



Universidad
Nacional
de Córdoba

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS TÉCNICAS INSAR
PERSISTENT SCATTERERS INTERFEROMETRY (PSI) Y
SMALL BASELINE SUBSET (SBAS) APLICADAS EN LA
MEDICIÓN DE LA DEFORMACIONES DEL COMPLEJO
VOLCÁNICO CORDÓN CAULLE (40.5°S) - ANDES DEL SUR

Autor: RAYNER DE RUYT M.

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 académico de

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

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

Mayo, 2013

©IG - CONAE/UNC 2013

© FaMAF - UNC 2013

Director: Dr. Pablo Euillades
Instituto CEDIAC - Facultad de Ingeniería UNC - Mendoza - Argentina.

Co-Director: Dr. Leonardo Euillades
Instituto CEDIAC - Facultad de Ingeniería UNC - Mendoza - Argentina.

Agradecimientos

Quisiera agradecer en primera instancia a Dios, por darme la posibilidad de haber tenido esta maravillosa aventura fuera de mi país, y por la gran cantidad de personas que conocí y que fueron parte de este proceso, las que me ayudaron no sólo a aprender herramientas de carácter técnico, sino también aquellas cosas elementales que quedan marcadas profundamente y que provocan una y otra vez el encanto de sentirse vivo y la pasión por emprender nuevos caminos.

En este sentido, la primera persona que sin duda alguna estuvo desde el principio hasta el fin en esto fue mi esposa Sage, a la cual agradezco de todo corazón por todo el amor, fuerza, paciencia y todas las manifestaciones de apoyo incondicional, tanto cuando estuvimos físicamente juntos y sobre todo cuando vivimos esta experiencia a distancia. Adicionalmente agradezco de forma muy especial, a las familias Nachar Muñoz y De Ruyt Muñoz, que siempre me brindaron un gran apoyo e hicieron extensivas sus manifestaciones de afecto en y desde Chile.

En segundo lugar, me gustaría agradecer a la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y al Instituto Mario Gulich, por darme la posibilidad de poder cursar la maestría, y por todo lo vivido y aprendido en sus aulas. Profesores, administrativos, y personal externo siempre estuvieron ahí con gran disposición para compartir y darme cualquier tipo de apoyo. En este sentido, quisiera agradecer especialmente al director del instituto Sr. Gabriel Platzeck y al director de la maestría Sr. Marcelo Scavuzzo por toda la orientación y ayuda brindada.

Agradezco profundamente también a los directores de esta tesis, Pablo y Leonardo Euillades por su gran apoyo y disposición para que este trabajo pudiera concretarse, a pesar de todos los impedimentos metodológicos y técnicos que existieron, los cuales sin duda se transformaron en una motivación adicional, no sólo para continuar desarrollando este trabajo de investigación, sino también para seguir su estudio con mayor profundidad.

A mis compañeros, con los cuales compartí estos dos años de formación y de los cuales me llevo un gran recuerdo por todas las experiencias que pasamos juntos: Paola, Romina, Juan José, Mirko y Nicolás; muchas gracias por todo.

Finalmente, quiero que quede plasmado mi profundo agradecimiento a mi querido abuelo Julio De Ruyt que antes de finalizar este proceso falleció, dejando una huella imborrable en mi persona y dentro de tantas cosas, el eterno recuerdo de la recepción habitual: siempre con una sonrisa, el abrazo apretado y el ofrecimiento casi instantáneamente del café para conversar de la vida. Desde luego, las palabras y el consejo preciso vinieron siempre después...

Este trabajo tiene como objetivo general, comparar la serie temporal de deformaciones corticales obtenidas por los algoritmos Persistent Scatterer Interferometry (PSI) y Small Baseline Subset (SBAS), que se presentaron entre los años 2000 y 2009 en el Cordón Volcánico Puyehue - Cordón Caulle (CVPCC)¹, el cual a mediados del año 2011 hasta principios del 2012, registró una gran e intensa actividad eruptiva. Cabe señalar, que estudios precedentes han logrado determinar la existencia de deformaciones en este complejo volcánico ya desde el año 1996, en un marco general de bajos valores de coherencia, debido a la decorrelación temporal característica que se produce en la zona en la cual se encuentra localizado.

En términos metodológicos, se ocuparon 48 imágenes correspondientes a la plataforma ERS-2, las cuales fueron en un principio focalizadas por el software de Euillades et al. (2011) y procesadas por el software Stanford Method for Persistent Scatterers / Multi-Temporal InSAR (STaMPS/MTI), desarrollado por Universidad Tecnológica Delft (TUDelft).

Los procesamientos realizados tanto con PSI y SBAS, no lograron resultados consistentes, debido a que no pudieron soslayar la decorrelación temporal propia de la zona en donde se encuentra el CVPCC. Esto se debió fundamentalmente por dos motivos: El primero, a las características específicas de los datos del sensor ocupado (como por ejemplo la longitud de onda, repetición de ciclos, etc.); y por otro lado, a las limitadas capacidades de los algoritmos de procesamiento de series temporales, para determinar resultados consistentes en presencia de este tipo de decorrelación.

En este contexto general, ambos algoritmos coinciden en la detección al menos parcialmente, de un proceso de inflación que se desarrolla fundamentalmente en el centro del cordón volcánico. En términos comparativos, los resultados de ambos procedimientos presentan diferencias tanto en los intervalos de tiempo y el número de celdas seleccionadas con fase estable. Específicamente, debido a la baja cantidad tanto de celdas e interferogramas seleccionados para ambos procesamientos, no fue posible una comparación de carácter cuantitativo de los valores específicos de las series temporales correspondientes.

Palabras Claves: Series temporales interferométricas, Persistent Scatterer Interferometry (PSI), Small Baseline Subset (SBAS), Cordón Volcánico Puyehue - Cordón Caulle (CVPCC).

¹Localizado en la Región de los Ríos, Chile

Abstract

This work aims, is to compare the time series of crustal deformations obtained by the algorithms Persistent scatterer interferometry (PSI) and Small Baseline Subset (SBAS), presented between 2000 and 2009 in the Cordón Caulle volcanic complex (CVPCC)², which in mid-2011 to early 2012, recorded a large and intense eruptive activity. It should be noted, that previous studies have determined the existence of this volcanic complex deformations since 1996, in a general frame of low coherence values due to temporal decorrelation own that produces in the area in which is located.

In methodological terms, worked with 48 images corresponding to the platform ERS-2, which were initially processed by Euillades et al. (2011) software, and later in the times series for Stanford Method for Persistent Scatterers / Multi-Temporal InSAR (STaMPS/MTI) software, realized for TUDelft.

The processes performed with PSI and SBAS, don't obtain consistent results because they could not evade the temporal decorrelation characteristic of the area where is CVPCC. This was mainly for two reasons: First, the specific characteristics of the sensor data (such as the wavelength, repeating cycles, etc.); and on the other hand, the capacity limited of algorithms time series processing to determine consistent results in presence of this type of decorrelation.

In this context, both algorithms obtain to detect, at least partially, an inflation process mainly in the volcanic complex center. In comparative terms, the results of both procedures differ in time intervals and the selected cells number with stable phase. Specifically, due to the low amount of cells and interferograms processing, was not possible a quantitative comparison of the specific values corresponding to the time series.

Key words: Interferometry times series, Persistent Scatterer Interferometry (PSI), Small Baseline Subset (SBAS), Cordón Caulle Volcanic Complex (CVPCC).

²Located in Región de los Ríos, Chile

Tabla de Contenidos

| | |
|---|-----------|
| Agradecimientos | II |
| 1. Introducción | 2 |
| 1.1. Introducción | 2 |
| 1.2. Problemática | 4 |
| 1.3. Objetivos | 6 |
| 1.3.1. Objetivo General | 6 |
| 1.3.2. Objetivos Específicos | 6 |
| 1.4. Área de Estudio | 7 |
| 2. Marco Teórico | 9 |
| 2.1. Imágenes de RADAR | 9 |
| 2.1.1. Radar de Apertura Real (RAR) | 11 |
| 2.1.2. Radar de Apertura Sintética (SAR) | 13 |
| 2.1.3. Plataforma ERS | 18 |
| 2.2. Interferometría SAR (InSAR) | 19 |
| 2.3. Interferometría Diferencial (DinSAR) | 22 |
| 2.3.1. Método de doble pasada | 24 |
| 2.3.2. Método de triple pasada | 25 |
| 2.3.3. Contribución de otros fenómenos en los valores de diferencia de fase | 26 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.3.4. | Coherencia | 27 |
| 2.4. | Limitaciones de la InSAR convencional | 28 |
| 2.4.1. | Decorrelación espacial | 28 |
| 2.4.2. | Decorrelación por rotación de dispersores | 29 |
| 2.4.3. | Decorrelación temporal | 30 |
| 2.5. | Series Temporales Interferométricas | 31 |
| 2.5.1. | Persistent Scatterer Interferometry (PSI) | 31 |
| 2.5.2. | Small Baseline Subset (SBAS) | 32 |
| 2.6. | Etapas de Unwrapping | 34 |
| 2.6.1. | Algoritmos de Unwrapping en 3D | 35 |
| 3. | Metodología | 38 |
| 3.1. | Procesamiento Series de tiempo | 38 |
| 3.1.1. | Focalización de los datos Raw | 39 |
| 3.1.2. | Formación de interferogramas Diferenciales | 39 |
| 3.1.3. | Medición de la series temporales de deformación | 41 |
| 4. | Focalización de las Imágenes SAR y Formación de Interferogramas | 46 |
| 4.1. | Focalización de imágenes SAR. | 46 |
| 4.2. | Formación de interferogramas diferenciales. | 49 |
| 4.2.1. | Formación de Interferogramas diferenciales - PSI | 52 |
| 4.2.2. | Formación de interferogramas diferenciales - SBAS | 55 |
| 5. | Selección de Interferogramas diferenciales para el procesamiento de series temporales. | 58 |
| 5.1. | Análisis de interferogramas en base a la coherencia. | 58 |
| 5.1.1. | Casos - PSI. | 59 |
| 5.1.2. | Casos - SBAS | 63 |
| 5.1.3. | Selección de interferogramas diferenciales para PSI. | 66 |
| 5.1.4. | Selección de interferogramas diferenciales para SBAS. | 68 |
| 6. | Series Temporales Interferométricas PSI - SBAS | 73 |
| 6.1. | Persistent Scatterer Interferometry (PSI) | 73 |

| | |
|--|------------|
| 6.2. Small Baseline Subset (SBAS) | 79 |
| 6.2.1. SubConjunto N°1 | 79 |
| 6.2.2. SubConjunto N°2 | 84 |
| 6.2.3. SubConjunto N°3 | 88 |
| 7. Discusión | 89 |
| 8. Conclusiones | 91 |
| 8.1. Aporte | 93 |
| 8.2. Proyección | 93 |
| A. Parámetros correspondientes al procesamiento de series temporales - STaMPS/MTI | 97 |
| A.1. Valores por defecto de STaMPS/MTI en las distintas etapas del procesamiento. | 97 |
| A.2. Descripción de los parámetros de STaMPS/MTI. | 98 |
| A.2.1. Estimación de ruido de fase. | 98 |
| A.2.2. Selección de Persistent Scatterer (PS) y Fase Filtrada con baja Decorrelación (SDFP). | 98 |
| A.2.3. Eliminación PS y SDFP. | 98 |
| A.2.4. Corrección de fase. | 98 |
| A.2.5. Fase de unwrapping. | 99 |
| A.2.6. Estimación del error Ángulo de vista espacialmente correlacionado (SCLA). | 99 |
| B. Estimación de diferentes componentes de fase para cada uno de casos. | 100 |
| B.1. Caso - Persistent Scatterer Interferometry (PSI) | 100 |
| B.2. Caso Small Baseline Subset (SBAS) | 102 |
| B.2.1. Subconjunto - 1 SBAS | 102 |
| B.2.2. Subconjunto - 2 SBAS | 104 |

Acrónimos

| | | |
|---------------|---|-------|
| AOE | Errores Orbitales y el Atmosférico de la imagen maestra | XVIII |
| ASI | Agenzia Spaziale Italiana | 2 |
| CSA | Chirp Scaling | 17 |
| CLAP | Combinación de paso bajo y fase adaptativa | 98 |
| CONAE | Comisión Nacional de Actividades Espaciales | II |
| CVPCC | Cordón Volcánico Puyehue - Cordón Caulle | IV |
| DEM | Modelo de Elevación Digital | XVI |
| DEOS | Delft Institute for Earth-oriented Space Research | 24 |
| DinSAR | Interferometría Diferencial | VI |
| DLR | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - German Aerospace Center | 2 |
| DORIS | Delft Object-oriented Radar Interferometric Software | 3 |
| ERS | European Remote Sensing Satellite | XX |
| EROS | Earth Resources Observation Systems | 48 |
| ESA | Agencia Espacial Europea | 18 |
| FFA | Aproximación de Campo Lejano | XV |
| FFP | Fracción de Falsos Positivos | 43 |
| FFT | Trasformada Rápida de Fourier | 28 |
| GPS | Global Positioning System | |
| IFFT | Trasformada Rápida Inversa de Fourier | 39 |
| InSAR | Interferometría SAR | VI |
| JPL | Jet Propulsion Laboratory | 3 |
| LOS | Linea de Vista | XI |
| MAP | Máxima Probabilidad a Posteriori | 37 |

TABLA DE CONTENIDOS

| | | |
|--------------------|--|------|
| NASA | National Aeronautics and Space Administration | 2 |
| ODR | Orbital Data Records | |
| OVDAS | Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur | 7 |
| PDF | Función de Densidad de Probabilidad | 37 |
| PRF | Frecuencia de Repetición de Pulso | 13 |
| PS | Persistent Scatterer | VIII |
| PSI | Persistent Scatterer Interferometry | IV |
| RDA | Range Doppler | 17 |
| ROIPAC | Repeat Orbit Interferometry PACkage | 3 |
| SAR | Radar de Apertura Sintética | VI |
| SBAS | Small Baseline Subset | IV |
| SCLA | Ángulo de vista espacialmente correlacionado | VIII |
| SDFP | Fase Filtrada con baja Decorrelación | VIII |
| SERNAGEOMIN | Servicio Nacional de Geología y Minería | |
| SLAR | Radares de Vista Lateral Aerotransportados | XIV |
| SLC | Single Look Complex | XIII |
| SNR | Cociente-Señal Ruido | 13 |
| SRTM | Shuttle Radar Topography | XVI |
| STaMPS/MTI | Stanford Method for Persistent Scatterers / Multi-Temporal InSAR | IV |
| SVD | Valor de Descomposición Singular | 32 |
| SVZ | Southern Volcanic Zone | 4 |
| RADAR | Radio Detection and Ranging | 9 |
| RAR | Radar de Apertura Real | VI |
| USGS | U.S.Geological Survey | 48 |
| UTC | Universal Time Cordinated | 46 |
| TUDelft | Universidad Tecnológica Delft | IV |
| WGS-84 | World Geodetic System 1984 | 41 |

Lista de símbolos

| | | |
|----------------|---|----|
| B | Longitud de la línea de base entre dos plataformas. Ecuación (2.18)..... | 19 |
| B_c | Línea de base crítica entre dos plataformas SAR. Ecuación (2.42) | 29 |
| B_{Dop} | Ancho de banda Doppler. Ecuación (2.12)..... | 16 |
| β_r | Ancho del haz en rango. Ecuación (2.3)..... | 11 |
| β_α | Ancho del haz en acimut. Ecuación (2.3)..... | 11 |
| B_{ref} | Ancho de banda referencial en rango. Ecuación (2.9)..... | 14 |
| c | Velocidad de la luz. Ecuación (2.6)..... | 13 |
| D_A | Índice de dispersión de amplitud. Ecuación (3.7)..... | 41 |
| D_α | Ancho de antena. Ecuación (2.1) | 11 |
| $D_{\Delta A}$ | Índice de dispersión de amplitud - caso SBAS. Ecuación (3.7)..... | 41 |
| $\Delta\rho$ | Diferencia en rango debido a la posición de dos plataformas. Ecuación (2.16)..... | 19 |
| Δ_t | Tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción. Ecuación (2.10) | 15 |
| $D_{espacial}$ | Decorrelación espacial entre dos plataformas SAR. Ecuación (2.41) | 29 |
| D_p | Desplazamiento en la Línea de Vista (LOS) de un punto P . Ecuación (2.26) | 22 |
| f_D | Frecuencia Doppler. Ecuación (2.11) | 16 |
| $f(t)$ | Frecuencia del <i>Chirp</i> . Ecuación (2.7) | 14 |
| f_0 | Frecuencia de la onda portadora. Ecuación (2.5) | 13 |
| γ_{coh} | Coherencia o Correlación entre dos señales SAR. Ecuación (2.39)..... | 27 |
| $g(t)$ | Onda moduladora. Ecuación (2.5) | 13 |

TABLA DE CONTENIDOS

| | | |
|---------------------------|--|----|
| H_{sat} | Altura de la plataforma satelital. Ecuación (2.23) | 21 |
| $j\psi$ | Valor de fase o parte imaginaria de y . Ecuación (2.13) | 17 |
| L_{α} | Largo de antena. Ecuación (2.1) | 11 |
| λ | Longitud de onda. Ecuación (2.1) | 11 |
| μ_A | Promedio de los valores de amplitud en la dimensión temporal. Ecuación (3.7) | 41 |
| P | Posición de la plataforma satelital. Ecuación (2.32) | 24 |
| ϕ | Diferencia de fase entre las imágenes y_1 y y_2 . Ecuación (2.15) | 19 |
| $\phi_{def,x,i}$ | Diferencia de Fase debido al movimiento de la celda en la LOS. Ecuación (3.8) | 41 |
| ϕ_{α} | Ángulo entre el centro de la dirección y el límite del haz, en acimut. Ecuación (2.1) | 11 |
| $\phi_{n,x,i}$ | Ruido de fase relacionado con efectos termales, corrección y posición de centro de fase. Ecuación (3.8) | 41 |
| $\Delta\phi_{orb,x,i}$ | Fase residual producto de la imprecisión de las órbitas. Ecuación (3.8) | 41 |
| ϕ_r | Ángulo entre el centro de la dirección y el límite externo del haz enviado en rango. Ecuación (2.1) | 11 |
| ϕ_s | Ángulo Squint. Ecuación (2.11) | 16 |
| $\Delta\phi_{\theta,x,i}$ | Fase residual debido al error del ángulo de vista. Ecuación (3.8) | 41 |
| ϕ^w | Fase enrollada de un interferograma. Ecuación (2.46) | 34 |
| P | Patrón de antena. Ecuación (2.1) | 11 |
| ψ | Fase de una imagen y . Ecuación (2.15) | 19 |
| $\Psi_{int,x,i}$ | Valor de fase de una celda x del interferograma aplanado y topográficamente corregido i . Ecuación (3.8) | 41 |
| r | Vector de deformación en <i>Slant range</i> . Ecuación (2.27) | 22 |
| R_{ac} | Resolución en acimut. Ecuación (2.4) | 12 |
| ρ | Distancia en rango. Ecuación (2.4) | 12 |
| $\rho_{Doppler}$ | Diferencia del Centroide Doppler - Índice de correlación. Ecuación (3.1) | 39 |
| $\rho_{espacial}$ | Línea de base perpendicular - Índice de correlación. Ecuación (3.1) | 39 |
| $D_{rotacion}$ | Decorrelación por rotación de dispersores. Ecuación (2.43) | 30 |
| $\rho_{temporal}$ | Línea de base temporal - Índice de correlación. Ecuación (3.1) | 39 |
| $D_{temporal}$ | Decorrelación temporal en un sistema SAR. Ecuación (2.44) | 30 |
| ρ_{total} | Índice de correlación para la selección de la imagen maestra. Ecuación (3.1) | 39 |
| R_r | Resolución en Rango. Ecuación (2.6) | 13 |

TABLA DE CONTENIDOS

| | | |
|------------------|---|----|
| R_{sr} | Resolución en <i>Slant Range</i> . Ecuación (2.9)..... | 14 |
| $r(t)$ | Función del eco recibido en rango. Ecuación (2.10)..... | 15 |
| rt | Radio de la tierra - Eje semimayor (asumida como esférica). Ecuación (2.35)..... | 25 |
| S_c | Crecimiento líneal del pulso. Ecuación (2.7)..... | 14 |
| σ | Sección transversal del radar. Ecuación (2.44)..... | 30 |
| $\phi_{atm,x,i}$ | Diferencia de Fase producto del retardo atmosférico en las pasadas. Ecuación (3.8)... | 41 |
| σ_A | Desviación estándar de la amplitud en la dimensión temporal. Ecuación (3.7)..... | 41 |
| $sinc$ | Función “Sinc”, o seno cardinal normalizada. Ecuación (2.1)..... | 11 |
| $s(t)$ | Pulso emitido. Ecuación (2.5)..... | 13 |
| t | Tiempo. Ecuación (2.7)..... | 14 |
| τ | Largo de pulso, en microsegundos. Ecuación (2.6)..... | 13 |
| θ | Ángulo de vista. Ecuación (2.11)..... | 16 |
| θ_{inc} | Ángulo de incidencia. Ecuación (2.13)..... | 17 |
| θ_{loc} | Ángulo de incidencia local. Ecuación (2.13)..... | 17 |
| φ | Ángulo que se genera por la rotación de un dispersor. Ecuación (2.43)..... | 30 |
| φ_s | Eco de un punto dispersor con un cambio de fase. Ecuación (2.10)..... | 15 |
| ϑ | Fase esperada de un cuerpo de referencia. Ecuación (2.22)..... | 21 |
| v | Velocidad de la plataforma satelital. Ecuación (2.11)..... | 16 |
| W | Operador de enrollado de fase. Ecuación (2.46)..... | 34 |
| y | Valor complejo en un archivo Single Look Complex (SLC). Ecuación (2.13)..... | 17 |
| y_2^* | Complejo conjugado de la imagen esclava. Ecuación (2.14)..... | 19 |
| y_1 | Imagen maestra. Ecuación (2.14)..... | 19 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| 1.1. Imagen del satélite Landsat-7 (combinación de bandas 3-4-5) con fecha 28/06/2011, que muestra la erupción desarrollada por el Cordón Caulle. | 5 |
| 1.2. Área de estudio - Complejo volcánico Cordón Caulle. Imagen del satélite Landsat-7 con una combinación de bandas 1-2-3 (fecha: 2002/02/01). | 7 |
| 2.1. Clasificación general de Radares desarrollada por Wolff (2012). | 9 |
| 2.2. Espectro electromagnético e interacción de los tipos de frecuencias con los diferentes componentes de la atmósfera, según Richards (2009). | 10 |
| 2.3. Componentes y parámetros generales de un sistema Radares de Vista Lateral Aerotransportados (SLAR), según Richards (2009). | 11 |
| 2.4. A) Geometría conformada por un sistema SLAR con una superficie de referencia. B) Patrón de antena normalizado en dirección de acimut, $\text{sinc}^2\left(\frac{D\alpha}{\lambda}\right)$, con un ϕ_r constante. | 12 |
| 2.5. Comparación en la captación de pulsos en la trayectoria de la Plataforma (acimut) de un sistema Radar de Apertura Real (RAR) y un sistema Radar de Apertura Sintética (SAR) . . . | 14 |
| 2.6. Cambios en la frecuencia recibida (efecto Doppler) por un sistema SAR, causado por la inclusión de un mismo objeto en una serie de pulsos. | 15 |
| 2.7. A) Vista 3D del ángulo Squint ϕ_s y del ángulo de vista θ . El vector velocidad puede ser descompuesto en diferentes direcciones. B) Patrón de antena, con una dirección del Centroide Doppler. | 16 |
| 2.8. Geometría de captación y sistema de referencia. Las coordenadas en <i>Ground range</i> están referenciadas a un elipsoide. El ángulo de incidencia θ_{inc} , y el ángulo de incidencia local θ_{loc} , están definidos en base a una línea vertical que intersecta con el elipsoide definido y con el terreno respectivamente, (Ferretti, 2007). | 17 |

| | |
|--|----|
| 2.9. Geometría de doble pasada- Interferometría SAR (InSAR) | 20 |
| 2.10. Interferograma que presenta los valores de fase del cuerpo de referencia - Interferometría SAR (InSAR). | 21 |
| 2.11. Configuración interferométrica conformada por dos plataformas satelitales. Usando el rango ρ_1 y la altura H_{sat} de la plataforma es posible determinar la altura del punto P (Zebker et al., 1994b; Hanssen, 2001). | 21 |
| 2.12. A) Vector de deformación en base a la geometría conformada entre las plataformas B) Representación del vector deformación r bajo el supuesto de la Aproximación de Campo Lejano (FFA)(Hanssen, 2001). | 23 |
| 2.13. Geometría de dos pares interferométricos ocupados para medir desplazamientos en la LOS | 26 |
| 2.14. Dos ejemplos de artefactos atmosféricos. (Izquierda) Frente temporal en Pennsylvania, consistente en ondas que viajan de este a oeste con una longitud de cerca de 12 km en un interferograma realizado por dos imágenes ERS-1 adquirido en Enero de 1994. (Derecha) Tormenta en Landers California. Los patrones circulares irregulares tienen entre 5-10 km de ancho y representan sobre 3 franjas (84 mm) de perturbación atmosférica sobre el desierto de Mojave, en agosto de 1992 (Massonnet y Feigl, 1998). | 27 |
| 2.15. Decorrelación que se produce por la distancia entre ambas plataformas (Zebker y Villasenor, 1992). | 28 |
| 2.16. Rotación en un ángulo ϕ de un dispersor, desde una posición x a una nueva posición o que provoca un cambio de fase para cada centro dispersión (Zebker y Villasenor, 1992). | 29 |
| 2.17. Ejemplo en la definición de Persistent Scatterer (PS) para el caso de la deformación del Volcán Alcedo (Islas Galápagos - Ecuador) con imágenes ERS-2 de órbitas descendentes en (Hooper et al., 2007). | 32 |
| 2.18. Ejemplo de aplicación del algoritmo SBAS, para el caso del volcán Vesuvio (Nápoles -Italia), con órbitas ascendentes y descendentes tanto de ERS-1 y ERS-2, entre los años 1992-2002 (Lanari et al., 2007). | 33 |
| 2.19. Ejemplo de una red de sumatorias de diferencias de fase en ciclos, con una búsqueda en la dirección de las manillas del reloj, con residuos positivos y negativos (centro de celda representado por los círculos) para una matriz dada (Chen y Zebker, 2000). | 34 |
| 2.20. Fase desenrollada a lo largo de la transecta blanca mostrada en el interferograma: En el recuadro superior derecho se muestra la variación de la fase enrollada a lo largo de la transecta; en el recuadro inferior izquierdo, se muestra el gradiente de la fase enrollada, y finalmente en el inferior derecho, se muestra la fase desenrollada (Richards, 2009). | 35 |
| 2.21. Una superficie de discontinuidad de fase simple (área verde) intersectando con un conjunto de datos en 2D. La superficie es bordeada por un bucle residual (línea de color rojo). Donde la superficie intersecta el plano 2D resulta una línea de discontinuidad (línea verde oscura) que une dos residuos mostrados en azul derivados desde la intersección del bucle residual con el conjunto de datos (Hooper, 2006). | 36 |

| | |
|---|----|
| 2.22. Superficie de discontinuidad múltiple (verde). Los bucles rojos representan bucles residuales, el bucle de la derecha delimita el borde una superficie y el bucle de la izquierda separa la región de discontinuidad de fase 2π de la superficie desde la región de discontinuidad 4π (Hooper, 2006). | 36 |
| 4.1. Casos específicos de datos que no fueron focalizados satisfactoriamente por el algoritmo <i>Range Doppler</i> . Imágenes con un factor de Multilook en acimut de 5; y con un factor de Multilook en rango de 1 - Resolución 25 metros. | 47 |
| 4.2. Imagen en coordenadas SAR (órbita descendente) correspondiente al 12 de Noviembre del año 2000, la cual presenta una cobertura de nieves estacionales importante en el área superior del Cordón Caulle (valores de amplitud mas bajos observados en el centro de la imagen). Imagen con un factor de Multilook en acimut de 5; y con un factor de Multilook en rango de 1 - Resolución 25 metros | 49 |
| 4.3. Modelo de Elevación Digital (DEM), perteneciente a la misión Shuttle Radar Topography (SRTM) utilizado para la sustracción de la fase topográfica. | 52 |
| 4.4. Líneas de base para el procesamiento de Persistent Scatterer Interferometry (PSI). | 52 |
| 4.5. Interferogramas diferenciales entre el 16 de Noviembre del año 2000, y el 04 de Mayo del año 2006 (Fecha imagen maestra); con un factor de Multilook en acimut de 20; y con un factor de Multilook en rango de 4. | 54 |
| 4.6. Interferogramas diferenciales entre el 04 de Mayo del año 2006 (Fecha imagen maestra), y el 24 de diciembre del 2009; con un factor de Multilook en acimut de 20; y con un factor de Multilook en rango de 4. | 54 |
| 4.7. Líneas de base perpendiculares entre las diferentes conexiones conformadas en el conjunto de imágenes, generadas por el método SBAS. | 55 |
| 4.8. Selección de 25 interferogramas generados por el método SBAS; con un factor de Multilook en acimut de 20; y con un factor de Multilook en rango de 4. | 56 |
| 5.1. Coberturas diferenciales de nieves estacionales en la zona alta del cordón Caulle. Imágenes Landsat con combinación de bandas 4-3-2, con las siguientes fechas en orden descendente: 01/02/2002, 20/02/2003 y 15/02/2004. | 59 |
| 5.2. Valores de coherencia de los interferogramas realizados entre el 16 de Noviembre del año 2000 y el 28 de Julio del año 2005; con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4. | 60 |
| 5.3. Valores de coherencia de los interferogramas realizados entre el 15 de Diciembre del año 2005 y el 24 de Diciembre del año 2009; con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4. | 60 |
| 5.4. Valores de coherencia del interferograma realizado entre la imagen maestra (20060504) y la imagen esclava del 20 de Diciembre del año 2007; con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4. | 61 |

| | |
|---|----|
| 5.5. Histograma de los Valores de coherencia del interferograma entre la imagen maestra y la imagen esclava del 20 de Diciembre del año 2007. | 61 |
| 5.6. Valores de coherencia del interferograma realizado entre la imagen maestra (20060504) y la imagen esclava del 15 de Diciembre del año 2005; con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4. | 62 |
| 5.7. Histograma de los Valores de coherencia del interferograma entre la imagen maestra y la imagen esclava del 15 de Diciembre del año 2005. | 62 |
| 5.8. Depósitos volcánicos recientes (1921 y 1960) con una alta coherencia - Imagen Landsat del 15 de Febrero del año 2004, combinación de bandas 7-5-3. | 63 |
| 5.9. Mediana y desviación estándar del conjunto de las imágenes de coherencia seleccionadas para el análisis de series temporales; con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4. | 63 |
| 5.10. Ejemplos de valores de coherencia de interferogramas realizados entre el 16 de Noviembre del año 2000 y el 28 de julio del 2005; con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4. | 64 |
| 5.11. Ejemplos de valores de coherencia de interferogramas realizados entre el 4 de Mayo del año 2006 y el 23 de Abril del 2009; con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4. | 64 |
| 5.12. Valores de coherencia del interferograma realizado entre la imagen del 8 de Julio del año 2006 y la imagen del 4 de Enero del año 2007; con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4. | 65 |
| 5.13. Histograma de los valores de coherencia del interferograma entre la imagen del 8 de Julio del año 2006 y la imagen del 4 de Enero del año 2007. | 65 |
| 5.14. Valores de coherencia del interferograma realizado entre la imagen del 10 de Abril del año 2003 y la imagen del 15 de Mayo del año 2003; con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4. | 66 |
| 5.15. Histograma de los Valores de coherencia del interferograma entre la imagen del 10 de Abril del año 2003 y la imagen del 15 de Mayo del año 2003. | 66 |
| 5.16. Líneas de base definitivas para el procesamiento de Persistent Scatterer Interferometry (PSI). | 67 |
| 5.17. Interferogramas diferenciales que se utilizarán para el análisis de PSI; con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4. | 68 |
| 5.18. Líneas de base perpendiculares del conjunto de interferogramas -Small Baseline Subset (SBAS). | 68 |
| 5.19. Líneas de base perpendiculares de los interferogramas correspondientes al subconjunto N°1 -Small Baseline Subset (SBAS). | 69 |
| 5.20. Interferogramas diferenciales correspondientes al subconjunto N°1 - Small Baseline Subset (SBAS); con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4. | 70 |

| | |
|--|----|
| 5.21. Líneas de base perpendiculares de los interferogramas correspondientes al subconjunto N°2 -Small Baseline Subset (SBAS). | 70 |
| 5.22. Interferogramas diferenciales correspondientes al subconjunto N°2 - Small Baseline Subset (SBAS); con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4. | 71 |
| 5.23. Líneas de base perpendiculares de los interferogramas correspondientes al subconjunto N°3 -Small Baseline Subset (SBAS). | 72 |
| 5.24. Interferogramas diferenciales correspondientes al subconjunto N°3 - Small Baseline Subset (SBAS); con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4. | 72 |
| 6.1. Valores de fase enrollados ($-\pi - \pi$) para Persistent Scatterer Interferometry (PSI), en coordenadas SAR. | 75 |
| 6.2. Interferogramas desenrollados, menos los errores asociados al SCLA, al Errores Orbitales y el Atmosférico de la imagen maestra (AOE) y las rampas de fase, en coordenadas SAR. . . . | 76 |
| 6.3. Velocidad promedio en la LOS entre el 29 de abril del año 2004 y el 23 de Abril de 2009 para Persistent Scatterer Interferometry (PSI), menos los errores asociados al SCLA y al AOE, en coordenadas geográficas. | 76 |
| 6.4. Valores de la serie temporal de deformación de la celda con coordenadas geográficas $-72,174$ Longitud O y $-40,526$ Latitud S. | 77 |
| 6.5. Valores de la serie temporal de deformación de la celda con coordenadas geográficas $-72,258$ Longitud O y $-40,437$ Latitud S. | 78 |
| 6.6. Valores de la serie temporal de deformación de la celda con coordenadas geográficas $-72,037$ Longitud O y $-40,590$ Latitud S. | 78 |
| 6.7. Valores de la serie temporal de deformación de la celda con coordenadas geográficas $-72,098$ Longitud O y $-40,480$ Latitud S. | 79 |
| 6.8. Valores de fase enrollados ($-\pi$ a π) para Small Baseline Subset (SBAS) - el Subconjunto N°1, en coordenadas SAR. | 81 |
| 6.9. Interferogramas desenrollados correspondientes al subconjunto N°1 SBAS, menos los errores asociados al SCLA, al AOE de la imagen maestra y las rampas de fase, en coordenadas SAR. | 82 |
| 6.10. Promedio de la velocidad en la LOS para el subconjunto N°1 SBAS, menos los errores asociados al SCLA y las rampas de fase, en coordenadas geográficas. | 82 |
| 6.11. Valores de la serie temporal de deformación de la celda con coordenadas geográficas $-72,218$ Longitud O y $-40,488$ Latitud S. | 83 |
| 6.12. Valores de la serie temporal de deformación de la celda con coordenadas geográficas $-72,052$ Longitud O y $-40,570$ Latitud S. | 83 |

| | |
|--|-----|
| 6.13. Valores de la serie temporal de deformación de la celda con coordenadas geográficas $-72,280$ Longitud O y $-40,446$ Latitud S. | 84 |
| 6.14. Valores de fase enrollados ($-\pi$ a π) - para el subconjunto N°2 - Small Baseline Subset (SBAS). | 85 |
| 6.15. Interferogramas desenrollados correspondientes al subconjunto N°2 SBAS, menos los errores asociados al SCLA, al AOE de la imagen maestra y las rampas de fase. | 86 |
| 6.16. Promedio de la velocidad en la LOS para el subconjunto N°2 SBAS, menos los errores asociados al SCLA y las rampas de fase. | 87 |
| 6.17. Valores de la serie temporal de la celda con coordenadas geográficas $-72,261$ Longitud O y $-40,432$ Latitud S. | 87 |
| 6.18. Valores de la serie temporal de la celda con coordenadas geográficas $72,253$ Longitud O y $-40,413$ Latitud S. | 88 |
| | |
| B.1. Estimación del error del ángulo de vista espacialmente correlacionado en radianes/metro - PSI. | 100 |
| B.2. Estimación de los Errores Orbitales y Atmosféricos de la imagen maestra - PSI. | 101 |
| B.3. Estimación de las rampas de fase para cada interferograma - PSI. | 101 |
| B.4. Residuales entre los valores de fase desenrollados de los interferogramas y los valores del modelo de imagen maestra única- SBAS-1. | 102 |
| B.5. Estimación del error del ángulo de vista espacialmente correlacionado - radianes/metro - SBAS-1. | 102 |
| B.6. Estimación de los Errores Orbitales y Atmosféricos de la imagen maestra - SBAS-1. | 103 |
| B.7. Estimación de las rampas de fase para cada interferograma - SBAS-1. | 103 |
| B.8. Residuales entre los valores de fase desenrollados de los interferogramas y los valores del modelo de imagen maestra única- SBAS-2. | 104 |
| B.9. Estimación del error del ángulo de vista espacialmente correlacionado en radianes/metro - SBAS-2. | 104 |
| B.10. Estimación de los Errores Orbitales y Atmosféricos de la imagen maestra - SBAS-2. | 105 |
| B.11. Estimación de las rampas de fase para cada interferograma - caso SBAS-2. | 105 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| 2.1. Especificaciones Técnicas de la plataforma European Remote Sensing Satellite (ERS)-2. | 18 |
| 4.1. Conjunto de datos SAR, con valores de Centroide Doppler, procesados con el algoritmo Range Doppler. | 46 |
| 4.2. Conjunto de datos SAR, con los respectivos valores de frecuencia del Centroide Doppler, focalizados por el algoritmo <i>Omega k</i> | 48 |
| 4.3. Conjunto de datos SAR, seleccionados para la realización de interferogramas del área de estudio. | 49 |
| 4.4. Imágenes que presentaron el índice ρ más alto en el conjunto de datos ERS-2. | 50 |
| 4.5. Offset de líneas y píxeles en la etapa de precisión a nivel de 1 píxel. | 50 |
| 4.6. Offset correspondientes a 25 píxeles, en la etapa de precisión a nivel subpíxel. | 51 |
| 4.7. Líneas de base perpendiculares, correspondientes a cada interferograma desarrollado para PSI. | 53 |
| 4.8. Líneas de base perpendiculares, correspondientes a cada interferograma desarrollado para SBAS. | 57 |
| 5.1. Líneas de base perpendiculares de los interferogramas que finalmente se ocuparán para realizar Persistent Scatterer Interferometry (PSI). El ítem 4, corresponde a la imagen Maestra. | 67 |
| 5.2. Líneas de Base perpendiculares, Subconjunto N°1 -SBAS. | 69 |
| 5.3. Líneas de Base perpendiculares, Subconjunto N°2 -SBAS. | 71 |
| 5.4. Líneas de Base perpendiculares, Subconjunto N°3 - SBAS | 72 |

| | |
|--|----|
| 6.1. Parámetros iniciales de STaMPS/MTI para comenzar con el procesamiento de series temporales - Persistent Scatterer (PS). | 73 |
| 6.2. Parámetros usados para la selección de celdas desarrollado por STaMPS/MTI, en el caso de Persistent Scatterer Interferometry (PSI). | 74 |
| 6.3. Parámetros iniciales STaMPS/MTI para Small Baseline Subset (SBAS) - Subconjunto N°1. | 79 |
| 6.4. Parámetros usados por STaMPS/MTI para determinar la LOS - Small Baseline Subset (SBAS) - Subconjunto N°1. | 80 |
| 6.5. Parámetros iniciales de STaMPS/MTI para Small Baseline Subset (SBAS) - Subconjunto 2. | 84 |
| 6.6. Parámetros usados para Small Baseline Subset (SBAS) - Subconjunto 2. | 85 |
| 6.7. Parámetros iniciales de STaMPS/MTI para Small Baseline Subset (SBAS). | 88 |
| A.1. Valores por defecto de los diferentes parámetros en el procesamiento de series temporales del software STaMPS/MTI. | 97 |

1.1. Introducción

La Interferometría SAR (InSAR), es una de la principales aplicaciones de un sistema de Radar de Apertura Sintética (SAR), correspondiendo específicamente a una técnica que tiene la capacidad de medir los patrones de interferencia causados por la diferencia de fase entre dos o mas imágenes, pudiendo así determinar diferencias angulares y distancias relativas con un gran detalle (en una fracción de la longitud de onda), en la geometría conformada entre las plataformas y la superficie terrestre.

En términos prácticos, existen dos tipos de implementaciones para la realización de esta medición: el primer caso, corresponde cuando dos antenas se encuentran en una misma plataforma pudiendo captar desde diferentes ángulos un área de forma simultánea (también llamado proceso de "una pasada"), como fue por ejemplo, la misión SRTM¹; y el segundo tipo consiste en utilizar una antena individual, la que pasa por el área de interés en reiteradas ocasiones (denominado como proceso de "doble pasada"), con la restricción de emular lo máximo posible la geometría orbital de la toma anterior, como por ejemplo, la misión Tandem desarrollada por las plataformas ERS-1 y ERS-2².

En base al segundo tipo de funcionamiento nombrado, la denominada Interferometría Diferencial (DinSAR), es el único método por el cual se pueden detectar deformaciones superficiales, tanto de origen natural como antropogénico, en grandes escalas, tanto temporales y espaciales con una precisión que puede alcanzar un nivel subcentimétrico.

A pesar de la robustez que ha tenido este método en diferentes temáticas (investigaciones sísmicas, vulcanológicas, glaciológicas, etc.), esta técnica posee una serie de limitaciones asociadas a un conjunto de condicionantes que influyen de forma directa en la información que el sensor puede captar. Específicamente, estas limitaciones pueden deberse por ejemplo, a cambios en la reflectividad de la zona, fenómeno denominado como decorrelación temporal; o por la separación espacial entre las dos órbitas de adquisición, denominada decorrelación espacial.

¹Misión desarrollada en febrero del año 2000, por la National Aeronautics and Space Administration (NASA), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - German Aerospace Center (DLR) y la Agenzia Spaziale Italiana (ASI).

²Dicha operación "Tandem", estuvo en funcionamiento por un periodo de 9 meses en que ERS-2 seguía la misma órbita que ERS-1, con una diferencia temporal de 30 minutos. Ya en 1996, ERS-1 fue ocupado sólo para funciones de "backup" en modo de hibernación, y solo fue activado en ocasiones especiales, como por ejemplo el terremoto de Izmit en el año 1999 - Hanssen (2001).

Ante estas limitaciones, en los últimos años ha aumentado el interés de la comunidad científica en el desarrollo de procesos de mejoramiento de esta técnica, dentro de los cuales han tenido una gran importancia el desarrollo de metodologías como las denominadas "Times series" o "Series de tiempo" que se basan fundamentalmente en relacionar y analizar los datos pertenecientes a una secuencia de interferogramas. Estos métodos, han permitido realizar un seguimiento temporalmente más extenso de las deformaciones detectadas, e identificar con más exactitud los diversos tipos de factores que inciden en la calidad de los datos obtenidos.

Estos algoritmos de series temporales interferométricas pueden ser jerarquizados en términos generales, principalmente en dos grandes grupos (Shanker, 2010): el primero denominado Persistent Scatterer Interferometry (PSI) propuesto por Hooper et al. (2004), que tiene como principal objetivo determinar la mayor cantidad de dispersores espacialmente correlacionados, con una estrategia de procesamiento que se basa en la combinación de cada una de las imágenes que se posean con una imagen master; y por otra parte se encuentra la técnica Small Baseline Subset (SBAS) propuesta por Berardino et al. (2002), la cual está basada en realizar una serie de combinaciones de pares de imágenes SAR, que estén caracterizadas por tener la menor separación orbital posible, con el fin de generar una serie de interferogramas con una decorrelación espacial baja.

En esta tesis de maestría, se tiene como objetivo general comparar los resultados obtenidos con las técnicas PSI y SBAS, con las cuales se obtendrán la serie temporal de deformaciones que se han desarrollado entre los años 2000 y 2009 en el complejo volcánico Cordón Caulle, el cual a mediados del año 2011 hasta principios del 2012, registró una gran e intensa actividad eruptiva. Para llevar a cabo esto, se ocuparon datos del satélite ERS-2, (banda C) de órbita descendente, proporcionados por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE).

