

**USO DE INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL PARA MONITOREAR DEFORMACIONES DE TERRENO EN
LA COMUNA DE CORVARA, PROVINCIA DE BOLZANO, ITALIA**

Por Santiago Seppi

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

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

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Agosto, 2016

©IG - CONAE/UNC 2016

©FaMAF - UNC 2016

DIRECTOR

Dr. Ing. Pablo A. Euillades

Instituto CEDIAC – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina

CO-DIRECTOR

Dr. Ing. Giovanni Cuozzo

Istituto per il Telerilevamento Applicato – EURAC Research. Bolzano, Italia



AGRADECIMIENTOS

Al equipo del *Istituto per il Terrilevamento Applicato* del EURAC Research por su apoyo logístico y el aporte de datos e infraestructura fundamentales para la realización de esta tesis, especialmente a Romy Schlögel y Benjamin Thiebes. A su vicedirectora, Claudia Notarnicola, y a las asistentes Paola Winkler y Daniela Dellantonio por sus gestiones para lograr que mi trabajo allí fuera posible.

A Daniele Perissin, por la provisión de la licencia del software de procesamiento *SarProz* empleado en esta tesis, y por su asistencia técnica.

A mi director, Pablo Euillades, y a mi co-director, Giovanni Cuzzo, por haberme orientado en la realización de la tesis y por aportar sus conocimientos sobre SAR e Interferometría en particular.

Al Instituto Gulich y a los docentes de la Maestría AEARTE por proporcionarme una oportunidad de crecimiento profesional única. A la CONAE y al sistema de educación superior público de Argentina, mi país, por permitir esta posibilidad de perfeccionamiento a egresados de carreras con tan diversos perfiles.

RESUMEN

El deslizamiento de Corvara (Alpes Italianos) se encuentra activo desde hace más de 10.000 años. Campañas de monitoreo GPS en los últimos 15 años han revelado vectores de deformación de hasta 50 metros para solo un año (Caroli, 2009). Para ese trabajo el deslizamiento de Corvara se toma como caso de estudio para comparar diferentes Imágenes SAR y diferentes técnicas para medir deformaciones en el terreno, y para evaluar la factibilidad del procesamiento interferométrico (InSAR) en estas aplicaciones.

Por un lado se prueba el algoritmo Permanent Scatterers (PS) con 27 imágenes Cosmo Skymed (banda X) en órbita descendente adquiridas sobre el área de estudio. La presencia en terreno de 16 Corner Reflectors artificiales, diseñados de acuerdo a la longitud de onda y la geometría de adquisición de las imágenes Cosmo Skymed, ha sido fundamental para la implementación de esta técnica en un ambiente en rápido movimiento y pobre en coherencia.

Por otro lado se procesan dos conjuntos de 16 imágenes Sentinel-1A (banda C) en órbita ascendente y descendente con el algoritmo Small Baselines Subset (SBAS). Al aplicarse esta técnica resulta esencial lograr una combinación de pares interferométricos lo suficientemente coherente sin por ello tener que descartar grandes porciones de datos.

Ambas familias de algoritmos se usan para generar series temporales de deformación y calcular parámetros como la velocidad de la deformación, la altura del terreno y el desplazamiento acumulado. En ese sentido los Corner Reflectors son también utilizados como verdad de campo para validar las series temporales derivadas de los tres conjuntos de datos. Se analizan características ambientales propias del área de estudio y parámetros de las adquisiciones tales como el tiempo cubierto por cada conjunto de datos, la magnitud de los movimientos identificados, la longitud de onda utilizada, y las posibles limitaciones de las dos técnicas para entender su performance en un ambiente de montaña en movimiento constante como Corvara.

PALABRAS CLAVE: InSAR, PS, SBAS, Banda X, Banda C.

ABSTRACT

The Corvara Landslide (Italian Alps) has been active for over 10,000 years, and systematic ground GPS monitoring within the last 15 years has revealed displacement vectors of up to 50 meters for only one year (Caroli, 2009). In this work the Corvara landslide is taken as case study in order to compare different spaceborne SAR images and techniques to retrieve ground deformation and to evaluate the feasibility of Interferometry (InSAR) processing for these applications.

On one side the Permanent Scatterers (PS) algorithm is used to process a set of 27 Cosmo Skymed images (X-band) in descending mode acquired over the study area. The presence of 16 artificial Corner Reflectors, designed according to Cosmo Skymed wavelength and acquisition geometry, has been crucial for the implementation of this technique in a rapidly moving and poorly coherent study area.

On the other side two datasets of 16 Sentinel-1A images (C-band) in ascending and descending mode are processed with the Small Baselines Subset (SBAS) algorithm, where achieving a coherent enough combination of interferometric pairs without discarding large portions of data becomes essential.

Both families of algorithms are intended to generate deformation time series and to retrieve parameters such as deformation velocity, terrain height and cumulative displacement. The Corner Reflectors are also used as ground control points to validate the time series derived from the three datasets. Local environmental factors and sensor characteristics such as the monitored time period, magnitude of the measured movements, difficulties related to X and C band wavelengths and algorithms limitations are analyzed in order to understand the performance of these techniques in a mountainous landslide area like Corvara.

KEYWORDS: InSAR, PS, SBAS, C-band, X-band.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Caracterización del deslizamiento de Corvara	2
1.2.	Antecedentes de investigación sobre el área.....	5
1.3.	OBJETIVOS DE ESTE TRABAJO	10
1.3.1.	Objetivo general	10
1.3.2.	Objetivos específicos	10
2.	PRINCIPIOS TEÓRICOS DE RADAR.....	11
2.1.	Geometría de Adquisición	12
2.2.	Modos de adquisición.....	14
2.3.	Resolución espacial: RAR y SAR	15
2.3.1.	Resolución en Rango	15
2.3.2.	Resolución en Azimut	16
2.4.	Mecanismos de interacción.....	17
2.5.	Distorsiones geométricas	19
2.6.	Distorsiones radiométricas.....	22
3.	PRINCIPIOS TEÓRICOS INSAR.....	24
3.1.	Configuración interferométrica.....	24
3.2.	Observaciones de fase, altura topográfica y deformación de superficie	25
3.3.	Coherencia interferométrica	28
3.4.	Flujo de trabajo InSAR	31
3.4.1.	Criterios para seleccionar imágenes.....	31
3.4.2.	Pre-procesamiento	32
3.4.3.	Coregistración.....	33
3.4.4.	Formación del interferograma	33
3.4.5.	Desenrollado de fase	34
3.4.6.	De fase desenrollada a deformación o altura	34
3.4.7.	Geocodificación	35
4.	SERIES DE DEFORMACIÓN	36
4.1.	Principios teóricos de SBAS	36
4.1.1.	Flujo de trabajo SBAS.....	38
4.2.	Principios teóricos PS.....	39
4.2.1.	Flujo de trabajo PS.....	42

4.3.	Cómo medir calidad de los resultados de las series de deformación	44
4.4.	¿PS o SBAS?	44
5.	MATERIALES Y MÉTODOS	46
5.1.	DATOS SAR.....	46
5.1.1.	Imágenes Cosmo Skymed	46
5.1.2.	Imágenes Sentinel-1A.....	48
5.1.3.	Análisis de las distorsiones geométricas	51
5.2.	Modelo Digital de Elevaciones (DEM)	53
5.3.	METODOLOGIA.....	54
5.3.1.	Permanent Scatterers (PSI).....	54
5.3.2.	Small Baselines Subset (SBAS)	55
5.3.3.	Validación de los Resultados	57
6.	PROCESAMIENTO PS.....	60
6.1.	Identificación de los PSC.....	60
6.2.	Agrupamiento de los datos por sector	64
6.3.	Procesado del área de acumulación.....	66
6.4.	Procesado del área de transporte	69
6.5.	Procesado del área de alimentación	71
6.6.	Validación de los resultados	75
7.	PROCESAMIENTO SBAS	79
7.1.	Elección de umbrales de separación espacial y temporal	79
7.2.	Procesado interferométrico	83
7.3.	Inversión y estimación de parámetros	88
7.4.	Validación e Interpretación de los Resultados	93
8.	DISCUSIÓN Y COMENTARIOS FINALES.....	96
8.1.	¿PS o SBAS? ¿Cosmo Skymed o Sentinel-1A?.....	96
8.2.	Conclusiones.....	99
9.	REFERENCIAS Y FUENTES CITADAS	101

LISTADO DE ACRÓNIMOS

APS	Atmospheric Phase Screen
ASI	Agenzia Spaziale Italiana
CSK	Cosmo Skymed
CR	Corner Reflector
CONAE	Comisión Nacional de Actividades Espaciales
DEM	Digital Elevation Model
DInSAR	Differential Interferometric SAR
ENL	Equivalent Number of Looks
ESA	European Space Agency
EURAC	European Academy of Bolzano
GPS	Global Positioning System
HP	High-Pass
IW	Interferometric Wide
InSAR	Interferometric SAR
LAWINA	Landslide detection and Windfall Assessments
LP	Low-Pass
LOS	Line of Sight
MCF	Minimum Cost Flow
PS	Persistent Scatterers
PSC	Persistent Scatterers Candidates
RAR	Real Aperture Radar
RCS	Radar Cross Section
S1-A	Sentinel-1A
SAR	Synthetic Aperture Radar
SBAS	Small Baselines Subset
SLC	Single Look Complex
SNR	Signal to Noise Ratio

1. INTRODUCCIÓN

La detección, el mapeo y el monitoreo de deslizamientos de terreno pueden contribuir de manera significativa a mitigar el impacto negativo de dichos movimientos en masa. De la mano de la teledetección, en los últimos años las técnicas de medición clásicas para estos fenómenos se han visto complementadas por el uso de sensores remotos, principalmente a través de técnicas de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR). A través del análisis integrado de conjuntos de imágenes SAR, ha sido posible desarrollar algoritmos que buscan reducir las limitaciones propias del uso de solo un par de imágenes, como las distorsiones atmosféricas o la decorrelación espacio-temporal. A su vez, permiten darle un enfoque multi-temporal al estudio del fenómeno, al poderse estimar tendencias en el movimiento estudiado (velocidad, aceleración, desplazamiento o deformación total, etc.).

Como trabajo final de maestría se propone realizar una aplicación de técnicas de interferometría multi-temporal en la localidad de Corvara in Badia (Italia). Esta zona ha sido objeto de monitoreo y medición durante más de diez años, debido a los recurrentes deslizamientos de terreno que allí se producen y que suponen una amenaza para la población y la economía local.

Corvara es una comuna de la Provincia Autónoma de Bolzano, situada en la región de Trentino-Alto Adige, en el extremo nordeste de Italia (ver Figura 1). Es el centro más poblado del Valle de Badia, en el corazón de las Dolomitas. La zona pertenece a la cuenca hidrográfica del río Adige y es atravesada por numerosos cursos de agua, entre los que se destacan el río Gadera y el río Rutorto.

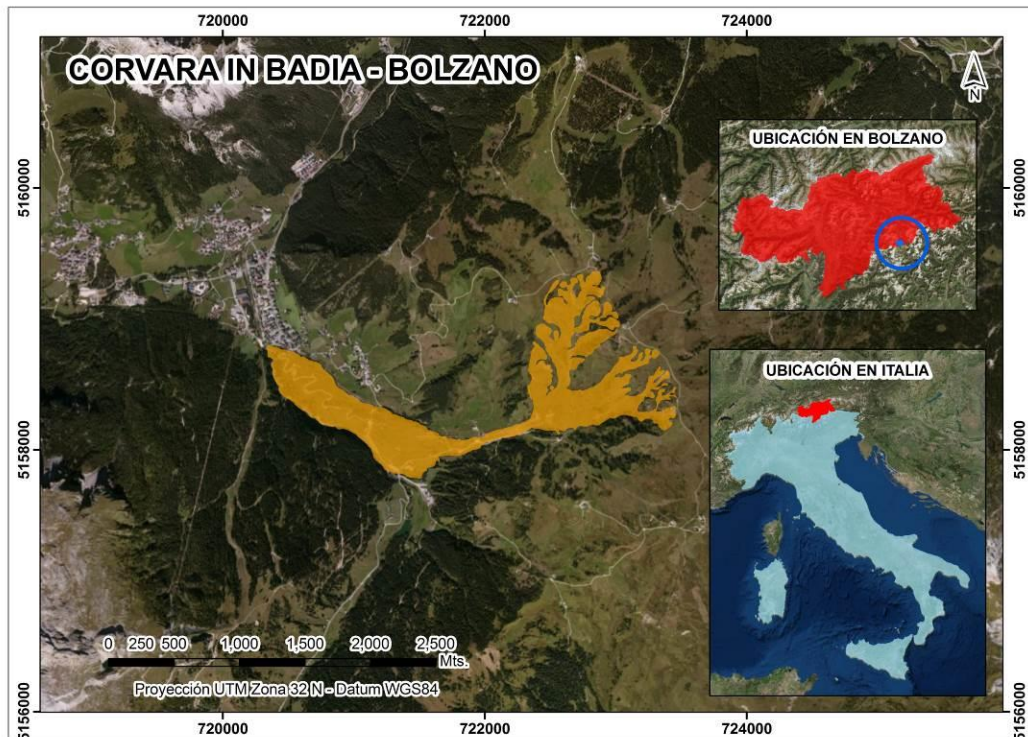


Figura 1: Ubicación de Corvara en Bolzano e Italia, con el área afectada resaltada en naranja.

El sector localizado al sudeste de Corvara, ubicado entre los cerros Col Alto (2002 m.s.n.m.) y Pralongià (2150 m.s.n.m.) es conocido por los deslizamientos que de manera recurrente se dan allí. Corsini et al (1998) ha identificado con nombres alguno de esos principales movimientos o *franas*¹, como Col Alto, Arlara y Corvara. Dichos fenómenos cubren un área que supera los 3 km² (Caroli, 2009). En particular, el deslizamiento de Corvara se caracteriza por una cinemática lenta y ha sido causa de reiterados anegamientos en la Ruta Nacional SS244 (ver figura 2), constituyendo además un factor de amenaza para la localidad de Corvara que se encuentra en sus cercanías.



Figura 2: Sector de la ruta estatal S244, afectada por las deformaciones de terreno (Relevamiento propio).

1.1. CARACTERIZACIÓN DEL DESLIZAMIENTO DE CORVARA

El deslizamiento de Corvara comprende un volumen total de 30 millones de m³ extendidos a lo largo de 3,5 km, y ha estado en movimiento por más de 10.000 años. Las partes actualmente activas suman alrededor de 25 millones de m³ (ver figura 4).

Se compone morfológicamente de un sector de alimentación o fuente, uno de transporte y otro de acumulación (figura 5). La primera zona, de morfología cóncava compleja, se encuentra delimitada en su lado superior por una quebrada principal con alturas superiores a los 25 metros. A su vez esta zona puede ser clasificada en cuatro subsectores morfológicos: S1, S2, S3 y S4, que se dividen entre sí por crestas formadas por cúmulos de rocas. La cabeza del deslizamiento en los sectores S1, S2 y especialmente S3 está formada por superficies casi llanas o en contrapendiente, seguidas de escarpes secundarios con una altura en torno a los 20 metros. Por debajo de la superficie, los sectores se encuentran cubiertos de capas de material arcilloso con un espesor en torno a los 40-50 metros y se encuentran sujetos a movimientos traslacionales y coladas (Caroli, 2009).

¹ Con el término *frana* en italiano se indican todos los fenómenos de movimiento o caída de material rocoso o poco sólido debido a la pérdida de equilibrio estático o por las fuerzas de gravedad que, actuando sobre el mismo, superan la capacidad de cohesión del terreno.

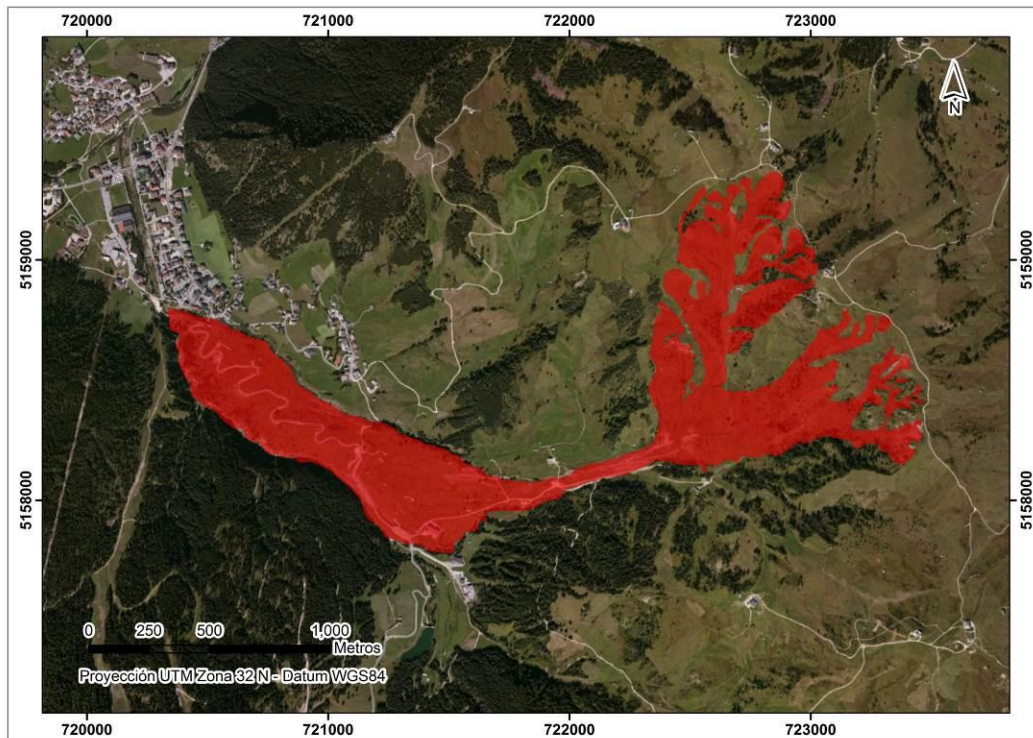


Figura 3: Identificación del sector afectado por el deslizamiento de Corvara.

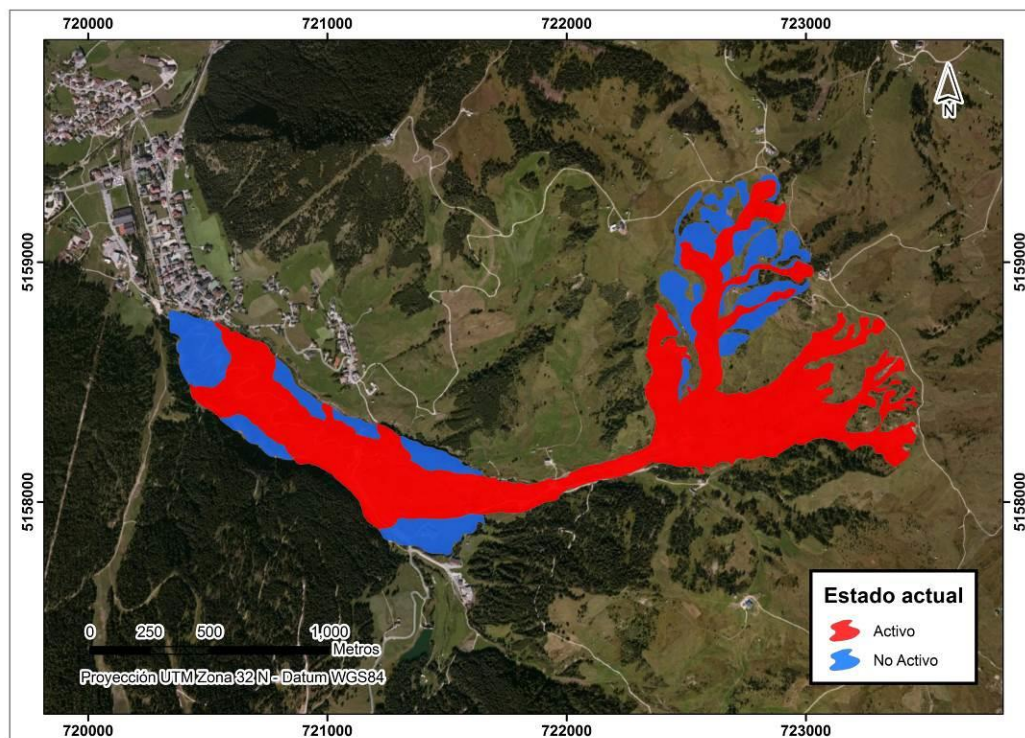


Figura 4: Zonas identificadas como activas y no activas en base a las campañas de monitoreo (EURAC Research).

En S1 y S4 la mayor parte de dichos fenómenos son actualmente no activos, mientras que en S2 y S3 la mayor parte resulta activa a lo largo de superficies de escurrimiento múltiple, hasta una profundidad de 30 metros.

La segunda zona, de transporte, tiene una longitud de alrededor de 300 metros y se constituye de una capa de material arcilloso de casi 40 metros de espesor. Esta capa se encuentra sujeta a un continuo movimiento traslativo sobre superficies de múltiple profundidad (de entre 20 y 30 metros) y actualmente dicho movimiento sigue siendo alimentado por coladas más superficiales, que llegan principalmente de los sectores de alimentación S1 y S2. Estas coladas han avanzado de modo consistente en los últimos años (hasta 10 m/año en 1997-1998).

El lóbulo o zona de acumulación se inserta en el valle del Rutorto a la altura del km 36 de la ruta SS244 y se extiende por un trayecto de aproximadamente 1,5 km. Este sector del deslizamiento se constituye de una mezcla de material limo-arcilloso, gravas, bloques y grandes pedazos de rocas que en algunos casos conservan su estratificación original. Ambos costados del sector de acumulación se caracterizan por escarpes secundarios, frecuentemente activos, ligados a fenómenos de deslizamiento explicado por la remoción o erosión provocada por los Rios Chiesa y Rutorto. Dicho movimiento queda evidenciado por las fracturas y ondulaciones del orden de decenas de metros que caracterizan la superficie de esta zona. También se manifiesta en el movimiento registrado para algunas estructuras construidas presentes en el sector, y ha sido corroborado por mediciones inclinométricas (Provincia di Bolzano, 2006, pág. 14) . No obstante esto último, la zona del deslizamiento más cercana al poblado de Corvara no se encuentra actualmente en fase de avance. Se presume que la razón de eso es que el extremo final de este deslizamiento está formado en realidad por la antigua zona de acumulación de un deslizamiento vecino, el de Arlara (Caroli, 2009).