En términos metodológicos, para determinar las series temporales interferométricas por ambas técnicas (PSI y SBAS) se ocupará el software Stanford Method for Persistent Scatterers / Multi-Temporal InSAR (STaMPS/MTI), el cual ha sido mejorado por el Instituto de Observación Terrestre y Sistemas Espaciales de TUDelft. En las etapas de focalización y generación de interferogramas, STaMPS/MTI, articula el trabajo de 2 softwares realizados por diferentes desarrolladores: Específicamente, para la etapa de focalización de imágenes SAR, ocupa el software Repeat Orbit Interferometry PACKage (ROIPAC), realizado por el Jet Propulsion Laboratory (JPL), el cual está basado en el algoritmo *Range Doppler*; Por otro lado, en la etapa de generación de interferogramas diferenciales ocupa el software Delft Object-oriented Radar Interferometric Software (DORIS), realizado también por el Instituto de Observación Terrestre y Sistemas Espaciales TUDelft. Cabe destacar, que en la etapa de focalización se ocupará de forma alternativa el software propuesto por Euillades et al. (2011), que se basa en el algoritmo *Omega K*, el cual ha presentado mejores resultados en la focalización de imágenes que tengan un Centroid Doppler alto (Cumming et al., 2003).

1.2. Problemática

Dentro del grupo de temáticas en que se ha ocupado comúnmente el análisis de series temporales interferométricas, la vulcanología es una de las ramas en donde se han realizado una gran cantidad de investigaciones (Lanari et al., 2007; Hooper, 2008; Bonano et al., 2010; Shirzaei y Walter, 2010), debido al interés que genera poder captar en el tiempo, la serie de deformaciones que se producen en la estructura de un complejo volcánico en actividad.

En el trabajo de Fournier et al. (2010), se plantea que las deformaciones corticales en áreas asociadas a estos complejos entregan pistas claves acerca de la serie de procesos que se presentan tanto al interior como en el exterior de la superficie, pudiendo adicionalmente en la práctica, proporcionar una advertencia de una eminente erupción. Sin embargo, los mismos autores explican que los volcanes tienen diferentes comportamientos antes de dicho proceso; algunos muestran difusas advertencias antes de generar una erupción, o pueden presentar una serie de indicadores de una inminente explosión, la cual nunca alcanza a producirse. Específicamente, estos procesos de inflación y/o deflación, son interpretados principalmente como un cambio en el volumen de las cámaras magmáticas internas o también a la inyección de fluidos hidrotermales.

Para el caso del área de estudio, el CVPCC está ubicado en la denominada Southern Volcanic Zone (SVZ) según Pritchard y Simons (2004), teniendo actualmente mucho interés científico debido a que el 4 de junio del año 2011, comenzó un nuevo proceso eruptivo que se extendió por varios meses (específicamente hasta Enero del 2012), siendo en su momento catalogada por las autoridades chilenas como una zona de alto peligro, debido a que el área cercana al edificio volcánico presentó una alta susceptibilidad de ser afectada por la proyección de piroclastos balísticos (con un radio de 5 km en torno al cráter activo), el avance de lava activa, presencia de flujos piroclásticos de distribución restringida y lahares secundarios (ver figura 1.1).

Pritchard y Simons (2004), plantearon que la aplicación de interferometría diferencial en esta zona presenta varias dificultades, fundamentalmente relacionadas por los cambios significativos de las propiedades de dispersión generadas por la cobertura nival estacional y por las extensas masas boscosas que rodean a los complejos volcánicos, lo que determina la existencia de bajos valores de coherencia. Por ende, en base a la experiencia, los datos recolectados durante estaciones estivales (entre diciembre y mayo aproximadamente) presentan predominantemente valores de coherencia más altos y estables comparativamente. Por el contrario, la incorporación de datos cercanos a estos límites estacionales, con líneas de base mayores a 150 metros, presentan valores de correlación muy bajos, por lo tanto insuficientes para la realización de este tipo de técnica.

Es ante este tipo de limitaciones, que efectivamente las "Series de tiempo" interferométricas mediante una secuencia de interferogramas, buscan maximizar los valores de coherencia por medio de distintas estrategias de procesamiento. Los resultados obtenidos con el empleo de estos algoritmos, han permitido aislar de forma más eficiente la fase correspondiente al desplazamiento y sobre todo identificar con más exactitud los diversos tipos de factores limitantes que inciden en la calidad de la información entregada por el modelo final.

Específicamente, los únicos resultados publicados para el área de estudio fueron realizados por Fournier et al. (2010), y se basan en la aplicación de interferometría diferencial con distintos sensores en época estival, entre los años 1996 y 2008. Los resultados, poseen con un nivel de decorrelación considerable, y muestran que con imágenes ERS fue posible identificar un proceso de deflación con una tasa de 3 cm/año entre febrero de 1996 y febrero de 1999. Posteriormente, con datos del sensor ASAR (Plataforma ENVISAT) entre 2003 y 2005, se obtuvo una tasa media de inflación de 1 cm/año, aumentando la tasa a 3 cm/año entre el año 2004 y el 2006. Finalmente, con datos ALOS PALSAR, entre enero del 2007 y febrero 2008, se obtuvo un marcado incremento en tasa de inflación a 19,8 cm/año.

A partir de este contexto general, este trabajo de investigación pretende en primera instancia, sintetizar la serie de mediciones realizadas con distintos sensores por medio de la aplicación de dos modelos de series temporales interferométricas, evaluando los resultados obtenidos por los algoritmos PS y SBAS, considerando fundamentalmente estas limitaciones tan particulares asociadas a las condicionantes geográficas de la zona en donde se encuentra el complejo volcánico y las características específicas del sistema SAR ocupado, como son sus características orbitales, geométricas o radiométricas.

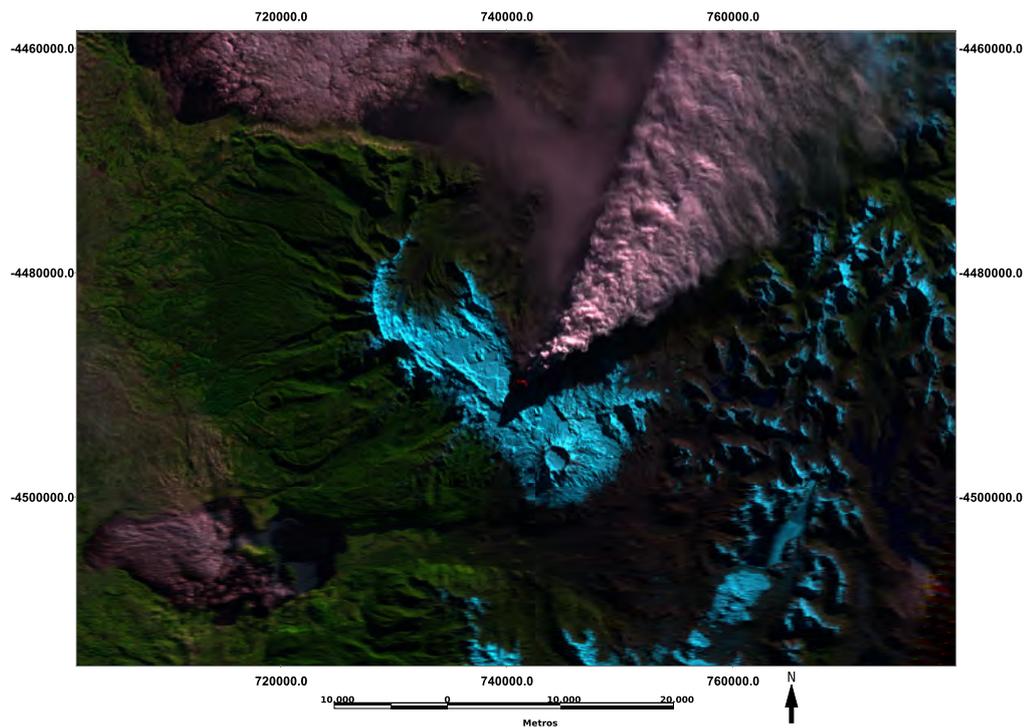


Figura 1.1: Imagen del satélite Landsat-7 (combinación de bandas 3-4-5) con fecha 28/06/2011, que muestra la erupción desarrollada por el Cordón Caulle.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Comparar los resultados obtenidos entre los métodos de series temporales Persistent Scatterer Interferometry (PSI) y Small Baseline Subset (SBAS) asociados a las deformaciones superficiales que presentó el Cordón Volcánico Puyehue - Cordón Caulle (CVPCC) entre los años 2000 y 2009.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar los interferogramas diferenciales mediante las estrategias de procedimiento de los algoritmos Persistent Scatterer (PS) y Small Baseline Subset (SBAS).
- Identificar y seleccionar los interferogramas diferenciales que presenten los valores de coherencia más altos y con una mayor correlación espacial.
- Estimar la serie temporal de deformación para cada uno de los algoritmos analizados.

1.4. Área de Estudio

El Cordón Volcánico Puyehue - Cordón Caulle (CVPCC), está formado por un grupo de centros eruptivos que se extienden aproximadamente por 15 km desde la cordillera Nevada hasta la caldera del estratovolcán Puyehue (ver figura 1.2). Específicamente, esta estructura está conectada por un sistema de fallas constituido entre el Pleistoceno y el Holoceno³, cuyas unidades más antiguas afloran a lo largo del escarpamiento de un graben o fosa tectónica (Lara et al., 2006).

Se encuentra localizado en los 40°31'22' de Latitud Sur y los 72°11'54" de Longitud Oeste (Coordenada referencial), con una altitud que varía entre 1500 y 1700 msnm, en una zona caracterizada por un clima templado lluvioso con influencia mediterránea. Específicamente en el área donde se localiza este complejo, se registran temperaturas bajo 0°C en los meses de Junio y Julio con un promedio de precipitaciones que alcanza los 400 mm mensuales. Las máximas temperaturas se registran entre Enero y Abril llegando a los 23°C (sitio web, Dirección meteorológica de Chile, 2012).

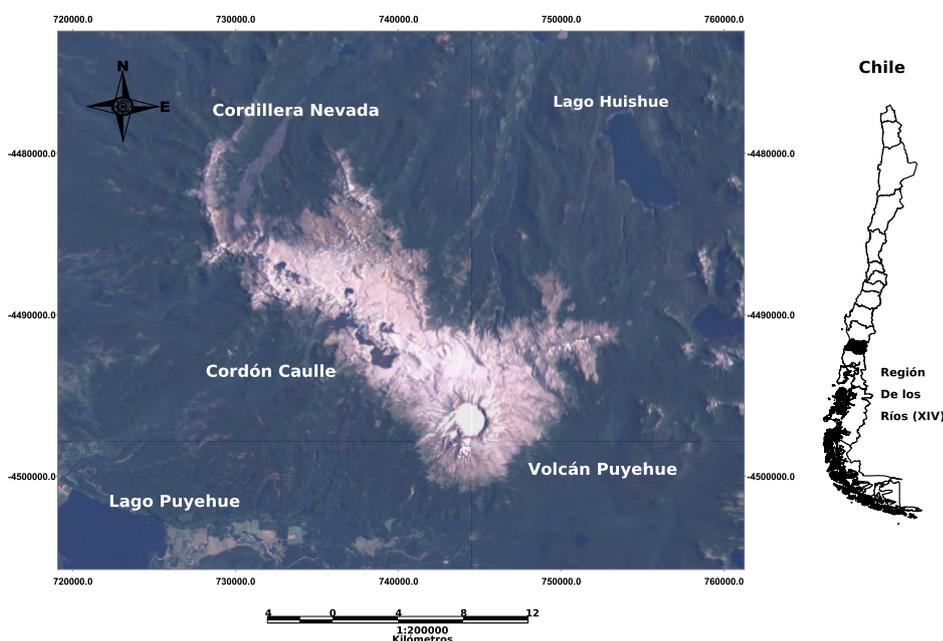


Figura 1.2: Área de estudio - Complejo volcánico Cordón Caulle. Imagen del satélite Landsat-7 con una combinación de bandas 1-2-3 (fecha: 2002/02/01).

Debido fundamentalmente a este dominio climático, existe una cobertura vegetal horizontal y verticalmente muy densa, dominada fundamentalmente en los sectores superiores por bosques de *Nothofagus pumilio* (denominada comúnmente Lengua), que tienen un promedio de 20 metros de alto. Por otra parte, los sectores distales del complejo volcánico están dominados por comunidades de *Nothofagus betuloides* (Coihue de Magallanes), con un promedio entre 15 y 20 metros, con un sotobosque⁴ muy desarrollado dominado fundamentalmente por asociaciones de Coihue-Rauli-Tepa (Donoso, 1981).

Según González-Ferran (citado en Fournier et al., 2010), en la zona se han presentado una cantidad considerable de erupciones con diferentes focos dentro de la estructura de este complejo en los siglos XIX y XX, siendo una de las más importantes la que sucedió posteriormente al gran terremoto de 1960. En este sentido, en lo que respecta a la actividad sísmica, el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS)-SERNAGEOMIN, informó en función de los registros que se tienen del área, que del 3 Junio del año 1959 y

³Épocas geológicas pertenecientes al periodo Cuaternario. Aproximadamente se hace referencia a unos 10.000 años a.C.

⁴Vegetación formada por especies herbáceas y arbustivas que crecen bajo los árboles de un bosque

2 de Junio del año 2000, se desarrollaron sobre 1450 sismos, los cuales se han localizado principalmente al sureste del complejo volcánico con una profundidad de entre 2 y 5 km. Adicionalmente, se logró detectar un incremento en la tasa sísmica (230 sismos /hora) con una profundidad variable entre 1 a 4 km, antes del gran proceso eruptivo que tuvo como fecha el 4 de Junio de 2011 ⁵.

⁵Publicado en el sitio <http://www.v-e-i.de/vhdl/project/puyehue.html>, correspondiente al Programa de vulcanismo global del Smithsonian Institution.

2.1. Imágenes de RADAR

Según Hanssen (2001), al concepto Radio Detection and Ranging (RADAR), se ha ocupado frecuentemente con dos acepciones diferentes, tanto para hacer alusión a un instrumento específico y como para un tipo de técnica de medición. De forma instrumental, un radar primario corresponde a un dispositivo que emite una señal electromagnética siendo capaz de detectar las reflexiones o ecos que provienen de los objetos que están en su línea de vista; y en cuanto a la técnica, ésta consiste en la medición del tiempo de viaje “ida-vuelta” de un pulso emitido para determinar la distancia a la cual se ubica el objeto o la superficie iluminada.

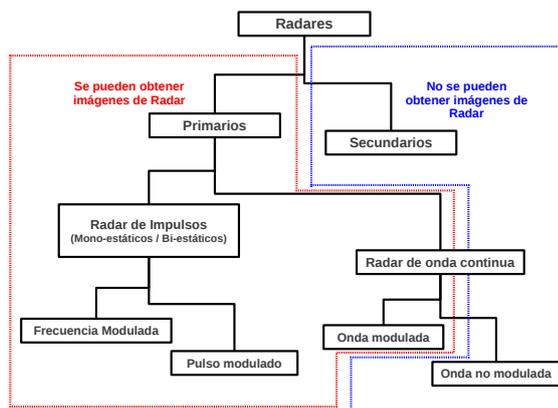


Figura 2.1: Clasificación general de Radares desarrollada por Wolff (2012).

Dentro de los radares que funcionan en base a impulsos, existen dos grandes clasificaciones: por una parte, están los radares Mono-estáticos, los cuales están constituidos sólo por una antena, que se utiliza tanto para la transmisión de la señal como para la recepción del eco respectivo; mientras que los radares denominados

biestáticos, ocupan dos antenas independientes, tanto para la transmisión del pulso como para la recepción del eco (Skolnik, 1962; citado en Hanssen, 2001).

Como se puede apreciar en la Figura 2.1, el grupo de radares que se han descrito hasta ahora, tienen la capacidad de generar una imagen a partir del eco que reciben de un área determinada. Según Cumming y Wong (2005), la potencialidad de la información generada por este tipo de sistema, está dada fundamentalmente por 3 características básicas:

- Un sistema de RADAR, es un sensor activo por lo que tiene su propia fuente de iluminación, por ende trabaja independientemente de la influencia solar (o sea funciona, tanto de día como de noche).
- El tipo de ondas electromagnéticas emitidas, pasan por medio de nubes y precipitaciones con un deterioro pequeño o nulo (como se puede apreciar en la Figura 2.2).
- La retrodispersión de la energía de los diferentes materiales, a diferencia de los sensores ópticos proporcionan una complementaria y a veces mejor discriminación de las características superficiales presentes.

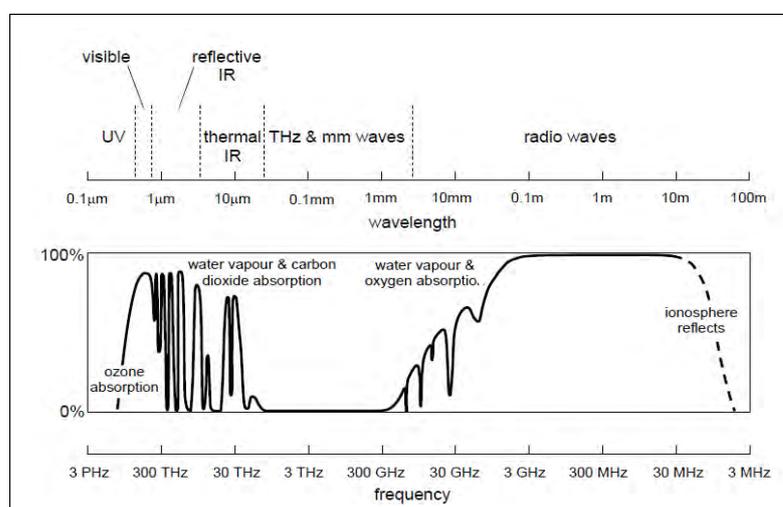


Figura 2.2: Espectro electromagnético e interacción de los tipos de frecuencias con los diferentes componentes de la atmósfera, según Richards (2009).

Cabe señalar, que mediante diferentes procedimientos de captación, este tipo de sistemas han podido mapear diferentes atributos de la superficie de la tierra, de planetas del sistema solar, como también de otros cuerpos celestes, como por ejemplo: la Misión Magallanes realizada el año 1990 a Venus, (Leberl et al., 1996) y el mapeo del asteroide PA8, realizado en el año 2007 por el Jet Propulsion Laboratory (JPL).

Un ejemplo de esta clase de sistemas son los Radares de Vista Lateral Aerotransportados (SLAR), los cuales en base a la trayectoria de la plataforma, envían una serie de pulsos a una superficie determinada, adquiriendo una mayor sensibilidad al eco recibido, evitando ambigüedades propias de la dispersión (Figura 2.3). Los primeros sistemas de este tipo, fueron radares incoherentes los que se caracterizan por no poder conservar la información de fase, tanto de la onda emitida como de la recibida en la coordenada de rango. Adicionalmente, la resolución en la dirección del vuelo (Acimut), fue obtenida usando una antena de un largo considerable a lo cual se le denominó funcionalmente como un sistema de Radar de Apertura Real (RAR). Este tipo de configuración, tiene como principal característica que la resolución en la dirección de Acimut es inversamente proporcional al tamaño físico de la antena.

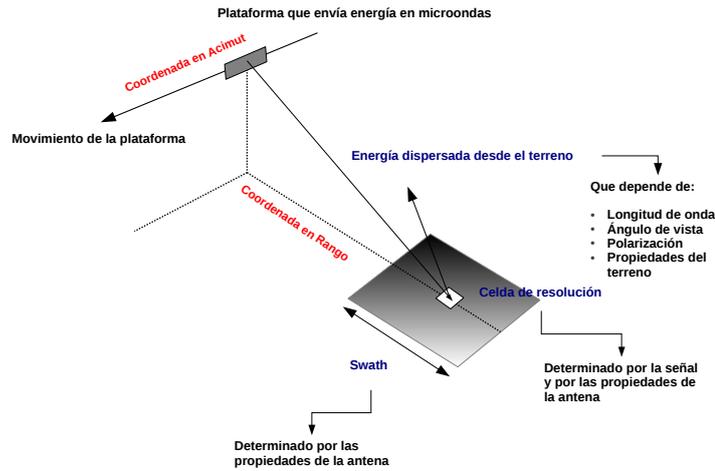


Figura 2.3: Componentes y parámetros generales de un sistema SLAR, según Richards (2009).

2.1.1. Radar de Apertura Real (RAR)

Según Cumming y Wong (2005), el haz del radar corresponde a la energía electromagnética que es transmitida en intervalos regulares proyectada en dirección a la superficie, siendo la intersección de estos dos elementos el área iluminada final. La posición y la forma que adquiere esta “huella” es determinada por el patrón de antena y la geometría que conforma el sensor con la superficie referencial (como se puede apreciar en la Figura 2.4, en A y B).

Específicamente, un patrón de antena (P) es producido por una antena con un largo (L_α), y un ancho (D_α) con una densidad de energía uniforme, y es representado por la siguiente expresión (Curlander y McDonough, 1991; Hanssen, 2001) :

$$P = \text{sinc}^2\left(\frac{D_\alpha}{\lambda} \phi_r\right) \text{sinc}^2\left(\frac{L_\alpha}{\lambda} \phi_\alpha\right) \quad (2.1)$$

Donde ϕ_r y ϕ_α son los ángulos que se forman entre el centro de las direcciones y el límite externo de dicho haz, tanto en rango como en acimut, y λ corresponde a la longitud de onda del sistema. Cabe destacar que comúnmente, en los sistemas de radar los patrones de energía son considerados constantes entre los ángulos de mitad de potencia.

Hanssen (2001), plantea que frecuentemente en un sistema de radar la mitad de potencia es alcanzada entre los ángulos $\left(\frac{D_\alpha}{\lambda}\right) \phi_r = -0.443$ y $\left(\frac{D_\alpha}{\lambda}\right) \phi_r = +0.443$, por lo que el ancho del haz tanto en rango (β_r) como en acimut (β_α) corresponde a:

$$\beta_r = 0,886 \left(\frac{\lambda}{D_\alpha}\right) \quad (2.2)$$

$$\beta_\alpha = 0,886 \left(\frac{\lambda}{L_\alpha}\right) \quad (2.3)$$

Resolución en Acimut - RAR

A partir de los parámetros mencionados, la resolución en dirección del acimut (R_{ac}) a una distancia en rango ρ para un sistema RAR, está dada por la siguiente expresión (Hanssen, 2001; Richards, 2009):

$$R_{ac} = \frac{\lambda}{L_{\alpha}} \rho \tag{2.4}$$

A partir de ella se deduce, que se puede conseguir una mayor resolución fundamentalmente en la medida de que se incremente el largo de la antena, y adicionalmente que la distancia en rango no sea de grandes magnitudes, o en otras palabras, que la plataforma no se encuentre a una gran altura.

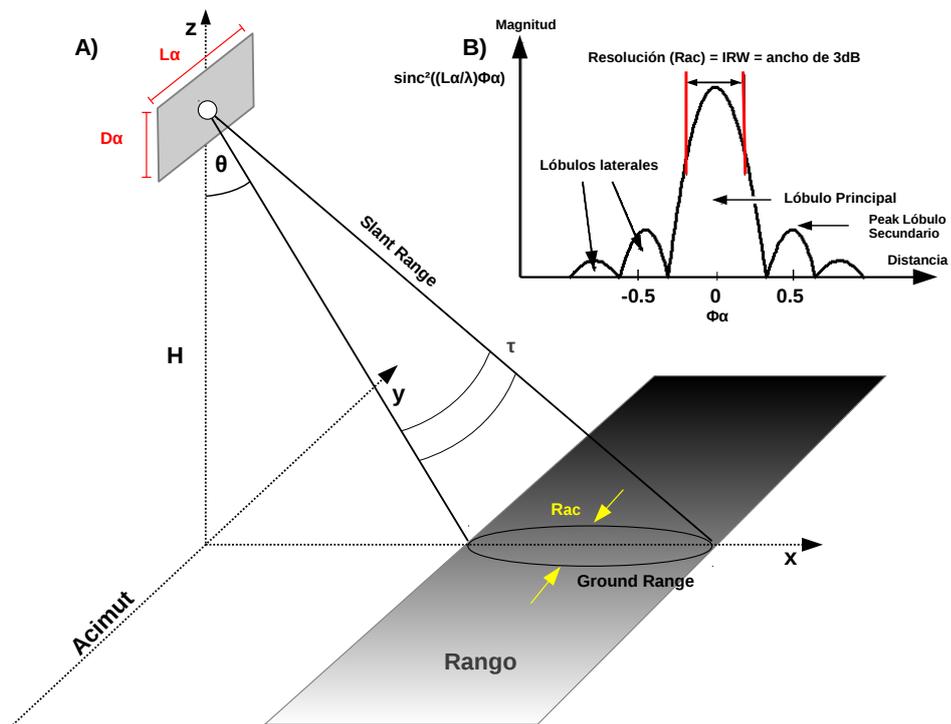


Figura 2.4: A) Geometría conformada por un sistema SLAR con una superficie de referencia. B) Patrón de antena normalizado en dirección de acimut, $\text{sinc}^2\left(\frac{D_{\alpha}}{\lambda}\right)$, con un ϕ_r constante.

Resolución Rango - RAR

En cuanto a la resolución en rango, el radar emite pulsos cortos y de una alta energía de microondas a la superficie de referencia registrando los ecos de cada uno de los pulsos que fueron enviados. La tasa de envío de éstos, es definida por la Frecuencia de Repetición de Pulso (PRF), y la onda que describen está dada por la siguiente expresión (Bamler y Hartl, 1998; Hanssen, 2001; Richards, 2009):

$$s(t) = G(t)e^{j2\pi f_0 t} \quad (2.5)$$

Donde $G(t)$ es la onda moduladora compleja y f_0 es la frecuencia de la onda portadora. A partir de esta señal enviada, la resolución en rango R_r , es decir, la menor distancia en que dos dispersores pueden ser distinguidos por una onda moduladora rectangular, depende del largo del pulso τ (en μs) y corresponde a (Ecuación 2.6):

$$R_r = \frac{c\tau}{2} \quad (2.6)$$

Donde c corresponde a la velocidad de luz. A partir de esto, se puede deducir que con una onda moduladora de un pulso corto, resultará una resolución en rango de gran detalle. Por otro lado, para obtener una imagen con un alto Cociente-Señal Ruido (SNR), se deben registrar altos *peak* de energía, ya que la energía del pulso recibido corresponde aproximadamente 10^{-11} órdenes de magnitud menor que la energía que fue emitida. Por ende, paralelamente pulsos cortos y altos *peak* de energía, no son totalmente compatibles ya que la cantidad de energía que el instrumento puede emitir en un tiempo finito es limitado, y como consecuencia de eso, se llega a un punto en el cual no se puede seguir reduciendo el largo de dicho pulso (Bamler y Hartl, 1998; Hanssen, 2001; Richards, 2009).

Por ejemplo, en base al planteamiento teórico mencionado y ocupando los parámetros de la plataforma ERS, en la dirección de acimut se tendría una resolución de aproximadamente 4.8 km. Por otro lado, en rango, con un $\tau = 37,1 \mu s$, una mínima distancia entre dos puntos distinguibles R_r sería \approx de 5.5 km en *Slant range* y de 14 km en *Ground range* (Hanssen, 2001). A partir de estos datos, este tipo de sistemas debido fundamentalmente a las restricciones operacionales en plataformas satelitales (como por ejemplo, la construcción de antenas de un gran largo), no alcanzan a tener una resolución apropiada en acimut, para captar información relevante de algún sitio de interés (Richards, 2009).

2.1.2. Radar de Apertura Sintética (SAR)

A partir de las limitaciones que presentan los sistemas RAR, se implementó un nuevo tipo de funcionamiento denominado Radar de Apertura Sintética (SAR), que por definición genera una antena artificial usando el movimiento de la plataforma (caso B de la Figura 2.5), combinando la información de muchos pulsos recibidos que retornan en un tiempo determinado. Este método mejora la resolución en acimut de la plataforma en cerca de tres órdenes de magnitud (Hanssen, 2001; Richards, 2009). Para llevar a cabo este proceso, la característica funcional más importante de un SAR es que corresponde a un sistema coherente, lo que significa que conserva la información de fase tanto de la señal enviada como del eco recibido (Hanssen, 2001). Esto no sólo determina la generación finalmente de una matriz ordenada con los ecos recibidos, sino que se transforma en el factor explicativo de la posibilidad de poder desarrollar una de las aplicaciones más características de este tipo de plataformas que corresponde específicamente a la interferometría.

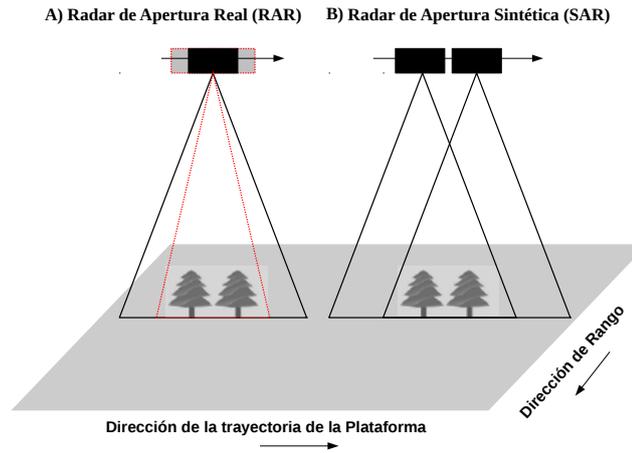


Figura 2.5: Comparación en la captación de pulsos en la trayectoria de la Plataforma (acimut) de un sistema Radar de Apertura Real (RAR) y un sistema Radar de Apertura Sintética (SAR)

Modulación en Rango

Como se mencionó anteriormente, la baja resolución que se puede alcanzar en la coordenada del rango un sistema RAR, se relaciona directamente con el largo limitado del pulso. Dicha problemática pudo ser mejorada significativamente con la aplicación de técnicas de compresión de pulso, lo cual específicamente consiste en realizar un proceso de modulación por intermedio de un “Chirp” de la onda portadora. Este proceso genera un mejoramiento de la potencia transmitida, mientras obtiene una resolución en rango similar a la de un pulso corto.

A partir de este planteamiento, en base a la ecuación 2.5, a la onda moduladora se le aplica un crecimiento lineal del pulso, obteniéndose finalmente una fase distinta, como se puede ver en la ecuación 2.7:

$$G(t) = e^{j\pi S_c t^2} \quad (2.7)$$

El ancho de banda referencial es definido como $B_{ref} = S_c \tau$, y determina que la resolución en *Slant Range* (R_{sr}) mejore de forma considerable (Curlander y McDonough, 1991; Hanssen, 2001). Ocupando nuevamente los parámetros de la plataforma ERS en la ecuación 2.8, se puede apreciar el valor específico de la resolución mencionada:

$$R_{sr} = \frac{c}{(2B_{ref})} \approx 9,6m \quad (2.8)$$

Este resultado en *Ground range* correspondería a 25 m. Finalmente, la resolución conseguida está dada por una compresión efectiva del largo de pulso en $\tau_c = 64ns$ (Hanssen, 2001).

Finalmente, el eco del radar puede ser descrito por la convolución¹ de la onda transmitida y la reflectividad de superficie, lo que correspondería a una línea en dirección de rango. Considerando el eco de un punto dispersor con un cambio de fase ϕ_s , el sensor recibe una réplica retrasada de la forma de onda transmitida (Bamler y Hartl, 1998; Hanssen, 2001; Richards, 2009):

¹Según Cumming y Wong (2005) una convolución corresponde a un operador matemático que transforma dos funciones f y G en una tercera función, que en cierto sentido representa la magnitud en la que se superponen f y una versión trasladada e invertida de G .

$$r(t) = G(t - \Delta t)e^{j2\pi f_0(t - \Delta t)} e^{j\phi_s} \quad (2.9)$$

Donde Δt es el tiempo de ida-vuelta entre la transmisión y la recepción.

Parámetros en dirección de Acimut

El ancho del haz de la antena en acimut, β_α (Ecuación 2.3) causa que un punto dispersor sea captado por un número consecutivo pulsos. Durante estos pulsos, la velocidad relativa de dicho dispersor con respecto al avance de la trayectoria de la plataforma del radar, causa un efecto Doppler² (Hanssen, 2001).

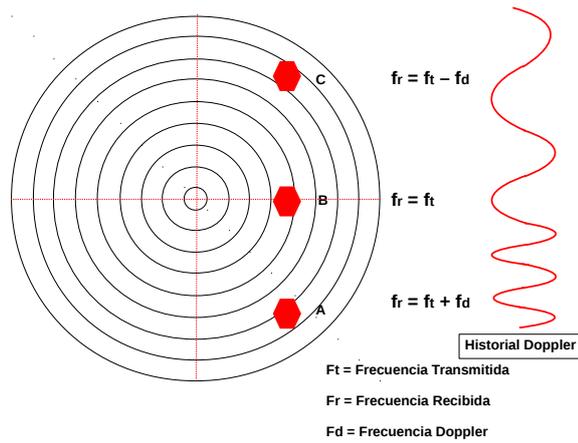


Figura 2.6: Cambios en la frecuencia recibida (efecto Doppler) por un sistema SAR, causado por la inclusión de un mismo objeto en una serie de pulsos.

En base a la Figura 2.6, la frecuencia central de un punto dispersor a través del haz es denominada Frecuencia Doppler F_D ; por otra parte se le denomina Cero-Doppler ($F_D = 0$) a la frecuencia que se encuentra perpendicularmente a la dirección de vuelo y como su nombre lo indica, su valor es igual a 0 (Hanssen, 2001; Richards, 2009).

Según Hanssen (2001), a pesar que el patrón de antena está dirigido casi exactamente de forma perpendicular a la suma del vector de dirección de vuelo y el vector velocidad debido a la rotación de la tierra, se generará siempre un leve ángulo *Squint* ϕ_s , dirigiendo el patrón de antena afuera de la dirección del cero-Doppler.

Como se muestra en Figura 2.7, la frecuencia Doppler considerando la geometría SAR que conforma la plataforma con la superficie de referencia, corresponde a:

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \sin \phi_s \sin \theta \quad (2.10)$$

En términos dinámicos, la frecuencia Doppler varía en la medida en que el haz del radar va pasando por diferentes dispersores. A esta variación se le denomina como el ancho de banda Doppler (B_{Dop}). Para un haz de antena en dirección de acimut, el ancho de banda Doppler es aproximadamente según Raney, 1998 (citado en Hanssen, 2001):

²Estrictamente, la analogía con el efecto Doppler es incorrecta, ya que este fenómeno es continuo, mientras las adquisiciones SAR pueden ser consideradas como un proceso de carácter discreto (Hanssen, 2001)

$$B_{Dop} = \frac{2\beta_{\alpha}v}{\lambda} \quad (2.11)$$

En este sentido, cabe señalar que la PRF debe ser suficiente para muestrear el espectro Doppler sin ambigüedades, de modo que ésta debe ser siempre mayor al ancho de banda Doppler ($PRF > B_{dop}$). Este último elemento, determina la resolución en la coordenada de acimut de la imagen SAR focalizada, correspondiendo esta a:

$$R_{ac} = \frac{v_s/c}{B_{Dop}} \quad (2.12)$$

En base a la Ecuación 2.12, se puede deducir que es posible alcanzar una alta resolución de acimut, básicamente usando una longitud de onda corta, un ancho de haz amplio, y que la plataforma tenga una velocidad alta ³.

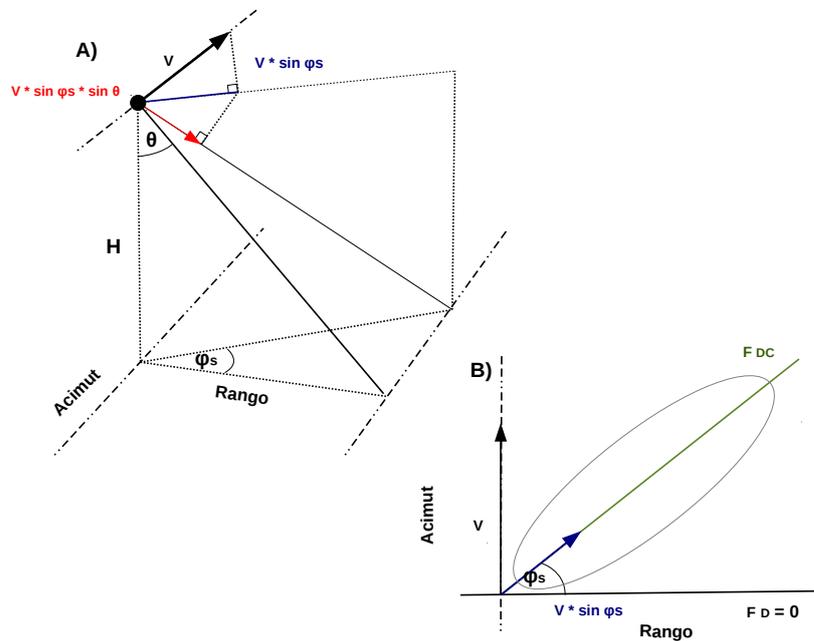


Figura 2.7: A) Vista 3D del ángulo Squint ϕ_s y del ángulo de vista θ . El vector velocidad puede ser descompuesto en diferentes direcciones. B) Patrón de antena, con una dirección del Centroide Doppler.

Según Cumming y Wong (2005), por definición como el haz tienen su máxima ganancia a lo largo del eje central, el *peak* de la modulación ocurre en el tiempo en que el centro de haz cruza el dispersor. La frecuencia Doppler en ese momento es la frecuencia central en acimut de los datos, y pasa a denominarse Centroide Doppler. Se asume que el patrón del haz en acimut es simétrico sobre su línea central, por lo que el *peak* de la frecuencia es también el promedio de ella, o el “centro de gravedad” de la energía espectral.

Para focalizar los datos SAR la frecuencia del Centroide Doppler es importante para maximizar la SNR y suprimir las ambigüedades en acimut. Para los datos SAR focalizados la F_{DC} que no sea igual a 0 es equivalente a un espectro que está cambiado en dirección del acimut (Geudtner, 1995 citado en Hanssen, 2001).

³Cabe señalar que la velocidad de una plataforma satelital es inversamente proporcional a la altura de la misma.

Focalización de imágenes SAR

Existe una gran cantidad de algoritmos publicados que tienen como objetivo realizar el proceso de focalización de los datos obtenidos por un sistema SAR, de los cuales los más utilizados por la precisión de sus resultados son Omega-K (ωk), Range Doppler (RDA) y Chirp Scaling (CSA). El resultado de este procesamiento es una imagen SLC, que corresponde a una grilla regular con valores complejos, los cuales pueden ser representados mediante la expresión $y = |y| \exp(j\psi)$. Donde $|y|$ corresponde a la parte real (amplitud) y $j\psi$ a la parte imaginaria (fase) de éstos (Cafforio et al., 1991; Hanssen, 2001; Cumming et al., 2003; Cumming y Wong, 2005; Richards, 2009).

Considerando la resolución diferencial en las coordenadas de rango y acimut, que se refleja en la dimensión horizontal y vertical de una celda de resolución, el proceso de *Multilook* o promedio de valores complejos en una ventana de dimensiones determinadas, durante la focalización de la imagen puede ser aplicado para mejorar la precisión radiométrica en desmedro de la resolución de la imagen. Por ejemplo, en el procesamiento de imágenes SAR para interferometría, este procedimiento es frecuentemente utilizado para simplificar promediando un número de celdas de resolución, lo que conlleva a mejorar la estadística de fase Hanssen (2001).

Geometría de un sistema SAR en función de una superficie referencial

En la Figura 2.8, se puede apreciar un radar mono-estático, el cual posee una antena fija con una dirección lateral que ilumina una franja paralela a la trayectoria del sensor con una serie de pulsos. De la variación de los ángulos de incidencia θ_{inc} y la topografía del área iluminada, resultarán una serie de distorsiones geométricas en la imagen. Específicamente estas distorsiones corresponden a: el efecto Foreshortening (compresión de la información radiométrica, en zonas de pendiente), inversiones de terreno (Efecto dado por la llegada del haz a zonas más altas antes que a la base de éstas) y sombras (Hanssen, 2001; Ferretti, 2007; Richards, 2009).

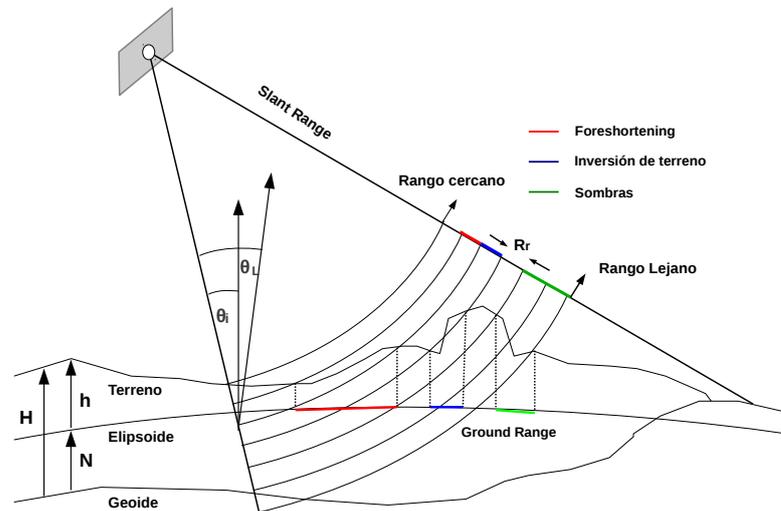


Figura 2.8: Geometría de captación y sistema de referencia. Las coordenadas en *Ground range* están referenciadas a un elipsoide. El ángulo de incidencia θ_{inc} , y el ángulo de incidencia local θ_{loc} , están definidos en base a una línea vertical que intersecta con el elipsoide definido y con el terreno respectivamente, (Ferretti, 2007).

Cabe señalar, que hasta esta sección, el modo de adquisición que se ha expuesto corresponde al denominado *Stripmap* que es el más común. Sin embargo, modernas antenas en fase han sido implementadas con estrategias de adquisición de datos de mayor complejidad, como por ejemplo son los casos del modo ScanSAR⁴ y Spotlight⁵ (Hanssen, 2001; Richards, 2009; Shanker, 2010).

2.1.3. Plataforma ERS

La Agencia Espacial Europea (ESA) lanzó el primer satélite equipado con un sistema SAR en Julio de 1991: ERS-1 (European Remote Sensing Satellite). A pesar de estar planificado para tener una vida útil de 5 años operó hasta Marzo del año 2000. En primera instancia, fue diseñado para el monitoreo de océanos y hielo, operando con un ángulo de vista de 23°. La sistemática adquisición de datos, el control orbital, y las políticas de distribución de datos, dieron lugar a importantes avances científicos, dentro de los cuales se encuentran una cantidad importante de investigaciones en referencia a los sistemas SAR (Hanssen, 2001). Una copia casi exacta es ERS-2 (características técnicas en la tabla 2.1), lanzado en Abril 1995, lo cual permitió el funcionamiento de la llamada operación Tandem. Después del año 1996 ERS-1 actuó sólo como un satélite de backup en modo hibernación, y fue sólo activado para ocasiones especiales, principalmente relacionadas con la ocupación de Interferometría SAR (InSAR), como por ejemplo en la erupción del volcán *Vatnajökull* en Islandia en el año 1998 y el terremoto de *Izmit* (Turquía) en el año 1999 (Ferretti, 2007).

| Parámetros | |
|-------------------------|--|
| Tipo de órbita | Polar-Sincronizada con el sol |
| Altitud | Entre 782 y 785 km |
| Inclinación | 98.52 grados |
| Repetición de ciclos | 3 días, 35 días y 176 días |
| Resolución Espacial | 30 m aprox en acimut y rango |
| Anchura del haz | 102.5 km |
| | /80.4 km (ejecución completa) |
| Ángulo de incidencia | Swath cercano 20.1° /Swath lejano 25.9° |
| Frecuencia | 5.3 GHz (banda C) |
| Longitud de onda | 5.6 cm |
| Ancho de banda | 15.55±0.1 MHz |
| Polarización | VV |
| Resolución radiométrica | 2.5 dB hasta sigma-cero=-18 dB |

Tabla 2.1: Especificaciones Técnicas de la plataforma ERS-2.

⁴Esta modalidad de adquisición incrementa el área de captación de información, sin embargo consigue una baja resolución.

⁵Por otra parte, al contrario que el modo ScanSAR, este tipo de adquisición logra cobertura menor, sin embargo llega a obtener una resolución muy alta.