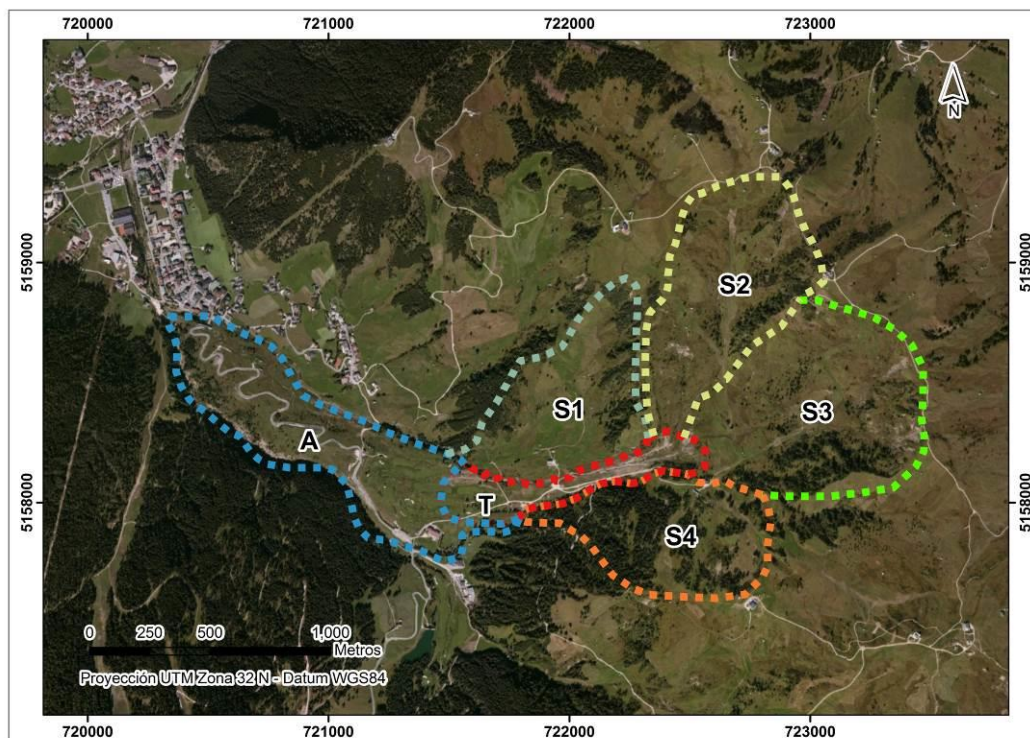


Figura 5: Composición morfológica del deslizamiento de Corvara. El sector de alimentación, formado por los subsectores S1,S2,S3,S4; la zona de transporte (T) y la zona de acumulación denotada con A (elaboración propia basada en datos de la Provincia de Bolzano).

1.2. ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN SOBRE EL ÁREA

Como se ha mencionado, el deslizamiento de Corvara ha sido estudiado y monitoreado a lo largo de más de una década. Las primeras caracterizaciones de la zona datan de fines del siglo XX (Corsini et al, 1998, 1999) y se prolongaron a lo largo de la década pasada (Corsini et al, 2001, 2005). Por su parte, la Provincia de Bolzano ha realizado campañas de relevamiento GPS en la zona de manera continua desde 1997 con el objetivo de monitorear la evolución del deslizamiento y dar soporte a los trabajos de investigación y caracterización sobre la misma (Provincia di Bolzano, 2006). Entre estos trabajos destaca la tesis de Nicola Caroli, donde se procesaron de manera integrada las medidas GPS desde 2001 hasta 2008 inclusive (Caroli, 2009).

La red GPS montada sobre el deslizamiento de Corvara llegó a contar con 52 puntos, casi todos instalados sobre el cuerpo principal del deslizamiento, y otros en zonas externas como medidas de referencia. De septiembre de 2001 a octubre de 2008 se ejecutaron 26 campañas de relevamiento, la mayoría a cargo de la Oficina de Planificación Forestal de Bolzano (Caroli, 2009, pág. 20).

Las medidas realizadas permitieron obtener una magnitud de los desplazamientos del terreno en Corvara, identificándose los sectores donde el terreno se movía más rápido. Las mediciones del movimiento van de pocos centímetros a 15 metros, correspondientes estos últimos al cuerpo más activo del deslizamiento (ver figura 6). Así, la velocidad media de desplazamiento ha variado de los 0 a los 47 cm/mes, de 0 a 2,3 m/año (Caroli, 2009, pág. 25).

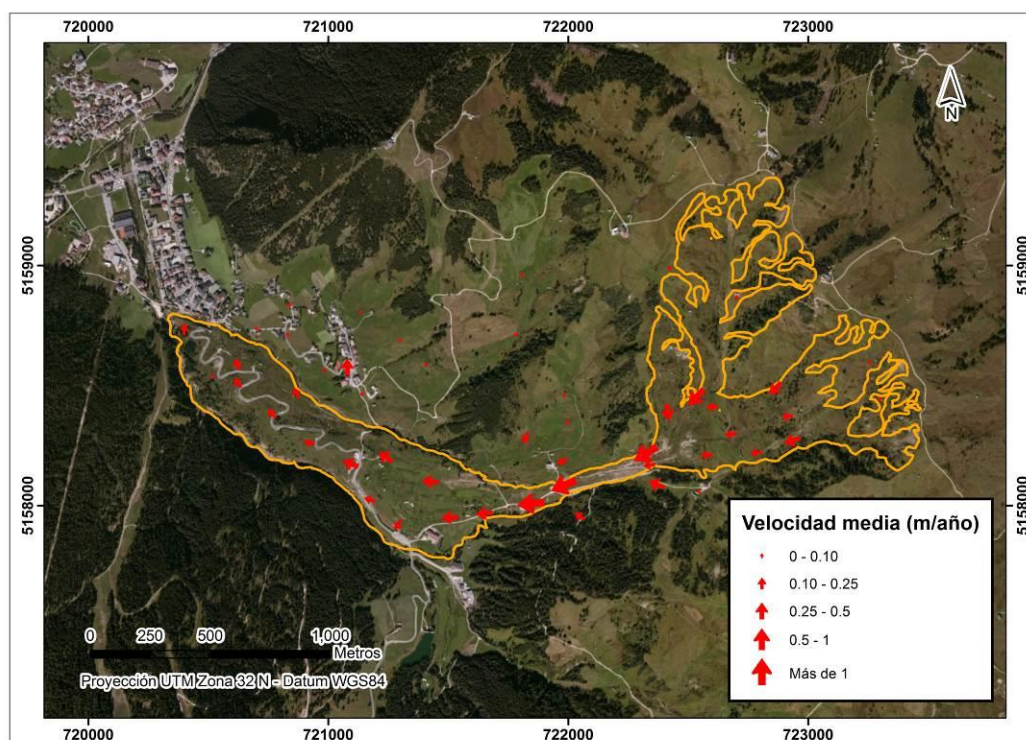


Figura 6: Red GPS utilizada para las campañas 2001-2008 junto a la velocidad y dirección de desplazamiento medio para el mencionado período. (Provincia di Bolzano, 2006).

Desde el ámbito de las imágenes satelitales también se han realizado aplicaciones tendientes a monitorear la evolución del deslizamiento. Uno de los primeros trabajos en ese sentido fue el de Strozzi et al (2005), en el que se procesaron imágenes SAR en banda L provenientes de la misión japonesa J-ERS para cuantificar la deformación del terreno en Corvara.

Otra importante iniciativa en esta línea fue el proyecto LAWINA², financiado por la Agencia Espacial Italiana (ASI) entre Febrero del 2010 y Febrero del 2012. Bajo el proyecto LAWINA se validaron técnicas y productos de interferometría multi-temporal para el monitoreo de los deslizamientos de terreno en Corvara. En el marco de este proyecto, además de la red de monitoreo GPS se instalaron una serie de *Corner Reflectors* (CR) artificiales, como el que se muestra en la figura 8, para servir de apoyo al procesamiento de las imágenes SAR³.

Se evaluó además la factibilidad de realizar un estudio de interferometría multi-temporal empleando la técnica Persistent Scatterers (PS). En uno de los informes más relevantes en este aspecto (Iasio, Corsini, Mair, Schneiderbauer, & Tamburini, 2011), se resumen los análisis realizados con este fin:

- Análisis preliminar de las posibles distorsiones geométricas que puedan afectar la visibilidad del sensor de la misión CSK⁴ y especialmente a la componente del movimiento en la línea de visión del sensor (Line of Sight o LOS). En este sentido, el hecho de contar con un DEM de resolución espacial similar a la de las imágenes utilizadas ha sido fundamental para detectar áreas afectadas por estas distorsiones.
- Análisis de retrodispersores que potencialmente podrían considerarse como estables. Además de utilizar el set de imágenes CSK, se realizó una caracterización de los distintos retrodispersores recurriendo a escenas RADARSAT y ENVISAT. Esto hace particularmente a la aplicación de la técnica PS, que se basa en el análisis de estos retrodispersores.
- Análisis de la influencia de la variación estacional de la cobertura del suelo para el sensor CSK. En base a la experiencia obtenida con imágenes de la misma zona (ERS-1/2 en banda C y J-ERS en banda L), se tiene conocimiento del tipo de cobertura característica del área afectada. La dificultad que implican los cambios en esta cobertura según la estación fueron tenidos en cuenta para planificar las adquisiciones CSK y el mantenimiento de los Corner Reflectors.
- Análisis de factores logísticos: El proyecto abarcó un período limitado de tiempo (2 años). La instalación y mantenimiento de los CR y de los puntos GPS fue un factor importante a ser considerado para las adquisiciones planificadas y la factibilidad de acceder a los mismos en distintas épocas del año (especialmente por la presencia de nieve y la existencia de complejos de Esquí que puedan dificultar la circulación en el área).

² *Landslide detection and Windfall Assessments based on CSK X-band data.*

³ Un corner reflector es un retroreflector que consta de tres superficies planas que se intersectan de manera perpendicular, lo que hace que cualquier onda incidente sea inmediatamente reflejada hacia la fuente que la emite.

⁴ Acrónimo de Cosmo-SkyMed.

Los estudios de factibilidad ya realizados, junto a los datos y resultados disponibles (Mulas, et al., 2015), constituyen una importante base de información de partida para un nuevo estudio de interferometría multi-temporal en la zona.

Los proyectos con los cuales se continuó la iniciativa originada con LAWINA fueron SLOMOVE y Corvara PSI Feasability. SloMove, financiado por Interreg (Italia-Suiza), sirvió para diseñar nuevos Corner Reflectors adecuados para banda X que permitieran la medición con GPS sin necesidad de desinstalar el CR. Si bien el sitio de prueba de SloMove fue distinto, durante el periodo cubierto por el mismo (2012-2014) se continuaron con las campañas GPS en Corvara.

En el marco del segundo proyecto, Corvara PSI Feasability, se instalaron en Corvara 16 CR como los diseñados durante SloMove en puntos donde ya se venían realizando monitoreo con GPS, conformando así una red que permitiera integrar los datos de campo con los análisis provenientes de procesamiento SAR. Para este último se adquirieron 35 imágenes Cosmo-Skymed (banda X) con un ciclo de repetición de 16 días, cubriendo el período que va de Septiembre de 2013 a Agosto de 2015. Las campañas GPS se organizaron de forma tal que las fechas de recolección coincidieran con las de adquisición de las imágenes SAR.

La red de monitoreo GPS-CR quedó entonces conformada por tres estaciones permanentes; seis fueron monitoreados manualmente cada dos semanas (frecuencia alta), y siete de manera mensual (frecuencia media), como se muestra en la figura 7.

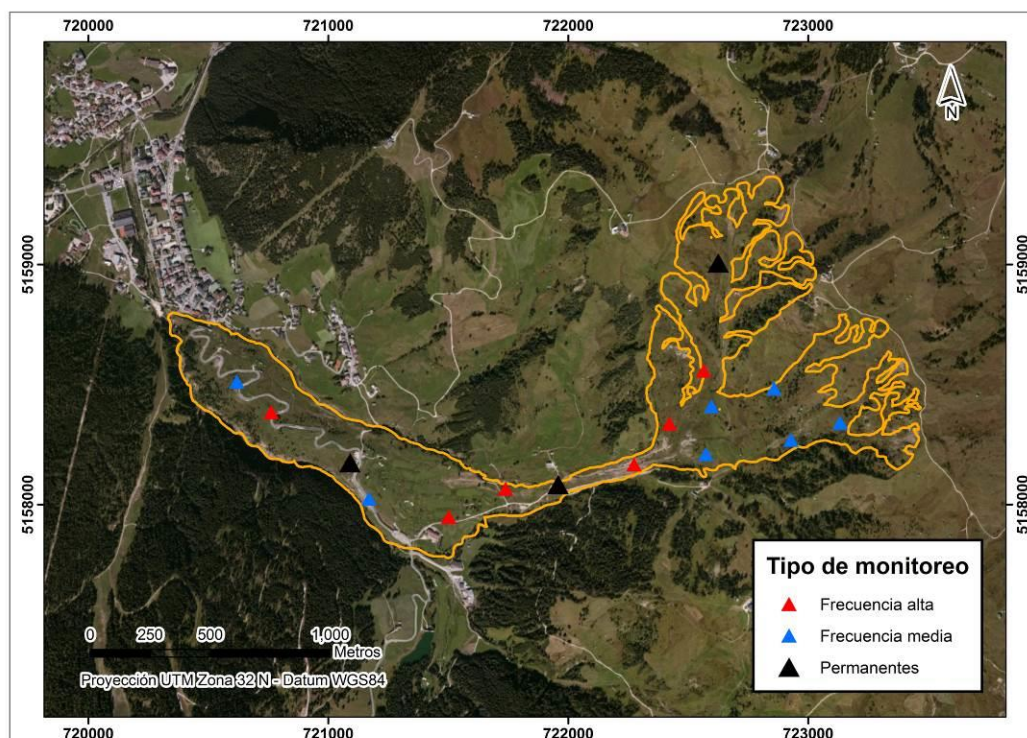


Figura 7: Localización de los Corner Reflectors donde simultáneamente se realizaron medidas GPS para el proyecto Corvara PSI Feasability (EURAC Research, 2015).



Figura 8: Uno de los Corner Reflectors instalados sobre el cuerpo del deslizamiento de Corvara. En este caso corresponde a una estación de medición manual. Este Corner Reflector está diseñado para banda X y permite la medición con GPS en la misma locación (Relevamiento propio).

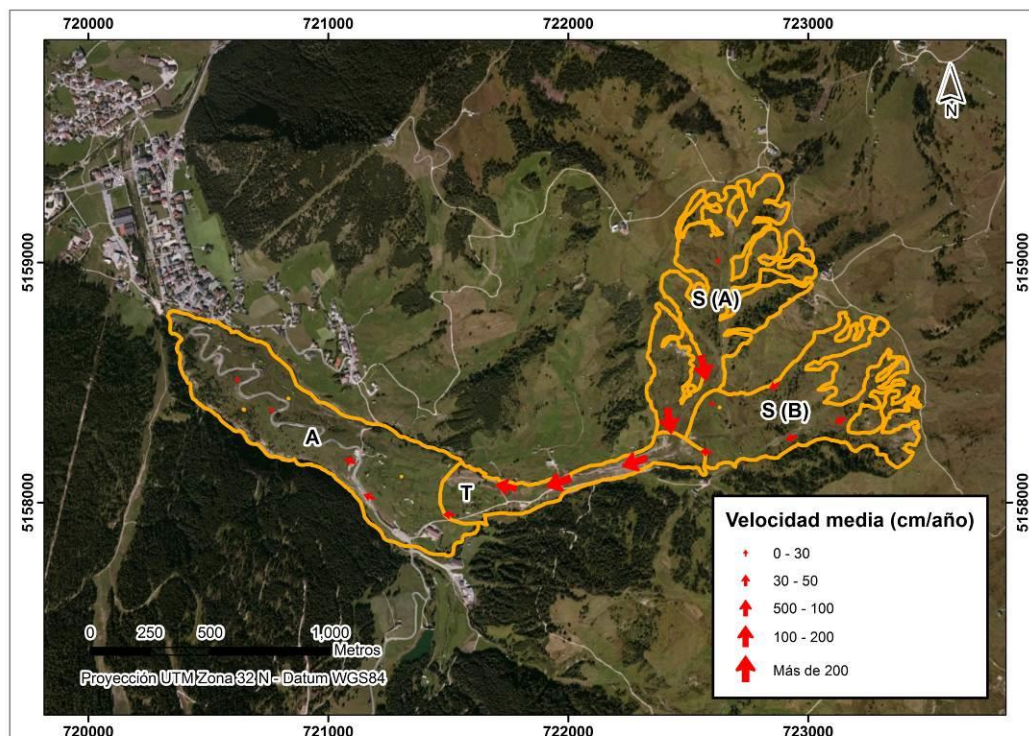


Figura 9: Velocidad y dirección de desplazamiento calculadas en las campañas GPS en el proyecto Corvara PSI Feasability. La zona de alimentación (A) se presenta como la más estable, la zona de transporte (T) es donde se registran la mayor cantidad de puntos veloces, y en la zona de alimentación se diferencia un sector más veloz S(A) de otro con velocidades más moderadas S (B) (Elaboración propia en base a datos provistos por EURAC Research).

Entre Septiembre de 2013 y Agosto de 2015 se realizaron 46 campañas GPS. En general, las velocidades y direcciones del movimiento fueron consistentes con las campañas anteriores (EURAC Research, 2015). En la zona de transporte se pudieron identificar altas velocidades, en el orden de los 120 a 260 cm/año, en correspondencia con las áreas más activas del deslizamiento. El área de acumulación en cambio se caracteriza por un movimiento más moderado, en torno a los 20-30 cm/año. En el sector de alimentación existe mayor heterogeneidad, por lo cual a los fines del análisis se han distinguido dos sub-zonas. En la zona A se ha llegado a registrar una velocidad de 243 cm/año, mientras que en la zona B la velocidad se movió en un rango de 30/40 cm/año (EURAC Research, 2015). Estos resultados se encuentran resumidos en la figura 9.

1.3. OBJETIVOS DE ESTE TRABAJO

Los *Corner Reflectors* fueron instalados para garantizar la presencia de puntos con clara visibilidad en las imágenes, a los fines de testear la técnica interferométrica PS. Por lo tanto, la idea detrás del proyecto es obtener estimaciones de la velocidad de deformación en los CR, que al contar con medidas GPS se constituyen al mismo tiempo como puntos de control.

Como se mencionó, estos CR fueron diseñados en función de las especificaciones propias de las imágenes Cosmo Skymed que se adquirieron para el proyecto. Sin embargo, por la frecuencia de ondas en la que trabajan, y dadas las condiciones ambientales de Corvara, es posible que en la práctica con estas imágenes solo puede extraerse información útil de los píxeles correspondientes a los Corner Reflectors, y que haya mucha presencia de ruido en los demás.

Ante esta situación se tiene que solo se cuenta con información de puntos sobre los que ya se conoce en detalle el desplazamiento, cuando la necesidad es la de poder lograr un análisis que se extienda a todo el cuerpo del deslizamiento. En este marco el lanzamiento de la misión europea Sentinel-1A en 2014 constituye un hito importante para un sitio como Corvara, ya que ha implicado la puesta en disponibilidad de imágenes SAR de libre acceso al público. Las imágenes Sentinel-1A trabajan en una longitud de onda mayor que las Cosmo Skymed, lo que en principio haría suponer que para un terreno de Corvara permitirían obtener información de áreas más extensas. Ello abre las puertas a la posibilidad de testar otras técnicas interferométricas, como DinSAR simple o SBAS.

Dados estos antecedentes, se plantean los siguientes objetivos para la presente tesis:

1.3.1. Objetivo general

Generar las bases para una metodología de monitoreo de deformación del terreno en Corvara mediante el empleo de interferometría multi-temporal.

1.3.2. Objetivos específicos

Para cumplimentar el objetivo general planteado, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Complementar el uso de imágenes Cosmo Skymed (banda X) con imágenes Sentinel-1A (banda C) para mejorar la cobertura espacial y temporal de las mediciones.
- Procesar las series de imágenes Cosmo Skymed con la familia de algoritmos PS⁵.
- Procesar las series de imágenes Sentinel-1A con la familia de algoritmos SBAS⁶.
- Evaluar, a partir de la confrontación entre resultados y datos de campo, el desempeño de cada una de estas familias de algoritmos para la detección y medición de movimientos de terreno.

⁵ Permanent Scatterers.

⁶ Small Baseline Subset.

2. PRINCIPIOS TEÓRICOS DE RADAR

En Teledetección, un Radar es un sistema de iluminación activo. Consiste básicamente en una antena montada sobre una plataforma que puede ser espacial o aérea, la cual transmite una señal hacia la superficie de la tierra, observándola siempre de manera lateral. El retorno de esta señal, conocido como eco, es retro-dispersado por la superficie y receptado nuevamente por el sensor o antena una fracción de segundo después (Notarnicola, 2013).

El radar emite energía electromagnética y trabaja en la región de las microondas, que cubre el espectro electromagnético que va desde 1 mm hasta aproximadamente 1 m (ver figura 10). Algunas de las principales bandas empleadas en radar son:

- Banda P, de alrededor de 65 cm. de longitud.
- Banda L, de alrededor de 23 cm de longitud.
- Banda S, de alrededor de 10 cm de longitud.
- Banda C, de alrededor de 5 cm de longitud.
- Banda X, de alrededor de 3 cm de longitud.
- Banda K, de alrededor de 1.2 cm de longitud.

No todas estas bandas son aplicadas en teledetección: La banda S se emplea sobre todo en radar meteorológico, telecomunicaciones y rastreo de embarcaciones; la banda K por lo general se reserva a aplicaciones de tipo militar. La banda P es capaz de adquirir información en terrenos difíciles, dada su alta penetrabilidad, pero desde un punto de vista ingenieril es difícil emplearla por las limitaciones que impone al tamaño de la antena.