2.2. Interferometría SAR (InSAR)

La Interferometría SAR (InSAR) corresponde a una técnica que mide los patrones de interferencia causados por la diferencia de fase entre dos imágenes SAR con una misma polarización⁶, las cuales conforman una configuración geométrica con la que se puede determinar diferencias angulares y distancias relativas con gran detalle entre la plataforma y la superficie observada (Zebker et al., 1994a; Hanssen, 2001; Hooper, 2006; Richards, 2009). Esta diferencia de fases puede determinarse por medio de la multiplicación compleja de una imagen maestra y_1 (o de referencia) y el complejo conjugado de la imagen esclava y_2^* , después de que esta última, se ha remuestreado en función de los parámetros geométricos de la imagen referencial (Ecuación 2.13). El resultado de esta operación, es el denominado interferograma complejo (Hanssen, 2001; Richards, 2009):

$$\phi = y_1 y_2^* = |y_1| |y_2| \exp(j(\psi_1 - \psi_2)) \quad (2.13)$$

Teóricamente según Hanssen (2001), la medición del cambio de fase para cada celda de resolución, es igual a la suma de una parte de la propagación proporcional a la distancia recorrida ida-vuelta (2ρ) y a una parte de dispersión debido a la interacción de la onda con el dispersor o terreno (ϕ_s). Consecuentemente, los valores de fase observados ϕ para un píxel son:

$$\phi = -\frac{2\pi * 2\rho}{\lambda} + \phi_s \quad (2.14)$$

Cabe destacar, que el signo negativo de la Ecuación 2.14, se debe a que el sistema describe un decrecimiento de la fase ϕ en la medida que se aumenta el rango ρ . Si cada píxel presente en el terreno mantiene un coeficiente de reflexión complejo continuo en cada observación, en el cálculo de la diferencia de fase se puede simplificar el factor de dependencia del mecanismo dispersor y por lo tanto sólo considerar los valores que dependen de la geometría conformada⁷ (Figura 2.9). Entonces, si los rangos de cada paso de la plataforma son definidos como ρ y $\rho + \Delta\rho$, la medida de diferencia de fase ϕ está dada por (Hanssen, 2001; Richards, 2009):

$$\phi = -(\psi_1 - \psi_2) = -\frac{4\pi(\rho_1 - \rho_2)}{\lambda} = -\frac{4\pi\Delta\rho}{\lambda} \quad (2.15)$$

De acuerdo con lo que se puede apreciar en la Figura 2.9, para el cálculo de $\Delta\rho$, al formarse un triángulo no rectángulo entre ambas captaciones se puede aplicar el teorema del coseno, con lo que se obtiene:

$$(\rho + \Delta\rho)^2 = \rho^2 + B^2 - 2B\rho \sin(\theta - \alpha) \quad (2.16)$$

$$\Delta\rho = \sqrt{\rho^2 + B^2 + 2B\rho \sin(\theta - \alpha)} - \rho \quad (2.17)$$

Donde B es la longitud de la línea de base, el rango a un punto en el terreno es ρ , el ángulo de vista es θ , y el ángulo de la línea de base con respecto a la horizontal del sensor es α (Zebker et al., 1994b; Bamler y Hartl, 1998; Hanssen, 2001; Richards, 2009).

⁶Orientación del campo eléctrico en una onda con respecto a un plano en la transmisión de la señal y la recepción de la misma.

⁷Cabe señalar, que en el caso específico de un sistema de radar biestático, como por ejemplo la Shuttle Radar Topography (SRTM), se realiza tan sólo una pasada por el área iluminada, por ende en vez de ocupar el factor 4π , se ocupa 2π .

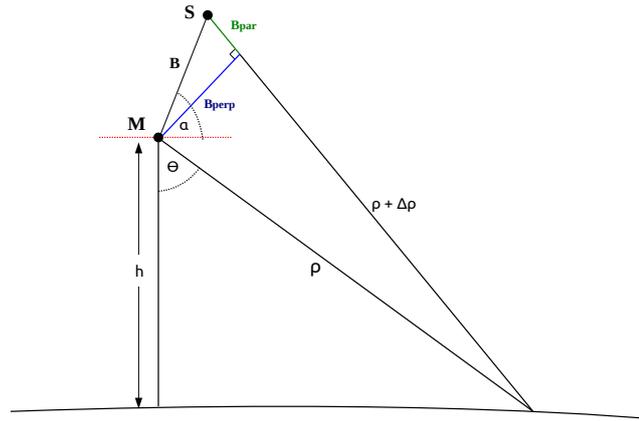


Figura 2.9: Geometría de doble pasada- Interferometría SAR (InSAR)

Debido a que en las constelaciones interferométricas de paso repetido actuales, la longitud de la línea de base es típicamente menor que 1000 m, la diferencia entre el ángulo de vista local θ es generalmente menor que 4 *arc minutos*, lo que permite ocupar una expresión alternativa para definir $\Delta\rho$. Esta aproximación fue denominada Aproximación de Campo Lejano (FFA), y considera que los ángulos de vista locales para ambos sensores son idénticos, por lo que las direcciones de vista paralelas proporcionan una diferencia de rangos aproximada, (Zebker et al., 1994b; Hanssen, 2001):

$$\Delta\rho = B \sin(\theta - \alpha) \quad (2.18)$$

Sin embargo, según Hanssen (2001) por la ambigüedad de fase 2π y las imprecisiones orbitales, no es posible derivar $\Delta\rho$ desde la geometría anteriormente descrita, por lo que la relación entre los cambios en $\Delta\rho$ y θ es representada como:

$$\partial\Delta\rho = B \cos(\theta^0 - \alpha) \partial\theta \quad (2.19)$$

Donde el valor inicial de θ^0 es obtenido del cuerpo de referencia (Figura 2.10). Específicamente, este cuerpo de referencia que generalmente corresponde a un elipsoide WGS-84, puede ser definido como:

$$\vartheta = \frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta^0 - \alpha) \quad (2.20)$$

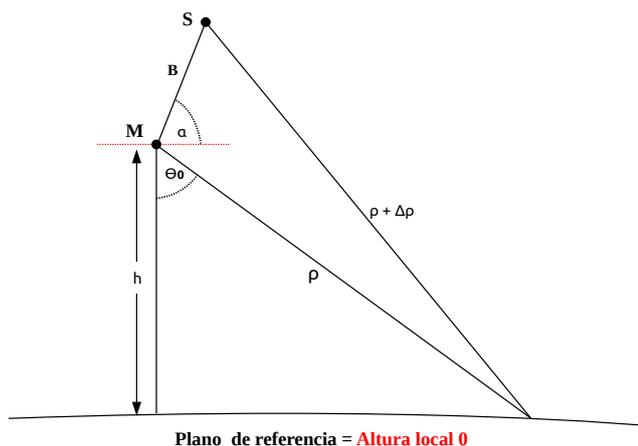


Figura 2.10: Interferograma que presenta los valores de fase del cuerpo de referencia - Interferometría SAR (InSAR).

Combinando las observaciones de la fase física (Ecuación 2.15) y la relación entre los cambios en rango y θ (la Ecuación 2.19), la relación entre el cambio de fase geométrica y el cambio de ángulo de vista θ corresponde a:

$$\partial\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} B \cos(\theta^0 - \alpha) \partial\theta \tag{2.21}$$

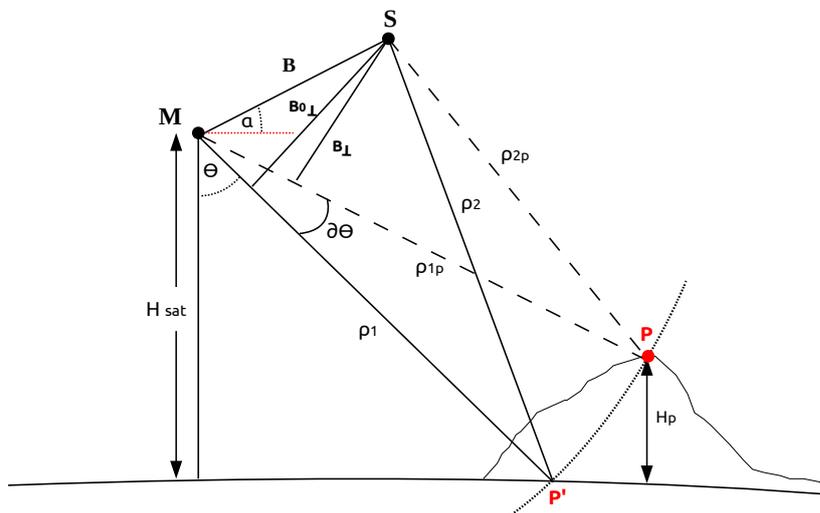


Figura 2.11: Configuración interferométrica conformada por dos plataformas satelitales. Usando el rango ρ_1 y la altura H_{sat} de la plataforma es posible determinar la altura del punto P (Zebker et al., 1994b; Hanssen, 2001).

Por otro lado, la altura del satélite por sobre el cuerpo de referencia es conocida, y puede ser expresada como:

$$H_{sat} = \rho_1 \cos \theta \quad (2.22)$$

Como muestra la Figura 2.11 para una celda de resolución P con un rango ρ_1 , existe una relación entre el cambio en el ángulo de vista θ debido a la diferencia de altura ∂H_{sat} ⁸ que se expresa de la siguiente forma:

$$\partial H_{sat} = -H_p = -\rho_1 \sin \theta_p^0 \partial \theta \quad (2.23)$$

Finalmente, si se relacionan las ecuaciones 2.21 y 2.23 se puede obtener la altura H_p en función de la relación entre el cuerpo de referencia (Ecuación 2.20) y la diferencia de fase $\partial \phi_p$:

$$H_p = -\frac{\lambda \rho_1 \sin \theta_p^0}{4\pi(B \cos(\theta_p^0 - \alpha))} \partial \phi_p \quad (2.24)$$

2.3. Interferometría Diferencial (DinSAR)

Según Hanssen (2001), en base al mismo esquema anterior (sección 2.2) como una consecuencia del intervalo de tiempo entre adquisiciones subsecuentes dado cierto escenario con una dinámica cortical, un componente de deformación D_p puede ser detectado en una diferencia de rango relativa entre las plataformas. La Ecuación 2.25, muestra el rango geométrico de una segunda adquisición ρ_{2p} de una celda de resolución P , en función del rango geométrico de la imagen maestra o referencial ρ_p , la diferencia en rango de la constelación $\Delta\rho$, y la deformación presente D_p :

$$\rho_{2p} = \rho_p + \Delta\rho_p + D_p \quad (2.25)$$

En el análisis específico de la geometría conformada con este nuevo componente (D_p), la Figura 2.12- parte A, muestra que el ángulo μ puede ser descrito como:

$$\mu = \frac{\pi}{2} - \zeta + \theta_{inc} \quad (2.26)$$

⁸Cabe destacar, que esta definición es independiente de la elección de cuerpo de referencia (Hanssen, 2001).

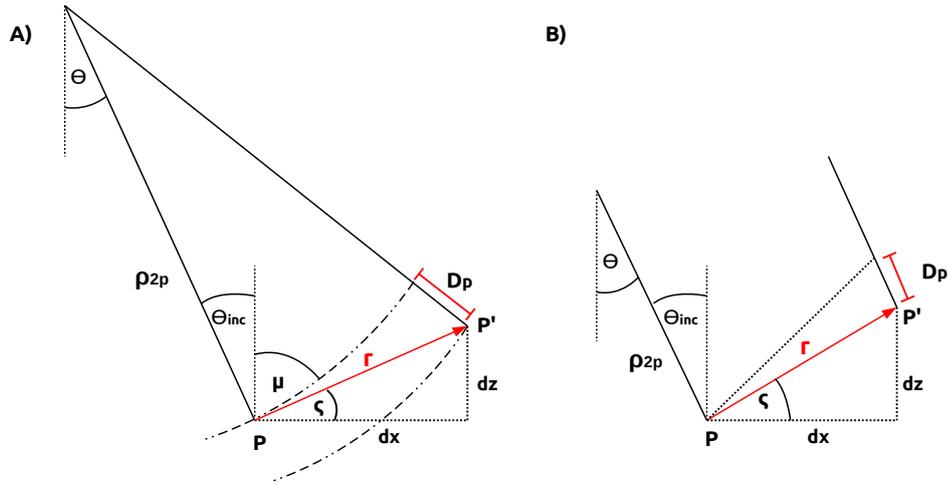


Figura 2.12: A) Vector de deformación en base a la geometría conformada entre las plataformas B) Representación del vector deformación r bajo el supuesto de la Aproximación de Campo Lejano (FFA)(Hanssen, 2001).

Donde θ_{inc} es el ángulo de incidencia de un punto P . Por ende, si esta celda de resolución presenta una deformación a lo largo del vector desplazamiento r en dirección ζ , en *Slant range* puede determinarse el componente D_p usando la regla del coseno (Ecuación 2.27):

$$(\rho_{2p} + D_p)^2 = r^2 + \rho_{2p}^2 - 2r\rho_{2p} \sin(\zeta - \theta_{inc}) \quad (2.27)$$

$$D_p = \sqrt{r^2 + \rho_{2p}^2 - 2r\rho_{2p} \sin(\zeta - \theta_{inc})} - \rho_{2p} \quad (2.28)$$

De la misma forma que se mencionó en la sección 2.2, se asume una FFA (como se aprecia en la parte B de la Figura 2.12), para la geometría conformada por las plataformas. La sensibilidad de esta medición, puede alcanzar resultados que en la práctica pueden tener valores en una escala subcentimétrica, lo cual puede estar limitado por la reducción en los valores de coherencia de los dispersores presentes en el terreno. Por lo tanto, una deformación r en dirección ζ resultará como un componente de deformación en *Slant range* (Hanssen, 2001) definido como:

$$D_p = |r| \cos(\theta_{inc} - \zeta) \quad (2.29)$$

Cabe destacar, que sólo un componente del vector deformación puede ser observado en el interferograma. La combinación de órbitas descendentes y ascendentes pueden ser usadas para encontrar un segundo componente del vector deformación. En este contexto, se pueden identificar tanto la deformación horizontal y vertical por medio de las ecuaciones 2.30 y 2.31 correspondientemente (Hanssen, 2001):

$$r^2 = dx^2 + dz^2 \quad (2.30)$$

$$\zeta = \arctan\left(\frac{dz}{dx}\right) \quad (2.31)$$

En términos prácticos, existen muchas maneras de construir un interferograma diferencial (Massonnet y Feigl, 1998; Hanssen, 2001). Los métodos más convencionales para construir este tipo de un interferograma son: el método de doble pasada y triple pasada.

2.3.1. Método de doble pasada

Este método específicamente consiste en determinar el componente de deformación D_p mediante el cálculo de la diferencia de fase entre una imagen maestra o de referencia y una imagen esclava, sustrayendo la fase topográfica procesando un Modelo de Elevación Digital (DEM) externo, el cual se convierte a la geometría de la imagen maestra, siendo sustraído al interferograma complejo (Massonnet y Feigl, 1998; Hanssen, 2001; Ferretti, 2007; Richards, 2009). Este procedimiento es factible y muy común, debido a que para muchas áreas del mundo están disponibles DEMs, como por ejemplo los generados por la misión SRTM (Hanssen, 2001).

En términos metodológicos, en primera instancia, en base a la información que proporcionan los datos ODR generados por el Delft Institute for Earth-oriented Space Research (DEOS)⁹ y la información que trae el archivo SLC de la imagen maestra¹⁰, se puede calcular la posición y velocidad que tuvo la plataforma para cada celda de resolución de la imagen SAR, considerando el ángulo Squint (ϕ_s) y en función de un sistema de coordenadas referenciales planas (el cual generalmente corresponde a WGS-84).

Posteriormente, según Buckley (2000) para cada celda del DEM, el cual también tiene el mismo marco de referencia (WGS-84) se realiza la conversión a coordenadas al sistema SAR, mediante las siguientes expresiones, considerando que la matriz resultante tiene coordenadas (x, y) ¹¹:

$$x = \frac{|P(t_{dem}) - P_{dem}| - \rho_{ref}}{\Delta r} + 1 \quad (2.32)$$

Para el caso de la coordenada en rango x , $|P(t_{dem})|$ corresponde a la posición del satélite en donde se cumple la frecuencia del Centroide Doppler, P_{dem} es la posición del DEM, ρ_{ref} es el rango para la primera celda de la simulación y Δr es el espacio muestral en rango.

$$y = \frac{|v(t_{dem})|t_{dem} - \alpha_{ref}}{\Delta \alpha} + 1 \quad (2.33)$$

De la misma forma, para la coordenada en acimut y , $v(t_{dem})$ es la velocidad de la plataforma en donde se cumple la frecuencia del Centroide Doppler, t_{dem} es el tiempo de la celda del DEM, α_{ref} es la localización de la primera línea en acimut y $\Delta \alpha$ es el espacio muestral en acimut.

Hay dos tipos de valores asignados a cada píxel de salida. El primero es el valor relacionado a la altura del DEM ajustada para cualquier sesgo entre el datum del DEM y el datum de la simulación. El segundo es una simulación de la intensidad del radar en base a los valores que posee el DEM. Debido al espaciado irregular del DEM simulado, este resultado debe ser interpolado a una grilla uniforme. Por ejemplo, este proceso en el software DORIS ocupa como interpolador la triangulación de Delaunay¹².

Posteriormente de ser coregistrado con el interferograma (en base a los valores de amplitud simulados), la topografía puede ser sustraída del interferograma complejo de forma similar al proceso de sustracción de la fase referencial (interferograma aplanado). Primero, el ángulo de inclinación θ_i , es calculado con la altura topográfica z asociada a cada píxel, ocupando la siguiente expresión:

⁹<http://www.deos.tudelft.nl/ers/precors/orbits/>

¹⁰Específicamente en el archivo *Header*.

¹¹ x en la coordenada del rango e y en la coordenada de acimut

¹²Esta función se encuentra en el software Triangle.

$$\cos \theta_i = \frac{\rho^2 + (rt + H_{sat})^2 - (rt + z)^2}{2\rho(r + H_{sat})} \quad (2.34)$$

Donde ρ es el rango a la superficie, rt corresponde al radio de la tierra (asumida como esférica) y H_{sat} es la altura de la plataforma por sobre la superficie. Obteniendo estos resultados, pueden ser calculados los valores de rango en cada celda y posteriormente convertidos a valores de fase, para ser finalmente sustraídos del interferograma complejo.

2.3.2. Método de triple pasada

En esta metodología se ocupan 3 imágenes SAR, de las cuales la adquisición extra es usada y combinada con la imagen geoméricamente mas adecuada para crear el denominado “par topográfico”. Para esta combinación, se asume la no presencia de un componente de deformación, una línea de base que proporcione sensibilidad a la topografía, y valores de coherencia suficientes. Como producto, se obtiene la fase topográfica, la cual es sustraída del par ocupado para determinar el componente de deformación, dando como resultado un interferograma diferencial (Zebker et al., 1994a; Hanssen, 2001; Ferretti, 2007).

Siguiendo el enfoque de Zebker et al. (1994a), si se considera un segundo interferograma (como se puede apreciar en la Figura 2.13) adquirido con una geometría distinta, se puede estimar la relación que tienen las fases consideradas mediante la expresión 2.35:

$$\frac{\phi}{\phi_2} = \frac{B_{Par}}{B_{Par2}} \quad (2.35)$$

Si el segundo presenta una B_{Par} mayor en una misma celda de resolución, siguiendo bajo el supuesto de que los ecos permanezcan correlacionados, la fase ϕ_2 estará dada por:

$$\phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda}(B_{Par2} + \Delta\rho) \quad (2.36)$$

El término $\Delta\rho$ correspondería a un desplazamiento presente, el cual en los valores de un interferograma se encuentra mezclado con la fase topográfica, creando ‘a priori’ un estado de confusión en la interpretación del resultado. Sin embargo, si los datos del interferograma complejo son escalados mediante la división de las líneas de base paralelas sustrayendo dicho resultado del segundo interferograma, se puede obtener una solución que incluya sólo el desplazamiento de la superficie:

$$\phi_2 - \frac{B_{Par2}}{B_{Par}}\phi = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta\rho \quad (2.37)$$

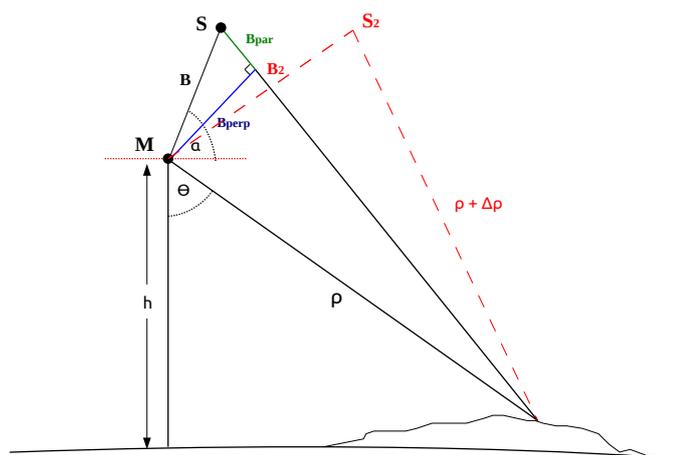


Figura 2.13: Geometría de dos pares interferométricos ocupados para medir desplazamientos en la LOS

2.3.3. Contribución de otros fenómenos en los valores de diferencia de fase

Adicionalmente a la influencia en los valores de fase de la topografía y de un eventual proceso de deformación, existen otras contribuciones las cuales específicamente corresponden a las siguientes (Massonnet y Feigl, 1998; Hooper, 2006; Hooper et al., 2007):

- **Contribución de la trayectoria de las órbitas:** En términos generales, esta contribución corresponde a la fase residual que se genera por la imprecisión de las órbitas de la plataformas que captan la información proveniente de la superficie. La diferencia entre las dos trayectorias puede ser calculada con el vector posición de cada satélite, el cual está en función de un sistema geocéntrico determinado (Kohlhase y Feigl, 1999). Plataformas como ERS en sus distintas versiones, y Envisat (como se mencionó en la sección 2.3.1), poseen información externa que sirve como base para realizar cálculos más precisos de la altura de la plataforma y correspondientemente de la geometría que forma con la otra adquisición (archivos ODR, generados por el DEOS). Cabe destacar, que este procesamiento se aplica a sólo trayectorias de plataformas satelitales y no para trayectorias de vehículos aéreo-transportados, que son menos regulares y difíciles de repetir (Massonnet y Feigl, 1998).
- **Contribución atmosférica:** El estado de la atmósfera no es idéntico si las dos imágenes son adquiridas en diferentes tiempos. Cualquier diferencia en la troposfera o en la ionosfera entre los dos datos pueden cambiar la longitud aparente de la trayectoria entre el radar y el terreno. Ejemplos de este tipo de efectos en la troposfera, según Massonnet y Feigl (1998) se relacionan con turbulencias causadas por masas nubosas de crecimiento vertical o por la interacción entre los vientos fuertes con el relieve; incluso variables de comportamiento relativamente homogéneo en la atmósfera, como la presión, la humedad, y la temperatura pueden ser revelados por contraste con el relieve, el cual modula el espesor de la troposfera que la señal debe cruzar. Cabe destacar, que en base a la experiencia, se ha logrado verificar que los interferogramas realizados desde escenas nocturnas poseen valores más altos de coherencia, mostrando menos artefactos atmosféricos que las escenas de día. Esto puede ser debido al inactivo estado de la vegetación y que atmósfera presenta un comportamiento estadístico mas estable (Massonnet y Feigl, 1998; Hanssen, 2001).
- **Otras contribuciones:** En esta clasificación se incluyen una serie de factores que pueden influir en los valores de fase de un interferograma, los cuales pueden presentarse fundamentalmente por problemas

técnicos de la plataforma, como también a errores generados por las metodologías aplicadas en el procesamiento de las imágenes. Como ejemplo, están los artefactos instrumentales, que se relacionan a la presencia de una posible inestabilidad del oscilador de la plataforma (Massonnet y Feigl, 1998); o por otra parte, errores de corrección e incertezas en la posición del centro de fase en acimut (Hooper, 2006; Hooper et al., 2007).

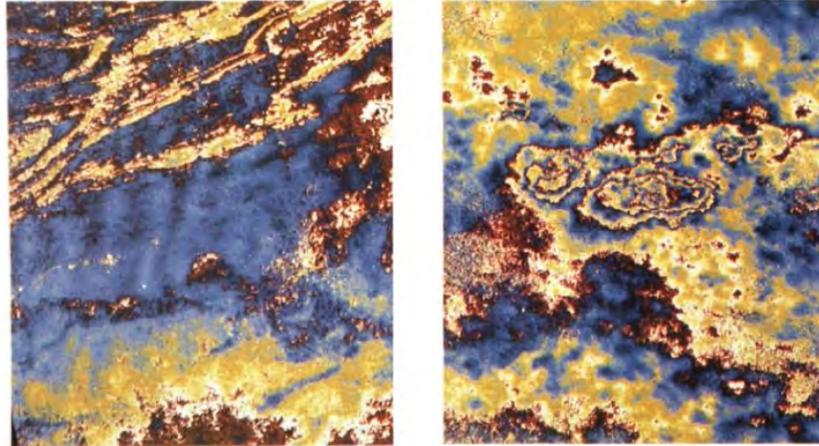


Figura 2.14: Dos ejemplos de artefactos atmosféricos. (Izquierda) Frente temporal en Pennsylvania, consistente en ondas que viajan de este a oeste con una longitud de cerca de 12 km en un interferograma realizado por dos imágenes ERS-1 adquirido en Enero de 1994. (Derecha) Tormenta en Landers California. Los patrones circulares irregulares tienen entre 5-10 km de ancho y representan sobre 3 franjas (84 mm) de perturbación atmosférica sobre el desierto de Mojave, en agosto de 1992 (Massonnet y Feigl, 1998).

2.3.4. Coherencia

La Coherencia o Correlación entre ecos InSAR es una observación fundamental en las mediciones interferométricas. Por definición, corresponde a una medida de similaridad entre dos ecos de radar, que son determinados por muchos parámetros y propiedades específicas de reflexión de dispersores de una superficie dada (Touzi et al., 1999; Hanssen, 2001; Zebker y Chen, 2005; Richards, 2009).

Específicamente, la coherencia γ_{coh} entre dos señales de radar, es descrita por la ecuación 2.38 de la siguiente forma:

$$\gamma_{coh} = \frac{y_1 y_2^*}{\sqrt{|y_1|^2 |y_2|^2}} \quad (2.38)$$

$$0 \leq \gamma_{coh} \leq 1$$

Donde y_1 y y_2 son las señales complejas recibidas a las dos antenas formando el proceso interferométrico. En otras palabras, la correlación o coherencia es el promedio de la potencia de la multiplicación cruzada de las dos señales normalizadas por la raíz cuadrada de los productos de las potencias de las señales individuales. Usando el modelo de correlación propuesto por Zebker y Villasenor (1992), los ecos del radar son consistentes en una parte correlacionada común cc a la señal de ambas antenas y también a una parte de ruido n_1 y n_2 :

$$\begin{aligned} s_1 &= cc + n_1 \\ s_2 &= cc + n_2 \end{aligned} \quad (2.39)$$

Donde el término ruido puede producirse fundamentalmente debido a la diferentes tipos de decorrelación, las cuales específicamente pueden estar dadas por la magnitud de línea de base (decorrelación espacial), por la rotación de un dispersor con respecto a la dirección de vista de las plataformas (decorrelación por rotación de dispersores), o por los cambios que presenta el eco proveniente de un dispersor en el tiempo (decorrelación temporal).

2.4. Limitaciones de la InSAR convencional

En términos generales, en el trabajo de Zebker y Villasenor (1992) se plantea la existencia de 3 fuentes de decorrelación que corresponden específicamente a: la longitud de línea de base espacial, la rotación de los dispersores entre las observaciones obtenidas, y el movimiento de los centros de los dispersores dentro de cada celda de resolución.

2.4.1. Decorrelación espacial

La medición de la decorrelación espacial $D_{espacial}$, consiste básicamente en determinar la fracción del eco del radar recibido que se decorrelaciona por la separación de las antenas.

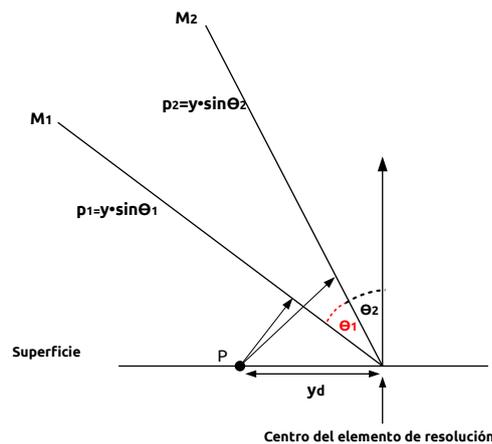


Figura 2.15: Decorrelación que se produce por la distancia entre ambas plataformas (Zebker y Villasenor, 1992).

En base a una geometría compuesta por dos plataformas SAR como se muestra en la Figura 2.15, dos antenas M_1 y M_2 , iluminan una misma área en superficie con ángulos de incidencia θ_1 y θ_2 , con una distancia y_d del punto P al centro del elemento de resolución en *Ground range* y una distancia desde el sensor al centro del mismo elemento denominada ρ .

La función de correlación entre ambas señales, que corresponde a la Transformada Rápida de Fourier (FFT) de la intensidad de respuesta del impulso, cae linealmente mientras la diferencia en ángulos de vista $\Delta\theta$ se incrementa. Esto puede ser descrito en términos de la línea de base (B) que separa a las plataformas (en metros) como:

$$D_{\text{espacial}} = 1 - \frac{2|B|R_r \cos^2 \theta}{\lambda r} \quad (2.40)$$

Donde R_r es la resolución rango. En función de lo anterior, el valor mínimo que puede adquirir B para que D_{espacial} no sea igual a 0, se define como línea de base crítica B_c (Ecuación 2.41) y ocurre cuando la diferencia de ángulos de vista entre dos pasadas es suficiente para causar que la retrodispersión de cada píxel, se transforme completamente en una señal decorrelacionada.

$$B_c = 1 - \frac{\lambda r}{2R_r \cos^2 \theta} \quad (2.41)$$

2.4.2. Decorrelación por rotación de dispersores

Otro efecto geométrico que genera decorrelación, es la rotación de un dispersor con respecto a la dirección de vista de las plataformas que conforman un sistema interferométrico SAR. El principio de este fenómeno, apunta a que no se puede iluminar el mismo parche de superficie desde dos diferentes ángulos y esperar que la señal esté completamente correlacionada.

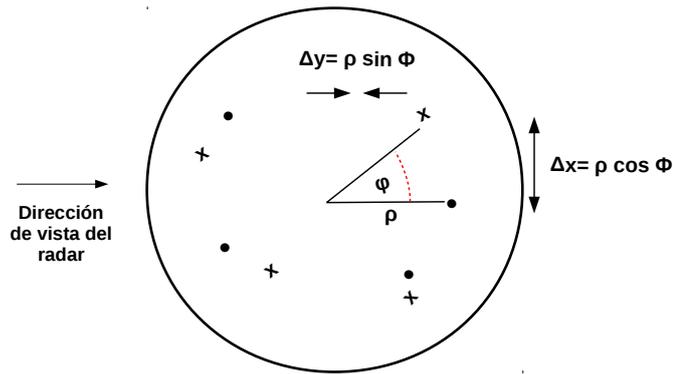


Figura 2.16: Rotación en un ángulo ϕ de un dispersor, desde una posición x a una nueva posición o que provoca un cambio de fase para cada centro dispersión (Zebker y Villasenor, 1992).

Como se puede apreciar en la Figura 2.16, cada centro de dispersión tiene una ubicación polar (δ, ϕ) , la cual se gira tomando una posición $(\delta, \phi + \Delta\phi)$. La transformación a coordenadas rectangulares $x = \delta \cos \phi$, $y = \delta \sin \phi$ expresan el cambio de posición en la superficie como un cambio en el rango.

Si la distancia al punto antes de considerar la rotación es $r + \delta \sin \theta \sin \phi_1$, la distancia que se genera posteriormente a la pequeña rotación es $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ y corresponde específicamente a $r + \delta \sin \theta \sin \phi_2$. En consideración de lo anterior, el parche es rotado suavemente, lo que genera que el rango de cada fase del centro de dispersión también lo haga, lo que determina que la suma coherente variará en base a dichas modificaciones.

Posteriormente, a la aplicación de la FFT se obtiene la siguiente expresión que describe la decorrelación inducida por la rotación en la respuesta del impulso en acimut:

$$D_{rotacion} = 1 - \frac{2 \sin \theta |\Delta \varphi| R_{ac}}{\lambda} \quad (2.42)$$

Donde $\Delta \varphi$ corresponde al diferencial de distancia existente entre las dos señales para un punto captado y R_{ac} es la resolución en acimut.

2.4.3. Decorrelación temporal

La decorrelación $D_{temporal}$, se produce debido a diferentes cambios físicos en la superficie observada durante el periodo en que son realizadas las observaciones. Por ende, este tipo de decorrelación depende en gran medida de la frecuencia con que una plataforma logra captar información de un lugar en específico (por ejemplo, la plataforma ERS-2, posee una frecuencia temporal aproximada de 35 días) y las características de la cobertura captada por el sensor en el tiempo.

De la misma forma que en los tipos de decorrelación mencionados, se ocupa como base para su determinación la correlación entre dos señales con la cual se generaliza una función de dispersión $f(x, y, z)$ considerando fundamentalmente la variabilidad tridimensional o el volumen de dispersión captado, incluyendo así, términos relacionados con el cambio de la posición horizontal Δy y el cambio en altura Δz de un dispersor.

Si se considera que los cambios en posición de un dispersor no están relacionados con la posición inicial, y son caracterizados por distribuciones de probabilidad independientes $p_y(\Delta y)$ y $p_z(\Delta z)$; entonces se tiene que $D_{temporal}$ es igual a:

$$D_{temporal} = \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 (\sigma_y^2 \sin^2 \theta + \sigma_z^2 \cos^2 \theta)\right\} \quad (2.43)$$

Donde σ corresponde a la sección transversal del radar.

Para el caso analizado en la misma investigación de Zebker y Villasenor (1992), donde se ocuparon imágenes *SEASAT*¹³ con un ángulo de incidencia nominal de 23°, se determinó que la contribución de desplazamientos en z es mayor que para los desplazamientos en y , por lo que existe una mayor sensibilidad a cambios verticales que a los cambios horizontales para ángulos de incidencia menores de 45°, lo que implica que las superficies con un volumen de dispersión significativa, como por ejemplo coberturas vegetacionales densas, deberían presentar una mayor decorrelación en función de un intervalo de tiempo determinado.

¹³Seasat fue el primer satélite diseñado para observar los océanos terrestres y tiene a bordo el primer SAR puesto en órbita (Hanssen, 2001).

2.5. Series Temporales Interferométricas

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

En términos generales, los algoritmos de series temporales pueden ser clasificados en dos grandes categorías: Persistent Scatterer Interferometry (PSI) y Small Baseline Subset (SBAS). Cada uno de este conjunto de métodos está diseñado para un tipo específico de mecanismo de dispersión Hooper (2008).

2.5.1. Persistent Scatterer Interferometry (PSI)

El objetivo de este algoritmo, consiste en la generación de interferogramas diferenciales con respecto a una imagen maestra, para cada adquisición disponible, incluso si el par de datos ocupados son caracterizados por una gran línea de base. En este contexto, el método busca seleccionar la mayor cantidad de dispersores que tengan un comportamiento estable en el tiempo (Hooper et al., 2004; Hooper, 2006; Hooper et al., 2007; Shanker, 2010; Shanker et al., 2011).

Este enfoque, está dado básicamente por la posibilidad de encontrar píxeles en una imagen SAR que posean un eco que sea dominado por un dispersor, de modo que la medición de fase de ese píxel pueda realizarse de forma más eficiente.

Ferretti et al. (2001), fueron uno de los primeros en referirse a celdas de resolución con dispersores con un comportamiento estable en el tiempo, denominándolos como Permanent Scatterers (Farina et al., 2006). En términos generales, este tipo de procesamiento ha sido muy exitoso para el análisis InSAR con imágenes que contengan un gran número de estructuras fijas en el espacio-tiempo y que tiendan a ser angulares, lo cual determina la presencia de dispersores muy eficientes, específicamente en áreas urbanas. Sin embargo, en lugares donde no se presentan estas características, los resultados no han sido altamente precisos (Hooper et al., 2004; Hooper, 2006; Hooper et al., 2007).

Debido fundamentalmente a estas limitaciones, en Hooper et al. (2004) propone el concepto Persistent Scatterer (PS), el cual mantiene la lógica de la identificación del dispersor permanente, sin embargo incorpora al procedimiento la medición de la correlación espacial de los valores de fase presentes, en lugar de solamente un modelo funcional temporal.

Este método, ha logrado encontrar dispersores caracterizados por una fase estable, independiente de las amplitudes asociadas a los objetos angulares presentes en el espacio, por lo que ha sido aplicable en zonas donde InSAR convencional falla (Hooper et al., 2004; Hooper, 2006; Hooper et al., 2007).

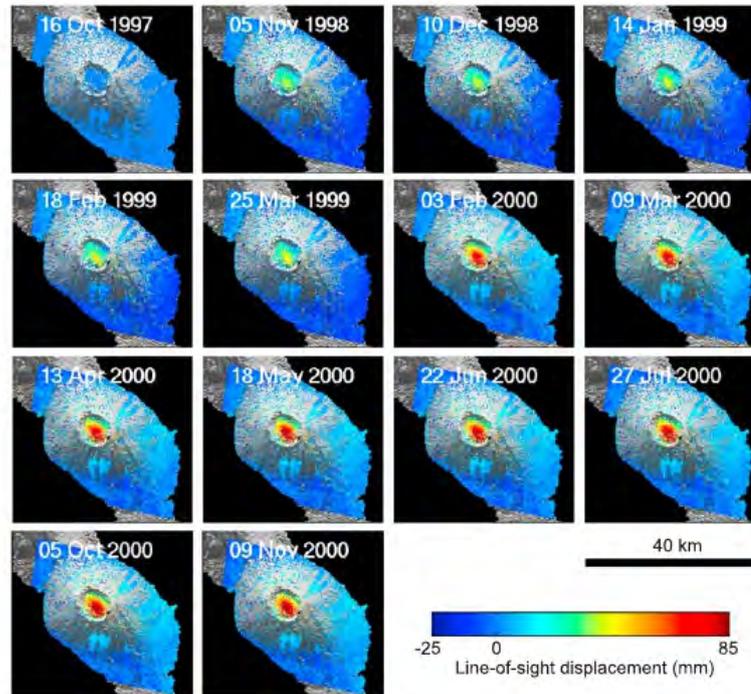


Figura 2.17: Ejemplo en la definición de Persistent Scatterer (PS) para el caso de la deformación del Volcán Alcedo (Islas Galápagos - Ecuador) con imágenes ERS-2 de órbitas descendentes en (Hooper et al., 2007).

2.5.2. Small Baseline Subset (SBAS)

Otro algoritmo que tiene como objetivo determinar la evolución temporal de deformaciones superficiales corresponde a Small Baseline Subset (SBAS), el cual se basa en la información generada por pares de imágenes SAR que conformen una geometría con órbitas que tengan una separación espacial baja, a fin de reducir la decorrelación espacial y los errores topográficos (Berardino et al., 2002; Lanari et al., 2007; Bonano et al., 2010; Shirzaei y Walter, 2010; Euillades et al., 2011; Shanker et al., 2011).

En este sentido, se forman de múltiples subconjuntos de interferogramas con una reducida línea de base espacial, los cuales al final del proceso son combinados. Cabe señalar que esta combinación, está basada en un criterio de norma-mínima de velocidad de deformación, obtenida por la aplicación de un método de Valor de Descomposición Singular (SVD) (Lanari et al., 2007; Euillades et al., 2011).

Según Hooper (2008), en base a interferogramas sólo formados entre imágenes separadas por cortos periodos de tiempo, y con una pequeña diferencia en ángulos de vista y ángulo Squint como es en el caso de SBAS, la decorrelación es minimizada y posteriormente filtrada en el espectro del rango, descartando así la no superposición de frecuencias Doppler en acimut; por ende los píxeles seleccionados se denominan dispersores de Fase Filtrada con baja Decorrelación (SDFP).

El tratamiento específico, en primera instancia considera un grupo de imágenes SAR $N + 1$ que abarquen una misma área, en una secuencia temporal (t_0, t_1, \dots, t_N) , las cuales se coregistran con una imagen de referencia. Para limitar el fenómeno de decorrelación en los interferogramas (explicados en la sección 2.4) se consideran 3 parámetros específicos: la línea de base perpendicular (parámetro principal), la línea de base temporal, y adicionalmente la estimación del promedio de los valores de la Frecuencia del Centroide Doppler (f_{DC}).

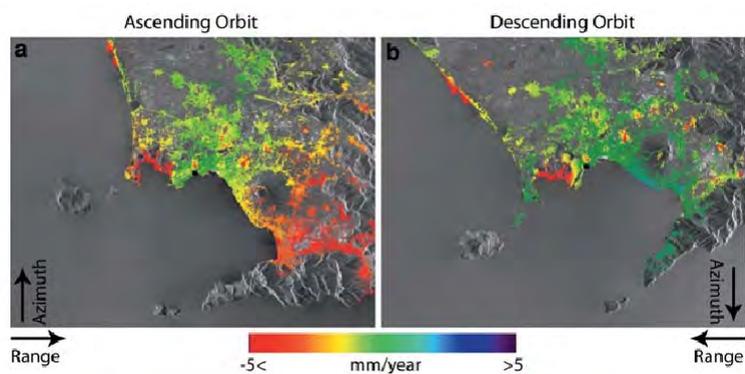


Figura 2.18: Ejemplo de aplicación del algoritmo SBAS, para el caso del volcán Vesuvio (Nápoles -Italia), con órbitas ascendentes y descendentes tanto de ERS-1 y ERS-2, entre los años 1992-2002 (Lanari et al., 2007).

2.6. Etapa de Unwrapping

Por definición, la etapa de desenrollado de fase es el proceso en el cual se recuperan los valores de fase sin ambigüedades desde una matriz de valores que son conocidos sólo en el módulo 2π (Ecuación 2.44). Para poder desarrollar este procedimiento, todos los algoritmos aplicados en interferometría SAR han determinado gradientes de los valores de fase por medio de procedimientos de integración. Este proceso específicamente, está basado en determinar la diferencia de fase absoluta entre píxeles vecinos, la cual sólo puede presentar valores que se encuentren dentro de medio ciclo (π). Una limitante muy importante, es contar con un conjunto de datos que tengan una tasa de muestreo lo suficientemente alta para evitar la existencia de regiones desconectadas (Chen y Zebker, 2000; Hanssen, 2001; Hooper, 2006; Hooper et al., 2007; Richards, 2009).

$$\phi^w = W\{\phi\}$$

$$\phi = -\frac{4\pi\Delta\rho}{\lambda} + \phi_N = 2\pi k + \phi_N \quad (2.44)$$

Donde W es el operador de enrollado, $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$ es la diferencia en rango de las dos plataformas, ϕ_N ($-\pi, \pi$) expresa el ruido de fase aditivo, y k es el número de ambigüedad entera.

Funcionalmente, la trayectoria de integración para poder determinar la diferencia de fase en un interferograma de coordenadas (i, j) (Figura 2.19), se puede ver en la ecuación 2.45 (Hanssen, 2001):

$$S = W(\phi_{i+1,j}^w - \phi_{i,j}^w) + W(\phi_{i+1,j+1}^w - \phi_{i+1,j}^w) + W(\phi_{i,j+1}^w - \phi_{i+1,j+1}^w) + W(\phi_{i,j}^w - \phi_{i,j+1}^w) \quad (2.45)$$

Donde el valor de S puede ser 0, lo cual corresponde a un área con un gradiente normal o residuo nulo, $+1$ es un residuo positivo y -1 , es un residuo negativo. Los residuos presentes en la fase enrollada suelen estar dados fundamentalmente por la presencia de datos ruidosos, como por ejemplo el efecto generado en la señal por superficies de cuerpos de agua, regiones con inversión de terreno, regiones afectadas por decorrelación temporal o por el mismo submuestreo de los datos. Esto puede generar errores generalizados en los valores fase del interferograma desenrollado (Chen y Zebker, 2000; Hanssen, 2001; Hooper, 2006).

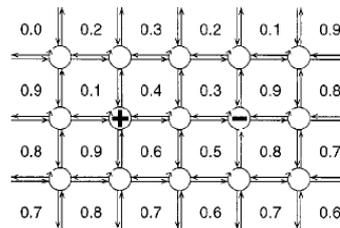


Figura 2.19: Ejemplo de una red de sumatorias de diferencias de fase en ciclos, con una búsqueda en la dirección de las manillas del reloj, con residuos positivos y negativos (centro de celda representado por los círculos) para una matriz dada (Chen y Zebker, 2000).

Muchos algoritmos de desenrollado de fase ocupando diferentes enfoques, han sido propuestos desde la interferometría SAR logrando completar el proceso (Figura 2.20) y obteniendo diversos resultados, en cuanto a precisión y eficiencia. Según Hanssen (2001), los algoritmos más utilizados han sido los siguientes:

- **Método corte de residuos:** Este método fue realizado por Goldstein et al. (1988) siendo también conocido como “Algoritmo de corte de ramas”, y está basado fundamentalmente en que todos los residuos determinados son conectados por medio de las denominadas líneas de discontinuidad (sólo cuando correspondan a residuos con diferente signo), y considerando la restricción de que todas éstas en conjunto tengan la menor dimensión posible.
- **Algoritmo de mínimos cuadrados:** Este método fue ocupado en un principio por Ghiglia y Romero, 1994 (citado en Zebker y Lu, 1998) en base al formalismo matemático desarrollado por Hunt, 1979 (citado en Zebker y Lu, 1998). Cabe señalar, que este método presenta dos modalidades: una versión denominada Ponderada y la otra No ponderada.