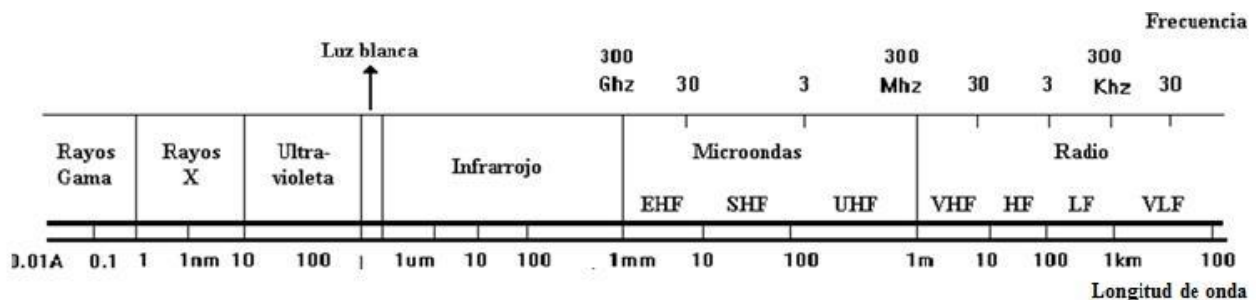


Figura 10: Espectro electromagnético (Mayorga Torres, 2013).

Los sistemas SAR están diseñados de tal forma de poder controlar la dirección del campo eléctrico emitido (Richards & Jia, 2005), lo que se conoce como polarización. Independientemente de la longitud de onda, las señales de radar pueden emitir vectores de campo eléctrico horizontal (H) o vertical (V), y receptar señales horizontales (H), verticales (V), o ambas. Generalmente, en la notación se pone primero la dirección de emisión y luego la dirección receptada. Así, se pueden encontrar configuraciones como HH, VV, VH, HV, e incluso, VH-HV/VV-HV/HH-VV/HV-VH en el caso que se esté trabajando en modalidad de polarización múltiple. Como será más adelante, la polarización es uno de los parámetros de la señal que influye en su interacción con el medio iluminado.

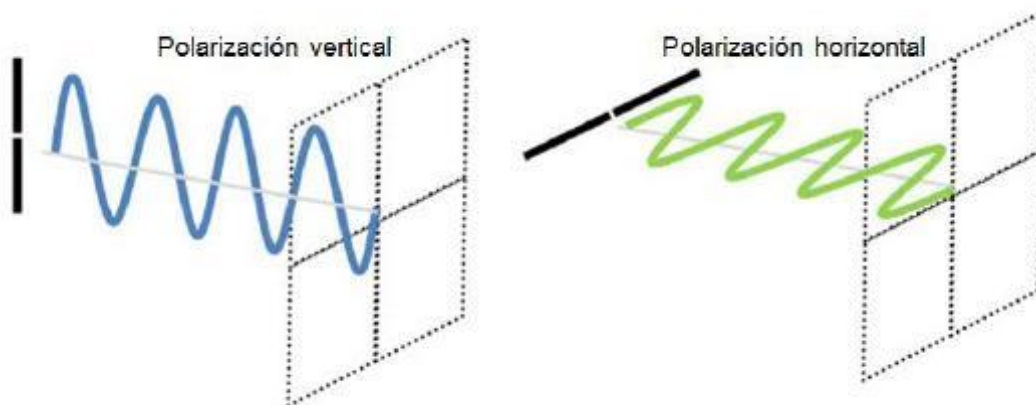


Figura 11: Campo eléctrico y polarización (CCRS, 2006).

2.1. GEOMETRÍA DE ADQUISICIÓN

Debido a que las imágenes de radar son tomadas con mirada lateral (y no nadiral como la mayoría de los sensores ópticos), las mismas presentan dos dimensiones o medidas diferenciadas conocidas como Azimut y Rango. El término Azimut se emplea para indicar la distancia lineal o la escala de la imagen en la dirección paralela al camino de la plataforma o satélite. El Rango en cambio se refiere a la distancia entre el sensor y el blanco, perpendicular a la línea de vuelo. Esta línea de mirada perpendicular, conocida como LOS o *Line of Sight* o línea de mirada del sensor, da lugar a lo que se denomina dirección de Rango Oblicuo o *Slant Range*. El Rango Oblicuo es por defecto la geometría en la que se visualiza la imagen Radar en los niveles de procesamiento más bajos. La proyección del Rango Oblicuo sobre un plano de referencia horizontal se denomina Rango Horizontal o *Ground Range* (Notarnicola, Introduction to SAR: Basic concepts, 2013), y es como generalmente se visualizan los productos derivados del Radar a partir de los niveles de procesamiento más altos.

Como se aprecia en la figura 12, los pulsos de Radar barren un área paralela a la trayectoria de la plataforma (conocida como *swath*), con un ángulo de mirada específico, denominado *look angle* (Hanssen, 2002). Existe sin embargo otro ángulo de relevancia para un sistema Radar, que se conoce como **ángulo de incidencia local** (ver figura 13). El mismo es el que se forma entre el rayo incidente del radar y la normal a la superficie del punto iluminado. Es decir que es un ángulo que depende de la topografía local y de la posición del punto iluminado respecto al sensor.

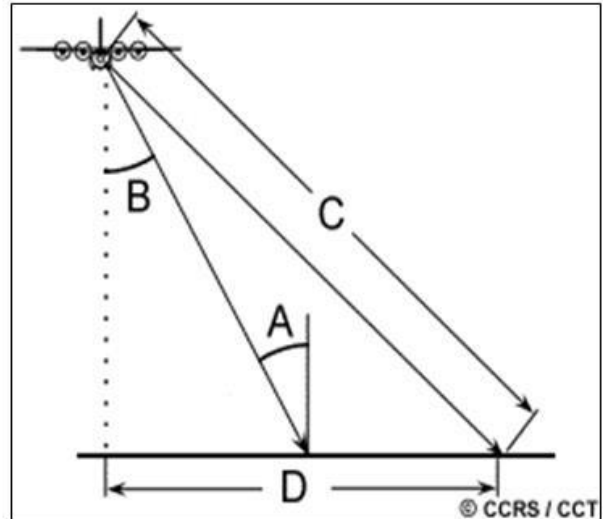
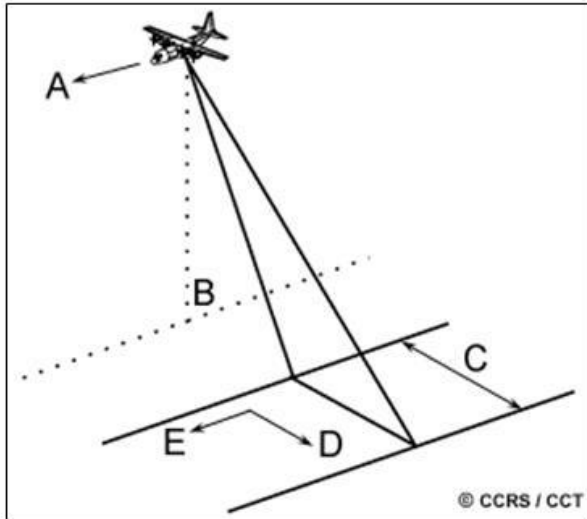


Figura 12: En la imagen de la izquierda, geometría de adquisición de un Radar, donde A indica la trayectoria de la plataforma, B indica el nadir, C indica el ancho de barrido o *swath*, D la dirección en rango y E la dirección en azimut. En la imagen de la derecha, A es el ángulo de incidencia local (en este caso del centro de la escena), B es el ángulo de mirada o *Look Angle*, C es el rango oblicuo o *slant range*, y D es el rango horizontal o *ground range*. (CCRS, 2006).

El ángulo de incidencia es una de las características más relevantes de la configuración geométrica de un sistema radar, sea RAR o SAR. Es importante distinguir entre ángulo de incidencia local, dependiente de la topografía local, y simplemente el ángulo de incidencia, que normalmente se mide en relación a una superficie de referencia como el elipsoide. Ninguno de los dos es constante a través del área de barrido o *swath*; el segundo crece desde el rango cercano hacia el rango lejano. En cuanto al primero, a este cambio hay que sumarle la topografía: generalmente en terrenos planos, la variación tiende a ser baja (de unos pocos grados para varios kilómetros). En regiones más montañosas, en cambio, la variación y la diferencia entre estos dos ángulos puede ser mucho mayor.

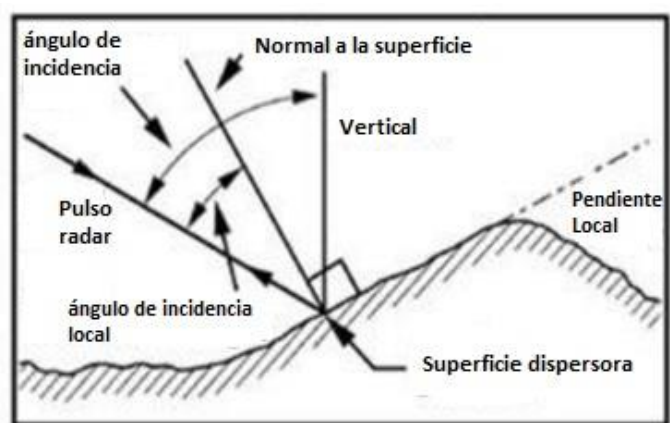
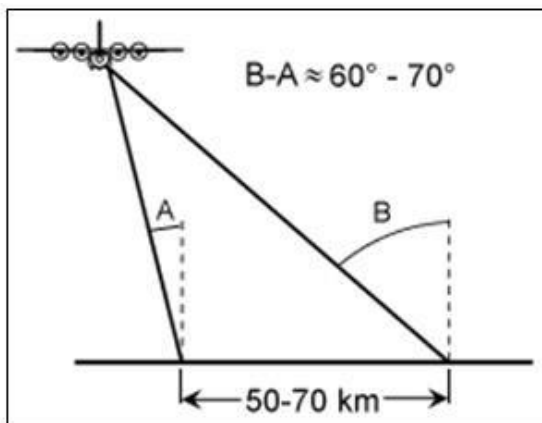


Figura 13: Con estas imágenes se busca graficar la diferencia entre el ángulo de incidencia y el ángulo de incidencia local. El primero se mide respecto a la normal al elipsoide, y siempre crece desde el rango cercano hacia el rango lejano. El segundo, en cambio, se mide respecto a la normal a la pendiente local, y su variación puede no ser tan constante. En terrenos planos, ambos ángulos tenderán a coincidir. Fuente: (CCRS, 2006)

2.2. MODOS DE ADQUISICIÓN

Los modos tradicionales de adquisición de las plataformas SAR son *Stripmap*, *ScanSAR* y *Spotlight*. Con el advenimiento de nuevas plataformas, ha surgido además el modo de adquisición *Topsar*, el cual será debidamente explicado.

Al operar en modo *Stripmap*, la antena normalmente ofrece la flexibilidad de seleccionar e iluminar un área de barrido cambiando el ángulo de mirada. Es una de las modalidades más utilizadas, pero como contrapartida presenta limitaciones en el ancho del área de barrido máximo. En el caso de algunas plataformas SAR como JERS-1 y ERS-1/2 este ancho de barrido es fijo, mientras que en otros sistemas como RADARSAT, ALOS-PALSAR, COSMO-SKYMED y RISAT se pueden seleccionar diversos anchos de barrido.

El modo *ScanSAR* permite superar la limitación del ancho de barrido de *Stripmap* con la contrapartida de una menor resolución espacial. Bajo esta modalidad la antena puede iluminar diversas sub-áreas de barrido escaneando hacia diversas posiciones. El principio de *ScanSAR* es dividir el tiempo de operación del radar entre dos o más sub-franjas separadas para obtener una imagen completa (SARMAP, 2008) .