En términos generales, está basado en minimizar la suma del error cuadrático entre los gradientes de fase desenrollados y la estimación de gradientes en una forma global. Técnicas como las FFT son aplicadas para poder llegar a un resultado de forma eficiente, sin embargo, en ocasiones tienden a distribuir los errores de desenrollado por toda la matriz de datos (Hanssen, 2001).

- **Método del flujo de Mínimo Costo:** Este algoritmo fue creado por Costantini (1998) y considera el problema de desenrollamiento de fase, como un problema de minimización global con variables enteras. Comparando las diferencias entre el gradiente estimado y las diferencias de la fase desenrollada, se consigue obtener la diferencia $k2\pi$, con $k \in Z$ (Costantini, 1998; Hanssen, 2001).

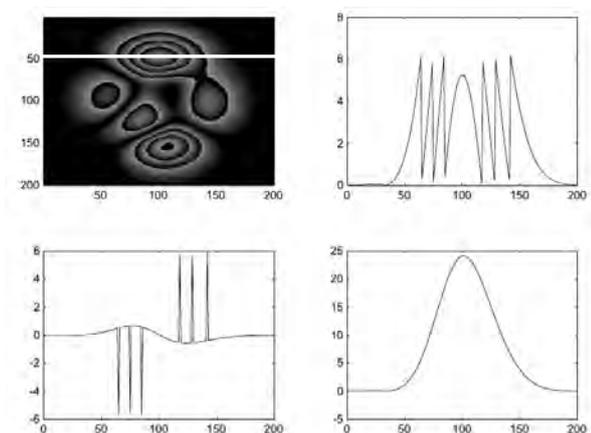


Figura 2.20: Fase desenrollada a lo largo de la transecta blanca mostrada en el interferograma: En el recuadro superior derecho se muestra la variación de la fase enrollada a lo largo de la transecta; en el recuadro inferior izquierdo, se muestra el gradiente de la fase enrollada, y finalmente en el inferior derecho, se muestra la fase desenrollada (Richards, 2009).

2.6.1. Algoritmos de Unwrapping en 3D

Como se puede ver en la sección anterior, en datos de fase 2D, las discontinuidades de fase se unen para formar redes que resultan muy similares a redes dendríticas. En series temporales interferométricas, al transformarse en un problema de 3D (considerando la dimensión temporal), es más fácil encontrar áreas con discontinuidades de fase debido a que hay más caminos potenciales que se pueden elegir, incrementando la efectividad del muestreo lo que a su vez hace decrecer las posibilidades de que existan regiones desconectadas (Hooper, 2006; Hooper et al., 2007).

En un espacio de 3D, las líneas de continuidad conforman superficies, las cuales pueden ser clasificadas como:

- **Superficies discontinuas de ciclos individuales:** Son aquellas donde la discontinuidad está dada siempre por un ciclo de fase simple ($<2\pi$). En este caso, bucles residuales ocurren en todos los bordes y ramas de la superficie y nunca dentro de la superficie misma. La superficie mas simple es una superficie abierta limitada por un borde solamente (Figura 2.21).

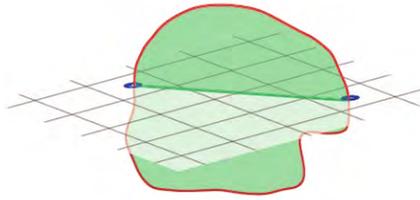


Figura 2.21: Una superficie de discontinuidad de fase simple (área verde) intersectando con un conjunto de datos en 2D. La superficie es bordeada por un bucle residual (línea de color rojo). Donde la superficie intersecta el plano 2D resulta una línea de discontinuidad (línea verde oscura) que une dos residuos mostrados en azul derivados desde la intersección del bucle residual con el conjunto de datos (Hooper, 2006).

- **Superficies discontinuas de ciclos múltiples:** Son aquellas que incluyen discontinuidades de fase mayores que un ciclo ($>2\pi$). Estas ocurren en áreas que son localmente submuestreadas o donde ocurren fenómenos como inversiones de terreno en un interferograma topográfico o superficies de ruptura en un interferograma de deformación (Figura 2.22).

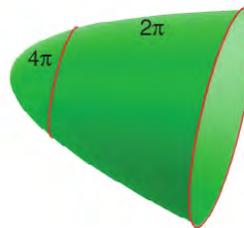


Figura 2.22: Superficie de discontinuidad múltiple (verde). Los bucles rojos representan bucles residuales, el bucle de la derecha delimita el borde una superficie y el bucle de la izquierda separa la región de discontinuidad de fase 2π de la superficie desde la región de discontinuidad 4π (Hooper, 2006).

Algoritmo 3D basado en una función de Mínimo Costo

En base a lo expuesto en las secciones 2.6 y 2.6.1, los algoritmos de desenrollado de fase están basados en la suposición que la diferencia de fase entre puntos muestreados vecinos en cualquier dimensión es generalmente menor de la mitad de un ciclo de fase.

Sin embargo, en el caso de las series de tiempo, los datos pueden presentar correlación espacial (en 2D) y adicionalmente presentar una alta decorrelación en un intervalo de tiempo determinado, debido fundamen-

talmente a la contribución en los valores de fase del retraso atmosférico (sección 2.3.3) presente en cada adquisición. Esto puede generar variaciones de muchos ciclos de fase (presentándose por ejemplo, superficies discontinuas de ciclo múltiple, sección 2.22) en un grupo de interferogramas, generando diferencias considerables en la dimensión temporal (Hooper, 2010).

En este contexto, el enfoque del algoritmo realizado por Hooper (2010)¹⁴ establece el problema de desenrollado de fase, como una serie de problemas de estimación de Máxima Probabilidad a Posteriori (MAP). Específicamente, en primer lugar, se estima la evolución temporal de la diferencia de fase entre muestras vecinas, desenrollando estas diferencias bajo la suposición clásica que consiste en una señal de deformación suave, mas un ruido aleatorio. Esas estimaciones son usadas para construir funciones de Densidad Probabilística para la diferencia de fase entre cada par de puntos de muestra vecinos en todos los interferogramas. Rutinas de optimización eficientes¹⁵, usan un enfoque de función de costo generalizada para encontrar una solución MAP aproximada, para cada interferograma.

Las funciones de costo, específicamente son derivadas desde la “a priori” Función de Densidad de Probabilidad (PDF) tomando el logaritmo negativo. En definitiva, las rutinas de optimización son usadas para buscar la solución del mínimo costo total para cada interferograma como muestra la ecuación 2.46:

$$\text{Minimizar} - \sum_k \log(f(\Delta\phi_k | \Delta\psi_k)) \quad (2.46)$$

Donde $f(\Delta\phi | \Delta\psi)$ es la función de densidad de probabilidad condicional del gradiente de fase desenrollado entre puntos vecinos, condicional en el gradiente de fase enrollado, y la suma con índice k se toma sobre todas las filas y columnas. Esto es equivalente a maximizar el total la densidad de probabilidad conjunta Hooper (2010).

¹⁴El cual está implementado en el software STaMPS/MTI.

¹⁵Como por ejemplo las implementadas en el software *SNAPHU* Hooper (2010).

3.1. Procesamiento Series de tiempo

El método desarrollado en este trabajo de investigación, en términos generales se basa en 3 etapas fundamentales:

- **Focalización de los datos:** En esta etapa se procesaron los datos Raw en formato CEOS, por medio del algoritmo Omega-K desarrollado por Cafforio et al. (1991).
- **Formación de interferogramas:** La conformación de pares de imágenes para la realización de interferogramas siguen la estrategia de procesamiento de los algoritmos PSI y SBAS, siendo posteriormente las imágenes esclavas coregistradas y remuestreadas en función de la imagen maestra seleccionada.
- **Medición de la series temporales de deformación:** En esta etapa se ocupó el método desarrollado por Hooper (2006), el cual tiene como objetivo identificar Persistent Scatterer (PS) para el método PSI y por otra parte, píxeles con Fase Filtrada con baja Decorrelación (SDFP) para el método SBAS. Específicamente para el reconocimiento de estos tipos de celdas, se realizaron básicamente tres pasos:
 - **Identificación de PS y SDFP:** En términos generales, este paso consistió en la realización de un análisis de amplitud y fase para determinar la probabilidad que tiene cada celda de resolución específica de presentar PS o SDFP.
 - **Selección de PS y SDFP:** En base a la identificación realizada en el punto anterior, se seleccionaron sólo los PS y SDFP que están presentes en el total de interferogramas obtenidos, excluyendo a aquellos que no están correlacionados espacialmente con los valores de las celdas adyacentes o vecinas.
 - **Estimación del Desplazamiento:** Finalmente, para cada uno de los PS y los SDFP definidos, se realizó el aislamiento de la señal de deformación en cada celda de resolución respectivas. Esto considera la conversión de valores en el módulo 2π a valores de fase desenrollados y la sustracción de los diferentes componentes que podrían estar interviniendo en la señal (ruido).

3.1.1. Focalización de los datos Raw

El proceso de focalización de las imágenes *Raw* se realizó con el algoritmo Omega-K, el cual según Cumming et al. (2003) consiste en 4 pasos fundamentales:

- En primera instancia, se aplica la FFT en 2D a los datos SAR, transformándolos así al dominio de las frecuencias.
- En segundo lugar, se multiplica dichos valores con la función de referencia, la cual es calculada para un sólo rango seleccionado. Este blanco referencial es correctamente focalizado, no obstante, los que se localizan en los alrededores lo son sólo parcialmente.
- Posteriormente se realiza la implementación de la interpolación Stolt, la cual completa la focalización de los blancos externos desde el blanco seleccionado como referencia, por la re-asignación del eje de frecuencia en rango.
- Y finalmente, se aplica la Transformada Rápida Inversa de Fourier (IFFT) en 2D, con lo cual los datos retornan al dominio del tiempo, obteniéndose la imagen con los datos comprimidos en ambas dimensiones.

3.1.2. Formación de interferogramas Diferenciales

El proceso de formación de interferogramas consistió en 4 sub-etapas las que corresponden específicamente a: Selección de una imagen maestra, coregistración de los pares de imágenes, generación de interferogramas complejos y finalmente el proceso de geocodificación .

- **Selección de la imagen Maestra:** El procedimiento para elegir la imagen maestra, consistió identificar la imagen que tenga el valor más alto del índice de correlación ρ_{total} (ecuación 3.1), en comparación al total de imágenes disponibles. Esta clasificación se realizó considerando los siguientes parámetros: Línea de base temporal (T), Línea de base perpendicular (B_{\perp}), y diferencia del Centroide Doppler (F_{FD}).

$$\rho_{total} = \rho_{temporal} * \rho_{espacial} * \rho_{Doppler} * \rho_{thermal} \quad (3.1)$$

$$\rho_{total} \approx \left[1 - f\left(\frac{T}{T^{cr}}\right) \right] \left[1 - f\left(\frac{B_{\perp}}{B_{\perp}^{cr}}\right) \right] \left[1 - f\left(\frac{F_{DC}}{F_{DC}^{cr}}\right) \right] \rho_{thermal} \quad (3.2)$$

$$f(x) = \begin{cases} x, & \text{para } x \leq 1, \\ 1, & \text{para } x > 1 \end{cases}$$

Donde ρ_{total} , corresponde al valor de correlación final y el superscript *cr* a los valores de los parámetros críticos, por sobre los cuales un interferograma posee una decorrelación completa.

- **Corregistración¹:** La etapa de coregistración consiste en el proceso que superpone una imagen (caso de las esclavas) con otra de referencia (imagen maestra) lo más exactamente posible. Para obtener dicho resultado, se calculan una serie de "offset", que por definición es un vector que se forma entre un punto P en la imagen maestra con coordenadas P_m (línea,píxel) y el mismo punto en la imagen esclava con coordenadas P_s (línea, píxel) como se muestra en la ecuación 3.3:

$$P_s(l, p) = P_m(l, p) + \text{offset}(l, p) \quad (3.3)$$

El proceso realizado es de carácter secuencial, y se puede sintetizar en tres etapas:

¹Para ver más detalles del algoritmo, revisar el ítem coregistración en Hooper (2006).

- **Cálculo de offset con datos orbitales:** Corresponde a la primera etapa del proceso, la cual está basada en la ocupación de archivos orbitales proporcionados por el DEOS, que se utilizan para determinar un punto referencial en la imagen maestra, que posteriormente es identificado en la imagen esclava, coregistrando el par de matrices con una precisión de 30 píxel.
- **Cálculo de offset con un píxel de precisión:** En esta etapa, sobre la imagen completa en una cantidad de ventanas definidas, los offsets entre la maestra y la esclava son estimados mediante el cálculo de correlación de los valores de amplitud de las imágenes, para coregistrar con una precisión a nivel de píxeles.
- **Cálculo de offset con una precisión subpíxel:** Finalmente, se identifica un grupo de píxeles vecinos que presenten una máxima correlación local, los cuales son armónicamente sobremuestreados para conseguir la máxima precisión a nivel subpíxel. A partir de lo anterior, el cálculo de estos offset son realizados en el dominio de las frecuencias, por lo que son implementadas las FFT.
- **Generación de interferogramas diferenciales:** Con todas las imágenes coregistradas, en base a la estrategia de cada algoritmo de series temporales ocupado, se realizan los interferogramas complejos. El procesamiento realizado, es la sustracción tanto de la fase topográfica y de la fase generada por la curvatura terrestre, con lo que se obtiene como resultado el interferograma diferencial. Cabe destacar que la sustracción de la topografía se realizó con un DEM correspondiente a Shuttle Radar Topography (SRTM), el cual posee una resolución de 3 arco segundos.

Cabe destacar, que después de la generación de interferogramas diferenciales para el caso de SBAS, se realiza un proceso de filtrado en Rango que tiene como objetivo descartar la no superposición de frecuencias Doppler en acimut.

Adicionalmente, en esta sección se sustraen los errores derivados tanto por del ángulo de vista y por el ángulo Squint.

- **Error del ángulo de vista:** Por definición, este error es característico en el proceso de series temporales y se debe fundamentalmente a que el $\Delta\theta$ o diferencia de ángulos de vista, es dependiente de cualquier diferencia entre la posición del centro de fase y el centro del píxel en dirección al rango.

En base a lo expuesto en la sección 2.2, omitiendo cualquier error en $B\cos(\theta - \omega)$, el cual está incluido en el error orbital (ecuación 3.8), se define entonces que el error $\Delta\phi_\theta$, depende sólo de $\Delta\theta$, y está dado por:

$$\Delta\phi_\theta \approx \frac{4\pi}{\lambda} B\cos(\theta - \omega)\Delta\theta = \frac{4\pi}{\lambda} B_\perp(\theta)\Delta\theta \quad (3.4)$$

Donde $B_\perp(\theta)$ es el componente perpendicular de la línea de base. Desde la geometría, $\Delta\theta$, es obviamente dependiente en precisión de la altura estimada sobre la superficie referencial, pero es también dependiente de cualquier diferencia en la posición del centro de fase del píxel que se asume cuando se realiza el interferograma aplanado:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta h \sin(\theta_i) + \xi \cos(\theta_i)}{r} \quad (3.5)$$

Donde Δh es el error en altura, ξ es la distancia horizontal del centro de fase desde la mitad del píxel en dirección de rango y θ_i es el ángulo de incidencia. Cabe destacar, que incluso si el DEM es 100 % preciso, habría todavía un error en θ , debido tanto a los offset laterales del centro de fase como a cualquier variación de altura debido a estos mismos offset.

Otra cosa importante es que metodológicamente el término $\Delta\phi_\theta$ es estimado después en el procesamiento tanto de PS y SDFP, por ende la precisión del DEM no es usualmente importante, a pesar que si es alta se reduce la ambigüedad de la estimación, por lo que es importante, en el caso donde sólo una cantidad reducida de interferogramas estén disponibles.

- **Error ángulo de Squint:** En el proceso de focalización en acimut, por defecto se asume que el centro de fase del píxel es efectivamente su centro físico. En este sentido, si el centro de fase se desvía desde el centro del píxel en dirección del acimut, por una cantidad η , se cancela cuando el ángulo de Squint es el mismo para ambas adquisiciones. Cuando el ángulo de Squint no corresponde al mismo se genera un término de error, $\Delta\phi_\theta$.

$$\Delta\phi_\theta = \frac{2\pi}{v} F_{DC} \eta \quad (3.6)$$

Donde v es la velocidad del sensor y F_{DC} , corresponde a la frecuencia del Centroide Doppler. Cabe destacar, que F_{DC} como la señal de deformación están correlacionados con el tiempo, lo que puede generar una estimación incorrecta de $\Delta\phi_\theta$, por lo que en base a la experiencia del autor, no se intentó estimar específicamente este término y en lugar se ha tratado como ruido.

- **Geocodificación ²:** Finalmente, el último paso consiste en geocodificar los interferogramas finales lo cual consiste específicamente en transformar las coordenadas del radar (rango-acimut-altura) a coordenadas en un sistema de referencia geodésico, como World Geodetic System 1984 (WGS-84), el cual está constituido por latitud, longitud y una altitud por sobre un cuerpo de referencia (elipsoide).

3.1.3. Medición de la series temporales de deformación

Identificación de PS y SDFP

Para la identificación de celdas con las características definidas, en la serie de interferogramas se realizó un análisis de los valores de amplitud y fase respectivamente. En primera instancia, se aplicó el índice de dispersión de amplitud D_A (Ferretti et al., 2001), el cual consiste específicamente en:

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \quad (3.7)$$

Donde σ_A y μ_A son la desviación estándar y el promedio de los valores de amplitud respectivamente. Según Hooper (2006), el comportamiento de los valores entre D_A y σ_ϕ (Desviación estándar de los valores de fase) cuando superan una SNR de 0.5, presentan comportamientos simétricos hasta un umbral, que para el caso de PSI corresponde a un D_A de 0.4. Por otra parte, para el caso de SBAS, el indicador $D_{\Delta A}$ corresponde a la razón entre la diferencia de la desviación estándar en amplitud entre la imagen maestra y esclava y μ_A que corresponde al promedio de la amplitud. Según (Hooper, 2008), éste ultimo es un indicador más preciso habiendo aplicado anteriormente un filtro espectral, lo cual permite tener un valor umbral más alto, el cual corresponde a 0.6.

Habiendo seleccionado un conjunto de celdas, posteriormente se realizó un análisis de fase para estimar la probabilidad que existe de encontrar un PS o SDFP en cada una de ellas. Este análisis de probabilidad, se realizó con los valores de fase enrollada $\psi_{int,x,i}$, en donde x corresponde al píxel del interferograma aplanado y topográficamente corregido i , el cual puede ser descrito como la suma de 5 términos:

$$\psi_{int,x,i} = W(\phi_{def,x,i} + \phi_{atm,x,i} + \Delta\phi_{orb,x,i} + \Delta\phi_{\theta,x,i} + \phi_{n,x,i}) \quad (3.8)$$

Donde $\phi_{def,x,i}$ es el cambio de fase debido al movimiento de la celda en dirección de la LOS, $\Delta\phi_{\theta,x,i}$ es la fase residual debido al error del ángulo de vista, $\phi_{atm,x,i}$ es la fase que se debe a la diferencia entre el retardo atmosférico en las pasadas, $\Delta\phi_{orb,x,i}$ es la fase residual por la imprecisión de las orbitas; $\phi_{n,x,i}$ es el ruido integrado por la variabilidad de dispersión, efectos termales, errores de corrección e incertezas en la posición del centro de fase en acimut; y finalmente $W\{\cdot\}$ es el operador de enrollado.

²Para ver más detalles del algoritmo, revisar el ítem *GEOCODE* en el manual del software DORIS (2008).

En esta etapa, las celdas que se buscaron, son aquellas que presenten un $|\phi_{n,x,i}|$, que sea lo suficientemente bajo, para que éste no sea capaz de obstaculizar mayormente la señal.

La variación que presentan los cuatro primeros términos de la ecuación 3.8, hace difícil identificar qué dispersores son los que presentan mejores condiciones para ser seleccionados directamente de la fase envuelta. Por lo tanto, se estimaron estos cuatro términos, los cuales fueron sustraídos, generando una estimación más aproximada de $\hat{\phi}_{n,x,i}$.

Debido a que estos componentes (tanto la deformación, el retraso atmosférico, los errores orbitales y los errores en el ángulo de vista) poseen un comportamiento espacialmente correlacionado, por medio de la aplicación de un proceso de filtrado de las celdas de resolución pertenecientes a $\psi_{x,i}$ se pudieron identificar, para ser posteriormente sustraídos.

Específicamente, este proceso consistió en la aplicación de un filtro de paso de bandas como un filtro adaptativo, combinado con un filtro de paso bajo, aplicado en el dominio de la frecuencia, como muestra la ecuación 3.9:

$$G_{x,y} = L\{x,y\} + \beta \left(\frac{H(x,y)}{\bar{H}(x,y)} \right)^\alpha \quad (3.9)$$

Donde $L(x,y)$ es un filtro de Butterworth de quinto orden (filtro adaptativo), con un corte típico de longitud de onda de 800 m, y $\bar{H}(x,y)$ es la mediana del valor de $H(x,y)$ (filtro de paso bajo), α y β son parámetros ajustables, los que por defecto tienen un valor de 1 y 0.3.

Posteriormente, el filtrado de los valores de fase, $\hat{\psi}_{int,x,i}$ como estimación enrollada de la parte espacialmente correlacionada de cada uno de los términos, son sustraídos al original $\psi_{int,x,i}$ (ecuación 3.10):

$$W(\psi_{int,x,i} - \hat{\psi}_{int,x,i}) = W(\phi_{def,x,i}^{nc} + \phi_{atm,x,i}^{nc} + \Delta\phi_{orb,x,i}^{nc} + \Delta\phi_{\theta,x,i}^{nc} + \phi_{n,x,i}^{nc}) \quad (3.10)$$

Dicha sustracción entrega como resultado general ϕ^{nc} , el cual corresponde a la parte no espacialmente correlacionada de ϕ . Los valores residuales específicos como $\phi_{def,x,i}^{nc}$, $\phi_{atm,x,i}^{nc}$ y $\phi_{orb,x,i}^{nc}$ se asumen que tienen una magnitud reducida, siendo reemplazados y simplificados por su suma $\delta_{x,i}$ (ecuación 3.11).

$$W(\psi_{int,x,i} - \hat{\psi}_{int,x,i}) = W(\Delta\phi_{\theta,x,i}^{nc} + \phi_{n,x,i}^{nc} + \delta_{x,i}) \quad (3.11)$$

En base a la ecuación 3.4, se asume que existe una relación lineal entre $\Delta\phi_{\theta,x,i}$ y $\Delta\theta_x$ (siendo este último término la diferencia de ángulos de vista). Siempre que $\Delta\phi_{\theta,x,i}^{nc}$ posea aproximadamente los mismos valores en frecuencia para todo i , se deduce que la misma relación será entre $\Delta\phi_{\theta,x,i}^{nc}$ y $\Delta\theta_x^{nc}$, por lo cual sustituyendo $\Delta\phi_{\theta,x,i}^{nc}$ se obtiene:

$$W(\psi_{int,x,i} - \hat{\psi}_{int,x,i}) = W\left(\frac{4\pi}{\lambda} B_{\perp,x,i} \Delta\theta_x^{nc} + \phi_{n,x,i}^{nc} + \delta_{x,i}\right) \quad (3.12)$$

El término $B_{\perp,x,i}$ no se espera que esté correlacionado con $\phi_{n,x,i}^{nc}$ o $\delta_{x,i}$, y se estima $\Delta\hat{\theta}_x^{nc}$ por el cálculo de mínimos cuadrados. La contribución de la imagen maestra a $\phi_{n,x,i}^{nc} + \delta_{x,i}$ estará presente en todos los interferogramas, causando un offset constante de $\phi^{m,nc}$.

Con la estimación realizada para $\Delta\hat{\theta}_x^{nc}$, se deriva $\Delta\hat{\phi}_{\theta,x,i}^{nc}$, la cual se sustrae a la ecuación 3.11 obteniendo:

$$W(\psi_{int,x,i} - \psi_{int,x,i} - \Delta\hat{\phi}_{\theta,x,i}^{nc}) = W(\phi_{n,x,i}^{nc} + \delta'_{x,i}) \quad (3.13)$$

Donde $\delta'_{x,i} = \delta_{x,i} + \Delta\phi_{\theta,x,i}^{nc} - \Delta\hat{\phi}_{\theta,x,i}^{nc}$.

A partir de estos resultados, la parte filtrada es ocupada como input para el cálculo de variación de fase residual para el grupo de dispersores pre-seleccionados, la cual está definida como:

$$\gamma = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \exp^{j(\psi_{int,x,i} - \psi_{int,x,i} - \Delta\phi_{\theta,x,i}^{nc})} \right| \quad (3.14)$$

Donde N es el número de interferogramas. Se asume que $\phi_{n,x,i} \approx \phi_{n,x,i}^{nc}$ y $\delta_{x,i} \approx 0$, por lo que γ_x es una medida del nivel de ruido de fase y un indicador de si la celda corresponde tanto a un PS en el caso de PSI y un SDFP en el caso de SBAS. Cabe señalar que lo que mide γ_x , es similar a la magnitud de coherencia, salvo que los valores de amplitud no están incluidos.

Selección de PS y SDFP

Una vez que se tienen convergencia en las estimaciones para la estabilidad de fase de cada píxel, se seleccionan las celdas de resolución que presenten mayor estabilidad con un umbral determinado por la Fracción de Falsos Positivos (FFP).

Teóricamente existe una correlación entre γ_x y la probabilidad que un píxel x sea definido tanto como un PS o un SDFP. En esta etapa, el conjunto total de celdas es definida como la unión de dos grandes clasificaciones: una que contiene las celdas con valores de fase permanente, definida como A y otra que contiene el resto de celdas con valores que no presentan el atributo mencionado, definidos como el grupo B . Como se muestra en la ecuación 3.15, $p(\gamma_x)$ es la suma ponderada de la densidad probable de $p_A(\gamma_x)$ y la de $p_B(\gamma_x)$:

$$p(\gamma_x) = \alpha p_A(\gamma_x) + (1 - \alpha) p_B(\gamma_x) \quad (3.15)$$

Donde $0 \leq \alpha \leq 1$. Según el autor, adicionalmente existe una correlación alta entre la varianza de los valores amplitud $\hat{D}_{A,x}$ (ecuación 3.7) y la estabilidad de fase γ_x (ecuación 3.14), lo que determina que el cálculo de la probabilidad se puede realizar de una forma más precisa ocupando ambas variables.³

Como primer paso, se categorizaron los píxeles por $\hat{D}_{A,x}$ garantizando que haya un mínimo de 10^4 en cada clasificación, y luego se categorizaron por γ_x en incrementos de 0,01, resultando una distribución probabilística $p(\gamma_x, \hat{D}_{A,x})$. Para cada categoría en $\hat{D}_{A,x}$, se estimó el término α (ecuación 3.15). Si las celdas con un valor de γ_x se encuentran por sobre un límite dado, γ_{umbral} las celdas son seleccionadas, definiendo el número de las celdas que no son ni PS ni SDFP como:

$$(1 - \alpha(\hat{D}_{A,x})) \int_{\gamma_{umbral}}^1 p_B(\gamma_x) d\gamma_x \quad (3.16)$$

Donde $p_B(\gamma_x)$ es la distribución probabilística para celdas con una fase aleatoria.

Se determina así, $\gamma_{umbral}(\hat{D}_{A,x})$ para cada categoría $\hat{D}_{A,x}$ de tal manera que la fracción de píxeles que no se seleccionen (falsos positivos) sean aceptables para la aplicación:

$$\frac{(1 - \alpha(\hat{D}_{A,x})) \int_{\gamma_{umbral}}^1 p_B(\gamma_x) d\gamma_x}{\int_{\gamma_{umbral}}^1 p(\gamma_x, \hat{D}_{A,x}) d\gamma_x} = q \quad (3.17)$$

Donde q es la fracción aceptable específica de falsos positivos. Como se ha planteado, se espera que generalmente γ_x , que es una medida de estabilidad de fase disminuya con el incremento de $\hat{D}_{A,x}$. Esto implica que cuando $\hat{D}_{A,x}$ aumenta, $p(\gamma_x, \hat{D}_{A,x})$ se inclinará a valores bajos de γ_x . El efecto neto en $\gamma_{umbral}(\hat{D}_{A,x})$ es

³Las primeras metodologías realizadas por el autor, sólo contemplaban la determinación de la probabilidad de una celda, en base a los valores de γ_x .

aumentar con el incremento de $\hat{D}_{A,x}$. Empíricamente, existe una relación aproximadamente lineal, es decir, $\gamma_{umbra} = k(\hat{D}_A)$, donde k es una constante. Por medio de un ajuste para k por la inversión de mínimos cuadrados, se seleccionaron finalmente píxeles que cumplieran la norma $\gamma_x > kD_{A,x}$.

Estimación de desplazamiento

Después de haber seleccionado, tanto los PS y SDFP, se sustraen todas las celdas con un alto contenido de ruido y se retorna a la fase enrollada de los interferogramas $\psi_{int,x,i}$ (ecuación 3.8). En este paso, los valores de fase fueron desenrollados⁴ para que posteriormente se realice la estimación y sustracción del error de ángulo de vista espacialmente correlacionado, el error atmosférico y orbital de la imagen maestra y las rampas orbitales de cada interferograma.

• Fase de Unwrapping

En esta etapa del proceso, se ocupó el algoritmo desarrollado por Hooper (2010). En términos generales la aplicación de este algoritmo consiste en las siguientes etapas:

- En primer lugar, se interpola primero cada interferograma en el dominio del espacio usando un algoritmo de vecinos más cercano. En base a dichos valores, se calcula la diferencia de fase entre celdas vecinas que no fueron interpoladas desde el mismo punto en todos los interferogramas considerados.
- Posteriormente en la dimensión temporal, a los puntos existentes se aplica la triangulación de Delaunay y se calcula la diferencia de fase entre los valores enrollados (en el sentido de las manillas del reloj). A continuación, se sustraen los siguientes términos remanentes: la contribución de la imagen maestra a $(\phi_{atm,x,i} + \Delta\phi_{orb,x,i})$, la cual está presente en todos los interferogramas considerados; y la contribución de la imagen esclava a $(\phi_{atm,x,i} + \Delta\phi_{orb,x,i})$ y $\Delta\phi_{\theta,x,i}$.

Para el caso de la imagen maestra, a las diferencias de fase en la dimensión temporal se les aplica un filtro de paso bajo⁵ por convolución con una función gaussiana, siendo el ancho de ésta un valor que sea menor que el tiempo sobre el cual la tasa de deformación esperada varíe; y por otra parte, en lo que respecta a la contribución de la imagen esclava, a la misma diferencia de celdas vecinas se le aplica un filtro de paso alto⁶ en la dimensión temporal, mediante una convolución ocupando una función gaussiana bidimensional, con un ancho aproximado de 50 m para excluir los valores que presentan píxeles aislados.

- Los resultados obtenidos del proceso de filtrado en tiempo son usados para construir funciones de Densidad de Probabilidad a priori con las diferencias de fase desenrolladas entre celdas vecinas en cada interferograma. En el caso donde celdas vecinas estén interpoladas desde la misma medida de fase, la PDF será una función Delta de Dirac, es decir, la probabilidad de una diferencia de fase que no sea igual a 0 es 0. Finalmente, en todos los otros casos, la PDF será un producto normalizado de una PDF gaussiana y una función *comb*. El propósito de multiplicar por una función *comb* es hacer cumplir la congruencia, en otras palabras, para asegurar que la fase desenrollada pueda sólo ser igual a la fase enrollada, más un número entero de ciclos. Los valores más altos son $\phi + 2n\pi$, donde ϕ es la fase enrollada. Funciones de costo son derivadas desde las PDF a priori tomando el logaritmo negativo. Las rutinas de optimización realizadas con el software *SNAPHU* son entonces usadas para buscar la solución de costo total mínimo (ecuación 2.46, en la sección 2.6.1).

⁴ Ambos tipos de series de tiempo con el mismo algoritmo.

⁵ Un filtro pasa bajo corresponde a un filtro caracterizado por permitir el paso de las frecuencias más bajas y atenuar las frecuencias más altas.

⁶ Al contrario que en el caso de los filtros de paso bajo, un filtro paso alto permite el paso de las frecuencias más altas y atenúa las frecuencias más bajas.

Adicionalmente para el caso de SBAS, el software STaMPS/MTI no considera la realización posterior a la etapa de desenrollado de fase, de una inversión de los valores usando el método de Valor de Descomposición Singular (SVD). Como no hay grupos aislados de interferogramas, los valores de la fase desenrollada son invertidos mediante mínimos cuadrados. Posteriormente, para comprobar que los valores de fase de todos los interferogramas considerados contribuyan al resultado final de forma consistente, se calcula la fase residual entre éstos y la fase determinada por el modelo de interferogramas con uno de ellos que ejerce como maestro. Estos valores residuales que tienen valores superiores a 2π , son esperados para celdas individuales que pueden presentar errores locales de desenrollado; por ende, si se observan residuales espacialmente correlacionados (grupo de celdas cercanas entre sí) corresponden a un error sistemático del desenrollado de fase. Si este es el caso, existen problemas en uno o más interferogramas, los cuales pueden ser identificados y eliminados a partir de los resultados de este proceso.

Focalización de las Imágenes SAR y Formación de Interferogramas

4.1. Focalización de imágenes SAR.

El conjunto de datos ocupados corresponde específicamente a 48 imágenes ERS-2, las cuales se encuentran entre los años 2000 y 2009, con una órbita descendente. Cabe señalar, que todas las adquisiciones fueron realizadas en horario Universal Time Cordinated (UTC) que promedió las 14:33:00 hrs.

| Misión | Fecha | Frecuencia Centroides Doppler | Misión | Fecha | Frecuencia Centroides Doppler Mz |
|--------|----------|-------------------------------|--------|----------|----------------------------------|
| ERS-2 | 20000907 | -690.974 | ERS-2 | 20050519 | -45.00 |
| ERS-2 | 20001012 | 432.70 | ERS-2 | 20050623 | -994.93 |
| ERS-2 | 20001116 | 424.88 | ERS-2 | 20050728 | 86.57 |
| ERS-2 | 20001221 | 743.86 | ERS-2 | 20050901 | -112.58 |
| ERS-2 | 20020425 | 73.10 | ERS-2 | 20051215 | 187.65 |
| ERS-2 | 20020704 | 904.46 | ERS-2 | 20060119 | -346.86 |
| ERS-2 | 20020808 | 536.72 | ERS-2 | 20060223 | 281.36 |
| ERS-2 | 20020912 | -936.79 | ERS-2 | 20060504 | 344.57 |
| ERS-2 | 20021017 | 77.23 | ERS-2 | 20060608 | -424.15 |
| ERS-2 | 20030306 | -104.33 | ERS-2 | 20060713 | 421.27 |
| ERS-2 | 20030410 | -712.24 | ERS-2 | 20060817 | -509.92 |
| ERS-2 | 20030515 | -856.82 | ERS-2 | 20070104 | -442.47 |
| ERS-2 | 20030619 | 373.87 | ERS-2 | 20070524 | -341.19 |
| ERS-2 | 20030724 | 623.50 | ERS-2 | 20070628 | 236.09 |
| ERS-2 | 20030828 | -357.85 | ERS-2 | 20070802 | 353.29 |
| ERS-2 | 20031211 | -407.13 | ERS-2 | 20071220 | 96.22 |
| ERS-2 | 20040325 | -616.44 | ERS-2 | 20080124 | 940.84 |
| ERS-2 | 20040429 | 89.95 | ERS-2 | 20080403 | 934.49 |
| ERS-2 | 20040603 | -710.23 | ERS-2 | 20080612 | 884.18 |
| ERS-2 | 20040708 | -228.43 | ERS-2 | 20080717 | -519.00 |
| ERS-2 | 20040812 | 801.62 | ERS-2 | 20090108 | -428.08 |
| ERS-2 | 20050310 | 213.89 | ERS-2 | 20090423 | 452.07 |
| ERS-2 | 20050414 | -167.40 | ERS-2 | 20091224 | -848.765 |

Tabla 4.1: Conjunto de datos SAR, con valores de Centroides Doppler, procesados con el algoritmo Range Doppler.

En el proceso de focalización de las imágenes, el cual en primera instancia, se realizó por defecto con STaMPS/MTI, ocupando específicamente el algoritmo *Range Doppler* (Ver tabla 4.1), se presentó la problemática de que en algunos casos, no se consiguió obtener como resultado una imagen focalizada en estado óptimo. Debido a esta situación se focalizó de forma alternativa con el software ocupado por Euillades et al.

(2011), el cual utiliza el algoritmo *Omega K*. Los resultados del proceso para todo el conjunto de datos fueron satisfactorios (Ejemplos de este tipo de casos se pueden ver en la figura 4.1), pudiendo así contar con la totalidad de imágenes para el procesamiento de interferogramas (Ver tabla 4.2).

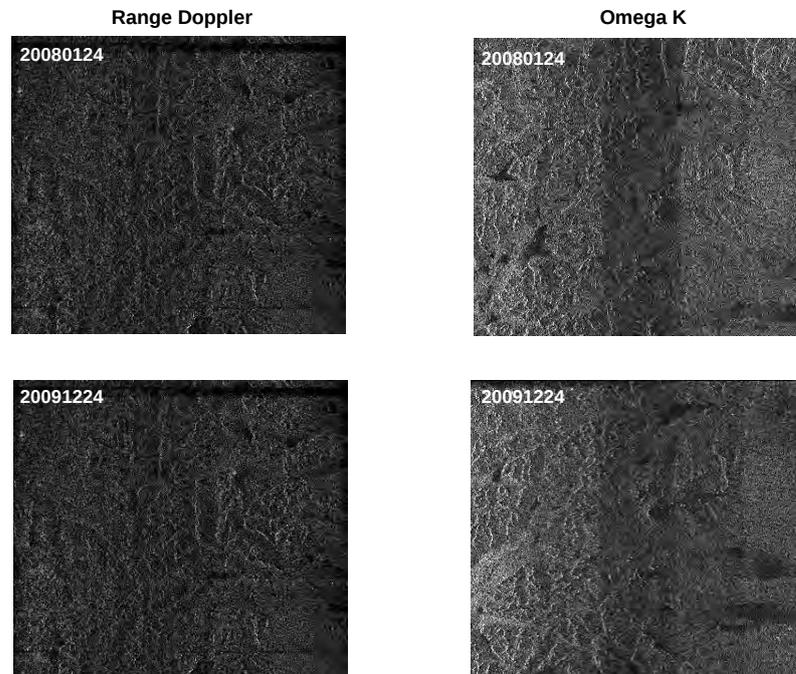


Figura 4.1: Casos específicos de datos que no fueron focalizados satisfactoriamente por el algoritmo *Range Doppler*. Imágenes con un factor de Multilook en acimut de 5; y con un factor de Multilook en rango de 1 - Resolución 25 metros.

En base a lo observado, los datos que tuvieron problemas de enfoque, correspondieron fundamentalmente a aquellos que presentaron los valores de frecuencia del Centroide Doppler más extremos (positivos y negativos). Según Cumming et al. (2003), el algoritmo *Omega k* posee la habilidad de procesar datos adquiridos sobre amplias aperturas en acimut o elevados ángulos Squint, lo cual explicaría los mejores resultados obtenidos comparativamente con el algoritmo *Range Doppler*.

4.1 FOCALIZACIÓN DE IMÁGENES SAR.

| Misión | Fecha | Frecuencia Centroides Doppler | Misión | Fecha | Frecuencia Centroides Doppler Mz |
|--------|----------|-------------------------------|--------|----------|----------------------------------|
| ERS-2 | 20000907 | -692.767 | ERS-2 | 20050519 | -3321.48 |
| ERS-2 | 20001012 | -1225.52 | ERS-2 | 20050623 | -2667.82 |
| ERS-2 | 20001116 | -1228.58 | ERS-2 | 20050728 | 60.7535 |
| ERS-2 | 20001221 | -922.013 | ERS-2 | 20050901 | -1759.15 |
| ERS-2 | 20020425 | 3300.49 | ERS-2 | 20051215 | -1467.18 |
| ERS-2 | 20020704 | 2470.25 | ERS-2 | 20060119 | -1989.74 |
| ERS-2 | 20020808 | 3748.55 | ERS-2 | 20060223 | 374.654 |
| ERS-2 | 20020912 | -2574.77 | ERS-2 | 20060504 | -1318.26 |
| ERS-2 | 20021017 | -4848.82 | ERS-2 | 20060608 | -2070.73 |
| ERS-2 | 20030306 | 1493.78 | ERS-2 | 20060713 | -2868.05 |
| ERS-2 | 20030410 | -2350.89 | ERS-2 | 20060817 | -531.063 |
| ERS-2 | 20030515 | -2497.98 | ERS-2 | 20070104 | -3710.89 |
| ERS-2 | 20030619 | -2912.34 | ERS-2 | 20070524 | -1998.51 |
| ERS-2 | 20030724 | -1039.07 | ERS-2 | 20070628 | -3051.71 |
| ERS-2 | 20030828 | -2003.72 | ERS-2 | 20070802 | -2937.11 |
| ERS-2 | 20031211 | -5303.47 | ERS-2 | 20071220 | -3186.70 |
| ERS-2 | 20040325 | -634.286 | ERS-2 | 20080124 | 2512.32 |
| ERS-2 | 20040429 | -1563.78 | ERS-2 | 20080403 | 838.217 |
| ERS-2 | 20040603 | -3979.04 | ERS-2 | 20080612 | 746.309 |
| ERS-2 | 20040708 | -3501.31 | ERS-2 | 20080717 | -2154.27 |
| ERS-2 | 20040812 | 757.773 | ERS-2 | 20090108 | -3701.56 |
| ERS-2 | 20050310 | -3076.28 | ERS-2 | 20090423 | -1212.69 |
| ERS-2 | 20050414 | -3448.11 | ERS-2 | 20091224 | -4119.46 |

Tabla 4.2: Conjunto de datos SAR, con los respectivos valores de frecuencia del Centroides Doppler, focalizados por el algoritmo *Omega k*.

Posteriormente al proceso de focalización del conjunto de datos, se realizó la primera selección de las imágenes, que obedece a lo expuesto por Pritchard y Simons (2004), que plantearon que el problema principal del área de estudio corresponde al alto grado de decorrelación temporal, producto del comportamiento dinámico y variable de las coberturas presentes, específicamente de los parches vegetacionales en la serie de pendientes que rodean al cordón volcánico y a las coberturas nivales estacionales en la parte superior del mismo. Debido a lo anterior, se consideraron inicialmente los datos correspondientes a los meses estivales del área (entre Enero y Mayo específicamente) y aquellas imágenes en donde la cobertura nival que se presenta en la parte superior del cordón volcánico, no tuviera un área considerable. Esta selección se realizó interpretando y comparando los valores de amplitud de cada imagen ¹, con datos ópticos pertenecientes a la plataforma *Landsat*, disponibles en distintas fechas, los cuales se encuentran en el catálogo del Earth Resources Observation Systems (EROS) perteneciente al U.S. Geological Survey (USGS).²

En la figura 4.2, se puede apreciar un ejemplo de las imágenes que se descartaron en primera instancia del conjunto de datos, debido a que se detectó que la parte superior del cordón volcánico se encuentra cubierta por nieves estacionales. Generalmente, esta cobertura aparece con valores de amplitud bajos, lo que se interpreta como una superficie carente de textura (característica de las nieves estacionales, por lo que el mecanismo de interacción predominante es la reflexión especular).

Como consecuencia de este proceso de selección, el conjunto de datos se redujo a 31 imágenes. Con esta información se realizarán los conjuntos de interferogramas diferenciales respectivos, según las pautas de los algoritmos de series temporales interferométricas en análisis (Ver tabla 4.3).