Bajo la modalidad *Spotlight* el sensor orienta su antena de manera tal de iluminar continuamente la misma porción de terreno. De esa manera, se logra una resolución en azimut más fina que en el modo *Stripmap*, empleando la misma antena. Provee además la posibilidad de iluminar una escena con diversos ángulos de mirada en una sola pasada, por lo cual se recomienda su uso cuando se quiere obtener un mapeo de áreas más acotadas en superficie, con alta resolución.

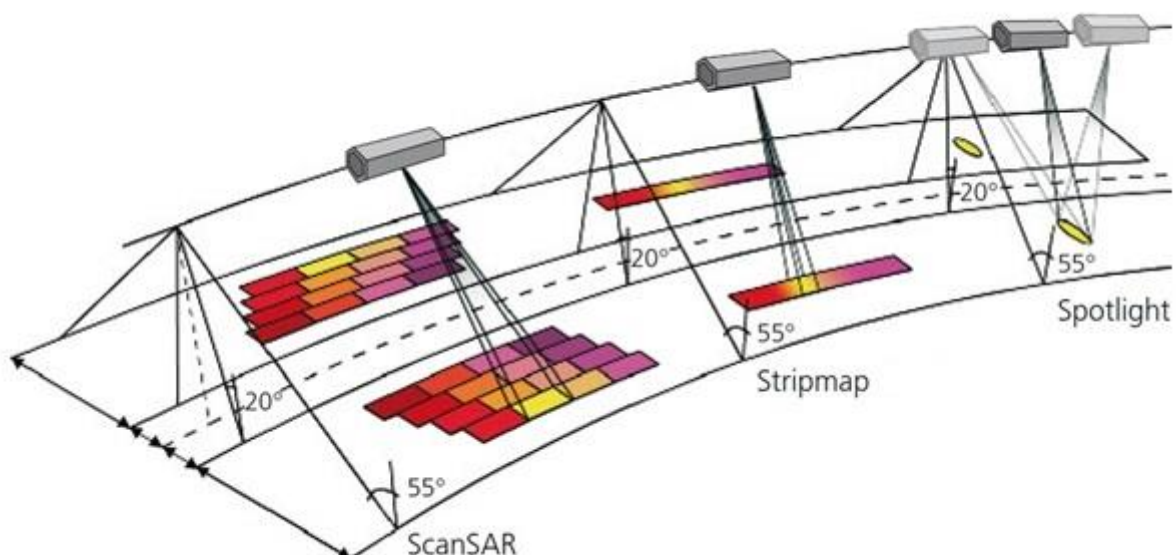


Figura 14: Adquisición en modo ScanSAR , en modo Stripmap y en modo Spotlight (Airbus Defense and Space, 2014) .

Por último, la modalidad de adquisición *Topsar* se presenta como una variante de *ScanSAR*, donde la información se adquiere y organiza en franjas o *bursts* (dentro de cada *swath*) , lo cual se logra

cambiando la orientación de la antena entre distintas sub-áreas de barrido adyacentes en una misma pasada. Además de orientar la antena en rango, como en *ScanSAR*, el rayo emitido también se orienta electrónicamente en azimut, hacia adelante y hacia atrás para cada franja. De esa manera, se evita el efecto de *scalloping*⁷ presente en las imágenes *ScanSAR* y se obtiene una calidad de imagen más homogénea a lo largo del área barrida (De Zan & Monti Guarnieri, 2006) .

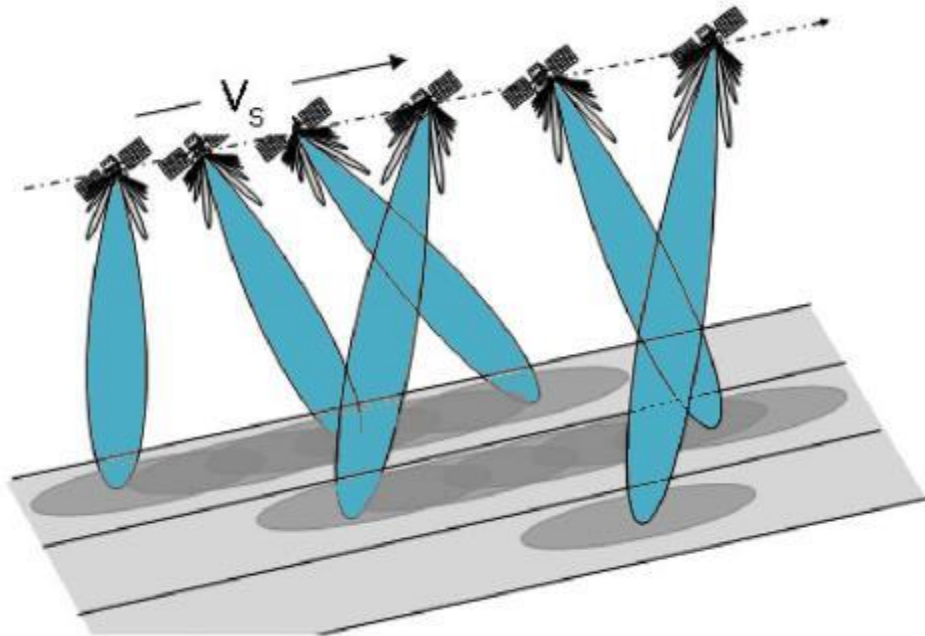


Figura 15: Modo de adquisición TOPSAR (De Zan & Monti Guarnieri, 2006).

2.3. RESOLUCIÓN ESPACIAL: RAR Y SAR

Cada imagen de radar consta de dos dimensiones: Rango y Azimut, resultando en un píxel que casi nunca es cuadrado. Cuando se habla de resolución entonces debe tratarse la resolución en Rango, por un lado, y la resolución en Azimut por otro.

Como concepto general, la resolución espacial debe entenderse como la distancia mínima de separación a la que se deben encontrar dos objetos para ser distinguidos como tales. En un sistema radar, si el tiempo de arribo del comienzo del eco del pulso del blanco más lejano arriba luego del final del eco del más cercano, entonces pueden ser distinguidos por el sistema Radar (Curlander & McDonough, 1991) .

2.3.1. Resolución en Rango

La resolución en rango de un sistema Radar viene definida por la siguiente ecuación:

$$r_s = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{2B} \quad (1)$$

⁷ El scalloping se produce en las imágenes *ScanSAR* debido a un error en la estimación de la frecuencia del centroide Doppler del área iluminada. Visualmente aparece como una secuencia de rayas oscuras y brillantes con una estructura dentada , orientados en la dirección del rango (Elizavetin, 2010) .

Donde C es la velocidad de la luz, y τ es la duración del pulso para un determinado ancho de banda B (Nagler, 1996). Esto quiere decir que la resolución en rango es mejor si se logra tener un pulso de menor duración, o un ancho de banda mayor.

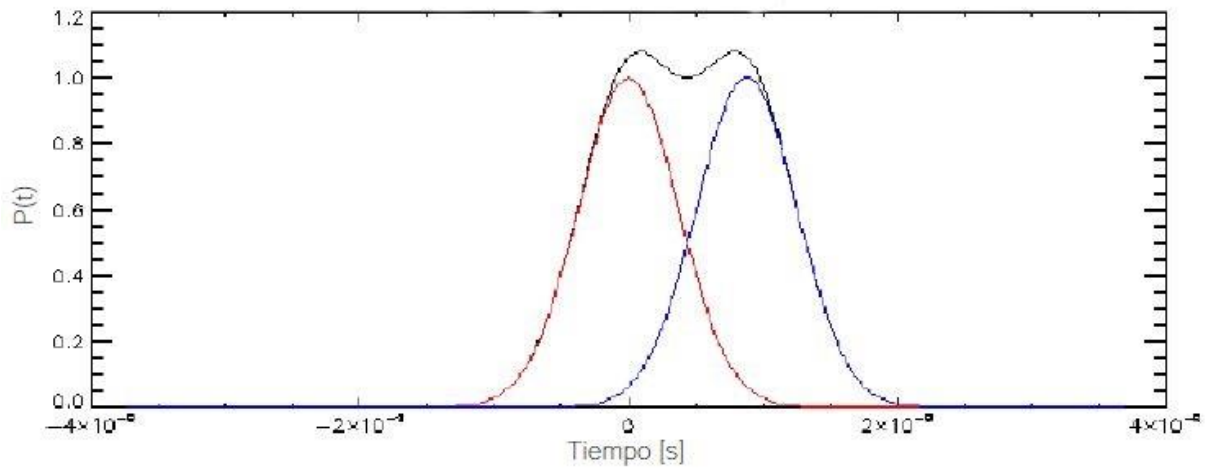


Figura 16: Máxima cercanía posible entre dos ecos para ser distinguidos como tales. A menor duración del pulso, menor es esa distancia y mejor la resolución. (Panozzo Zénere, 2015).

El problema de reducir la duración del pulso, es que esto degrada la resolución radiométrica porque se debilita la señal. Para preservar la resolución radiométrica, tanto los sistemas RAR como SAR modulan la señal en frecuencia en lugar de tiempo, dando lugar a lo que se conoce como *chirp*. Al pasar al plano de las frecuencias, una mayor duración del *chirp* conduce a un mayor ancho de banda B , y por lo tanto a mejor resolución. Desde el punto de vista de la electrónica, es más sencillo generar un pulso más largo modulado en frecuencia que uno extremadamente corto a alta potencia (Franceschetti & Lanari, 1999).

Obviamente, no puede generarse un *chirp* de duración extremadamente larga, ya que existe otra restricción. Al tener mayor duración el pulso, los ecos retornan superpuestos y para poder identificar las distintas respuestas hace falta un proceso complejo denominado compresión del pulso (Curlander & McDonough, 1991).

La fórmula expuesta aplica para la resolución en rango oblicuo. Si se desea proyectar dicha resolución en rango horizontal, debe considerarse el ángulo de incidencia local:

$$\rho_{rt} = \frac{r_s}{\sin \theta_i} \quad (2)$$

Donde ρ_{rt} es la resolución en rango horizontal, r_s es la resolución en rango oblicuo y θ_i es el ángulo de incidencia local. De lo cual se desprende que la resolución en rango horizontal no será constante a lo largo de la imagen, sino que variará según el ángulo de incidencia local.

2.3.2. Resolución en Azimut

La resolución en azimut se refiere a aquella obtenida en el sentido de avance de la plataforma, y depende básicamente de la apertura de la antena del sistema. En este punto es donde radica la diferencia fundamental entre los Radares de Apertura Real (RAR) y los de Apertura Sintética (SAR).

En un RAR, la apertura real de la antena viene dada por λ/L donde λ es la longitud de onda y L es la longitud de la antena. La resolución en azimuth viene definida por la fórmula:

$$\rho_a = \frac{2R\lambda}{L} \quad (3)$$

Donde R es la distancia al blanco en rango inclinado. En un SAR, en cambio, gracias al aprovechamiento del efecto Doppler, la resolución en azimuth suele definirse como:

$$\rho_a = \frac{L_a}{2} \quad (4)$$

Donde L_a es la longitud de la antena en dirección de azimuth. De esta última ecuación se derivan dos diferencias importantes respecto a la resolución en azimuth de un RAR. En primer lugar, que la misma no depende de la longitud de onda, ni de la distancia sensor-objetivo. En segundo lugar, que al contrario de lo que ocurre con un RAR, mientras más pequeña sea la antena, mejor será la resolución, eliminándose así una importante restricción. No obstante, la antena no puede ser arbitrariamente pequeña ya que sus dimensiones están también restringidas por otros factores de la configuración de un SAR que determinan el mínimo tamaño posible (Freeman, 2006). Aunque pareciera ser que reducir la antena podría aumentar la resolución infinitamente, la ganancia efectiva de la antena es proporcional al cuadrado de su apertura. Por lo tanto, la reducción en la antena será resultado de una suerte de equilibrio con el nivel de ruido en la imagen que se quiera alcanzar (Henderson & Lewis, 1998).

2.4. MECANISMOS DE INTERACCIÓN

La conjunción entre los parámetros propios de la configuración SAR (polarización, ángulo de incidencia, longitud de onda) y las propiedades del blanco define el comportamiento final de la señal retrodispersada.

Del lado del sensor, la longitud de onda es uno de los principales elementos que gobierna la interacción con los objetos presentes en la superficie, ya que define la penetrabilidad de la señal en la superficie de incidencia. A mayor longitud de onda, mayor será la capacidad del pulso de penetrar distintos objetos presentes en la superficie. Esto, en conjunción con la polarización empleada y el ángulo de mirada, derivará en que un objeto sea más o menos susceptible de ser identificado por el sensor. Si se combina un ángulo de incidencia bajo con una longitud de onda larga, el pulso de radar puede penetrar a una gran profundidad.

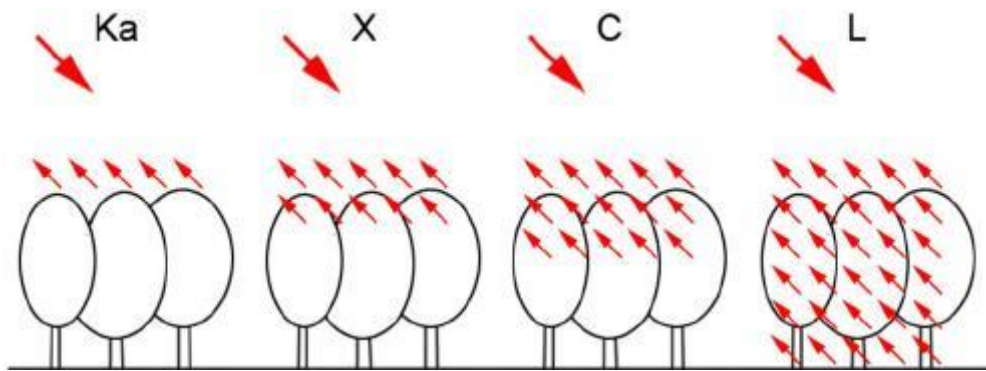


Figura 17: La penetrabilidad de la señal cambia en función de la longitud de onda empleada (Schmitt, Shahzad, & Xiang Zhu, 2015).

Entre las características del blanco se pueden analizar dos grandes grupos: sus propiedades dieléctricas y sus características geométricas.

Las propiedades dieléctricas del objeto están fuertemente relacionadas con su contenido de humedad. En general, el coeficiente de retrodispersión σ es directamente proporcional al contenido de humedad, incluso en zonas de alta vegetación. La humedad en la superficie puede ser descrita a través de una variable conocida como la constante dieléctrica (ϵ), la cual depende fuertemente de la humedad del suelo.

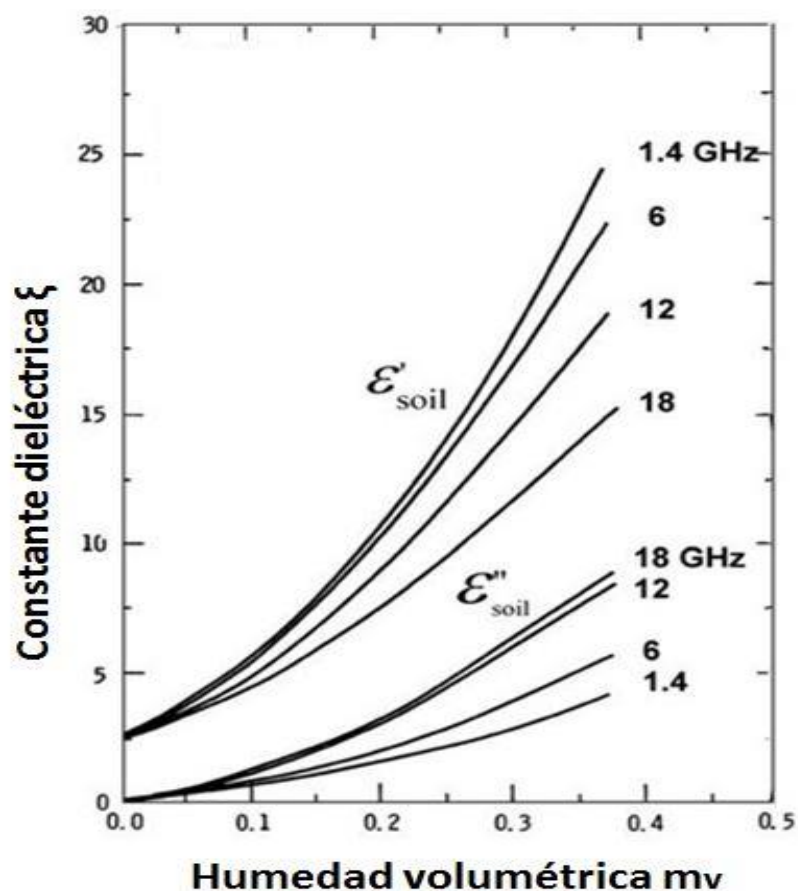


Figura 18: Relación entre la humedad del suelo y la constante dieléctrica. La misma relación positiva puede encontrarse entre la humedad del suelo y el coeficiente de retrodispersión σ (Ulaby, Moore, & Fung, 1986) .

En cuanto a la geometría del objeto, una de las características más importantes es la rugosidad, representada por las irregularidades presentes en la superficie a una escala centimétrica o milimétrica. La rugosidad identificada o medida está muy ligada a la longitud de onda empleada. Los principales mecanismos de interacción pueden resumirse en (Richards & Jia, 2005):

- Retrodispersión de superficie (especular y difusa): Si la superficie es suave o plana, la señal tenderá a rebotar en la dirección perpendicular al rayo incidente. Este es el caso del agua calma por ejemplo, que se visualiza con tonos oscuros y homogéneos en una imagen SAR indicando una baja retrodispersión. Si en caso contrario la rugosidad es detectable a la longitud de onda empleada, se produce una retrodispersión *lambertiana* (en todas las direcciones), de la cual una parte regresa al sensor.
- Retrodispersión de doble rebote: Se produce por superficies tipo Corner-Reflector, donde al haber dos superficies perpendiculares se produce una fuerte retrodispersión. Esto viene gobernado también por el ángulo del rayo incidente: mientras más estén estas superficies orientadas al sensor, mayor será el retorno.
- Retrodispersión volumétrica: Es el resultado de la interacción múltiple de la señal del radar con los objetos presentes en un mismo medio homogéneo. Este tipo de dispersión se da en caso de presencia de abundante vegetación, donde la retrodispersión es la suma de la contribución del rebote proveniente de hojas, tallos y ramas.

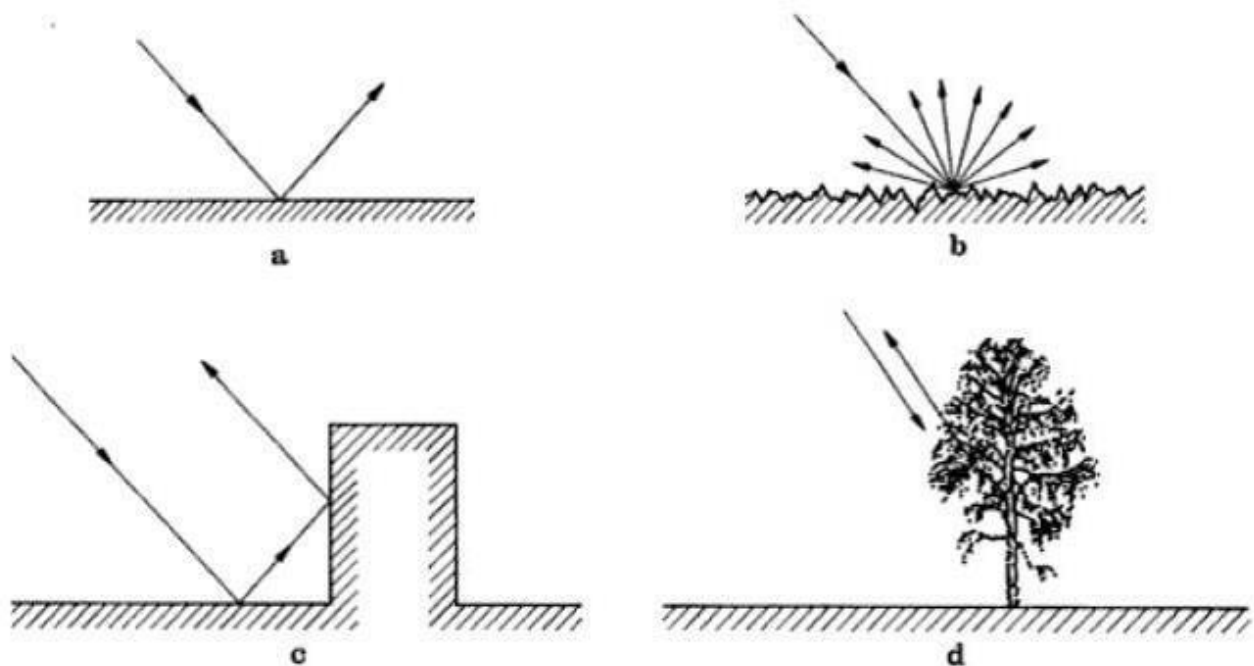


Figura 19: Mecanismos de interacción. Especular y difuso (a y b), doble rebote (c) y volumétrico (d) (Richards, 1993).

2.5. DISTORSIONES GEOMÉTRICAS

Debido a la modalidad de adquisición de un sistema radar, las imágenes obtenidas son susceptibles de sufrir distorsiones geométricas en función de distintos factores. Dadas las diferencias que representa la geometría SAR en rango y en azimut, es recomendable considerarlas separadamente a la hora de analizar este tipo de distorsiones. En general, en rango suelen ser mayores, y causadas

sobre todo por variaciones topográficas. En azimut en cambio tienden a ser más pequeñas, pero también más difíciles de corregir.

La posición medida para un blanco específico es función del tiempo de viaje del pulso o de la señal desde el sensor hasta la superficie, siendo así proporcional a la distancia sensor-objeto. En el plano correspondiente al rango oblicuo se produce una suerte de compresión de la superficie iluminada. Este efecto, denominado distorsión de escala de rango oblicuo, provoca que la escala de la imagen varíe desde el rango cercano hacia el lejano. Esta distorsión se corrige al hacerse la proyección a rango horizontal.