¹Los valores de amplitud corresponden a : $A = \sqrt{y^2 + \psi^2}$

²Sitio web del catálogo: <http://glovis.usgs.gov/>

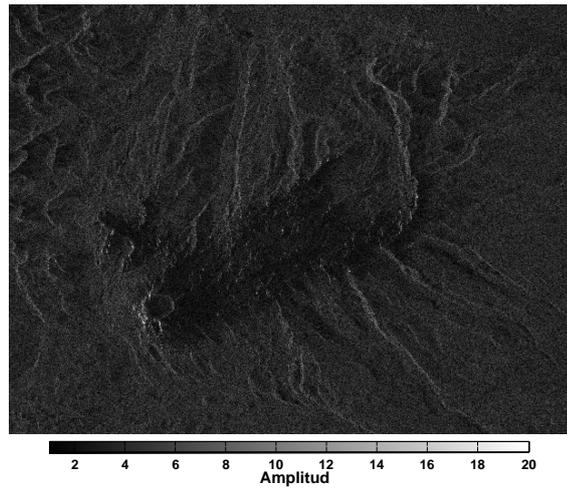


Figura 4.2: Imagen en coordenadas SAR (órbita descendente) correspondiente al 12 de Noviembre del año 2000, la cual presenta una cobertura de nieves estacionales importante en el área superior del Cordón Cauille (valores de amplitud mas bajos observados en el centro de la imagen). Imagen con un factor de Multilook en acimut de 5; y con un factor de Multilook en rango de 1 - Resolución 25 metros

| Misión | Fecha | Frecuencia Centroide Doppler | Misión | Fecha | Frecuencia Centroide Doppler Mz |
|--------|----------|------------------------------|--------|----------|---------------------------------|
| ERS-2 | 20001116 | -1228.58 | ERS-2 | 20060119 | -1989.74 |
| ERS-2 | 20001221 | -922.013 | ERS-2 | 20060223 | 374.654 |
| ERS-2 | 20030306 | 1493.78 | ERS-2 | 20060504 | -1318.26 |
| ERS-2 | 20030410 | -2350.89 | ERS-2 | 20060608 | -2070.73 |
| ERS-2 | 20030515 | -2497.98 | ERS-2 | 20060713 | -2868.05 |
| ERS-2 | 20030619 | -2912.34 | ERS-2 | 20070104 | -3710.89 |
| ERS-2 | 20031211 | -5303.47 | ERS-2 | 20070524 | -1998.51 |
| ERS-2 | 20040325 | -634.286 | ERS-2 | 20070628 | -3051.71 |
| ERS-2 | 20040429 | -1563.78 | ERS-2 | 20071220 | -3186.70 |
| ERS-2 | 20040603 | -3979.04 | ERS-2 | 20080124 | 2512.32 |
| ERS-2 | 20040708 | -3501.31 | ERS-2 | 20080612 | 746.309 |
| ERS-2 | 20050310 | -3076.28 | ERS-2 | 20080717 | -2154.27 |
| ERS-2 | 20050414 | -3448.11 | ERS-2 | 20090108 | -3701.56 |
| ERS-2 | 20050519 | -3321.48 | ERS-2 | 20090423 | -1212.69 |
| ERS-2 | 20050728 | 60.7535 | ERS-2 | 20091224 | -4119.46 |
| ERS-2 | 20051215 | -1467.18 | | | |

Tabla 4.3: Conjunto de datos SAR, seleccionados para la realización de interferogramas del área de estudio.

Cabe destacar, que posteriormente a la focalización de los archivos *Raw*, en función de la ubicación promedio del área de interés en cada una de la imágenes focalizadas y a los recursos informáticos disponibles, se acotó la cobertura de dicha base de datos a una matriz de 25000 líneas y 5000 píxeles (en resolución 1:1).

4.2. Formación de interferogramas diferenciales.

Como primer paso para la realización de los interferogramas, para los distintos algoritmos de la series temporales se determinó la imagen maestra, bajo un procedimiento común, el cual consiste en determinar cuál de las imágenes del conjunto de datos tiene el índice de correlación más alto (Ver capítulo 3, ecuación 3.2). Siguiendo los requerimientos del índice (para ambos algoritmos), se consideraron los siguientes valores críticos: $T^c=1500$ días (4 años), $B_{\perp}^c=400$ m y $F_{DC}^c=1000$ Hz³; adicionalmente se asumió que el ruido termal ($\rho_{thermal}$) posee un valor constante.

³Valores analizados y discutidos en base al trabajo de Euillades et al. (2011).

| Imágenes | Índice ρ |
|-----------------|---------------------------------|
| 20060504 | 2.86 |
| 20060608 | 2.71 |
| 20070104 | 2.62 |
| 20060119 | 2.60 |
| 20070524 | 2.55 |
| 20050310 | 2.47 |

Tabla 4.4: Imágenes que presentaron el índice ρ más alto en el conjunto de datos ERS-2.

Como se puede apreciar en la tabla 4.4, dentro de el conjunto de datos, en función de los 3 parámetros que considera el índice de correlación, la imagen que obtuvo el valor más alto fue la correspondiente al 4 de Mayo del año 2006, definiéndose así como la imagen maestra.

Posteriormente, se realizó el proceso de coregistración de cada una de las imágenes esclavas con la imagen maestra. Cabe señalar que en este proceso, específicamente en la primera parte que corresponde al cálculo de off-set con valores orbitales, éstos se tuvieron que realizar de forma manual. Este procedimiento consistió en identificar un punto de la imagen maestra, ver las coordenadas que tiene en la matriz de datos (número de fila y columna) para posteriormente determinar la diferencia que tiene con las coordenadas del mismo de punto en la imagen esclava. Cabe destacar, que esto se llevó a cabo, ya que los archivos orbitales realizados por el DEOS, no generaron una coregistración adecuada, que permitiera realizar las siguientes etapas de mayor precisión.

| ID | Líneas | Píxeles | Coherencia | Offset - Líneas | Offset - Píxeles |
|-----------|---------------|----------------|-------------------|------------------------|-------------------------|
| 0 | 13643 | 2675 | 0.375874 | -4770 | 0 |
| 1 | 13643 | 2896 | 0.400689 | -4770 | 0 |
| 2 | 13643 | 3118 | 0.4199 | -4770 | 0 |
| 3 | 13643 | 3339 | 0.377896 | -4770 | -1 |
| 4 | 13643 | 3561 | 0.403784 | -4769 | -1 |
| 5 | 13875 | 2833 | 0.425184 | -4770 | 0 |
| 6 | 13875 | 3055 | 0.417308 | -4770 | 0 |
| 7 | 13875 | 3276 | 0.394551 | -4770 | -1 |
| 8 | 13875 | 3497 | 0.381366 | -4769 | -1 |
| 9 | 14106 | 2770 | 0.412789 | -4770 | 0 |
| 10 | 14106 | 2991 | 0.40982 | -4770 | 0 |
| 11 | 14106 | 3213 | 0.386209 | -4770 | 0 |
| 12 | 14106 | 3434 | 0.375625 | -4769 | -1 |

Tabla 4.5: Offset de líneas y píxeles en la etapa de precisión a nivel de 1 píxel.

| ID | Posición- Líneas | Posición - Píxeles | Offset - Líneas | Offset - Píxeles | Coherencia |
|----|------------------|--------------------|-----------------|------------------|------------|
| 0 | 12651 | 2451 | -4768.78 | 0.84 | 0.19 |
| 1 | 12651 | 2510 | -4770.38 | 0.69 | 0.37 |
| 2 | 12651 | 2570 | -4770.19 | 0.47 | 0.27 |
| 3 | 12651 | 2629 | -4768.62 | 0.34 | 0.32 |
| 4 | 12651 | 2689 | -4769.84 | 0.28 | 0.16 |
| 5 | 12651 | 2748 | -4770.16 | -0.22 | 0.25 |
| 6 | 12651 | 2807 | -4771.44 | 0.12 | 0.36 |
| 7 | 12651 | 2867 | -4771.34 | 0.47 | 0.25 |
| 8 | 12651 | 2926 | -4769.34 | 0.16 | 0.29 |
| 9 | 12651 | 2986 | -4767.41 | 0.50 | 0.41 |
| 10 | 12651 | 3045 | -4768.66 | -0.22 | 0.37 |
| 11 | 12651 | 3104 | -4768.66 | 0.06 | 0.20 |
| 12 | 12651 | 3164 | -4771.84 | -0.03 | 0.23 |
| 13 | 12651 | 3223 | -4769.25 | -0.22 | 0.28 |
| 14 | 12651 | 3283 | -4762.22 | -0.22 | 0.40 |
| 15 | 12651 | 3342 | -4749.28 | 0.41 | 0.48 |
| 16 | 12651 | 3401 | -4768.72 | -0.16 | 0.40 |
| 17 | 12651 | 3461 | -4770.62 | -0.03 | 0.17 |
| 18 | 12651 | 3520 | -4769.06 | -0.09 | 0.27 |
| 19 | 12651 | 3580 | -4768.75 | -0.41 | 0.30 |
| 20 | 12651 | 3639 | -4768.69 | -0.53 | 0.26 |
| 21 | 12651 | 3698 | -4768.75 | -0.66 | 0.18 |
| 22 | 12651 | 3758 | -4768.22 | -0.91 | 0.42 |
| 23 | 12651 | 3817 | -4769.56 | -1.09 | 0.54 |
| 24 | 12710 | 2480 | -4768.81 | 0.72 | 0.25 |
| 25 | 12710 | 2539 | -4769.12 | 0.19 | 0.45 |

Tabla 4.6: Offset correspondientes a 25 píxeles, en la etapa de precisión a nivel subpíxel.

En la tabla 4.5, se puede apreciar para el caso de la imagen del 15 de Diciembre del año 2005, los offset calculados manualmente para la coregistración con precisión de 1 píxel con respecto a la imagen maestra. Cabe destacar, que el número de ventanas para la realización de este proceso tuvo que ser aumentada a 60 (que corresponde al doble del valor que trae por defecto el archivo *COARSE.DORISIN* correspondiente al software DORIS) para conseguir un número aceptable de puntos con valores de correlación aceptables. En función de este desplazamiento, se realiza finalmente el proceso de coregistración fina (tabla 4.6), en el cual se utilizaron 2000 ventanas para calcular el desplazamiento a nivel subpíxel. Se revisaron todos los valores de correlación para cada una de las imágenes y existe una gran variabilidad de ellos, estando generalmente por sobre 0.12 que es el umbral mínimo (Manual DORIS, 2008). Sin embargo, a pesar de cumplir con esta condición, en términos generales no tienen valores altos (columna correlación, tabla 4.6 por lo que se puede concluir que el proceso de coregistración completo dado los valores de baja coherencia entre los datos, no fue del todo preciso, lo que podría influir en parte, en los resultados que presenten los interferogramas formados.

Posteriormente al proceso de coregistración, se realizaron los interferogramas diferenciales, para lo cual se sustrajo la fase topográfica con un DEM⁴ con las coordenadas del área de estudio, perteneciente a la misión SRTM (Figura 4.3) teniendo como resolución espacial 90 m (3 arco-segundos⁵).

⁴Este procedimiento se desarrolló mediante el programa *construct_dem.sh* perteneciente al software DORIS.

⁵Unidad de medida angular. Su valor equivale a 1/3600 del grado sexagesimal.

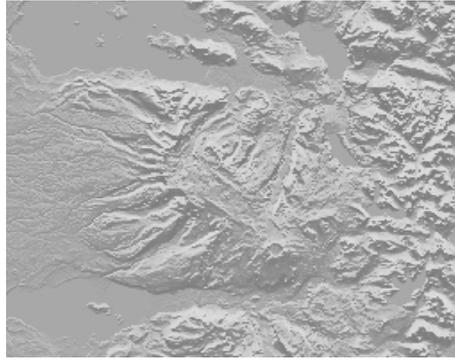


Figura 4.3: Modelo de Elevación Digital (DEM), perteneciente a la misión SRTM utilizado para la sustracción de la fase topográfica.

4.2.1. Formación de Interferogramas diferenciales - PSI

En lo que respecta al método PSI, como se muestra en la figura 4.4, teniendo como imagen maestra a la definida por el índice de correlación, se generaron 29 interferogramas diferenciales. En la tabla 4.7, se muestran específicamente la líneas de base perpendiculares para cada uno de los interferogramas realizados.

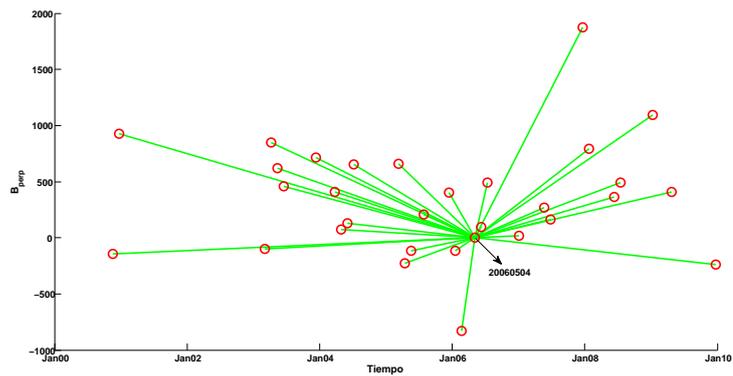


Figura 4.4: Líneas de base para el procesamiento de Persistent Scatterer Interferometry (PSI).

| ID | Órbita | Plataforma | Fecha | Línea de base Perpendicular |
|----|--------|------------|----------|-----------------------------|
| 1 | 29151 | ERS-2 | 20001116 | -142 m |
| 2 | 29652 | ERS-2 | 20001221 | 929 m |
| 3 | 41175 | ERS-2 | 20030306 | -100 m |
| 4 | 41676 | ERS-2 | 20030410 | 850 m |
| 5 | 42177 | ERS-2 | 20030515 | 618 m |
| 6 | 42678 | ERS-2 | 20030619 | 456 m |
| 7 | 45183 | ERS-2 | 20031211 | 717 m |
| 8 | 46686 | ERS-2 | 20040325 | 409 m |
| 9 | 47187 | ERS-2 | 20040429 | 76 m |
| 10 | 47688 | ERS-2 | 20040603 | 130 m |
| 11 | 48189 | ERS-2 | 20040708 | 652 m |
| 12 | 51696 | ERS-2 | 20050310 | 659 m |
| 13 | 52197 | ERS-2 | 20050414 | -227 m |
| 14 | 52698 | ERS-2 | 20050519 | -118 m |
| 15 | 53700 | ERS-2 | 20050728 | 205 m |
| 18 | 55704 | ERS-2 | 20051215 | 401 m |
| 17 | 56205 | ERS-2 | 20060119 | -117 m |
| 18 | 56706 | ERS-2 | 20060223 | -832 m |
| 19 | 58209 | ERS-2 | 20060608 | 95 m |
| 20 | 58710 | ERS-2 | 20060713 | 489 m |
| 21 | 61215 | ERS-2 | 20070104 | 20 m |
| 22 | 63219 | ERS-2 | 20070524 | 270 m |
| 23 | 63720 | ERS-2 | 20070628 | 163 m |
| 24 | 66225 | ERS-2 | 20071220 | 1875 m |
| 25 | 66726 | ERS-2 | 20080124 | 792 m |
| 26 | 68730 | ERS-2 | 20080612 | 366 m |
| 27 | 69231 | ERS-2 | 20080717 | 490 m |
| 28 | 71736 | ERS-2 | 20090108 | 1092 m |
| 29 | 73239 | ERS-2 | 20090423 | 408 m |
| 30 | 76746 | ERS-2 | 20091224 | -241 m |

Tabla 4.7: Líneas de base perpendiculares, correspondientes a cada interferograma desarrollado para PSI.

Como se puede apreciar en las figuras 4.5 y 4.6, la mayoría de los interferogramas presentan una gran cantidad de ruido, el cual no permite detectar un proceso de deformación en el área de estudio. Por ejemplo, en el caso del interferograma diferencial formado con la imagen esclava del 4 de Enero del año 2007, el cual tiene una línea de base perpendicular de 20 m, se puede apreciar mayormente ruido a pesar de tener una geometría teóricamente muy adecuada y un intervalo de tiempo que está dentro de los valores críticos. Por otro lado, un caso que presentó valores aceptables corresponde al interferograma que tiene como imagen esclava la correspondiente al 19 de Enero del año 2006. Este posee una línea de base de -117 m, y muestra que en la parte superior del cordón Cauile (a partir de los 1500 m de altura promedio) se detecta un proceso de deformación, el cual no puede interpretarse fácilmente ya que en las franjas distribuidas no se presenta ninguna estructura definida.

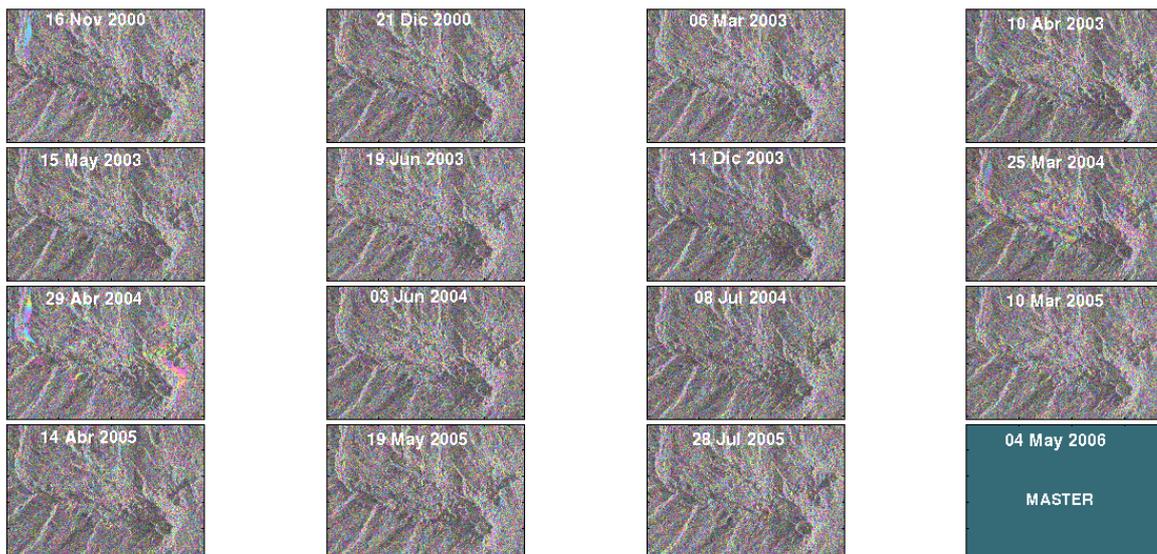


Figura 4.5: Interferogramas diferenciales entre el 16 de Noviembre del año 2000, y el 04 de Mayo del año 2006 (Fecha imagen maestra); con un factor de Multilook en acimut de 20; y con un factor de Multilook en rango de 4.

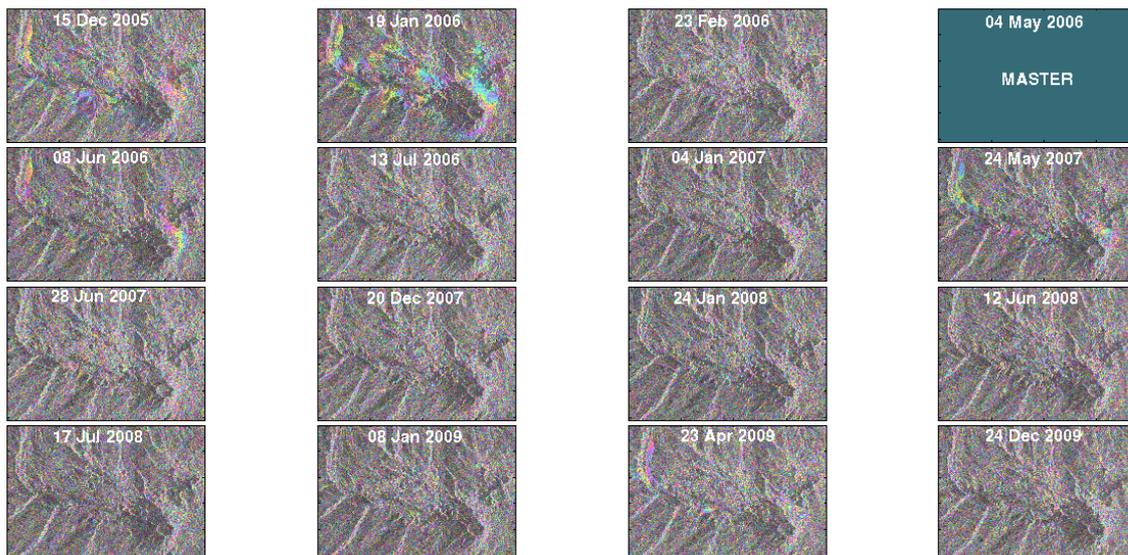


Figura 4.6: Interferogramas diferenciales entre el 04 de Mayo del año 2006 (Fecha imagen maestra), y el 24 de diciembre del 2009; con un factor de Multilook en acimut de 20; y con un factor de Multilook en rango de 4.

Al analizar estos casos, las características que presentan los interferogramas son atribuibles a los efectos provocados por la decorrelación temporal propia de este tipo de zonas. Ante este contexto específico, se hizo necesario una nueva instancia de selección, en la cual se analizaron los valores de coherencia de cada uno de los interferogramas, para así poder considerar solamente en el procesamiento de series temporales, aquellos que presenten la menor cantidad de ruido posible.

4.2.2. Formación de interferogramas diferenciales - SBAS

Por otro lado, en la generación de interferogramas mediante el método de selección de SBAS, como se muestra en la figura 4.7, se obtuvieron 163 interferogramas diferenciales. Los parámetros ⁶ para poder realizar esta serie de conexiones entre las imágenes fueron los siguientes:

- Las imágenes que conforman un interferograma deben contar con una coherencia mínima dada por el índice de correlación ρ igual o superior a 0.3.
- Los interferogramas en cuanto al intervalo temporal abarcado, deben tener un diferencial máximo de 1500 días.
- Los interferogramas conformados debe tener una línea de base crítica menor a 1070 m.

En la tabla 4.8, se muestran específicamente la líneas de base perpendiculares para cada uno de los interferogramas realizados.

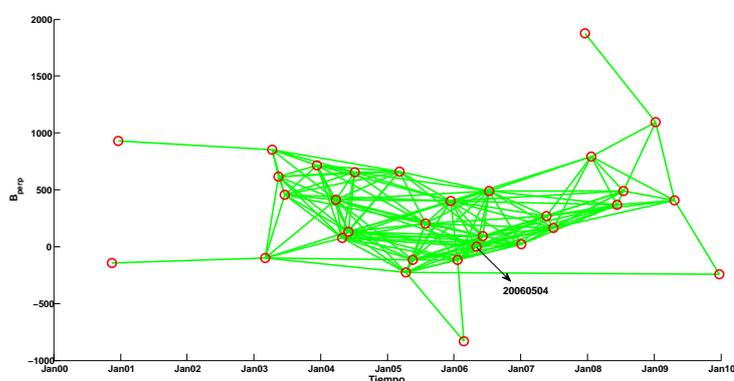


Figura 4.7: Líneas de base perpendiculares entre las diferentes conexiones conformadas en el conjunto de imágenes, generadas por el método SBAS.

Como se puede apreciar en las figura 4.8, a pesar de la gran cantidad de interferogramas generados por el algoritmo, en términos generales, la mayoría presentan una gran cantidad de ruido.

En el conjunto, se presentan casos de interferogramas que tienen una geometría con parámetros muy adecuados, como por ejemplo el caso conformado por la imagen maestra del 8 de julio del año 2004 y la imagen esclava al 10 de marzo del 2005, que tiene una línea de base perpendicular de 5 metros, y a pesar de ello, sus valores muestran sólo parcialmente franjas de deformación en ciertos sectores del cordón Cauile.

⁶En el caso de los dos últimos parámetros una diferencia mayor a la planteada específicamente genera una decorrelación total de los datos ERS-2.

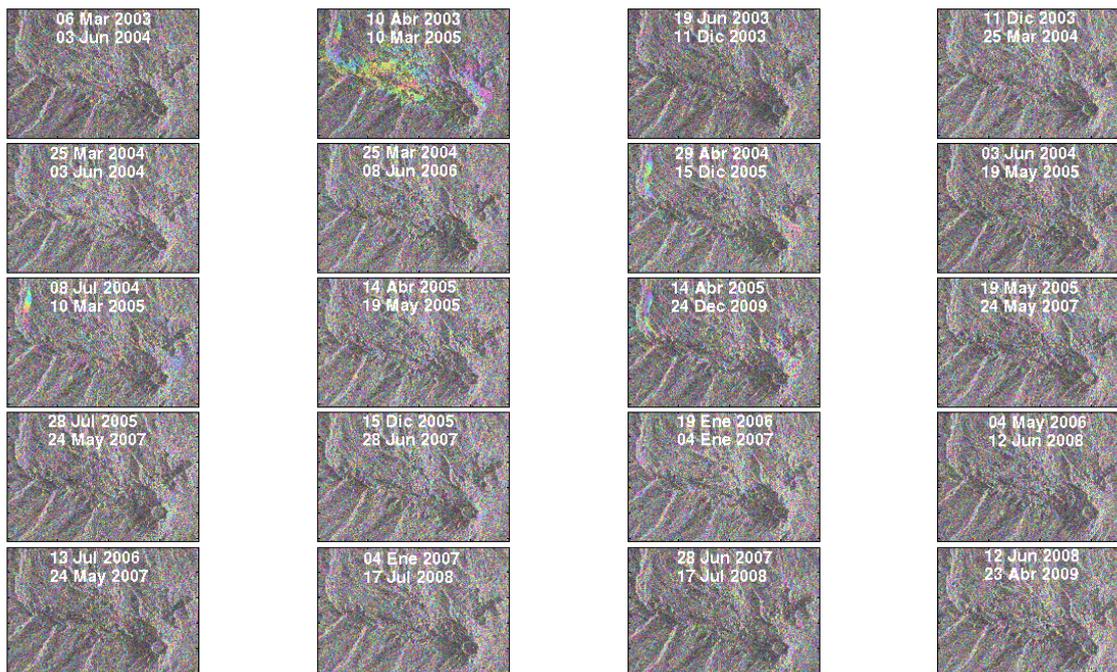


Figura 4.8: Selección de 25 interferogramas generados por el método SBAS; con un factor de Multilook en acimut de 20; y con un factor de Multilook en rango de 4.

La revisión de la totalidad de los casos, nos lleva a concluir anticipadamente que a pesar de la gran cantidad de conexiones realizada por el algoritmo, éste no puede eludir el problema de la decorrelación temporal.

Sin embargo, existieron casos de interferogramas que presentaron valores aceptables. Uno de los mejores casos, es el conformado por la imagen maestra del 10 de abril del año 2003 y la imagen esclava del 10 de marzo 2005, las cuales configuran una geometría donde la línea de base perpendicular es de -191 m. Este interferograma muestra valores que indican un grado de deformación en el centro del cordón Cauille, sin embargo la lectura de estos datos no es de muy fácil realización, debido a que no se logra identificar un patrón de franjas que sea indicativo del tipo y grado de deformación que se produce en este intervalo de tiempo. El resto de los datos, que corresponden a zonas con parches vegetacionales predominantemente, poseen un alto grado de decorrelación.

Ante esta dificultad de interpretación de los valores de los interferogramas, de la misma forma en que ocurrió para PSI, fue necesario realizar una selección mas fina del grupo de datos, para poder así contar con un grupo el grupo de interferogramas menos ruidosos posible.

4.2 FORMACIÓN DE INTERFEROGRAMAS DIFERENCIALES.

| ID | Plataforma | Fecha | B _{perp} | ID Órbita | Plataforma | Fecha | B _{perp} | ID Órbita | Plataforma | Fecha | B _{perp} |
|----|------------|-------------------|-------------------|-----------|------------|-------------------|-------------------|-----------|------------|-------------------|-------------------|
| 1 | ERS-2 | 2000116-20030306 | 43 m | 51 | ERS-2 | 20040429-20050310 | 584 m | 101 | ERS-2 | 20050728-20060713 | 284 m |
| 2 | ERS-2 | 20001221-20030410 | 80 m | 52 | ERS-2 | 20040429-20050414 | -303 m | 102 | ERS-2 | 20050728-20070104 | -185 m |
| 3 | ERS-2 | 20030306-20030515 | 717 m | 53 | ERS-2 | 20040429-20050519 | -193 m | 103 | ERS-2 | 20050728-20070524 | 65 m |
| 4 | ERS-2 | 20030306-20030619 | 556 m | 54 | ERS-2 | 20040429-20050728 | 129 m | 104 | ERS-2 | 20050728-20070628 | -42 m |
| 5 | ERS-2 | 20030306-20040325 | 509 m | 55 | ERS-2 | 20040429-20051215 | 326 m | 105 | ERS-2 | 20050728-20060119 | -518 m |
| 6 | ERS-2 | 20030306-20040429 | 175 m | 56 | ERS-2 | 20040429-20060119 | -192 m | 106 | ERS-2 | 20051215-20060504 | -401 m |
| 7 | ERS-2 | 20030306-20040603 | 230 m | 57 | ERS-2 | 20040429-20060504 | -76 m | 107 | ERS-2 | 20051215-20060608 | -306 m |
| 8 | ERS-2 | 20030306-20050414 | -128 m | 58 | ERS-2 | 20040429-20060608 | 19 m | 108 | ERS-2 | 20051215-20060713 | 88 m |
| 9 | ERS-2 | 20030306-20050519 | -18 m | 59 | ERS-2 | 20040429-20070104 | -55 m | 109 | ERS-2 | 20051215-20070104 | -381 m |
| 10 | ERS-2 | 20030410-20030515 | -232 m | 60 | ERS-2 | 20040603-20040708 | 552 m | 110 | ERS-2 | 20051215-20070524 | -131 m |
| 11 | ERS-2 | 20030410-20030619 | -394 m | 61 | ERS-2 | 20040603-20050310 | 529 m | 111 | ERS-2 | 20051215-20070628 | -239 m |
| 12 | ERS-2 | 20030410-20031211 | -132 m | 62 | ERS-2 | 20040603-20050414 | -357 m | 112 | ERS-2 | 20051215-20080124 | 391 m |
| 13 | ERS-2 | 20030410-20040325 | -440 m | 63 | ERS-2 | 20040603-20050519 | -248 m | 113 | ERS-2 | 20051215-20080612 | -35 m |
| 14 | ERS-2 | 20030410-20040708 | -198 m | 64 | ERS-2 | 20040603-20050728 | 75 m | 114 | ERS-2 | 20051215-20080717 | 89 m |
| 15 | ERS-2 | 20030410-20050310 | -191 m | 65 | ERS-2 | 20040603-20051215 | 271 m | 115 | ERS-2 | 20060119-20060223 | -716 m |
| 18 | ERS-2 | 20030515-20030619 | -162 m | 66 | ERS-2 | 20040603-20060119 | -247 m | 116 | ERS-2 | 20060119-20060504 | 117 m |
| 17 | ERS-2 | 20030515-20031211 | 100 m | 67 | ERS-2 | 20040603-20060504 | -130 m | 117 | ERS-2 | 20060119-20060608 | 212 m |
| 18 | ERS-2 | 20030515-20040325 | -208 m | 68 | ERS-2 | 20040603-20060608 | -35 m | 118 | ERS-2 | 20060119-20060713 | 606 m |
| 19 | ERS-2 | 20030515-20040429 | -542 m | 69 | ERS-2 | 20040603-20060713 | 359 m | 119 | ERS-2 | 20060119-20070104 | 137 m |
| 20 | ERS-2 | 20030515-20040603 | -488 m | 70 | ERS-2 | 20040603-20070104 | -110 m | 120 | ERS-2 | 20060119-20070524 | 387 m |
| 21 | ERS-2 | 20030515-20040708 | 34 m | 71 | ERS-2 | 20040708-20050310 | 7 m | 121 | ERS-2 | 20060119-20070628 | 279 m |
| 22 | ERS-2 | 20030515-20050310 | 42 m | 72 | ERS-2 | 20040708-20050728 | -447 m | 122 | ERS-2 | 20060504-20060608 | 95 m |
| 23 | ERS-2 | 20030619-20031211 | 261 m | 73 | ERS-2 | 20040708-20051215 | -251 m | 123 | ERS-2 | 20060504-20060713 | 489 m |
| 24 | ERS-2 | 20030619-20040325 | -47 m | 74 | ERS-2 | 20040708-20060713 | -163 m | 124 | ERS-2 | 20060504-20070104 | 20 m |
| 25 | ERS-2 | 20030619-20040429 | -380 m | 75 | ERS-2 | 20050310-20050728 | -454 m | 125 | ERS-2 | 20060504-20070524 | 270 m |
| 26 | ERS-2 | 20030619-20040603 | -326 m | 76 | ERS-2 | 20050310-20051215 | -258 m | 126 | ERS-2 | 20060504-20070628 | 366 m |
| 27 | ERS-2 | 20030619-20040708 | 196 m | 77 | ERS-2 | 20050310-20060608 | -564 m | 127 | ERS-2 | 20060504-20080612 | 163 m |
| 28 | ERS-2 | 20030619-20050310 | 203 m | 78 | ERS-2 | 20050310-20060713 | -170 m | 128 | ERS-2 | 20060608-20060713 | 394 m |
| 29 | ERS-2 | 20030619-20050728 | -251 m | 79 | ERS-2 | 20050414-20050519 | 110 m | 129 | ERS-2 | 20060608-20070104 | -75 m |
| 30 | ERS-2 | 20030619-20051215 | -55 m | 80 | ERS-2 | 20050414-20050728 | 432 m | 130 | ERS-2 | 20060608-20070524 | 175 m |
| 31 | ERS-2 | 20031211-20040325 | -308 m | 81 | ERS-2 | 20050414-20051215 | 628 m | 131 | ERS-2 | 20060608-20070628 | 68 m |
| 32 | ERS-2 | 20031211-20040429 | -642 m | 82 | ERS-2 | 20050414-20060119 | 111 m | 132 | ERS-2 | 20060608-20080612 | 271 m |
| 33 | ERS-2 | 20031211-20040603 | -587 m | 83 | ERS-2 | 20050414-20060223 | -605 m | 133 | ERS-2 | 20060608-20080717 | 395 m |
| 34 | ERS-2 | 20031211-20040708 | -66 m | 84 | ERS-2 | 20050414-20060504 | 227 m | 134 | ERS-2 | 20060713-20070104 | -469 m |
| 35 | ERS-2 | 20031211-20050310 | -58 m | 85 | ERS-2 | 20050414-20060608 | 332 m | 135 | ERS-2 | 20060713-20070524 | -219 m |
| 36 | ERS-2 | 20031211-20050728 | -512 m | 86 | ERS-2 | 20050414-20070104 | 247 m | 136 | ERS-2 | 20060713-20070628 | -327 m |
| 37 | ERS-2 | 20031211-20051215 | -316 m | 87 | ERS-2 | 20050414-20091224 | -14 m | 137 | ERS-2 | 20060713-20080124 | 303 m |
| 38 | ERS-2 | 20040325-20040429 | -334 m | 88 | ERS-2 | 20050519-20050728 | 322 m | 138 | ERS-2 | 20060713-20080612 | -123 m |
| 39 | ERS-2 | 20040325-20040603 | -279 m | 89 | ERS-2 | 20050519-20051215 | 519 m | 139 | ERS-2 | 20060713-20080717 | 1 m |
| 40 | ERS-2 | 20040325-20040603 | 242 m | 90 | ERS-2 | 20050519-20060119 | 1 m | 140 | ERS-2 | 20070104-20070524 | 250 m |
| 41 | ERS-2 | 20040325-20050310 | 250 m | 91 | ERS-2 | 20050519-20060504 | 118 m | 141 | ERS-2 | 20070104-20070628 | 142 m |
| 42 | ERS-2 | 20040325-20050414 | -637 m | 92 | ERS-2 | 20050519-20060608 | 212 m | 142 | ERS-2 | 20070104-20080612 | 346 m |
| 43 | ERS-2 | 20040325-20050519 | -527 m | 93 | ERS-2 | 20050519-20060713 | 607 m | 143 | ERS-2 | 20070104-20080717 | 470 m |
| 44 | ERS-2 | 20040325-20050728 | -204 m | 94 | ERS-2 | 20050519-20070104 | 138 m | 144 | ERS-2 | 20070524-20070628 | -108 m |
| 45 | ERS-2 | 20040325-20051215 | -8 m | 95 | ERS-2 | 20050519-20070524 | 338 m | 145 | ERS-2 | 20070524-20080124 | 521 m |
| 46 | ERS-2 | 20040325-20060504 | -409 m | 96 | ERS-2 | 20050519-20070628 | 280 m | 146 | ERS-2 | 20070524-20080612 | 96 m |
| 47 | ERS-2 | 20040325-20060608 | -314 m | 97 | ERS-2 | 20050728-20051215 | 196 m | 147 | ERS-2 | 20070524-20080717 | 220 m |
| 48 | ERS-2 | 20040325-20060713 | 80 m | 98 | ERS-2 | 20050728-20060119 | -322 m | 148 | ERS-2 | 20070524-20090423 | 137 m |
| 49 | ERS-2 | 20040429-20040603 | 55 m | 99 | ERS-2 | 20050728-20060504 | -205 m | 149 | ERS-2 | 20070628-20080124 | 629 m |
| 50 | ERS-2 | 20040429-20040708 | 576 m | 100 | ERS-2 | 20050728-20060608 | -110 m | 150 | ERS-2 | 20070628-20080612 | 203 m |

Tabla 4.8: Líneas de base perpendiculares, correspondientes a cada interferograma desarrollado para SBAS.

Selección de Interferogramas diferenciales para el procesamiento de series temporales.

5.1. Análisis de interferogramas en base a la coherencia.

En base a lo expuesto en el capítulo anterior, el problema de la decorrelación temporal característico de la zona en la cual se localiza el área de estudio no pudo ser eludido por las estrategias de procesamiento de los dos algoritmos implementados. Los resultados obtenidos, en ambos casos, son de muy baja calidad, por lo cual analizar los valores de coherencia de los interferogramas realizados es fundamental para incluir en el análisis de series temporales el menor ruido posible y no generar dificultades en los procesamientos posteriores, como por ejemplo en el desenrollado de fase.

Como se puede apreciar en la figura 5.1 en la zona de altas cumbres del complejo volcánico, en la cual no existe vegetación, existe una cobertura de nieves estacionales diferencial durante un año hidrológico¹. Se pudo corroborar que esta variabilidad también se manifiesta de forma interanual, presentándose años en donde dicha cobertura y su influencia pueden estar presente hasta en meses estivales. En el caso específico de la figura, se muestran tres imágenes Landsat de los años 2002, 2003 y 2004 del mes de Febrero en donde la cobertura nival se presenta de forma totalmente diferencial. En efecto, cuando dicha área se encuentra total o parcialmente cubierta de nieve, los valores de coherencia entre las señales de los datos tienden a ser bajos, generando así interferogramas ruidosos. Por el contrario, si esta superficie se presenta con una cobertura baja tanto en la imagen maestra como en la esclava, un interferograma tendrá más probabilidades de tener valores coherentes y por ende, reúne las condiciones para ser considerado en el análisis de series de tiempo.

Adicionalmente, en los datos ópticos se muestra que el área circundante al cordón Caulle está fundamentalmente cubierta por masas vegetacionales (gradientes marcados por los tonos rojizos), las cuales adquieren en la mayoría de los interferogramas, valores con una gran variación debido a la decorrelación temporal que se presenta de forma característica en este tipo de coberturas, lo que se ve potenciado cuando se ocupa la banda C². Cabe señalar, que otro factor relacionado que intercedería en parte en el comportamiento de estos valores, es el horario en que fueron adquiridos los datos por la plataforma. La hora promedio fue a las 14:33:00 hrs UTC, lo cual no es recomendable según (Ferretti, 2007) para la realización de interferogramas en zonas con cobertura vegetal densa. Esto es debido a la mayor inestabilidad atmosférica existente durante

¹En el hemisferio sur por convención se inicia a partir del mes de marzo.

²La cual tiene una penetración parcial en superficies vegetadas, lo que hace más ambiguo el valor final de la fase.

el día, lo que en la práctica se traduce en una variable circulación de vientos que al interactuar con este tipo de coberturas, producen una superficie mas inestable en tiempo.

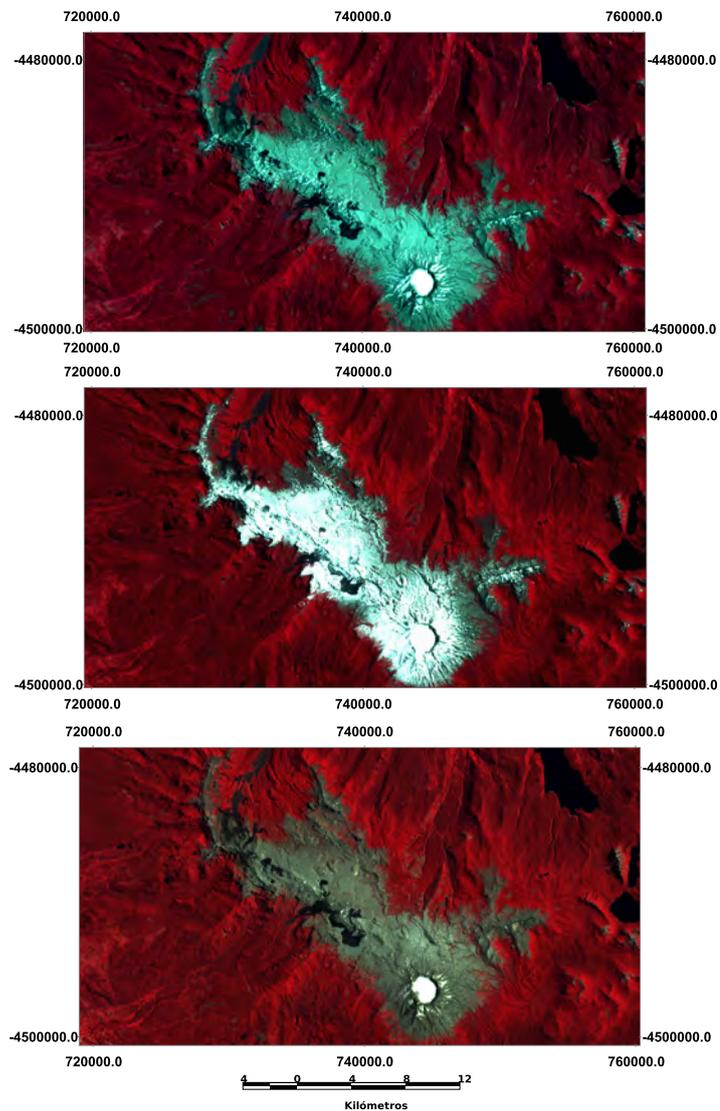


Figura 5.1: Coberturas diferenciales de nieves estacionales en la zona alta del cordón Cauile. Imágenes Landsat con combinación de bandas 4-3-2, con las siguientes fechas en orden descendente: 01/02/2002, 20/02/2003 y 15/02/2004.

5.1.1. Casos - PSI.

En las figuras 5.2 y 5.3, se muestran los valores de coherencia de la señal en las distintas combinaciones de imágenes realizadas. El criterio de discriminación para conformar el conjunto de datos final para el análisis de series temporales, consiste básicamente en elegir los casos que tengan los valores de coherencia mas altos y que éstos de forma adicional se encuentren espacial y temporalmente correlacionados.

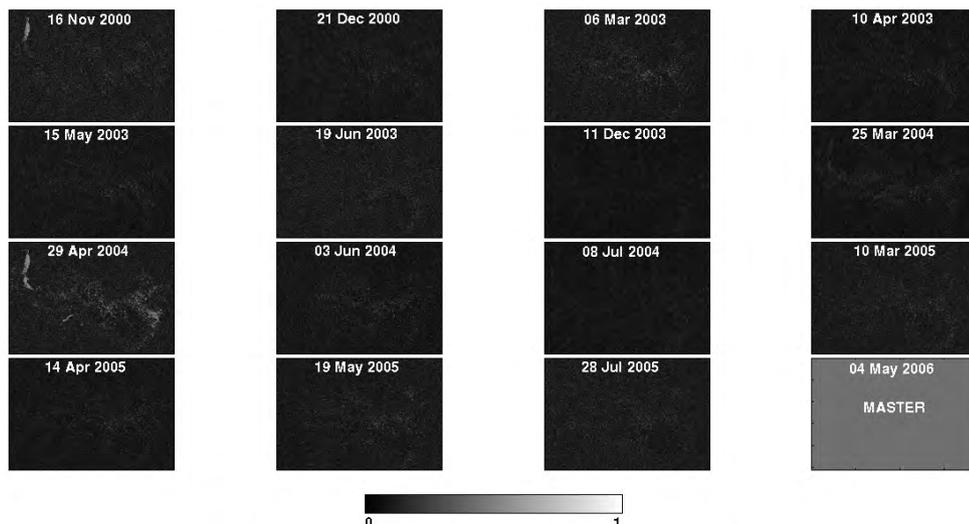


Figura 5.2: Valores de coherencia de los interferogramas realizados entre el 16 de Noviembre del año 2000 y el 28 de Julio del año 2005; con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4.

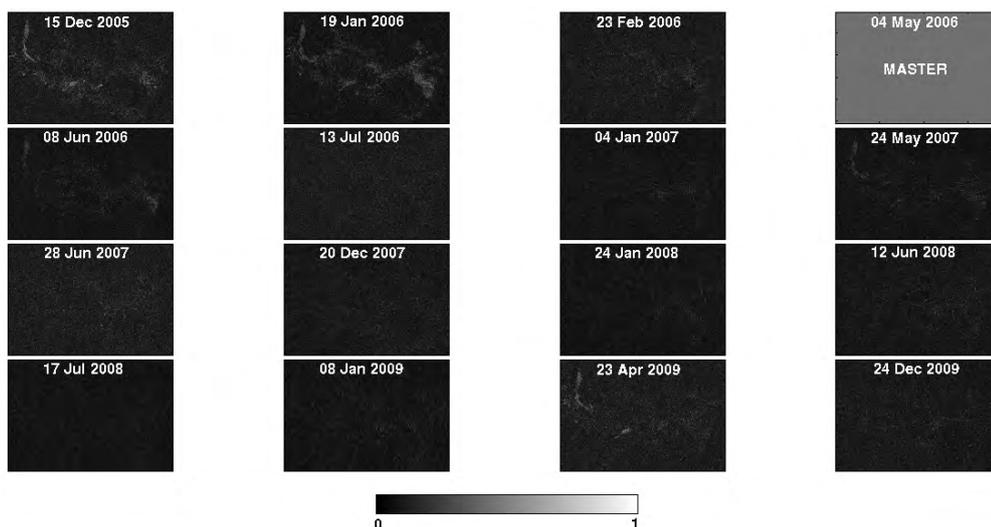


Figura 5.3: Valores de coherencia de los interferogramas realizados entre el 15 de Diciembre del año 2005 y el 24 de Diciembre del año 2009; con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4.

Específicamente, como se muestra en la figura 5.4 y en su respectivo histograma (figura 5.5), para el caso entre la imagen maestra y la imagen del 20 de Diciembre del año 2007, los valores de coherencia obtenidos son muy bajos, teniendo como promedio 0.108 y una desviación de 0.0312, no presentándose una correlación espacial de sus valores mas altos en ninguna parte de la imagen.



Figura 5.4: Valores de coherencia del interferograma realizado entre la imagen maestra (20060504) y la imagen esclava del 20 de Diciembre del año 2007; con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4.

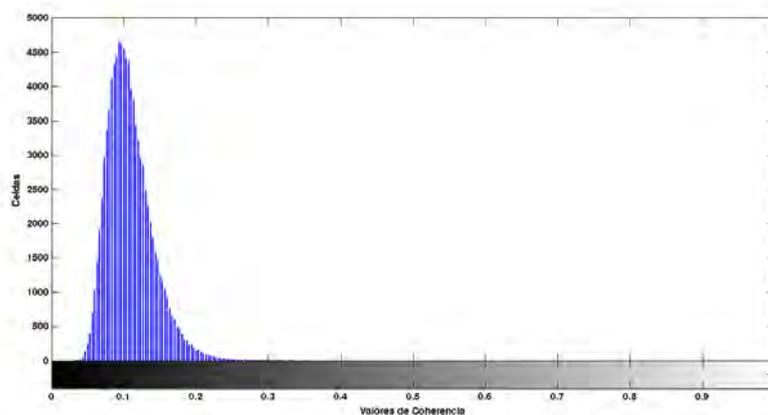


Figura 5.5: Histograma de los Valores de coherencia del interferograma entre la imagen maestra y la imagen esclava del 20 de Diciembre del año 2007.

Por otra parte, en la figura 5.6 y su respectivo histograma que corresponde a la figura 5.7, para el caso entre la imagen maestra y la imagen del 15 de Diciembre del año 2005, los valores de coherencia obtenidos siguen siendo en promedio bajos (0.1314) con una desviación un poco más amplia que en el caso anterior, la cual corresponde a 0.0472. Este último indicador, manifiesta una menor concentración de valores cercanos a la media, estando los mayores a ésta preferentemente correlacionados en espacio en la parte alta del cordón volcánico en análisis, específicamente en áreas que corresponden a lavas Rio-dacíticas³. Como se puede apreciar en la figura 5.8, este tipo de material se localiza exclusivamente en la parte superior del cordón volcánico, con tonalidades de grisáceas a negras, y según el trabajo de Lara et al. (2006) fueron parte de la serie de efectos que generó la entrada en actividad que tuvo el cordón volcánico, tanto en los años 1921 y 1960 respectivamente.

³Material volcánico de carácter extrusivo que tiene una composición intermedia entre dacitas y riolitas.

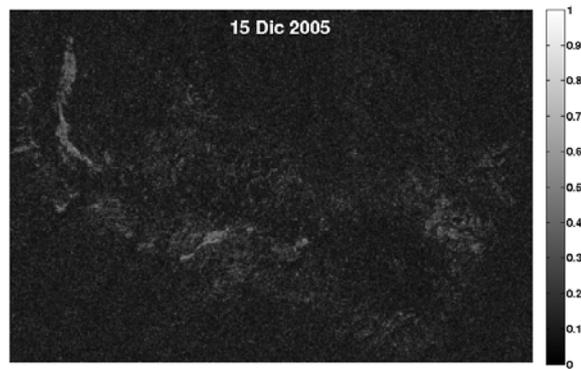


Figura 5.6: Valores de coherencia del interferograma realizado entre la imagen maestra (20060504) y la imagen esclava del 15 de Diciembre del año 2005; con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4.

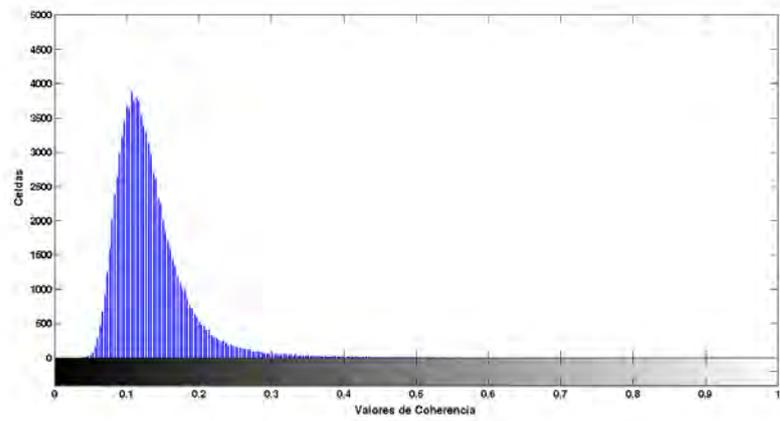


Figura 5.7: Histograma de los Valores de coherencia del interferograma entre la imagen maestra y la imagen esclava del 15 de Diciembre del año 2005.

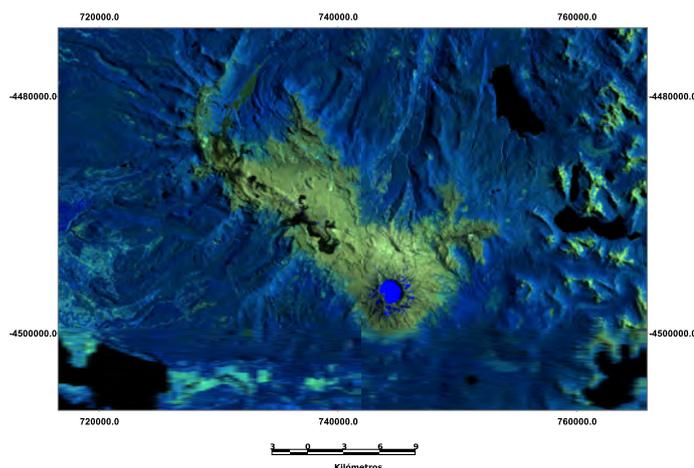


Figura 5.8: Depósitos volcánicos recientes (1921 y 1960) con una alta coherencia - Imagen Landsat del 15 de Febrero del año 2004, combinación de bandas 7-5-3.

En base a la revisión de cada caso específico, de un total de 29 imágenes de coherencia, sólo se seleccionaron 6 conexiones para la realización de las series temporales PSI. Como muestra la figura 5.9, los valores de coherencia mas altos del conjunto ⁴ se pueden identificar parcialmente a la parte superior del cordón volcánico (preferentemente sobre los 600 msnm aproximadamente).

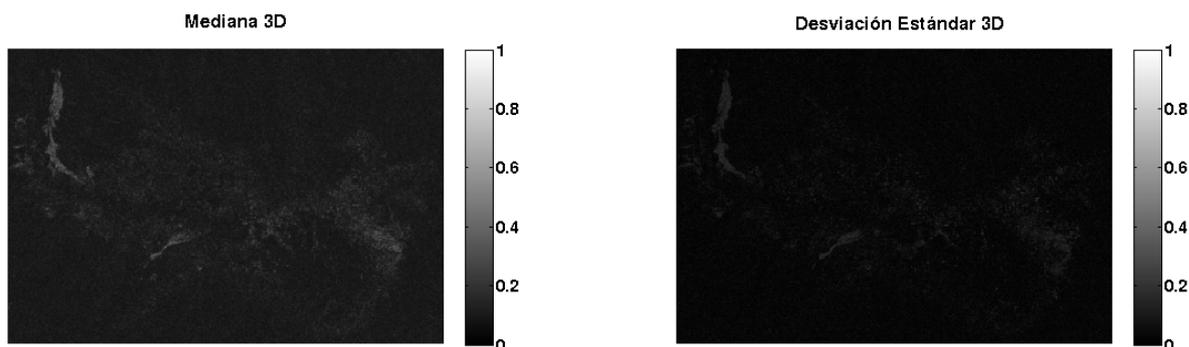


Figura 5.9: Mediana y desviación estándar del conjunto de las imágenes de coherencia seleccionadas para el análisis de series temporales; con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4.

5.1.2. Casos - SBAS

Para el análisis de los valores de coherencia de la serie de combinaciones generadas por el método SBAS, se aplicaron los mismos criterios de selección de los datos que fueron expuestos para el caso de PSI (identificación de valores altos de coherencia que estén espacial y temporalmente correlacionados). Como se muestra en las figuras 5.10 y 5.11, predominantemente se observan bajos valores de coherencia en cada una de las imágenes representadas. Como se esperaba, los valores mas altos se encuentran en la parte superior del cordón volcánico (por sobre los 800 msnm) y fundamentalmente se concentran en los depósitos de lavas Riodacíticas (ver figura 5.8).

⁴Que no significa que sean valores apropiados teóricamente.

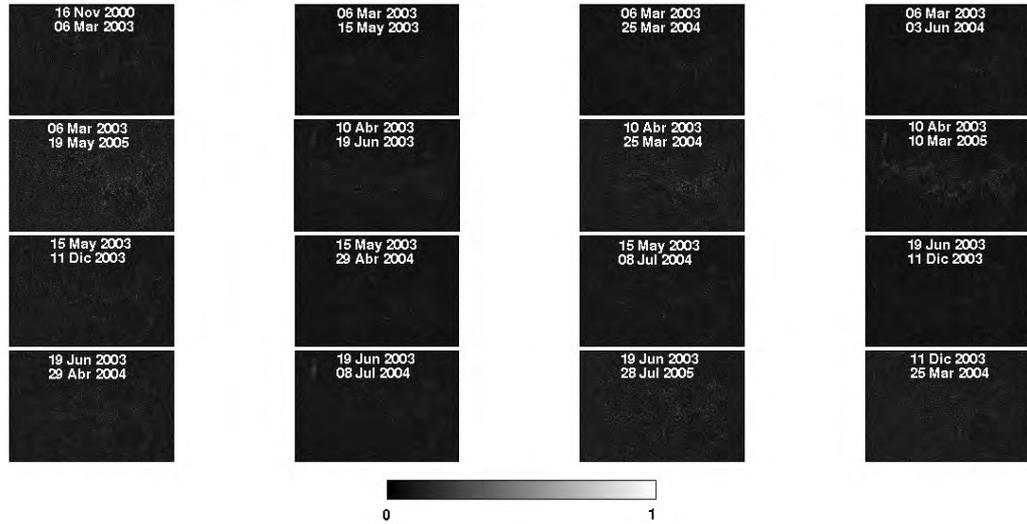


Figura 5.10: Ejemplos de valores de coherencia de interferogramas realizados entre el 16 de Noviembre del año 2000 y el 28 de julio del 2005; con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4.

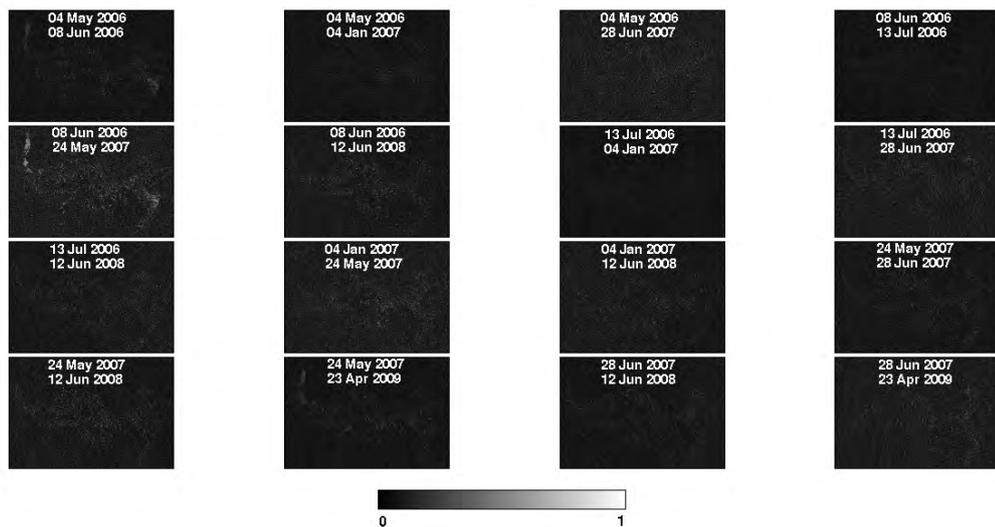


Figura 5.11: Ejemplos de valores de coherencia de interferogramas realizados entre el 4 de Mayo del año 2006 y el 23 de Abril del 2009; con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4.

En la figura 5.12 y en su respectivo histograma (figura 5.13), entre las imágenes del 08 de Julio del año 2006 y el 4 de Enero del 2007, los valores de coherencia tienen un promedio de 0.1358 y una desviación estándar de 0.0421. La zona de interés no logra distinguirse con valores superiores por la alta dinámica de las coberturas existentes, lo que produce un alto grado de decorrelación. Por lo tanto, casos de este tipo no fueron considerados en la selección de interferogramas para el análisis de series temporales SBAS.

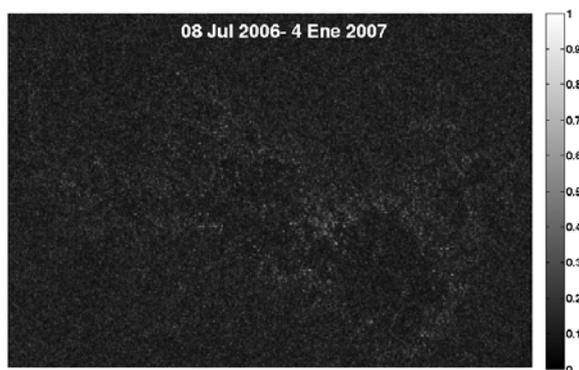


Figura 5.12: Valores de coherencia del interferograma realizado entre la imagen del 8 de Julio del año 2006 y la imagen del 4 de Enero del año 2007; con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4.

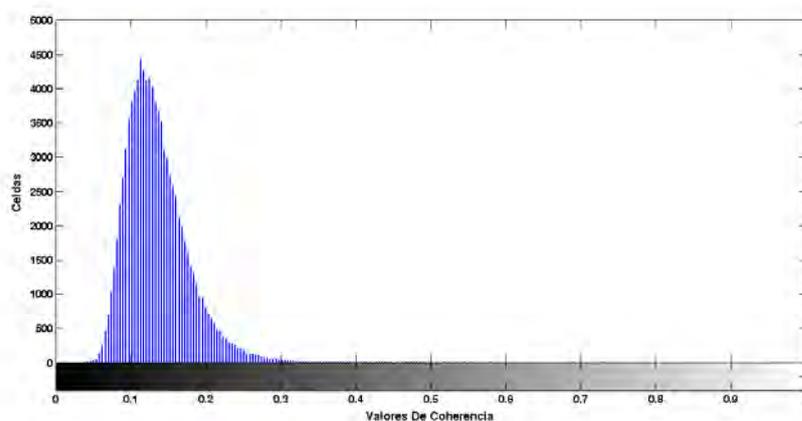


Figura 5.13: Histograma de los valores de coherencia del interferograma entre la imagen del 8 de Julio del año 2006 y la imagen del 4 de Enero del año 2007.

Por otro lado, en el caso de los valores de coherencia pertenecientes a la conexión entre el 10 de Abril del año 2003 y el 15 de Mayo del mismo año, el promedio de los valores corresponde 0.1746 (no existe una diferencia considerable con el anterior) y la desviación estándar a 0.0890 específicamente (figura 5.14). Dada la cobertura nival prácticamente nula en las dos imágenes, y adicionalmente a que el intervalo de tiempo es el menor de los que se observan (35 días), los valores en el sector alto del Cordón Caulle logran parcialmente aumentar en ciertas áreas.

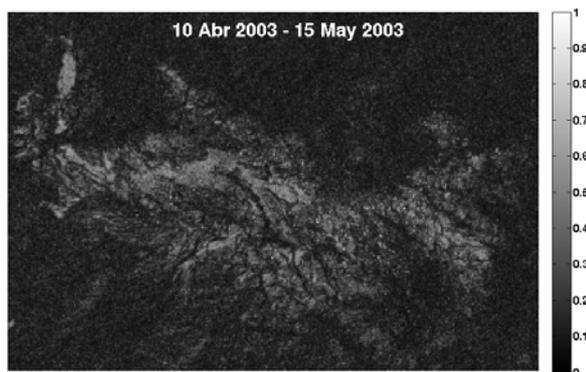


Figura 5.14: Valores de coherencia del interferograma realizado entre la imagen del 10 de Abril del año 2003 y la imagen del 15 de Mayo del año 2003; con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4.

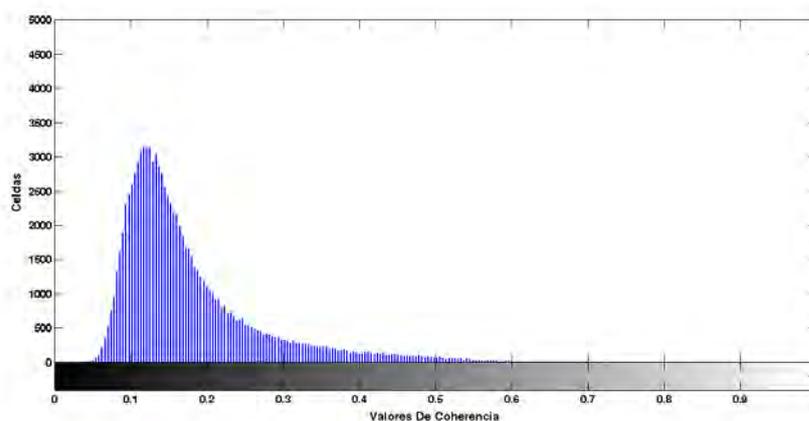


Figura 5.15: Histograma de los Valores de coherencia del interferograma entre la imagen del 10 de Abril del año 2003 y la imagen del 15 de Mayo del año 2003.

Cabe destacar, que a pesar de que se presentaron valores de coherencia superiores a 0.4, éstos siguen teniendo comparativamente una baja proporcionalidad dentro del total de celdas existentes. El hecho de haber realizado dos procedimientos de selección en base a parámetros distintos, nos lleva a la conclusión de que definitivamente no se cuenta con datos que garanticen un proceso de medición con una alta confiabilidad. Específicamente, para el caso de SBAS, se terminaron seleccionando 24 interferogramas para llevar a acabo el procesamiento de series temporales, lo que es una cantidad muy baja considerando el número de interferogramas inicialmente realizados (138 combinaciones dentro de los parámetros definidos).

5.1.3. Selección de interferogramas diferenciales para PSI.

Producto de la revisión de las imágenes de coherencia de cada combinación, los interferogramas que serán incluidos en análisis de Persistent Scatterer Interferometry (PSI), como se muestra en la figura 5.16, sólo corresponden a 6 en total. En términos generales, comparativamente con otras investigaciones, el número de interferogramas es muy bajo para realizar dicho tipo de procesamiento, sin embargo según Hooper (2006), en el caso específico del software STaMPS/MTI se ha podido constatar que se han logrado obtener resultados con buena calidad ocupando hasta un mínimo de 4 interferogramas.

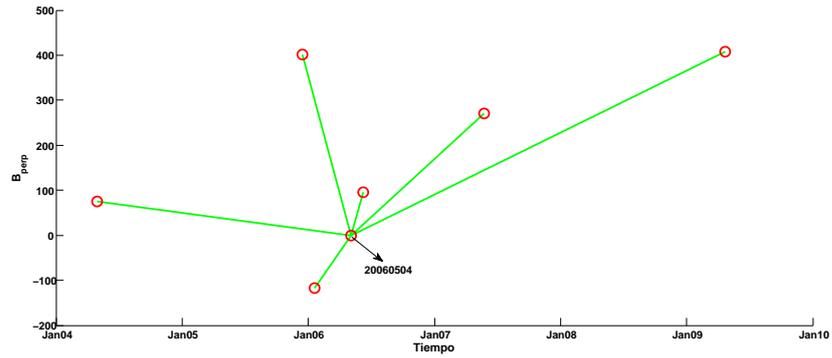


Figura 5.16: Líneas de base definitivas para el procesamiento de Persistent Scatterer Interferometry (PSI).

En la tabla 5.1, se muestran las líneas de base perpendiculares de los interferogramas que finalmente se incluirán en el análisis de PSI. Como se puede apreciar en la figura 5.17, estos interferogramas finales, presentan una distribución acotada de valores de fase coherentes espacialmente en la zona de cumbres del cordón volcánico, sin una estructura definida de franjas que permitan realizar a priori una interpretación del proceso de deformación detectado.

| ID | Fecha | Líneas de Base |
|----|--------------|----------------|
| 1 | 29-Abr-2004 | 76 m |
| 2 | 15-Dic-2005 | 401 m |
| 3 | 19-Ene-2006 | -191 m |
| 4 | 04-Mayo-2006 | 0 m |
| 5 | 08-Jun-2006 | 95 m |
| 6 | 24-May-2007 | 270 m |
| 7 | 23-Abr-2009 | 408 m |

Tabla 5.1: Líneas de base perpendiculares de los interferogramas que finalmente se ocuparán para realizar Persistent Scatterer Interferometry (PSI). El ítem 4, corresponde a la imagen Maestra.

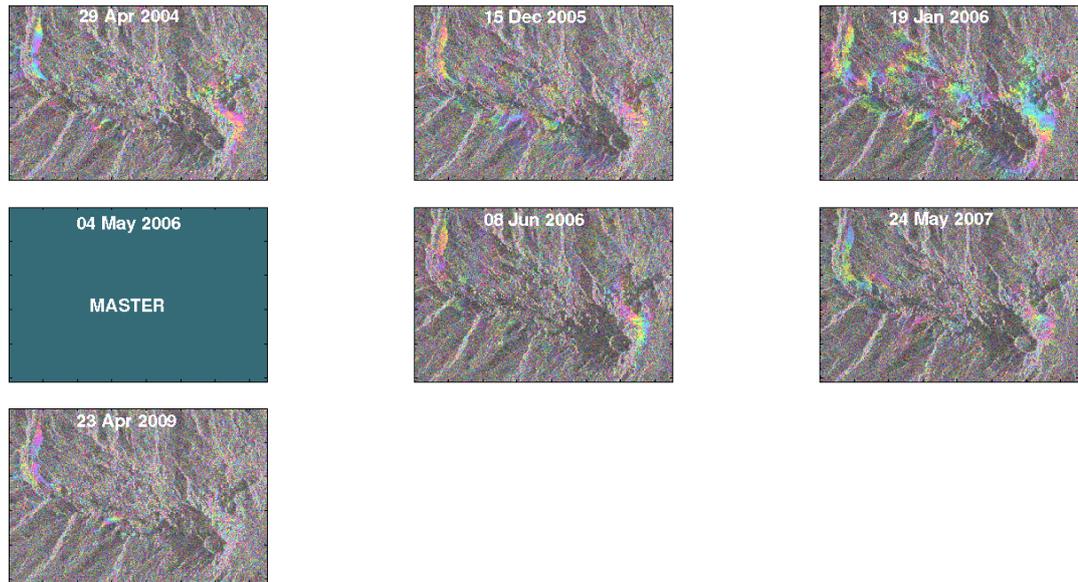


Figura 5.17: Interferogramas diferenciales que se utilizarán para el análisis de PSI; con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4.

5.1.4. Selección de interferogramas diferenciales para SBAS.

Para el caso de las series temporales SBAS, posteriormente de haber revisado y analizado los valores de coherencia de cada una de las combinaciones realizadas, como se puede ver en la figura 5.18, el número de interferogramas se reduce significativamente a 24. Cabe destacar, que como requisito indispensable en esta técnica, no pueden haber subgrupos de interferogramas aislados o no conectados directa o indirectamente con la imagen mega-maestra, por ende en primera instancia, no se pudieron eliminar todos los interferogramas con valores incoherentes. En otras palabras, existen interferogramas muy ruidosos que sólo actúan como conectores de otros de mejor calidad con la imagen maestra. Adicionalmente, se pudo constatar que la correlación espacial de los valores de coherencia es diferencial, presentándose sólo algunos interferogramas con coherencia en toda la parte superior del cordón volcánico, y por otro lado, una cantidad importante de interferogramas que tienen grados de coherencia diferenciales predominantemente en los depósitos de lavas Rio-dacíticas.

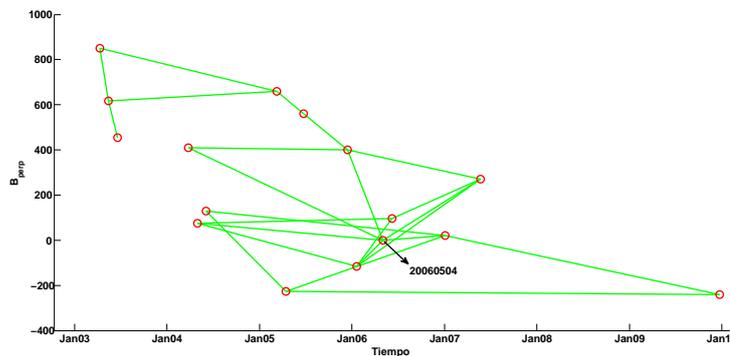


Figura 5.18: Líneas de base perpendiculares del conjunto de interferogramas -Small Baseline Subset (SBAS).

Por lo tanto, a partir de la problemática descrita, se dividió este conjunto de datos en 3 partes, con el objetivo de eliminar totalmente los interferogramas ruidosos y agrupar los valores de coherencia correlacionados espacial y temporalmente. Cabe destacar, que para la realización de este procedimiento se eligieron imágenes maestras para cada subgrupo, y se procuró de que el número de interferogramas estuviera siempre por sobre la cantidad crítica permitida por los lineamientos prácticos de STaMPS/MTI.

Subconjunto N°1

Este primer subgrupo está constituido, como se muestra en la figura 5.19 y en la tabla 5.2, por 5 imágenes y 5 interferogramas de los cuales la imagen mega-maestra seleccionada corresponde al 10 de Abril del año 2003 describiendo el intervalo de tiempo entre los años 2003 y 2005. Cabe señalar, que esta selección no se realizó en base al índice de correlación como se plantea en la metodología general. A partir de la eliminación de los interferogramas con un alto contenido de ruido, se seleccionó dentro del subgrupo como imagen maestra a la que tuviera una mayor participación en las combinaciones existentes⁵.

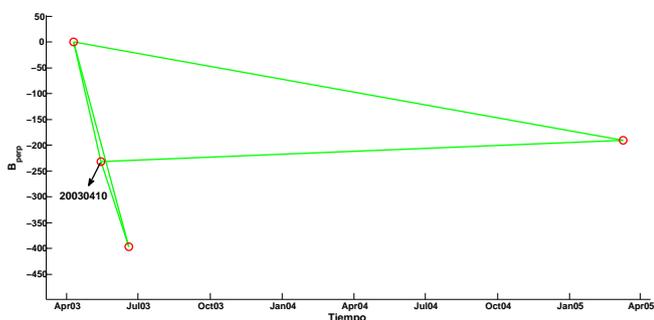


Figura 5.19: Líneas de base perpendiculares de los interferogramas correspondientes al subconjunto N°1 -Small Baseline Subset (SBAS).

| ID | Imágenes | Líneas de Base |
|----|----------------------------|----------------|
| 1 | 10-Abr-2003 al 15-May-2003 | -232 m |
| 2 | 10-Abr-2003 al 19-Jun-2003 | -397 m |
| 3 | 10-Abr-2003 al 10-Mar-2005 | -191 m |
| 4 | 15-May-2003 al 19-Jun-2003 | -165 m |
| 5 | 15-May-2003 al 10-Mar-2005 | 42 m |

Tabla 5.2: Líneas de Base perpendiculares, Subconjunto N°1 -SBAS.

Como se puede apreciar en la figura 5.20, los interferogramas seleccionados tienen una aparente correlación espacial y temporal en la parte superior-central del cordón volcánico. No obstante, los valores que presentan no permiten describir e interpretar un proceso de deformación.

⁵Manteniéndose los parámetros planteados en el capítulo 4, específicamente en la sección 4.2.2

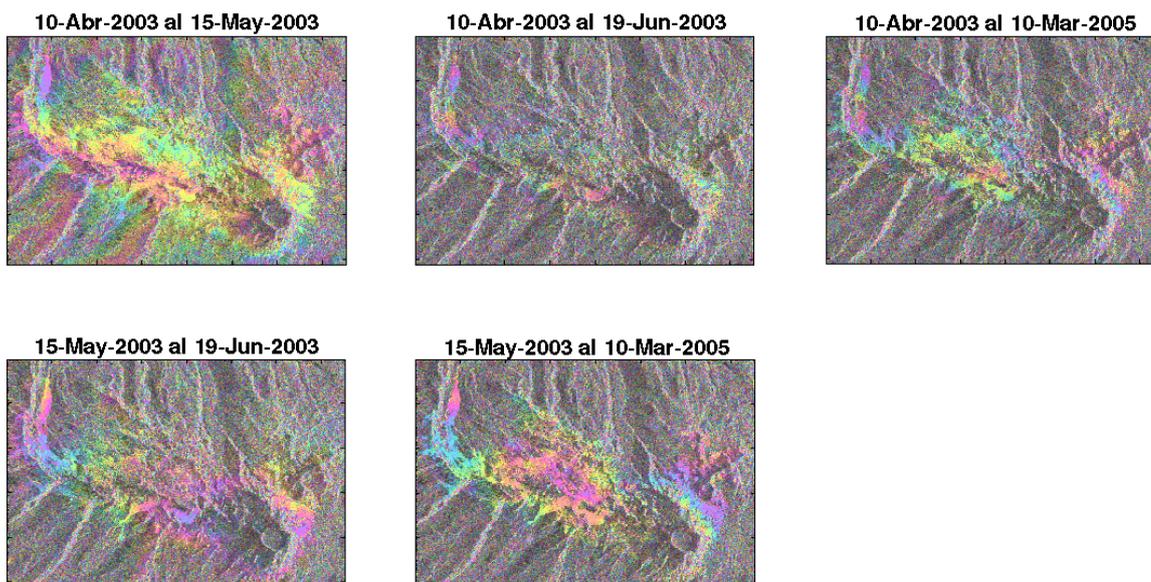


Figura 5.20: Interferogramas diferenciales correspondientes al subconjunto N°1 - Small Baseline Subset (SBAS); con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4.

Subconjunto N°2

El segundo subgrupo conformado, corresponde al conjunto que concentra la mayor cantidad de interferogramas correspondiendo específicamente a 11 combinaciones, describiendo el intervalo de tiempo entre los años 2004 y 2006 (ver figura 5.21 y tabla 5.3). La imagen mega-maestra en este caso se mantiene, correspondiendo al 4 de Mayo del año 2006. En este caso específico, los valores coherentes sólo se obtienen principalmente en las lavas Riodacíticas ubicadas al noroeste del cordón volcánico, generadas por la actividad registrada el año 1921.

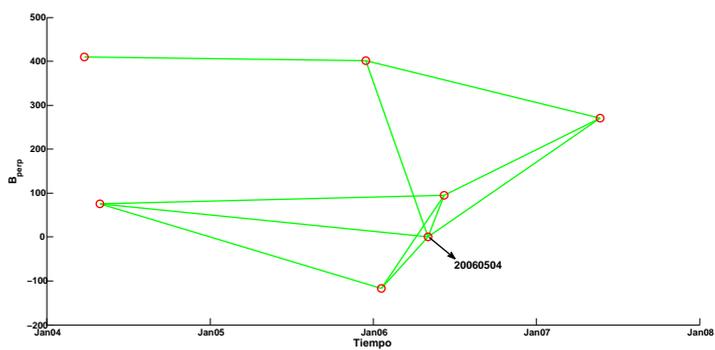


Figura 5.21: Líneas de base perpendiculares de los interferogramas correspondientes al subconjunto N°2 -Small Baseline Subset (SBAS).

| ID | Imágenes | Líneas de Base |
|----|----------------------------|----------------|
| 1 | 25-Mar-2004 al 15-Dic-2005 | -8 m |
| 2 | 29-Abr-2004 al 19-Ene-2006 | -192 m |
| 3 | 29-Abr-2004 al 04-May-2006 | -76 m |
| 4 | 29-Abr-2004 al 08-Jun-2006 | 19 m |
| 5 | 15-Dic-2005 al 24-May-2007 | -131 m |
| 6 | 19-Ene-2006 al 04-May-2006 | 117 m |
| 7 | 19-Ene-2006 al 08-Jun-2006 | 212 m |
| 8 | 04-May-2006 al 15-Dic-2005 | 401 m |
| 9 | 04-May-2006 al 08-Jun-2006 | 95 m |
| 10 | 08-Jun-2006 al 24-May-2007 | 175 m |
| 11 | 24-May-2007 al 04-May-2006 | -270 m |

Tabla 5.3: Líneas de Base perpendiculares, Subconjunto N°2 -SBAS.

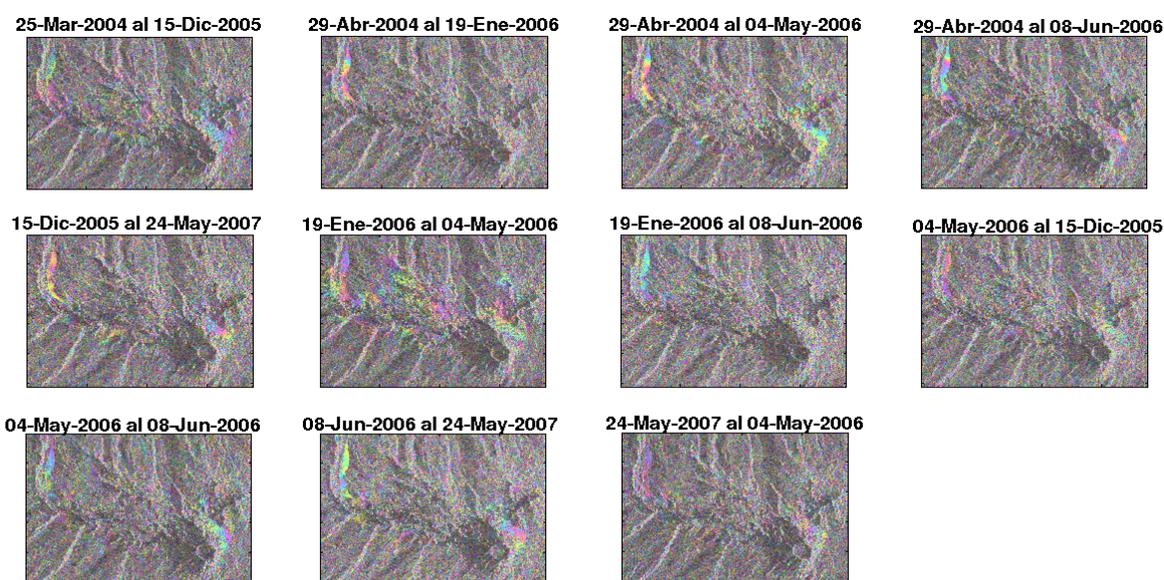


Figura 5.22: Interferogramas diferenciales correspondientes al subconjunto N°2 - Small Baseline Subset (SBAS); con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4.

Subconjunto N°3

El último subgrupo conformado, tiene una cantidad de interferogramas que está dado por 5 combinaciones, describiendo un intervalo de tiempo entre los años 2004 y 2009 (ver figura 5.23 y tabla 5.4). La imagen maestra corresponde al 3 de Junio del año 2004 y en términos generales se puede apreciar que existe aparentemente un cierto grado de coherencia en el área central del cordón volcánico (sin poderse tampoco interpretar mediante el análisis de franjas), aunque en menor grado que el subconjunto N°1.

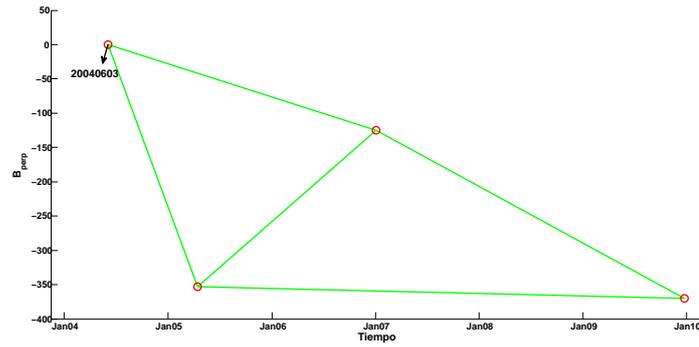


Figura 5.23: Líneas de base perpendiculares de los interferogramas correspondientes al subconjunto N°3 -Small Baseline Subset (SBAS).

| ID | Imágenes | Línea de Base (m) |
|----|----------------------------|-------------------|
| 1 | 03-Jun-2004 al 04-Ene-2007 | -125 |
| 2 | 14-Abr-2005 al 03-Jun-2004 | 353 |
| 3 | 14-Abr-2005 al 04-Ene-2007 | 229 |
| 4 | 14-Abr-2005 al 24-Dic-2009 | -17 |
| 5 | 04-Ene-2007 al 24-Dic-2009 | -245 |

Tabla 5.4: Líneas de Base perpendiculares, Subconjunto N°3 - SBAS

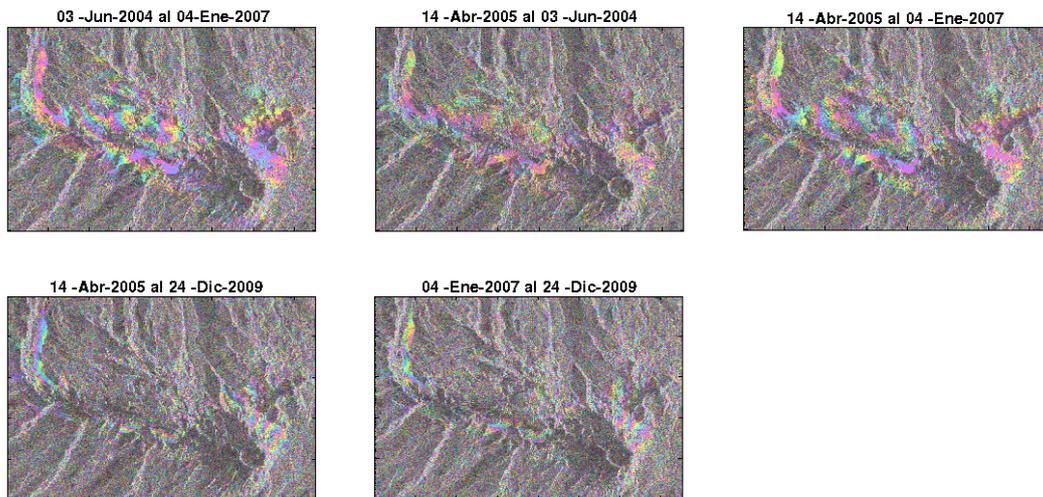


Figura 5.24: Interferogramas diferenciales correspondientes al subconjunto N°3 - Small Baseline Subset (SBAS); con un factor de Multilook en acimut de 20 y con un factor de Multilook en rango de 4.

Series Temporales Interferométricas PSI - SBAS

6.1. Persistent Scatterer Interferometry (PSI)

Para comenzar con el procesamiento de series temporales en el caso específico de Persistent Scatterer Interferometry (PSI), se seleccionaron celdas que tuviesen un índice de amplitud hasta 0.4 (umbral explicado en la sección metodología 3.1.3). Considerando la dimensión de cada uno de los interferogramas (5100 filas y 1500 columnas en formato SLC) se definió solamente la utilización de un parche para realizar los procesos de identificación y selección de celdas¹.

| Parámetro | Valor |
|---------------------------------|--------------|
| Índice de Dispersión - amplitud | 0.4 |
| Parches en Rango | 1 |
| Parches en Acimut | 1 |

Tabla 6.1: Parámetros iniciales de STaMPS/MTI para comenzar con el procesamiento de series temporales - Persistent Scatterer (PS).

En esta primera etapa, que consiste en el análisis de los valores de amplitud de los datos, se identificaron 2201401 celdas con valores por debajo del umbral establecido.

Como se puede apreciar en la tabla 6.2, posteriormente se determinaron una serie de parámetros que apuntan a la identificación y selección de una cantidad de píxeles que posean los valores de fase con una mayor correlación espacial y estabilidad en la dimensión temporal. En este caso específico, la definición de los parámetros estuvo dada por un contexto general de bajos valores de coherencia y su concentración parcial que predominantemente se encuentra en ciertas áreas cercanas al centro del cordón volcánico.

¹En STaMPS/MTI, para desarrollar los procedimientos de identificación y selección de celdas de forma más eficiente considerando los recursos informáticos disponibles, existe la opción de subdividir en una serie de matrices el conjunto de interferogramas definidos.

| Parámetro | Valor |
|--|----------------------|
| DEM | SRTM 3 arco-segundos |
| Error máximo del DEM | 5 |
| Tamaño de grilla para filtro de fase combinado | 100 m |
| Tamaño de ventana de Filtro de paso combinado | 64 |
| Densidad espacial máxima de celdas con fase aleatoria por km^2 | 25 |
| Umbral de desviación estándar de los valores de fase | 1 |
| Umbral para el ruido máximo de fase permitido para una celda | inf |
| Ventana filtrado en tiempo - distribución de ruido de fase | 730 (días) |
| Ventana Filtro de Goldstein | 32 |
| Tamaño de grilla - Unwrapping | 200 |
| Tamaño de ventana en tiempo - Unwrapping | 730 (días) |
| Lista de interferogramas no incluidos - Unwrapping | [5 6] |

Tabla 6.2: Parámetros usados para la selección de celdas desarrollado por STaMPS/MTI, en el caso de Persistent Scatterer Interferometry (PSI).

En primera instancia, en lo que respecta a la estimación del ruido de fase, se determinó en función de los valores de los parámetros que trae por defecto STaMPS/MTI², ampliar la dimensión de la grilla y la ventana del filtrado relacionadas con la correlación espacial de los datos. Con esto, el margen espacial de identificación de términos correlacionados en esta dimensión aumentó (Sección Metodología, ecuación 3.10), determinando así una mayor inclusión de pequeños grupos de celdas aislados por valores ruidosos. Cabe destacar que para efectos de control a nivel de celdas específicas, se mantuvo el valor por defecto del parámetro de máximo error del DEM, que minimiza la influencia de éste sobre los resultados obtenidos.

En función del aumento del margen espacial aplicado en el paso anterior, para el proceso de selección se determinó un amplio umbral de densidad espacial de celdas. De esta forma, se flexibilizó el proceso de selección aumentando el número de celdas en la re-estimación de los valores de fase para cada celda referencial, lo cual disminuiría la cantidad de celdas aisladas, requisito básico para desenrollar la fase en la dimensión del espacio de una forma adecuada.

Para controlar esta flexibilización y eliminar el conjunto de celdas con valores muy ruidosos, se mantuvo el umbral de la desviación estándar asociado a la eliminación de valores ruidosos entre celdas vecinas.

Al finalizar este proceso, el número de celdas que fueron finalmente seleccionadas corresponden a 12524, las cuales se pueden apreciar en la figura 6.1 en valores de fase enrollados. Cabe señalar, que debido al bajo número de celdas finalmente seleccionadas, se aumentó la dimensión de éstas (pixel spacing), para mejorar la visualización de los datos en las figuras respectivas.

²Los parámetros específicos que trae por defecto STaMPS/MTI, están incluidos en el Apéndice A.

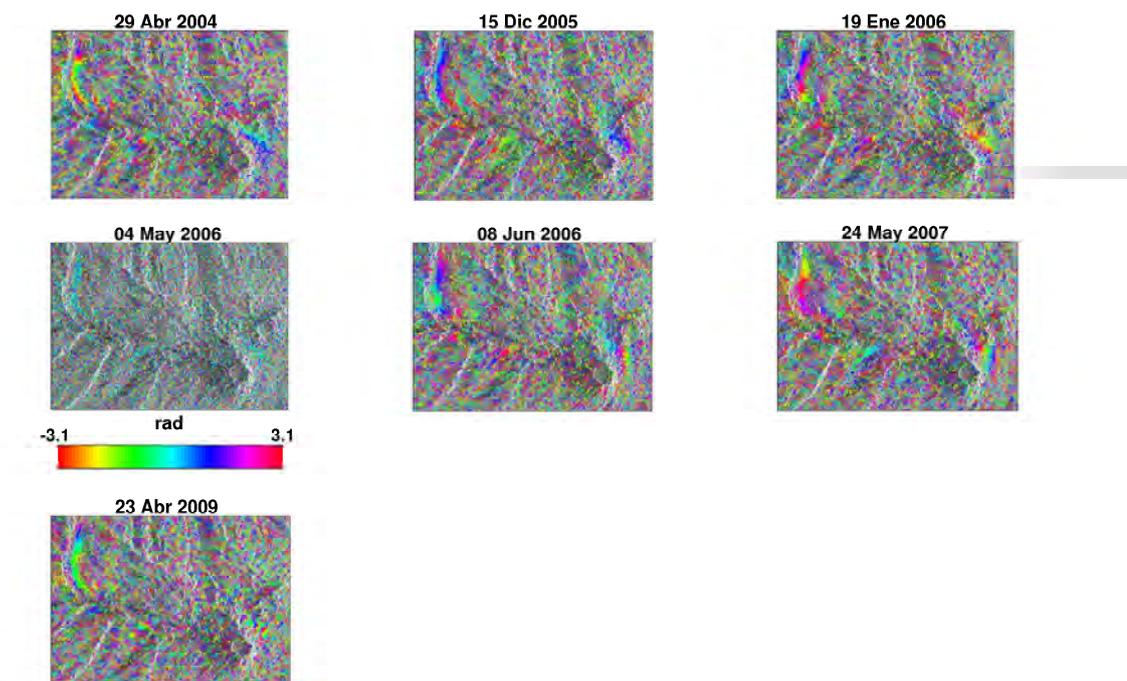


Figura 6.1: Valores de fase enrollados ($-\pi - \pi$) para Persistent Scatterer Interferometry (PSI), en coordenadas SAR.

En cuanto a la etapa de desenrollamiento de fase, en la dimensión del espacio se mantuvieron el tamaño de grillas y ventanas de filtrado que trae por defecto el software. En lo que respecta a parámetros relacionados con la dimensión del tiempo, se aumentó el intervalo temporal del filtrado de Gauss entre celdas vecinas a 730 días, para disminuir la influencia de artefactos atmosféricos característicos del área de estudio y de forma adicional porque en base a los resultados de Pritchard y Simons (2004), la tasa de deformación en el área de estudio, varió en intervalos de 2 años aproximadamente.

En la serie temporal desenrollada (figura 6.2) por el algoritmo 3D de STaMPS/MTI, menos los errores SCLA, AOE y las rampas de fase³, con base acumulativa en la imagen correspondiente al 29 de Abril del año 2004, se puede identificar parcialmente un proceso de deformación dominante en el centro del complejo volcánico durante el periodo comprendido por los datos. Por convención, en STaMPS/MTI, cuando la imagen maestra se encuentra antes que la imagen esclava (en tiempo), los valores positivos indican un vector en sentido contrario a la plataforma.

Cabe destacar, que como se muestra en la lista de parámetros mencionada (tabla 6.2), se eliminaron del proceso de Unwrapping los interferogramas N°5 y N°6 (Selección de interferogramas PSI, tabla 5.1). La razón por la cual no se les consideró en este proceso se debe fundamentalmente a que en zonas periféricas del cordón volcánico, sus valores sobrepasaron el módulo 2π en tiempo, alterando los valores finales de velocidad promedio en la LOS. Debido a esto, se estima que en la dimensión del tiempo existen problemas metodológicos en lo que respecta a la sustracción de los artefactos atmosféricos existentes.

³Los cuales se pueden ver cada uno en el Apéndice B - Sección PSI.

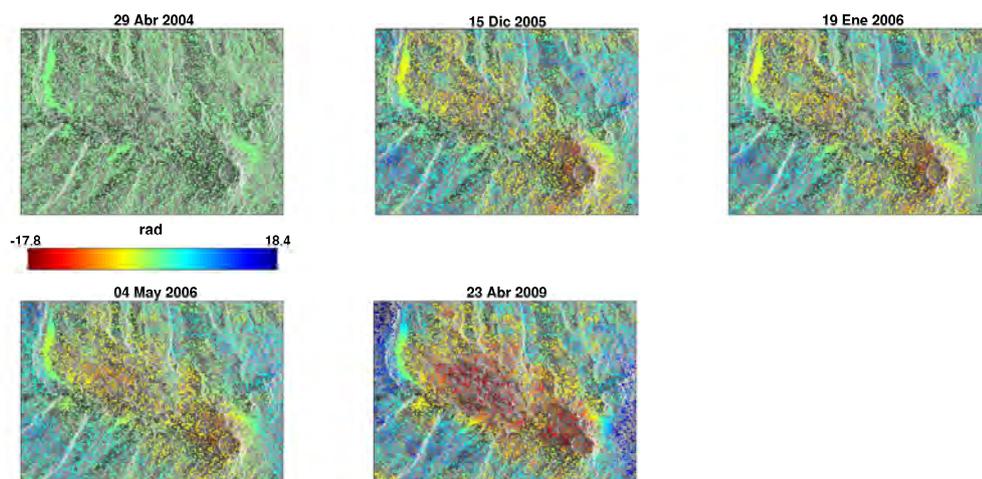


Figura 6.2: Interferogramas desenrollados, menos los errores asociados al SCLA, al AOE y las rampas de fase, en coordenadas SAR.

En cuanto a la velocidad de deformación promedio en la LOS, las celdas que presentaron los valores mas altos hacia la plataforma están localizadas principalmente en el centro del cordón volcánico, alcanzando hasta 16.3 mm/año; por otra parte, en áreas localizadas al noreste y suroeste (sectores en donde existen preferentemente altas pendientes), se registraron velocidades promedio en sentido contrario hasta los -18.7 mm/año. Resulta importante considerar, que dada la dimensión del área común abarcada, no se tienen puntos de control localizados en zonas que no hayan presentado deformación, por lo que los valores obtenidos son solo referenciales a dicha área.⁴

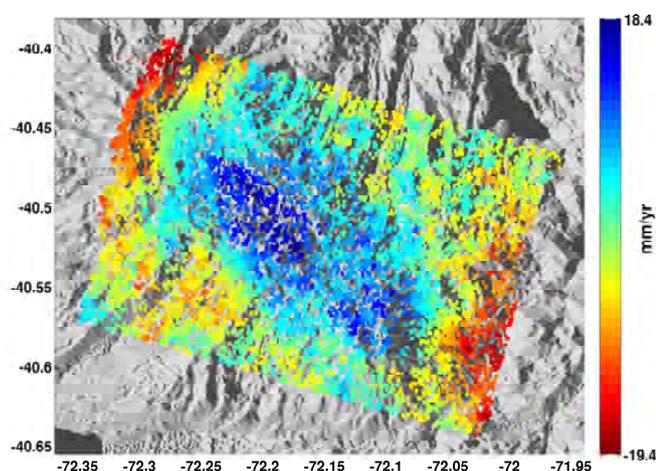


Figura 6.3: Velocidad promedio en la LOS entre el 29 de abril del año 2004 y el 23 de Abril de 2009 para Persistent Scatterer Interferometry (PSI), menos los errores asociados al SCLA y al AOE, en coordenadas geográficas.

⁴STaMPS/MTI por convención, en lo que respecta a las velocidades, los valores positivos indican un vector de desplazamiento hacia al satélite; y por el contrario, valores negativos indican un alejamiento de la plataforma.

En los gráficos que se presentan a continuación, se pueden visualizar los comportamientos particulares para cada una de las celdas específicas en la dimensión del tiempo. Los valores de la serie temporal están representados por el símbolo ∇ , la deformación promedio calculada en base a mínimos cuadrados por la línea roja, y por último los umbrales de confianza de los resultados por la línea verde en el módulo 2π . Adicionalmente en la parte superior, están los valores de las líneas de base perpendiculares de cada uno de los interferogramas incluidos en esta etapa final del proceso.

En lo que respecta al gráfico 6.4, en consideración del submuestreo de datos en tiempo (baja cantidad de interferogramas finalmente ocupados) se puede apreciar una simetría en lo que respecta a las velocidades registradas, las cuales muestran parcialmente un proceso de inflación que de forma predominante se desarrolla en el centro del cordón volcánico.

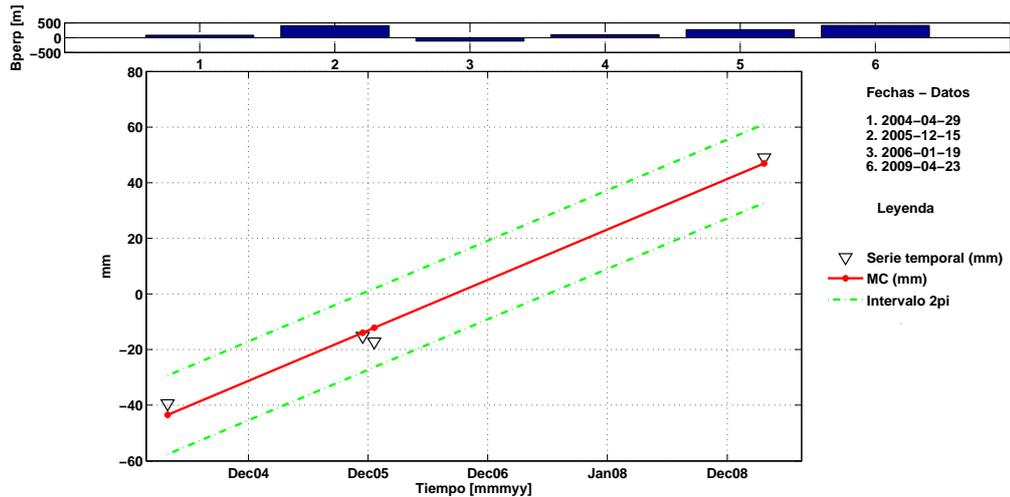


Figura 6.4: Valores de la serie temporal de deformación de la celda con coordenadas geográficas $-72,174$ Longitud O y $-40,526$ Latitud S.

En los depósitos de lavas con data del año 1921, que fueron una de las zonas que presentaron los valores de coherencia más altos en términos comparativos, como se puede apreciar en el gráfico 6.5, los resultados indican que potencialmente pertenecería al área que presenta mayor estabilidad en el tiempo, no presentándose una tendencia clara de una deformación constante.

6.1 PERSISTENT SCATTERER INTERFEROMETRY (PSI)

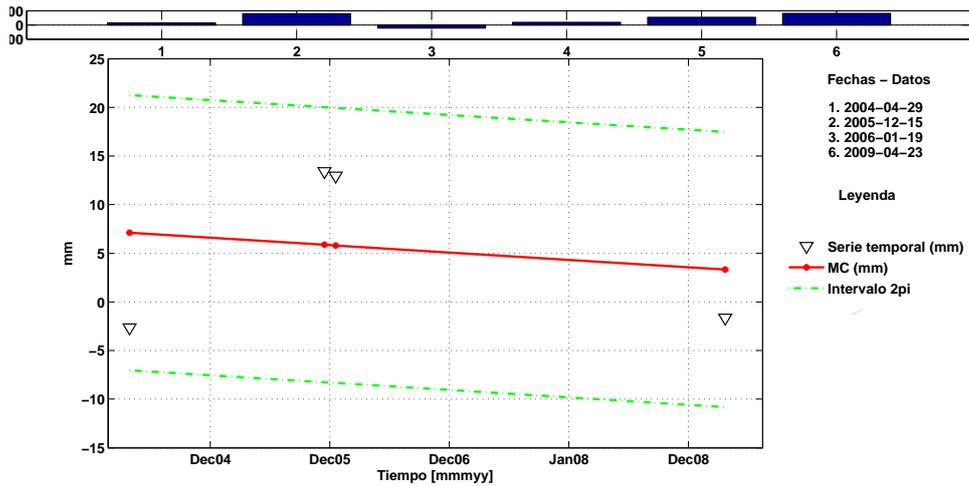


Figura 6.5: Valores de la serie temporal de deformación de la celda con coordenadas geográficas $-72,258$ Longitud O y $-40,437$ Latitud S.

Por otro lado, el gráfico 6.6, muestra los resultados obtenidos en una celda que está localizada al sureste de la caldera del volcán Puyehue. Específicamente, estos resultados describen de forma aparente un proceso de subsidencia que se ha desarrollado en dicha área. Debido básicamente, al área común seleccionada (como se ha planteado anteriormente), y al bajo número de celdas e interferogramas seleccionados, no se obtuvo una explicación conclusiva del proceso que generaría estos valores. Se estima a priori, que dada su localización (áreas de fuertes pendientes) y la ausencia de coberturas vegetacionales, pueden ser fenómenos locales, como por ejemplo deslizamientos de terreno. Por ende, dado este contexto, es necesario realizar procesos de validación para poder confirmar las tendencias descritas ⁵.

área descubierta de vegetación y de altas pendientes, y por otro lado a los parámetros utilizados como la dimensión de la grilla de filtrado de elementos espacialmente correlacionados (realizado en el análisis de fase), se va dificultando aún más

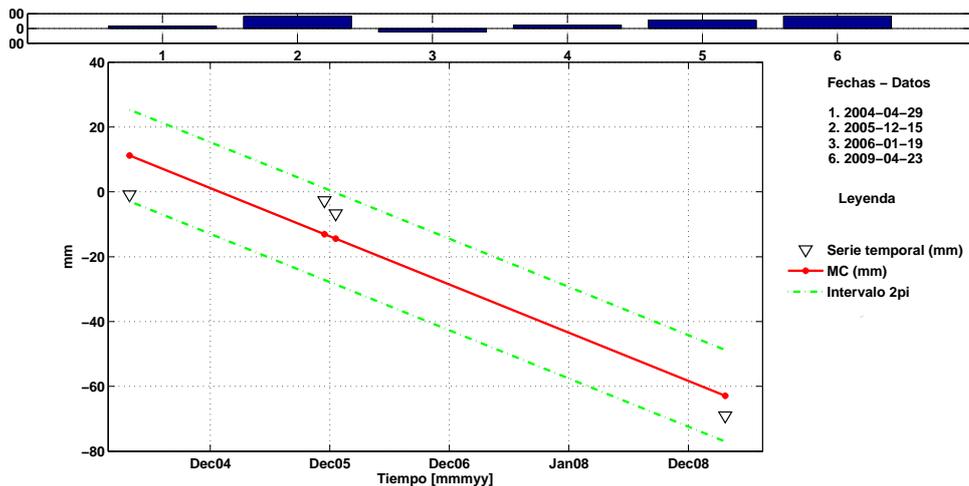


Figura 6.6: Valores de la serie temporal de deformación de la celda con coordenadas geográficas $-72,037$ Longitud O y $-40,590$ Latitud S.

⁵Cabe señalar, que sólo se tienen antecedentes que un proceso de inflación en el área.

El área periférica del cordón volcánico, presentó los valores con la mayor irregularidad o asimetría en la serie temporal. En el gráfico 6.7, se puede apreciar un ejemplo del comportamiento de los valores de la serie en una celda localizada al noreste del área de estudio, en donde existen fundamentalmente coberturas vegetacionales con una alta densidad. Se asume que este tipo celdas han sido seleccionadas porque existe una relación directa entre el valor que adquiere γ como indicador de estabilidad de fase y el número de interferogramas utilizado (Sección Metodología - ecuación 3.14). A menor cantidad de interferogramas, el indicador tiende a ser mayor, por lo que dependiendo del valor de corte (el cual, al haber una gran cantidad de celdas ruidosas, probablemente es bajo) la celda fue seleccionada sin tener valores de fase estables.

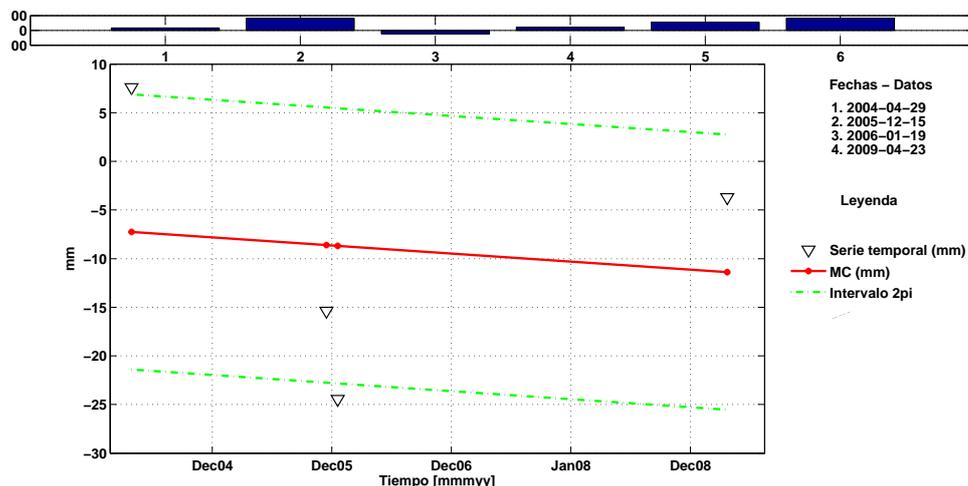


Figura 6.7: Valores de la serie temporal de deformación de la celda con coordenadas geográficas $-72,098$ Longitud O y $-40,480$ Latitud S.

6.2. Small Baseline Subset (SBAS)

6.2.1. SubConjunto N°1

Para el caso del procesamiento de series temporales para el primer subconjunto SBAS, en base a lo planteado en la metodología (3.1.3) el valor del umbral del D_A ocupado corresponde a 0.6 (ver tabla 6.3). Adicionalmente, al igual que en el caso anterior, no se subdividió en sub-matrices el área abarcada por los interferogramas seleccionados.

| Parámetro | Valor |
|---------------------------------|-------|
| Índice de Dispersión - amplitud | 0.6 |
| Parches en Rango | 1 |
| Parches en Acimut | 1 |

Tabla 6.3: Parámetros iniciales STaMPS/MTI para Small Baseline Subset (SBAS) - Subconjunto N°1.

En primera instancia, en lo referente a los resultados alcanzados por el análisis de los valores de amplitud de los datos, se identificaron 3061364 de potenciales candidatos a celdas SDFP.

Cabe recalcar, que este procesamiento no sólo se diferencia del algoritmo PSI, por incorporar a la realización de interferogramas umbrales de selección en lo que respecta a línea de base espacial, línea de base

temporal y diferencias de frecuencias de centroides doppler; adicionalmente todos los interferogramas diferenciales son filtrados en el espectro del rango, lo cual minimiza la decorrelación, descartando así la no superposición de frecuencias Doppler en acimut. Debido a esto, se esperó una baja importante en la cantidad de celdas seleccionadas dadas las propiedades descritas de los datos utilizados en los capítulos anteriores. En la tabla 6.4, se pueden apreciar la serie de valores otorgados a los distintos parámetros en lo que respecta al análisis de fase, de los cuales algunos fueron modificados con respecto a los que trae por defecto de STaMPS/MTI.

En este sentido, a pesar de ser el conjunto de datos con los valores de coherencia con mayor correlación espacial, no presentan valores altos en promedio, por lo que se aumentó la dimensión de la grilla y ventana del filtrado relacionadas con la determinación de los elementos espacialmente correlacionados en los valores de fase de un interferograma diferencial. Conjuntamente, se mantuvo el valor por defecto del parámetro de máximo error del DEM y se aumentó la densidad espacial de celdas con fase aleatoria, lo que genera que en un rango espacial mayor se realice el proceso de re-estimación de los valores de fase para cada celda referencial.

| Parámetro | Valor |
|--|------------|
| Error máximo del DEM | 5 |
| Tamaño de grilla para filtro de fase combinado | 100 m |
| Tamaño de ventana de Filtro de paso combinado | 64 |
| Densidad espacial máxima de celdas con fase aleatoria por km^2 | 25 |
| Umbral de desviación estándar de los valores de fase | inf |
| Umbral para el ruido máximo de fase permitido para una celda | inf |
| Ventana filtrado en tiempo - distribución de ruido de fase | 730 (días) |
| Ventana Filtro de Goldstein | 32 |
| Tamaño de grilla - Unwrapping | 200 |
| Tamaño de ventana en tiempo - Unwrapping | 730 (días) |
| Lista de interferogramas no incluidos - Unwrapping | [] |

Tabla 6.4: Parámetros usados por STaMPS/MTI para determinar la LOS - Small Baseline Subset (SBAS) - Subconjunto N°1.

En lo que respecta a los umbrales de desviación estándar tanto para los valores de fase y como para el ruido de ésta calculados, se disminuyeron, considerando los valores que por defecto trae el software, debido fundamentalmente a la baja cantidad de interferogramas que forman parte del conjunto de datos.

Finalmente, el número de celdas de Fase Filtrada con baja Decorrelación (SDFP), que fueron seleccionadas en este proceso corresponden específicamente a 723, las cuales se pueden apreciar en la figura 6.8 en valores de fase enrollados. Cabe destacar, que debido al bajo número de celdas, se aumentó la dimensión de los píxeles (pixel spacing) para poder visualizar de mejor forma dichos resultados.

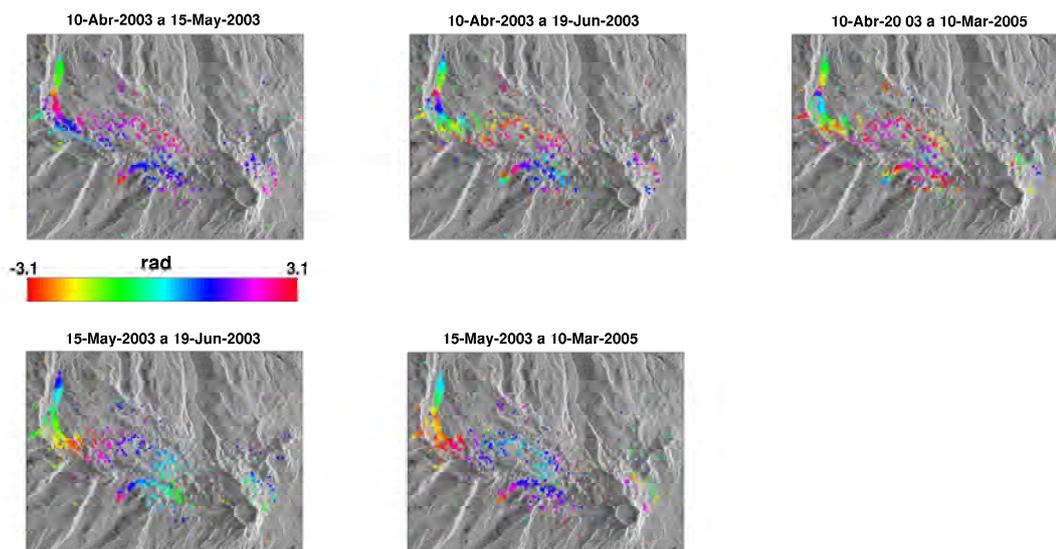


Figura 6.8: Valores de fase enrollados ($-\pi$ a π) para Small Baseline Subset (SBAS) - el Subconjunto N°1, en coordenadas SAR.

A este conjunto de celdas posteriormente se les aplicó el algoritmo 3D de STaMPS/MTI para obtener valores desenrollados de fase. En lo que respecta a los parámetros relacionados esta etapa, en la dimensión del espacio se mantuvieron el tamaño de grillas y ventanas de filtrado y en lo que respecta a la dimensión del tiempo, de la misma forma que en el caso anterior, se aumentaron los valores por defecto, dando un intervalo temporal de 730 días al filtrado de Gauss del ruido entre celdas vecinas, para disminuir la influencia de artefactos atmosféricos y por la tasa de deformación que se maneja por información complementaria.

En la serie temporal desenrollada menos los errores estimados de SCLA, AOE y las rampas orbitales de cada interferograma (figura 6.9)⁶, entre el 10 de abril del año 2003 y el 10 de marzo del año 2005, se puede apreciar un proceso de deformación aparentemente dominante en el centro del complejo volcánico. Mediante el cálculo de la fase residual entre todos los interferogramas considerados y la fase determinada por el modelo generado, se verificó que el conjunto celdas individuales no presentaron errores locales de desenrollado (no se aprecian celdas espacialmente correlaciones con valores sobre 2π - Apéndice B - Figura B.4: Residuales entre la los valores de fase desenrollados de los interferogramas y los valores del modelo de imagen maestra única - SBAS-1).

⁶Los cuales se pueden ver cada uno en el Apéndice B - Sección SBAS-1.

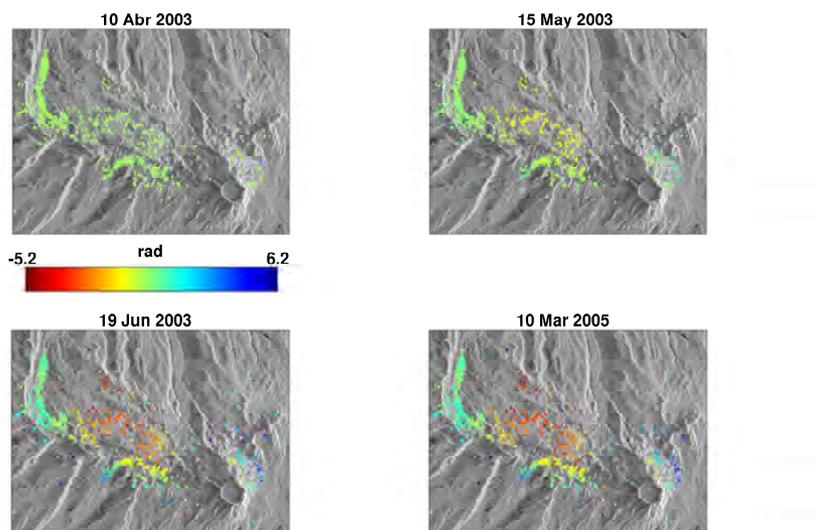


Figura 6.9: Interferogramas desenrollados correspondientes al subconjunto N°1 SBAS, menos los errores asociados al SCLA, al AOE de la imagen maestra y las rampas de fase, en coordenadas SAR.

Específicamente, los valores de velocidad promedio en la LOS, la celdas que presentaron los valores más altos hacia la plataforma están localizadas principalmente en el centro del cordón volcánico, alcanzando hasta 11.6 mm/año; por otra parte, en áreas localizadas suroeste de la caldera del volcán Puyehue, se registraron los velocidades promedio en sentido opuesto hasta los -15.5 mm/año. Estos resultados siempre en base a marco de referencia dentro del área circunscrita, que no posee áreas sin procesos de deformación.

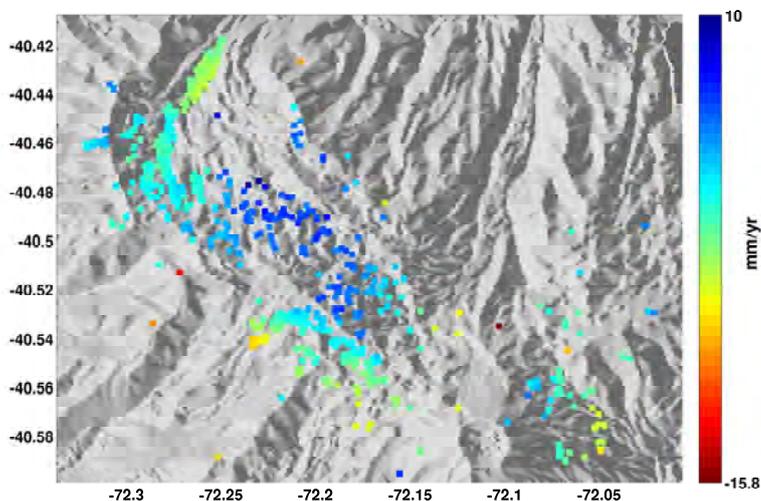


Figura 6.10: Promedio de la velocidad en la LOS para el subconjunto N°1 SBAS, menos los errores asociados al SCLA y las rampas de fase, en coordenadas geográficas.

En el caso del gráfico 6.11, que corresponde a la serie temporal de una celda localizada en el área central del cordón volcánico, en consideración de la baja cantidad de interferogramas ocupados, se puede apreciar una simetría relativamente parcial de los valores de deformación, lo cual se interpreta como un potencial

6.2 SMALL BASELINE SUBSET (SBAS)

proceso de inflación de baja magnitud que se desarrolla en dicha área mencionada, cercano a un centímetro por año.

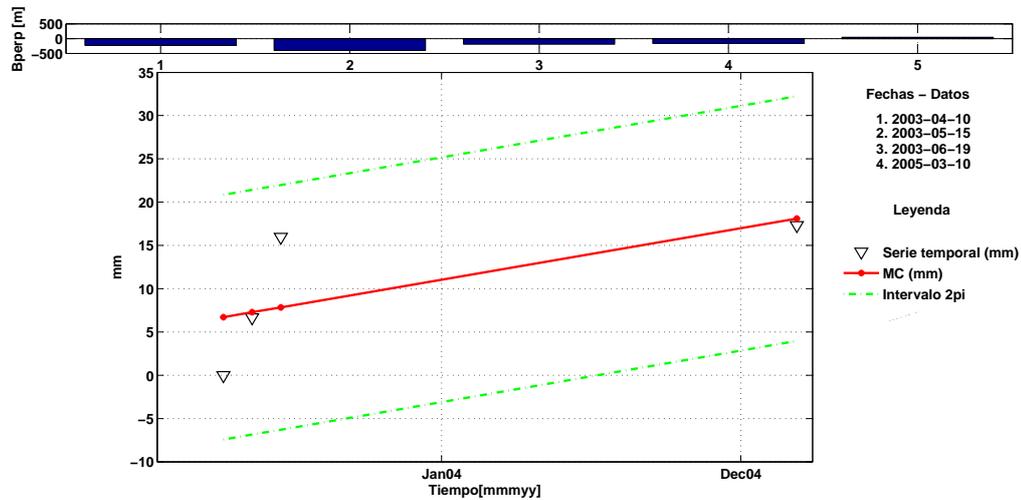


Figura 6.11: Valores de la serie temporal de deformación de la celda con coordenadas geográficas $-72,218$ Longitud O y $-40,488$ Latitud S.

Por otro lado, el gráfico 6.12 muestra los valores de una celda localizada al oeste de la caldera del volcán Puyehue, en donde se puede apreciar un movimiento relativamente constante de los valores de la deformación, que corresponden a un potencial proceso de subsidencia local, cercano a un centímetro y medio por año. Cabe señalar, que en el área en cuestión, en el procesamiento de PSI también se obtuvieron valores con esta tendencia, los cuales pueden responder a la generación de procesos locales (por ejemplo, deslizamientos de terreno).

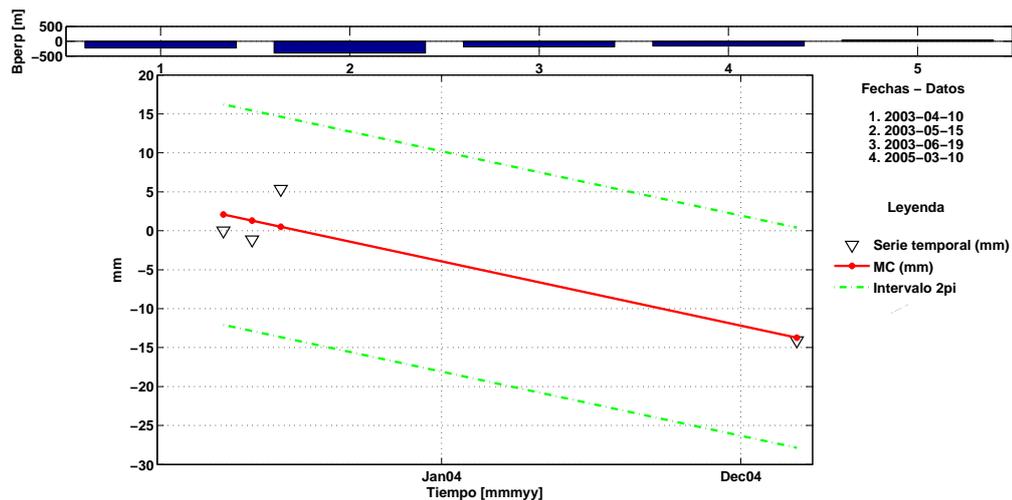


Figura 6.12: Valores de la serie temporal de deformación de la celda con coordenadas geográficas $-72,052$ Longitud O y $-40,570$ Latitud S.

Sin embargo, en el caso que se puede apreciar en el gráfico 6.13, en una celda localizada en la colada de lava (con data de 1921), el problema de la baja cantidad de datos en tiempo se potencia por la dispersión de los valores de deformación, específicamente en este caso de los valores correspondientes al 10 de abril y el 19 de junio del año 2003 (el último cabe señalar, se encuentra en el límite de $-\pi$). En consideración que esta área en específico cuenta con los valores de coherencia promedio mas altos, se considera que a priori estos valores pueden deberse a la incorporación de artefactos atmosféricos en los valores de fase, los cuales mediante el procesos de filtrado espectral, tanto en la imagen maestra como en las esclava, no pudieron ser sustraídos.

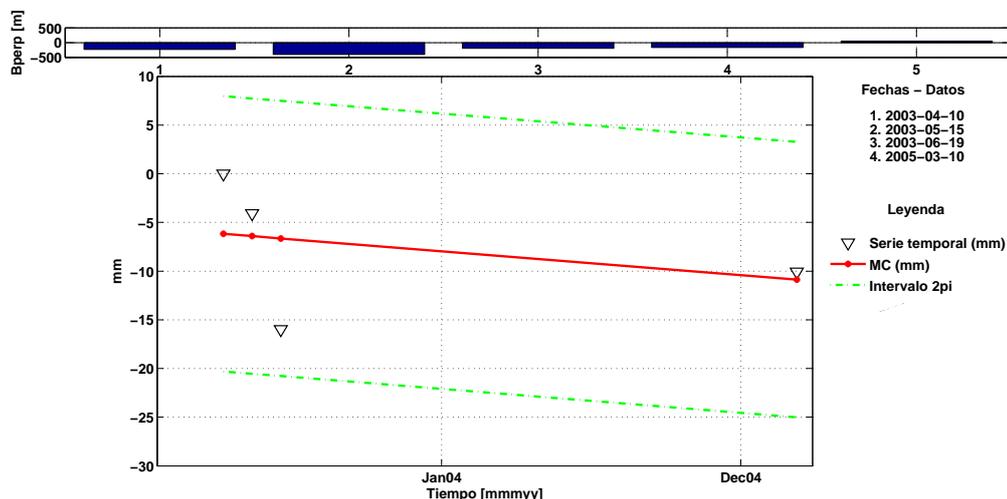


Figura 6.13: Valores de la serie temporal de deformación de la celda con coordenadas geográficas $-72,280$ Longitud O y $-40,446$ Latitud S.

6.2.2. SubConjunto N°2

Para el caso del procesamiento de series temporales para el segundo subconjunto SBAS, al igual que en el caso anterior, el umbral del índice de amplitud D_A ocupado corresponde a 0.6. En base a una serie de pruebas realizadas, y debido a que un gran porcentaje de los altos valores de coherencia se concentraron en los depósitos de lava generados por la actividad de 1921, se subdividió la matriz en 6 parches, para realizar un procesamiento sólo del área mencionada (tabla 6.5).

| Parámetro | Valor |
|---------------------------------|-------|
| Índice de Dispersión - amplitud | 0.6 |
| Parches en Rango | 3 |
| Parches en Acimut | 2 |

Tabla 6.5: Parámetros iniciales de STaMPS/MTI para Small Baseline Subset (SBAS) - Subconjunto 2.

En lo referente al análisis de amplitud de los datos, en principio se identificaron 400906 celdas, con valores bajo el umbral definido.

En la tabla 6.6, se pueden apreciar la serie de valores otorgados a los distintos parámetros en lo que respecta al análisis de fase. Al igual que el subconjunto N°1 de SBAS, se aumentó la dimensión de la grilla y ventana del filtrado relacionadas con la determinación de los componentes correlacionados espacialmente de los interferogramas seleccionados. Por otra parte, debido a que el depósito de lavas Rio-dacíticas posee una cobertura específica, se disminuyó la densidad espacial de celdas con fase aleatoria utilizada, lo que

determinó que la selección de celdas fuera mucho menor en cantidad que en los subconjuntos analizados anteriormente.

| Parámetro | Valor |
|--|------------|
| Error máximo del DEM | 5 |
| Tamaño de grilla para filtro de fase combinado | 100 m |
| Tamaño de ventana de Filtro de paso combinado | 64 |
| Densidad espacial máxima de celdas con fase aleatoria por km^2 | 3 |
| Umbral de desviación estándar de los valores de fase | 1 |
| Umbral para el ruido máximo de fase permitido para una celda | 1 |
| Ventana filtrado en tiempo - distribución de ruido de fase | 730 (días) |
| Ventana Filtro de Goldstein | 32 |
| Tamaño de grilla - Unwrapping | 200 |
| Tamaño de ventana en tiempo - Unwrapping | 730 (días) |
| Lista de interferogramas no incluidos - Unwrapping | [1 9 11] |

Tabla 6.6: Parámetros usados para Small Baseline Subset (SBAS) - Subconjunto 2.

El número de celdas de SDFP que fueron seleccionadas finalmente en este proceso corresponden específicamente a 185, las cuales se pueden apreciar en la figura 6.14 con sus valores de fase en el módulo 2π . Cabe destacar, que este conjunto de celdas resultante es muy bajo, por lo que se aumentó, al igual que en los casos anteriores, la dimensión de los píxeles (pixel spacing) para poder visualizar de mejor forma los resultados obtenidos.

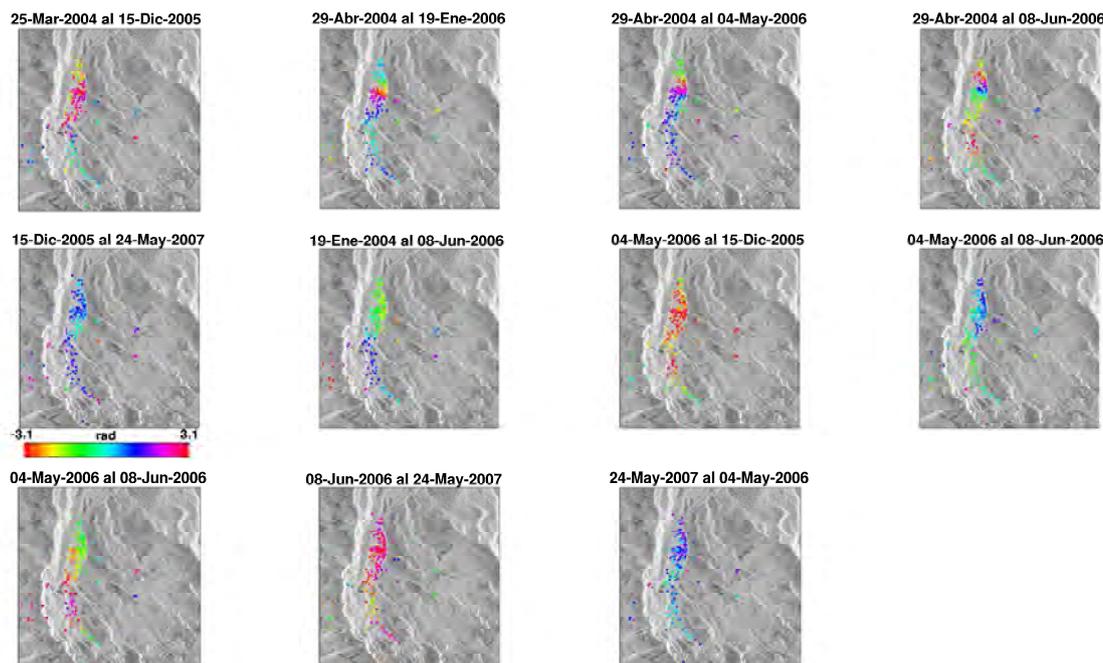


Figura 6.14: Valores de fase enrollados ($-\pi$ a π) - para el subconjunto N°2 - Small Baseline Subset (SBAS).

Posteriormente, se desenrollaron los valores de fase aplicando el algoritmo 3D de STaMPS/MTI. En cuanto a los parámetros específicos se mantuvieron los que se han ocupado en todos los casos anteriores. Cabe señalar, que en esta etapa se han sustraído los interferogramas 1, 9 y 11 (Selección de interferogramas SBAS-2 tabla 5.3), debido a que en diferentes áreas analizadas los valores de la serie temporal difieren del comportamiento estándar, alterando los valores de velocidades promedio. En la serie temporal desenrollada

menos los errores estimados de SCLA, AOE y las rampas orbitales de cada interferograma (figura 6.15)⁷, entre el 29 de abril del año 2004 y el 24 de Mayo del año 2007, se puede identificar en términos generales un cierto grado de estabilidad de los valores de deformación, presentándose pequeñas fluctuaciones locales. Finalmente, mediante la estimación de la fase residual entre los interferogramas considerados y la fase determinada por el modelo generado, se verificó que no se presentaron errores locales de desenrollado (no se aprecian celdas espacialmente correlacionadas con valores sobre 2π - Apéndice B - Figura B.8: Residuales entre la los valores de fase desenrollados de los interferogramas y los valores del modelo de imagen maestra única - SBAS-2).

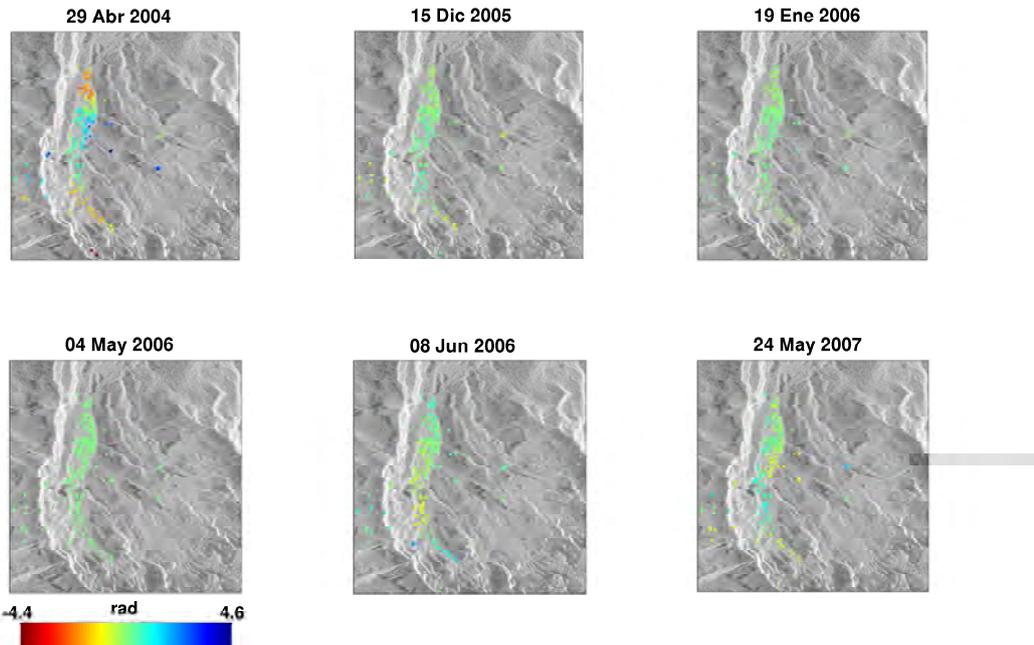


Figura 6.15: Interferogramas desenrollados correspondientes al subconjunto N°2 SBAS, menos los errores asociados al SCLA, al AOE de la imagen maestra y las rampas de fase.

En cuanto a los valores de velocidad promedio en la LOS, la celdas que presentaron los valores más altos hacia la plataforma, tuvieron un valor máximo de 9.1 mm/año; por otro lado las celdas que presentaron velocidades en el sentido opuesto alcanzaron los -7.9 mm/año.

⁷Los cuales se pueden ver cada uno en el Apéndice B - Sección SBAS-2.

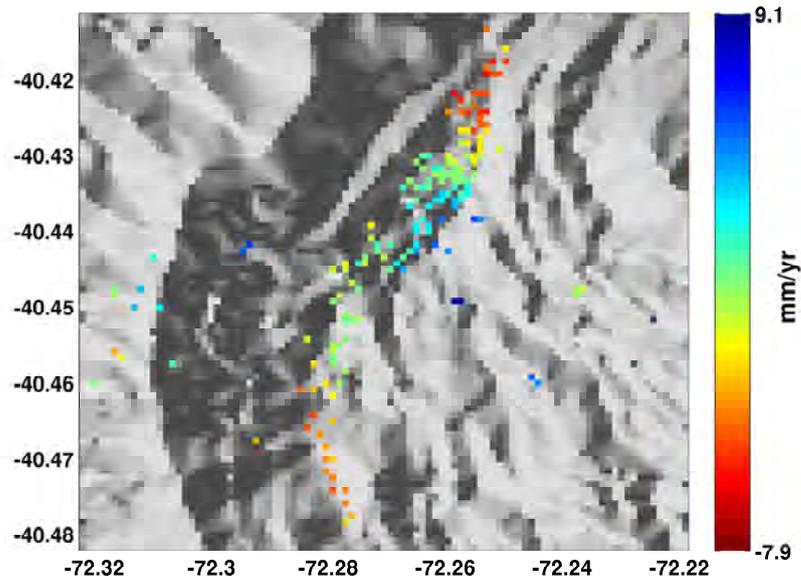


Figura 6.16: Promedio de la velocidad en la LOS para el subconjunto N°2 SBAS, menos los errores asociados al SCLA y las rampas de fase.

En términos generales, como se puede apreciar en los gráficos 6.17 y 6.18 las celdas localizadas en el depósito de lavas Rio-dacíticas, no describen un proceso de deformación con una tendencia definida, presentando valores de la serie tiempo con un comportamiento relativamente constante y cercano a 0 (en base a la referencia del área). En base a estos resultados, en el periodo comprendido por los datos, se plantea que esta zona del complejo volcánico presentó un comportamiento espacialmente correlacionado y en el caso de que se tuviera una referencia externa al área analizada, este depósito de lava eventualmente describiría valores de deformación constantes.

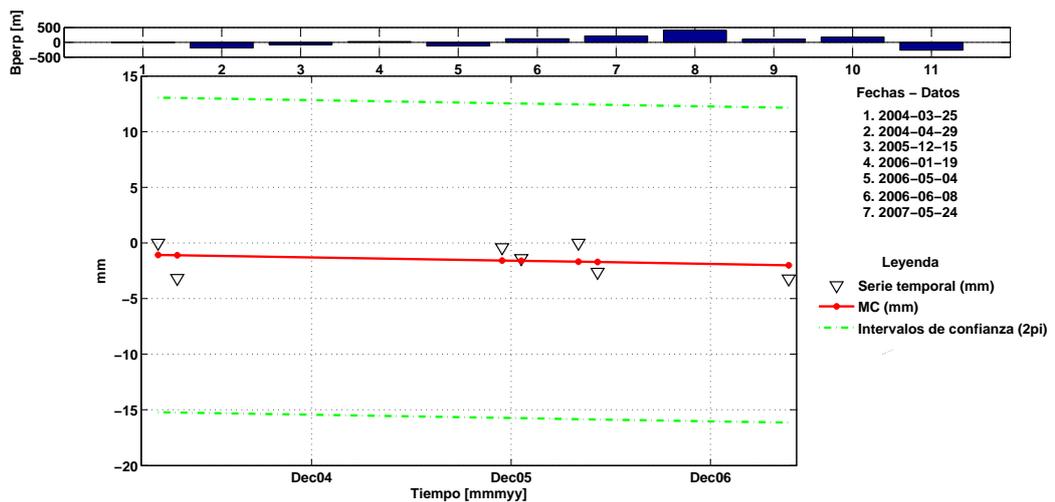


Figura 6.17: Valores de la serie temporal de la celda con coordenadas geográficas $-72,261$ Longitud O y $-40,432$ Latitud S.

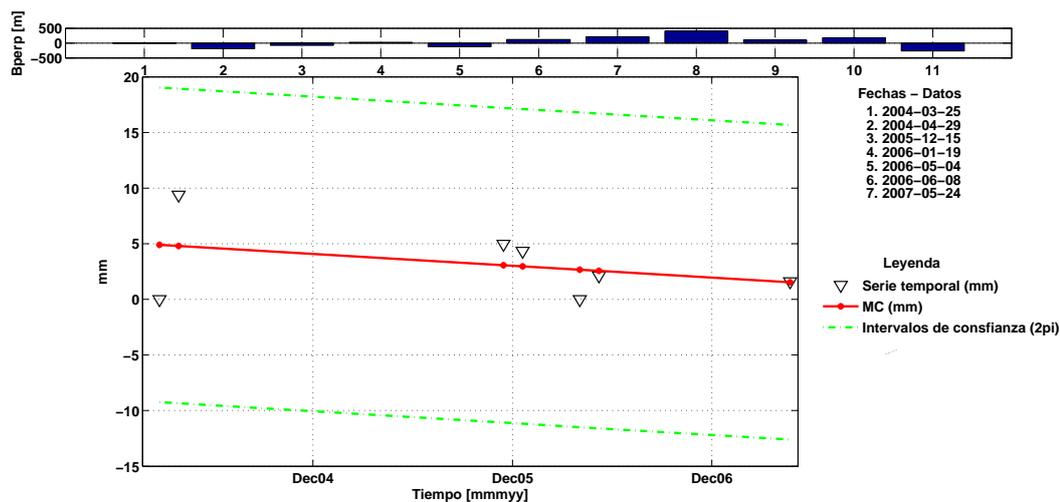


Figura 6.18: Valores de la serie temporal de la celda con coordenadas geográficas 72,253 Longitud O y -40,413 Latitud S.

6.2.3. SubConjunto N°3

En este caso, como muestra la tabla 6.7 para el análisis de valores de amplitud se definieron los mismo parámetros que se han definido para los subconjuntos SBAS anteriores.

| Parámetro | Valor |
|---------------------------------|-------|
| Índice de Dispersión - amplitud | 0.6 |
| Parches en Rango | 1 |
| Parches en Acimut | 1 |

Tabla 6.7: Parámetros iniciales de STaMPS/MTI para Small Baseline Subset (SBAS).

Como resultado de este análisis preliminar de los datos, se lograron identificar 2927225 celdas que tienen valores bajo el umbral definido por la parametrización de la metodología propuesta por los autores. Sin embargo, en la etapa correspondiente al análisis de fase, en base a una serie de pruebas que se basaron en la flexibilización de todos los parámetros vinculados con la selección de celdas con valores estables de fase, no se consiguieron resultados satisfactorios. En otras palabras, este tipo de procesamiento no encontró ninguna celda con valores de fase estables en el tiempo.

Discusión

En términos generales, los procesamientos realizados con los algoritmos correspondientes a Persistent Scatterer Interferometry (PSI) y Small Baseline Subset (SBAS), no lograron los resultados esperados. Esto se ve reflejado, por ejemplo, en la limitada cantidad de interferogramas diferenciales que pudieron ser finalmente utilizados por ambos métodos en el análisis de series temporales, entregando resultados parcialmente aceptables si se comparan, tanto con lo determinado en investigaciones anteriores (Fournier et al., 2010) y los parámetros específicos referenciales de las distintas etapas del software utilizado (Manual de STaMPS/MTI).

El factor de mayor importancia que genera este problema es la decorrelación temporal característica de la zona en donde se encuentra localizado el Cordón Volcánico Puyehue - Cordón Caulle (CVPCC), que está determinada por la relación existente entre la dinámica de las coberturas de la zona, fundamentalmente de las nieves estacionales y las diferentes comunidades vegetacionales, y los parámetros básicos del sensor ocupado, en este caso de ERS-2, el cual tiene una frecuencia de 5.3 GHz (banda C) y una repetición de ciclos de 35 días. Este problema, en el caso específico de SBAS, fue de tal magnitud, que generó que el conjunto original de datos se tuviera que subdividir en subconjuntos de cantidades de interferogramas más limitadas. Cabe señalar también, que en la revisión de la etapa de coregistración, no se encontraron valores de correlación altos, lo que podría potencialmente haber disminuido la precisión de este proceso, influyendo en la presencia de ruido en los interferogramas conformados.

En el análisis comparativo, en lo que respecta a la selección final de celdas, PSI al tener parámetros generales más flexibles (por ejemplo, líneas de base y líneas temporales) logró obtener una mayor cantidad de celdas, las cuales específicamente corresponden a 11362, distribuidas mayormente por toda el área seleccionada. Por otra parte, los diferentes subconjuntos de SBAS, sólo lograron seleccionar 723 y 187 celdas correspondientemente, en áreas en donde se registraron los mayores valores de coherencia. Éstas corresponden en específico, al centro del cordón volcánico y a los depósitos de lavas generados por las erupciones desarrolladas en los años 1921 y 1960.

En términos generales, los resultados obtenidos por ambos algoritmos describen que en el centro del cordón volcánico se presenta un proceso de deformación que corresponde específicamente a una inflación, con diferentes velocidades promedio según el periodo abarcado.

Otra área en donde parcialmente presentan resultados similares, es en el depósito de lava Rio-dacíticas con datación de 1921, en el cual no se registra un proceso de deformación importante, manteniendo valores bajos y con un comportamiento relativamente constante en tiempo.

Cabe destacar que estos resultados como se ha mencionado durante el desarrollo de este trabajo, no poseen valores de referencia de puntos lejanos al complejo volcánico en donde no se registre la existencia de deformación, por lo que las mediciones realizadas son de carácter relativo al área circunscrita, y pueden reflejar una correlación espacial de los valores de deformación (es decir, que existe un comportamiento homogéneo de un área si se relaciona con otro punto de referencia), e incorporar deformaciones locales asociadas a procesos generados por otro tipo de factores, como por ejemplo a deslizamientos de terreno.

Sin embargo, a pesar de tener una tendencia definida, no es posible comparar los valores de las series temporales de forma cuantitativa, básicamente por dos motivos: el primero, es porque dada la baja cantidad de celdas seleccionadas por parte de ambos algoritmos, no se registraron píxeles que sean PS y SDFP de forma simultánea; por otro lado, aunque hubiesen presentado celdas en común, el submuestreo en tiempo, dado la limitada cantidad de interferogramas ocupados, no son suficientes para poder aplicar cualquier tipo de herramienta estadística de comparación, como por ejemplo índice de correlación, etc.

Cabe señalar también, que el software utilizado presentó limitaciones en su capacidad para determinar series temporales de forma consistente en este contexto específico de decorrelación. Esto en la práctica, se manifestó en la importante sustracción de interferogramas diferenciales, los cuales en la dimensión del espacio y del tiempo, no generaron valores desenrollados correlacionados y dentro del módulo 2π correspondientemente, a pesar de que se realizaron selecciones intensivas en base a valores de amplitud (imágenes) y de coherencia (interferogramas diferenciales) en las primeras etapas de la investigación (Capítulos 4 y 5).

En base a la revisión del desarrollo y los resultados obtenidos, se plantea la necesidad de incluir en el software ocupado, modelos mas sofisticados para la determinación de artefactos atmosféricos. La variabilidad que se puede observar en áreas con valores de coherencia aceptables, muestra que el proceso de filtrado espectral, tanto en la imagen maestra como en la esclava no fueron suficientes para sustraer dichos componentes.

Por lo tanto, en base a la investigación realizada, resulta necesario continuar con la búsqueda de resultados mas consistentes en estas zonas, sobre todo con los nuevos algoritmos publicados que han sido desarrollados efectivamente para soslayar este tipo de problemas, como por ejemplo el realizado por Ferretti et al. (2011), el cual apunta a la identificación y selección de dispersores en este tipo de ambientes mediante procedimientos estadísticos complejos, o al desarrollado por Pinel-Puysségur et al. (2012), que propone un proceso de desenrollamiento de fase en 3 dimensiones, que mejora los resultados obtenidos en casos que se caracterizan por tener una decorrelación temporal alta.

Conclusiones

Los procesamientos realizados con PSI y SBAS, no lograron resultados consistentes, debido a que no pudieron soslayar la decorrelación temporal propia de la zona en donde se encuentra localizado el Cordón Volcánico Puyehue - Cordón Caulle (CVPCC). Esto se debió fundamentalmente por dos motivos: El primero, a las características específicas de los datos del sensor utilizado y el segundo, a la incapacidad de los algoritmos ocupados para determinar resultados consistentes en un contexto de decorrelación temporal.

En lo que respecta al primer factor, debido fundamentalmente a la longitud de onda (o frecuencia) y a la baja repetición de ciclos de la plataforma ERS-2, en este tipo de zona con amplias áreas boscosas y fluctuantes coberturas nivales que determinan cambios físicos frecuentes de la superficie observada, la coherencia de la señal obtenida por el sistema es muy baja, por lo que su potencialidad para desarrollar series temporales interferométricas se ve muy restringida. Cabe destacar, que dependiendo de la cobertura que tengan los depósitos generados por el último proceso eruptivo registrado, se podrían obtener resultados de mayor consistencia, debido a que los valores más altos de coherencia fueron obtenidos efectivamente en los depósitos de lavas Rio-Dacíticas con diferente datación presentes en el complejo volcánico.

A pesar de realizar procesos de selección preliminares, considerando en primera instancia los valores de amplitud y su comportamiento anual, y posteriormente los valores de coherencia de los interferogramas diferenciales realizados por cada una de las estrategias de procesamiento vistas, los algoritmos ocupados presentan limitaciones para poder funcionar en ambientes con decorrelación temporal, lo que se puede corroborar por ejemplo, en el bajo porcentaje de celdas seleccionadas (cabe recalcar, que no se logró seleccionar ninguna celda en el subconjunto SBAS -3) y en la baja cantidad de interferogramas diferenciales que pudieron ser finalmente ocupados en el análisis de series temporales, para los distintos grupos de datos.

Adicionalmente, en la etapa de desenrollado de fase, se tuvieron que sistemáticamente sustraer interferogramas debido a que en la dimensión del espacio no se conseguían valores de fase desenrollados correlacionados, y sobre todo en la dimensión del tiempo, ya que en reiterados casos, los valores de fase sobrepasaban los límites establecidos por el módulo 2π , lo que se relacionó fundamentalmente a la presencia de artefactos atmosféricos.

A pesar de las problemáticas anteriores, ambos algoritmos parcialmente detectaron en el centro del cordón volcánico, un proceso de inflación con diferentes velocidades promedio en los intervalos de tiempo analizados. Cabe destacar, que en términos comparativos con los únicos datos de referencia, los resultados obtenidos muestran diferencias considerables en cuanto al proceso de inflación. Esto se atribuye tanto a la extensión del

área común considerada, la que no incluyó puntos en zonas que no registrasen deformación, obteniendo así resultados relativos solamente a dicha área; y adicionalmente, a la baja cantidad de datos en tiempo que se incluyeron, lo cual determina la imposibilidad de identificar cambios de velocidades con mas detalle.

Por lo tanto ante esta situación, resulta necesario mejorar los procedimientos de identificación, selección y desenrollamiento de fase en 3D, para ambientes que presenten este tipo de factores incidentes. Sería apropiado considerar procesamientos de este tipo de datos, con los nuevos algoritmos que han sido desarrollados para este tipo de contextos y empezar a realizar un proceso de validación relativa mediante los resultados que se vayan obteniendo (ya que en el periodo comprendido por los datos no se tiene información de estaciones GPS con los cuales verificar la calidad de las mediciones realizadas) para poder corroborar con mayor precisión, el comportamiento que presentó el Cordón Volcánico Puyehue - Cordón Caulle (CVPCC) antes de la gran erupción correspondiente al año 2011.

8.1. Aporte

- A pesar de la robustez que han tenido algoritmos como PSI y SBAS en diferentes temáticas específicas, y principalmente en las asociadas a la identificación de procesos de deformación de sistemas volcánicos, en esta tesis se puede corroborar que ocupando los datos con las características de la plataforma ERS-2, este tipo de procedimientos no logra resultados consistentes en zonas que presenten un alto grado de decorrelación temporal, como por ejemplo es la denominada Southern Volcanic Zone (SVZ). Esto puede transformarse en un antecedente más para futuras programaciones de proyectos de Radar de Apertura Sintética (SAR) que contemplen dentro de sus actividades realizar este tipo de estimaciones y modelos.
- En segundo lugar, este trabajo aporta a la discusión en lo que respecta a la identificación de los procesos específicos que podrían modificar o ajustar para poder conseguir resultados con un grado mayor de consistencia en ambientes como por ejemplo donde está localizada el área de estudio en cuestión, en donde la decorrelación temporal sea un factor incidente.
- A pesar de que los resultados obtenidos por ambos métodos no pueden ser catalogados como robustos ni conclusivos por la baja cantidad de celdas e interferogramas seleccionados, se puede parcialmente confirmar que en el Cordón Volcánico Puyehue - Cordón Caulle (CVPCC) entre los años 2004-2009 se produjo un proceso de inflación el cual podría eventualmente relacionarse con la actividad eruptiva desarrollada entre mediados del año 2011 y hasta principios del 2012.

8.2. Proyección

- En lo que respecta a los futuros desarrollos de este tipo de procesamientos, resulta fundamental desarrollar más investigaciones que apunten al mejoramiento de las diferentes etapas del procesamiento de series temporales en casos en donde fundamentalmente se presenten cambios significativos de las propiedades de dispersión y existan condiciones atmosféricas inestables. Específicamente, en el caso del software ocupado, el desarrollo por ejemplo de modelos atmosféricos que mejoren la sustracción de artefactos atmosféricos, y algoritmos de unwrapping en 3D que tengan capacidad de funcionar de forma eficiente con datos con un alto contenido de ruido, serían un complemento importante para poder determinar deformaciones en zonas de gran interés como por ejemplo la denominada SVZ.
- Adicionalmente a los avances y ajustes que puedan desarrollarse para las diferentes etapas de este tipo de procesamiento, uno de los principales problemas estructurales que persiste en la mayoría de los algoritmos de series temporales, es que los parámetros de estimación deben ser calculados usando todas las adquisiciones disponibles de una vez, en un solo grupo. Por lo tanto, se debe considerar en el futuro desarrollar procesos recursivos que puedan incluir sistemática y secuencialmente los datos de nuevas adquisiciones de forma que se vayan actualizando los resultados obtenidos para las diferentes áreas de interés.

Bibliografía

- R. Bamler y P. Hartl. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14:1–54, 1998.
- P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, y E. Sansosti. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential sar interferograms. 40(11):2375–2383, 2002. doi: 10.1109/TGRS.2002.803792.
- M. Bonano, M. Manunta, M. Marsella, y R. Lanari. The extended sbas technique for generating full resolution ers/envisat deformation time-series. páginas 4616–4619, 2010. doi: 10.1109/IGARSS.2010.5651133.
- S. Buckley. *ROI PAC Documentation Repeat Orbit Interferometry Package*, capítulo 3. Radar Interferometry Measurement of Land Subsidence., 2000.
- C. Cafforio, C. Prati, y Rocca F. Sar data focusing using seismic migration techniques. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 27:197–207, 1991.
- W Chen y Zebker. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms. *Journal of the Optical Society of America.*, 17:401–413, 2000.
- M. Costantini. A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36:813–821, 1998.
- I. Cumming y F. Wong. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar*. Artech House Remote Sensing Library, 2005.
- I. G. Cumming, Y.L. Neo, y F. H. Wong. Interpretations of the omega-k algorithm and comparisons with other algorithms. *IGARSS 2003: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vols I - VII, Proceedings*, página 1455–1458, 2003.
- J.C. Curlander y McDonough. *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*. John Wiley & Sons, INC, 1991.
- C Donoso. *Tipos Forestales de los Bosques Nativos de Chile*. 1981.
- Leonardo D. Euillades, Pablo A. Euillades, Antonio Pepe, Mauro H. Blanco, y Jorge H. Barón. On the generation of late ers deformation time series through small doppler and baseline subsets differential sar interferograms. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8:238–242, 2011.
- P. Farina, D. Colombo, A. Fumagalli, F. Marks, y S. Moretti. Permanent scatterers for landslide investigations: outcomes from the esa-slam project. *Engineering Geology*, 88:200–217, 2006.

- A. Ferretti, C. Prati, y F. Rocca. Permanent scatterers in sar interferometry. 39(1):8–20, 2001. doi: 10.1109/36.898661.
- A. Ferretti, A. Fumagalli, F. Novali, C. Prati, F. Rocca, y A. Rucci. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: Squeesar. *IEEE Journal of selected topics in applied Earth Observation and Remote Sensing*, 49:3460–3470, 2011.
- Monti-Guarnieri A. Prati C. Rocca F. Massonnet D. Ferretti, A. *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. ESA Publications, ESTEC, Postbus 299, 2200 AG Noordwijk - The Netherlands, 2007.
- T.J. Fournier, M.E. Pritchard, , y S.N. Riddick. Duration, magnitude, and frequency of subaerial volcano deformation events: New results from latin america using insar and a global synthesis. *Geochemistry Geophysics Geosystem*, 11, 2010.
- R. Goldstein, H. Zebker, y C. Werner. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 23:713–720, 1988.
- R. Hanssen. *Radar Interferometry. Data interpretation and error Analysis*. Radar Interferometry. Data interpretation and error Analysis., 2001.
- A. Hooper. *Persistent Scatterer Radar Interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation*. Tesis de Doctorado, Stanford university, 2006.
- A. Hooper. A multi-temporal insar method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35, 2008.
- A. Hooper. A statistical-cost approach to unwrapping the phase of insar time series. *European Space Agency, (Special Publication)*, 2010.
- A. Hooper, H. Zebker, P. Segall, y B. Kampes. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using insar persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31, 2004.
- A. Hooper, P. Segall, y H. Zebker. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to volcán alcedo, gala'pagos. *Journal Geophysical Research*, 112, 2007.
- A. Kohlhase y K. Feigl. Measuring the quality of precise orbits by applying insar: An approach to avoid orbital tuning. En *FRINGE 1999 - Workshop Report*, 1999.
- Jet Propulsion Laboratory. Nasa radar images asteroid 2007 pa8, Septiembre 2012. URL <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2012-350>.
- R. Lanari, F. Casu, M. Manzo, G. Zeni, P. Berardino, M. Manunta, y A. Pepe. An overview of small baseline subset algorithm: A din-sar technique for surface deformation analysis. *Pure Appl. Geophys*, 164:637–661, 2007.
- L. Lara, B. Lavenu, C. Cembrano, y D. Rodríguez. Structural controls of volcanism in transversal chains: Resheared faults and neotectonics in the cordón caulle-puyehue area (40.5°s), southern andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* xx, 2006.
- F.W. Leberl, W. Walcher, y R. Kalliany. Surface topography reconstruction of venus from magellan mission. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXI:Part B4, 1996.
- Didier Massonnet y Kurt L. Feigl. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics, Issue 4*, Volume 36:pp.441–500, 1998.
- B. Pinel-Puysségur, R. Michel, y J. Avouac. Multi-link insar time series: Enhancement of a wrapped interferometric database. *IEEE Journal of selected topics in applied Earth Observation and Remote Sensing*, 5: 784–794, 2012.

- M. Pritchard y M. Simons. An insar-based survey of volcanic deformation in the southern andes. *Geophysical Research Letters*, 31, 2004.
- J.A. Richards. *Remote Sensing with Imaging Radar*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- P. Shanker. *Persistent Scatterer Interferometry in Natural Terrain*. Tesis de Doctorado, Stanford University, 2010.
- P. Shanker, F. Casu, H. A. Zebker, y R. Lanari. Comparison of persistent scatterers and small baseline time-series insar results: A case study of the san francisco bay area. 8(4):592–596, 2011. doi: 10.1109/LGRS.2010.2095829.
- M. Shirzaei y T. R. Walter. Time-dependent volcano source monitoring using interferometric synthetic aperture radar time series: A combined genetic algorithm and kalman filter approach. *Journal of Geophysical Research*, 115, B10421., 2010.
- R. Touzi, A. Lopes, J Bruniquel, y P.W. Vachon. Coherence estimation for sar imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37:135–149, 1999.
- Engineering Christian Wolff. Tutorial radar / book-2 /“radar sets“, Septiembre 2012. URL <http://www.radartutorial.eu/druck/Book2.pdf>.
- H. Zebker y W Chen. Accurate estimation of correlation in insar observations. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2:124–127, 2005.
- H. Zebker, P. A. Rosen, R. Goldstein, A. Gabriel, y C. Werner. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The landers earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 99:19, 617– 19, 634, 1994a.
- H. Zebker, P. Werner, C.and Rosen, y S. Hensley. Accuracy of topographic maps derived from ers-1 interferometric radar. *Geoscience and Remote Sensing*, 12, 1994b.
- H. A. Zebker y J. Villasenor. Decorrelation in interferometric radar echoes. 30(5):950–959, 1992. doi: 10.1109/36.175330.

Parámetros correspondientes al procesamiento de series temporales - STaMPS/MTI

A.1. Valores por defecto de STaMPS/MTI en las distintas etapas del procesamiento.

| Parámetro | Valor |
|------------------------------|------------------|
| clap-alpha | 1 |
| clap-beta | 0.3000 |
| clap-low-pass-wavelength | 800 |
| clap-win | 32 |
| density-rand | 2 |
| drop-ifg-index | [] |
| filter-grid-size | 50 |
| filter-weighting | 'P-square' |
| gamma - change - convergence | 0.0050 |
| max-topo-err | 5 |
| scla-deramp | 'n' |
| scla-drop-index | [] |
| select-method | 'DENSITY' |
| unwrap-gold-n-win | 32 |
| unwrap-grid-size | 200 |
| unwrap-method | '3D' |
| unwrap-time-win | 730 |
| weed-max-noise | Inf |
| weed-standard-dev | PSI=1 / SBAS=inf |
| weed-time-win | 730 |

Tabla A.1: Valores por defecto de los diferentes parámetros en el procesamiento de series temporales del software STaMPS/MTI.

A.2. Descripción de los parámetros de STaMPS/MTI.

A.2.1. Estimación de ruido de fase.

- **max-topo-err:** Error máximo del DEM (m). Si se configura con valores altos, se incrementará directamente el promedio de γ ¹ de las celdas que tienen valores de fase con un comportamiento aleatorio.
- **filter-grid-size:** Tamaño de grilla para filtro de paso combinado (m). Los candidatos tanto a PS o SDFP, son remuestreados en una grilla con este espaciamiento antes de iniciar el proceso de filtrado de los valores de fase, el cual busca determinar la correlación espacial del conjunto de éstos.
- **clap-win:** Tamaño de ventana filtro de Combinación de paso bajo y fase adaptativa (CLAP). Junto con filter-grid-size, determinan el área incluida en la estimación de los valores de fase espacialmente correlacionados.
- **clap- α :** Término α del filtro CLAP. Junto con el término β , determinan la contribución relativa de los elementos de fase en la estructura del filtro.
- **clap-beta:** Término β del filtro CLAP.
- **gamma-change-convergence:** Umbral de cambio de los valores promedio de γ . Cuando se alcanza la convergencia de los valores, termina de realizar las iteraciones.

A.2.2. Selección de PS y SDFP.

- **density-rand:** Densidad espacial máxima de celdas con fase aleatoria (km^2).
- **drop-ifg-index:** Lista de interferogramas excluidos del procesamiento.

A.2.3. Eliminación PS y SDFP.

- **weed-standard-dev:** Umbral de desviación estándar de los valores de fase. Para cada celda, la desviación estándar del ruido de fase entre pares de ellas es calculado. Si la mínima desviación es mayor que el umbral, la celda será eliminada.
- **weed-max-noise:** Umbral de máximo ruido permitido para una celda. Para cada par de píxel por interferograma, es calculado el mínimo ruido posible. Los píxeles que tengan un mayor valor de ruido en los interferogramas son eliminados.
- **weed-time-win:** Ventana de suavizamiento (en días) para la estimación de la distribución del ruido de fase para cada par de píxeles vecinos. En la serie de tiempo, los valores de fase son suavizados mediante un ajuste lineal gaussiano ponderado por tramos. Este parámetro asigna la desviación estándar de la gaussiana utilizada. La fase original, menos la fase suavizada es asumida como ruido.

A.2.4. Corrección de fase.

- **merge-resample-size:** Remuestreo de celdas (m).
- **merge-standard-dev:** Desviación estándar del remuestreo de celdas estimado.

¹Índice de estabilidad de fase.

A.2.5. Fase de unwrapping.

- **unwrap-method:** Método de desenrollamiento de fase.
- **unwrap-grid-size:** Redimensionamiento de grilla muestral.
- **unwrap-gold-n-win:** Tamaño de ventana del filtro de Goldstein.
- **unwrap-time-win:** Ventana de suavizamiento (en días) para la estimación de la distribución del ruido de fase para cada par de píxeles vecinos. En la serie de tiempo, los valores de fase son suavizados mediante un ajuste lineal gaussiano ponderado por tramos. Este parámetro especifica la desviación estándar de la gaussiana utilizada. La fase original, menos la fase suavizada es asumida como ruido, el cual es usado para determinar la probabilidad de saltos de fase entre dicho par de celdas.

A.2.6. Estimación del error SCLA.

- **scla-drop-index:** Listado de interferogramas que no serán incluidos en el calculo de SCLA, pero si que fueron incluidos en los pasos anteriores.
- **scla-deramp:** Estimación de rampas de fase para cada interferograma incluido.

Estimación de diferentes componentes de fase para cada uno de los casos.

B.1. Caso - Persistent Scatterer Interferometry (PSI)

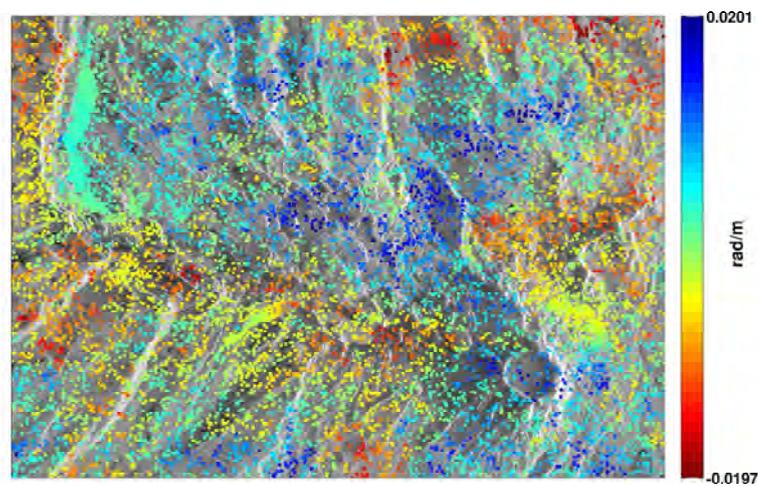


Figura B.1: Estimación del error del ángulo de vista espacialmente correlacionado en radianes/metro - PSI.

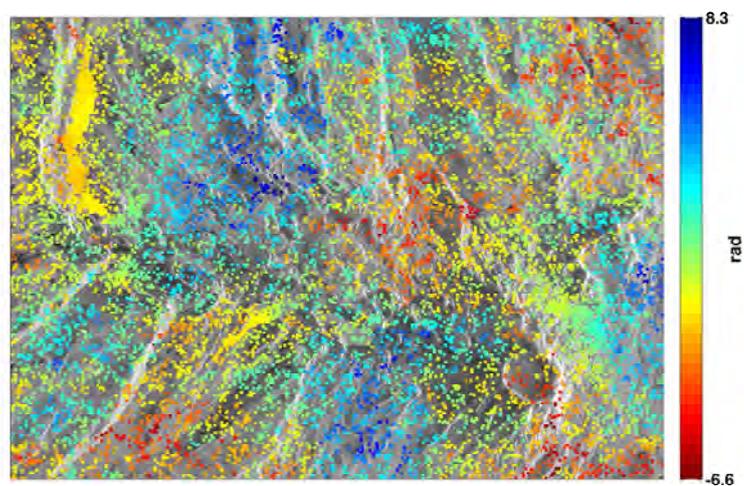


Figura B.2: Estimación de los Errores Orbitales y Atmosféricos de la imagen maestra - PSI.

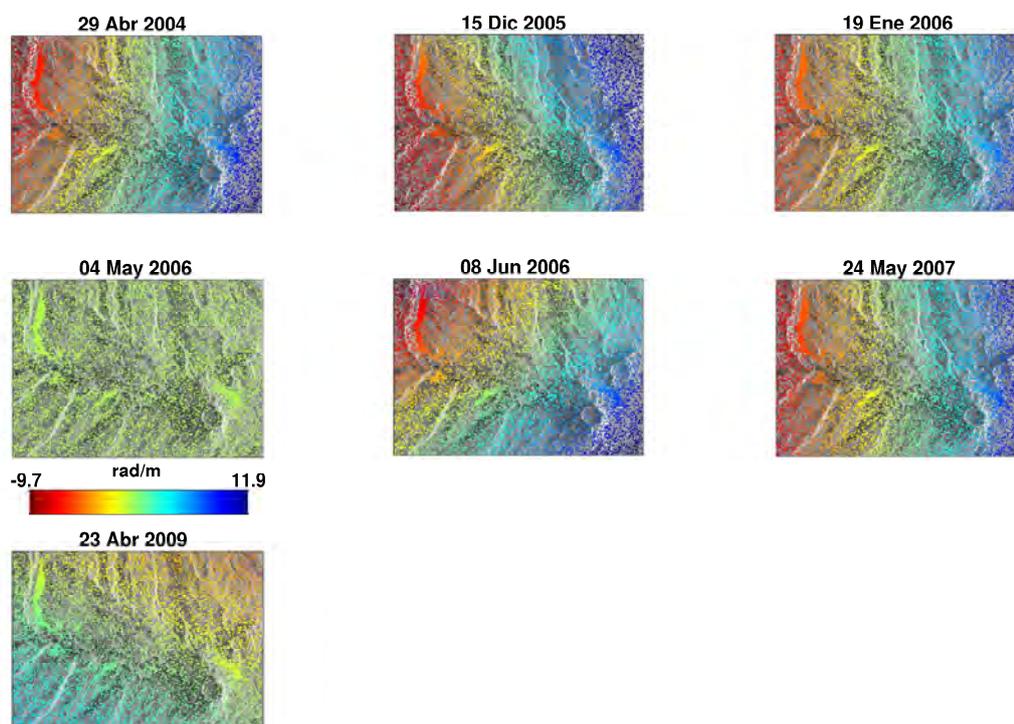


Figura B.3: Estimación de las rampas de fase para cada interferograma - PSI.

B.2. Caso Small Baseline Subset (SBAS)

B.2.1. Subconjunto - 1 SBAS

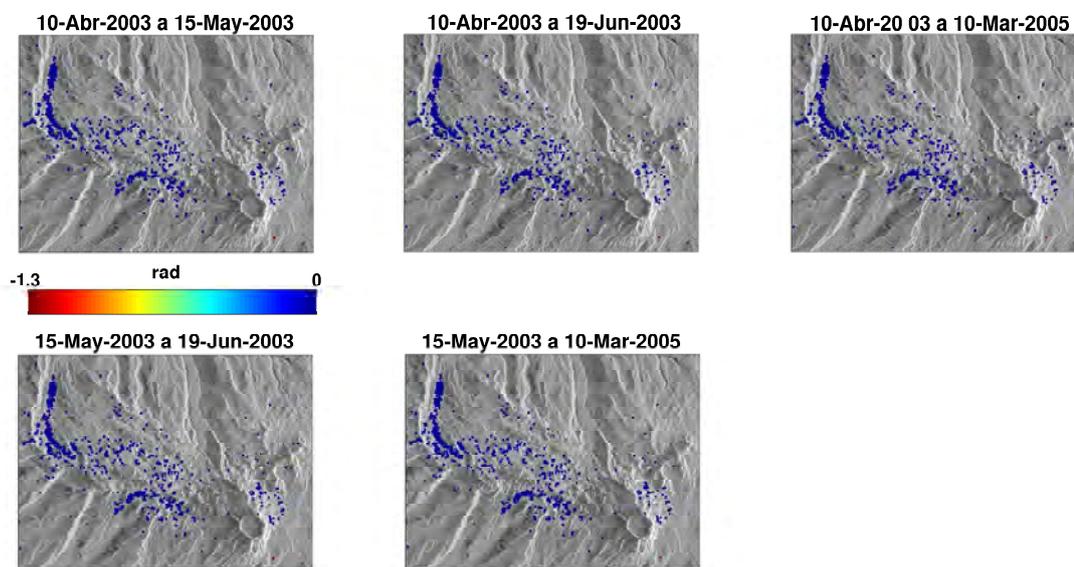


Figura B.4: Residuales entre los valores de fase desarrollados de los interferogramas y los valores del modelo de imagen maestra única- SBAS-1.

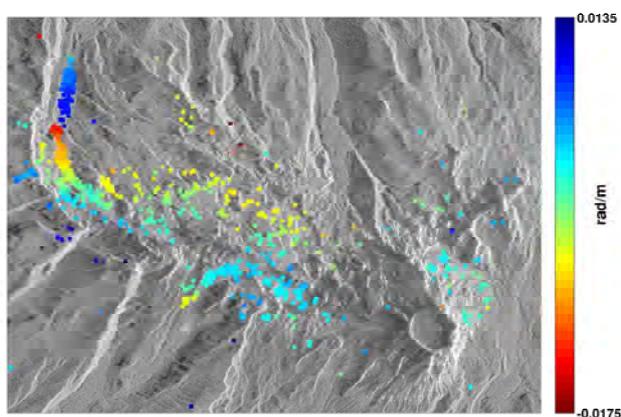


Figura B.5: Estimación del error del ángulo de vista espacialmente correlacionado - radianes/metro - SBAS-1.

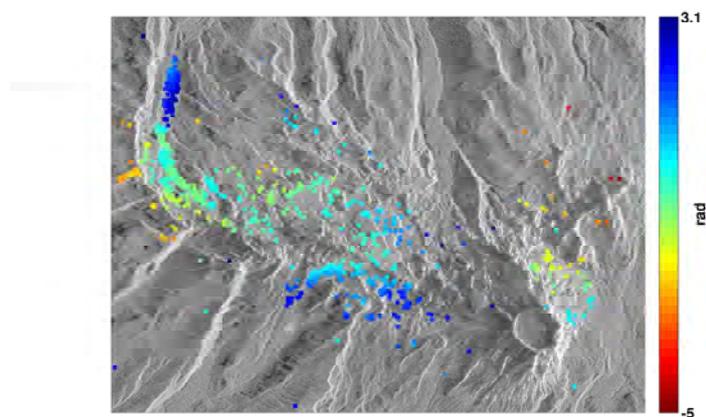


Figura B.6: Estimación de los Errores Orbitales y Atmosféricos de la imagen maestra - SBAS-1.

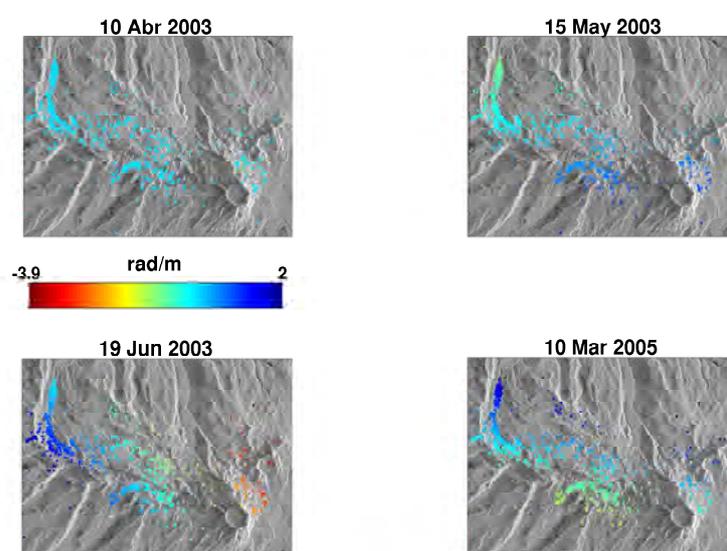


Figura B.7: Estimación de las rampas de fase para cada interferograma - SBAS-1.

B.2.2. Subconjunto - 2 SBAS

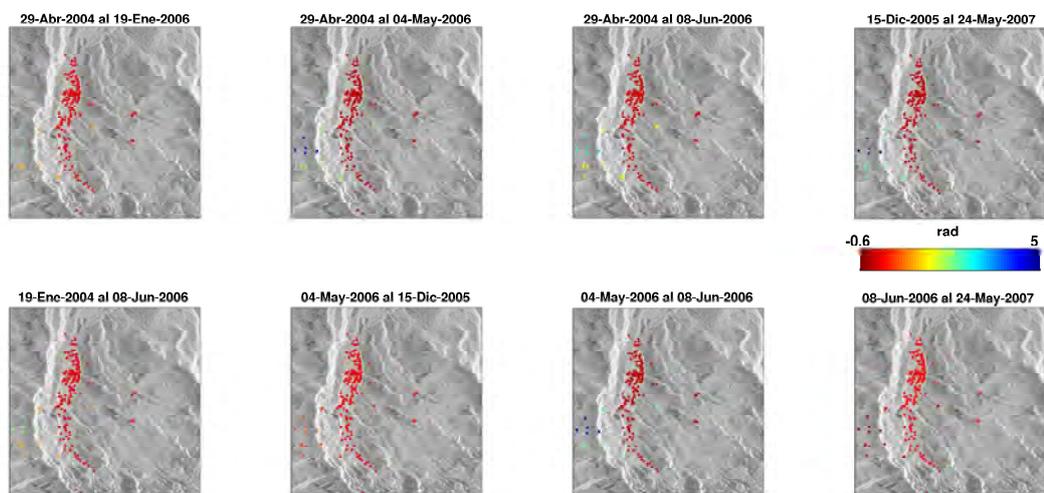


Figura B.8: Residuales entre la los valores de fase desenrollados de los interferogramas y los valores del modelo de imagen maestra única- SBAS-2.

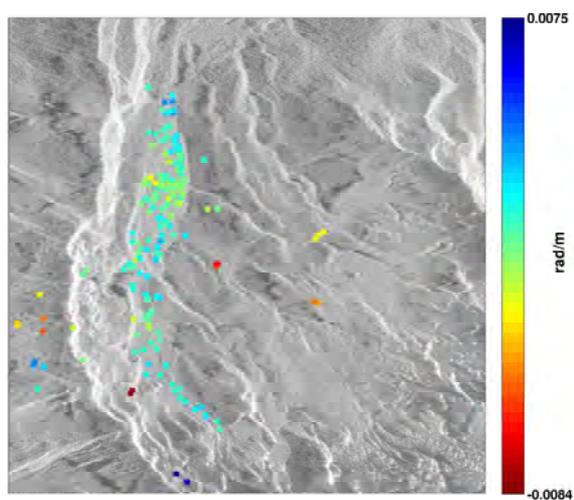


Figura B.9: Estimación del error del ángulo de vista espacialmente correlacionado en radianes/metro - SBAS-2.

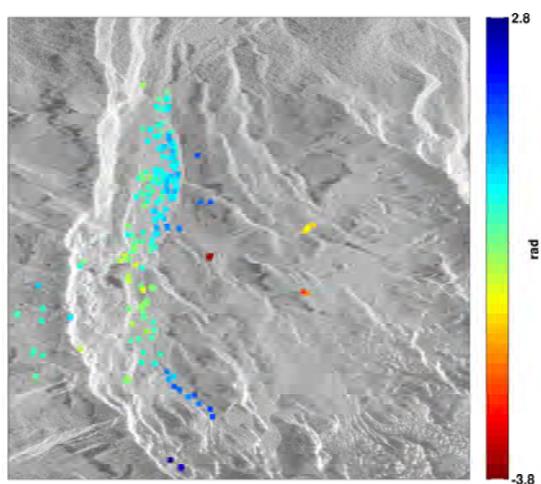


Figura B.10: Estimación de los Errores Orbitales y Atmosféricos de la imagen maestra - SBAS-2.

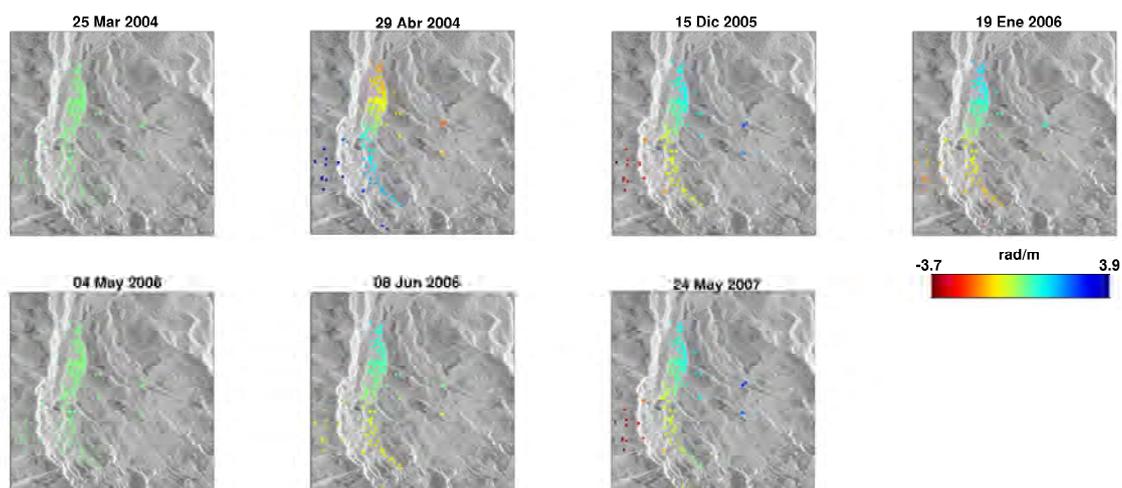


Figura B.11: Estimación de las rampas de fase para cada interferograma - caso SBAS-2.