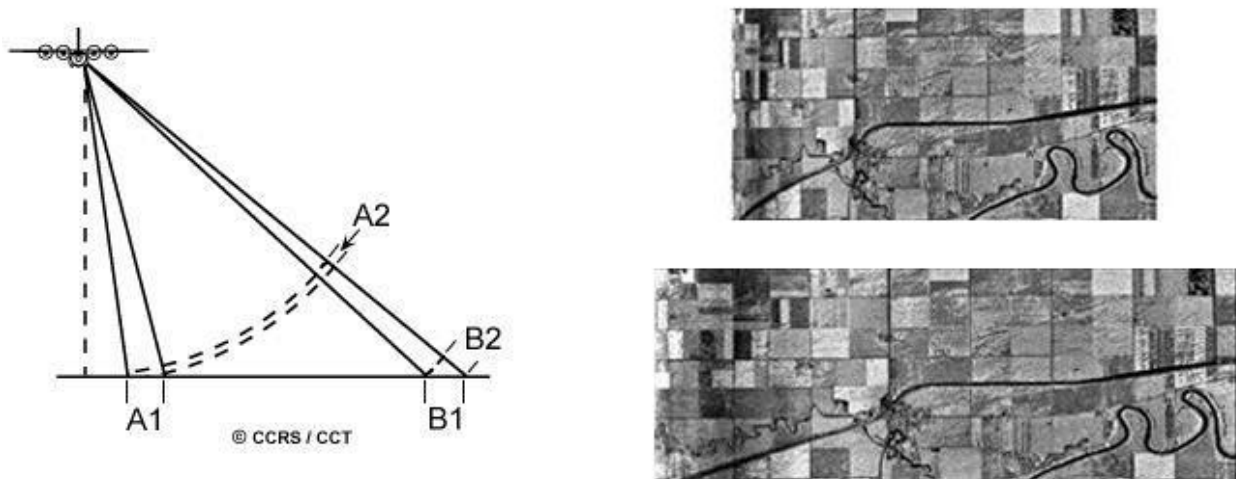


Figura 20: A pesar de que los objetivos A1 y A2 tienen el mismo tamaño en la superficie, sus dimensiones proyectadas en el rango oblicuo (A2 y B2) son diferentes. Esto se debe a que los objetos del rango cercano tienden a estar comprimidos respecto a los del rango lejano (CCRS, 2006).

Las imágenes SAR también sufren distorsiones geométricas por lo que en inglés se conoce como *relief displacement*. Con este término se hace referencia al desplazamiento de un objeto en la imagen, respecto a su posición real.

Dentro de esta categoría, el *foreshortening* es un efecto muy habitual en regiones montañosas o terrenos irregulares. Se da en pendientes orientadas hacia el sensor SAR y el efecto visual es que aparecen comprimidas en la imagen. Esto se debe a que el pulso del radar llega primero a la base del objeto en cuestión, que a su punto más alto (figura 21).

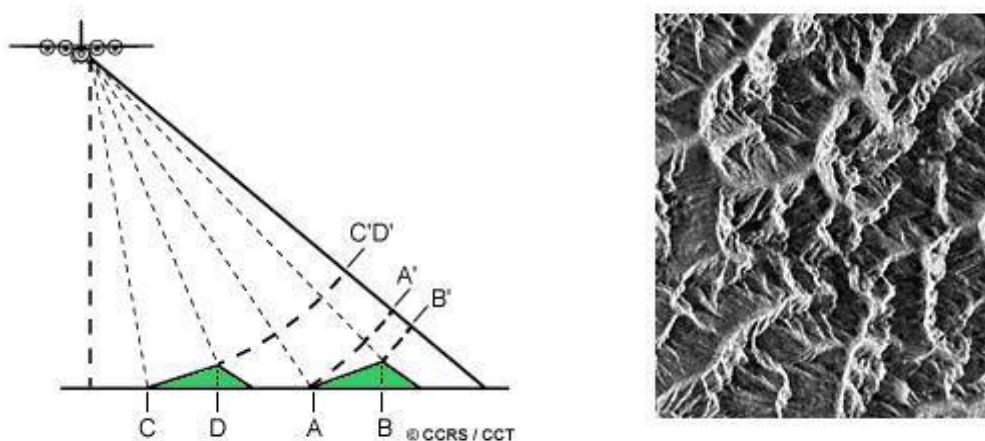


Figura 21: El efecto foreshortening (CCRS, 2006).

Como se expone en la figura 21, la pendiente A-B aparece comprimida en el rango oblicuo (A'-B'). La intensidad del efecto *foreshortening* variará según la relación entre la pendiente local y el ángulo del rayo incidente. Será más extremo cuanto más perpendicular sea el rayo incidente respecto a la pendiente local, como se puede observar con los puntos C y D, cuya pendiente proyectada es rango oblicuo es nula. En la figura 21, la imagen de la derecha muestra una escena SAR de un área muy montañosa, donde las áreas más brillantes son aquellas afectadas por el *foreshortening*. Este tipo de distorsión puede corregirse al procesar la imagen SAR a través del uso de un Modelo de Elevación Digital externo.

Cuando el haz del radar arriba a la parte superior de un objeto antes que a su base, se produce un efecto conocido como *layover*. La señal proveniente de la punta del objeto será receptada primero que la proveniente de la base, desplazando en el rango oblicuo la parte más alta hacia el sensor, y haciendo que se superponga a la base del objeto. El *layover* se incrementa para ángulos de vista más pequeños; es decir que se intensifica en el rango cercano y en terrenos montañosos.

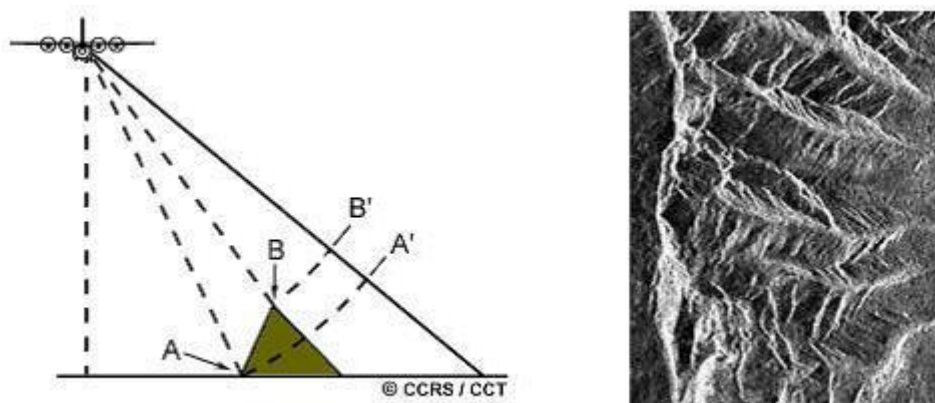


Figura 22: Efecto *layover* (CCRS, 2006).

Cuando el haz del radar directamente no puede iluminar la superficie, frecuentemente debido a interferencias topográficas o antrópicas, se produce el efecto conocido como sombreado o

shadowing. El efecto *shadowing* es más frecuente hacia el rango lejano de la imagen, detrás de estructuras verticales (como edificios altos) o pendientes muy abruptas. Todos los píxeles afectados por esta distorsión aparecerán oscuros en la imagen, y no se podrá extraer ninguna información de ellos.

En cuanto a las implicancias para una aplicación SAR, los efectos de *layover* y *shadowing* son los más complicados, ya que a diferencia del *foreshortening* no pueden ser corregidos. Es por ello que antes de realizar un análisis con una imagen SAR, resulta imprescindible identificar las posibles zonas afectadas por estas dos distorsiones.

2.6. DISTORSIONES RADIOMÉTRICAS

Dada la rugosidad de la superficie, la señal SAR es susceptible de sufrir fluctuaciones aleatorias, incluso en zonas más bien homogéneas, ya que dentro de una misma celda de resolución pueden existir múltiples objetivos o blancos. Debido a ello, los pulsos o ecos emitidos retornan habiendo recorrido caminos diferentes y acumulando diferencias de fase. Dependiendo del valor de estas diferencias, la interferencia puede ser constructiva, parcial o destructiva, como expuesto en la siguiente figura:

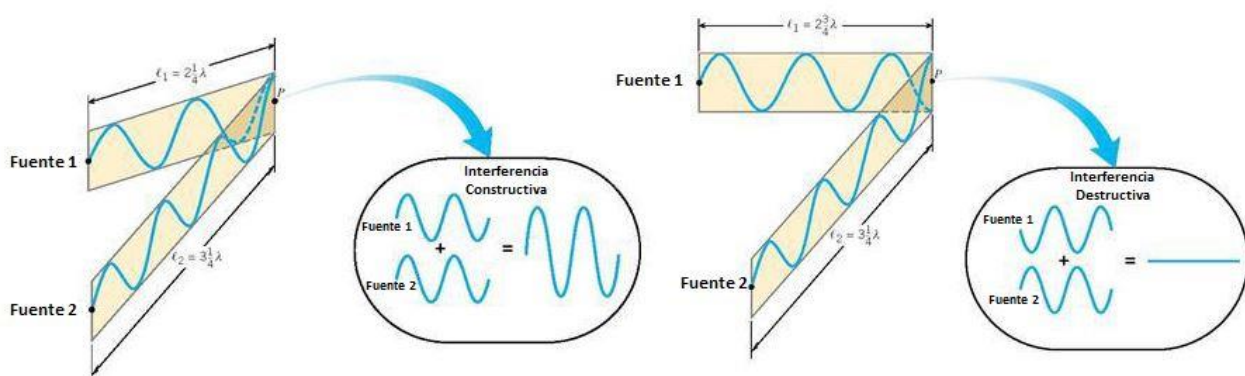


Figura 23: Comportamiento constructivo y destructivo (Alaska Earthquake Center, s.f.).

A gran escala, esta interferencia se manifiesta como un fenómeno denominado *speckle* o simplemente ruido. Para cuantificarlo se suele emplear el SNR (*Signal to Noise Ratio*), que puede definirse como la relación entre la señal transmitida y la intensidad del ruido o *speckle* que la afecta. El ruido da lugar a lo que se conoce como incerteza radiométrica, la cual por lo general se cuantifica conociendo el Número Equivalente de Looks (ENL), calculado como la relación entre la potencia recibida media y la correspondiente desviación estándar dentro de un área homogénea:

$$ENL = \left(\frac{\mu}{\sigma}\right)^2 \quad (5)$$

Para reducir la incerteza radiométrica frecuentemente se hace uso de filtros espaciales y de una técnica conocida como *multilooking*. El *multilooking* es generalmente el primer paso para reducir la incerteza radiométrica. Consiste en dividir el espectro de la imagen, trabajando en el dominio de las frecuencias, en un número de partes o *looks* que luego son promediados en la imagen final. El

objetivo del *multilooking* además es la obtención de un píxel de salida cuadrado, para lo cual es importante tomar como referencia la resolución de la imagen en rango horizontal (ecuación 2), en lugar del oblicuo (ecuación 1). El *multilooking* empleado para reducir el ruido radiométrico no debe confundirse con el *multilooking* utilizado en el procesado interferométrico para reducir ruido en la fase, que será debidamente comentado.

3. PRINCIPIOS TEÓRICOS INSAR

Como se adelantara en secciones precedentes, una imagen SLC almacena información tanto de amplitud como de fase. La primera, como ya se ha descrito, depende de la estructura del blanco, sus propiedades dieléctricas y de los parámetros del sensor. La segunda describe la distancia recorrida entre el sensor y el objeto.

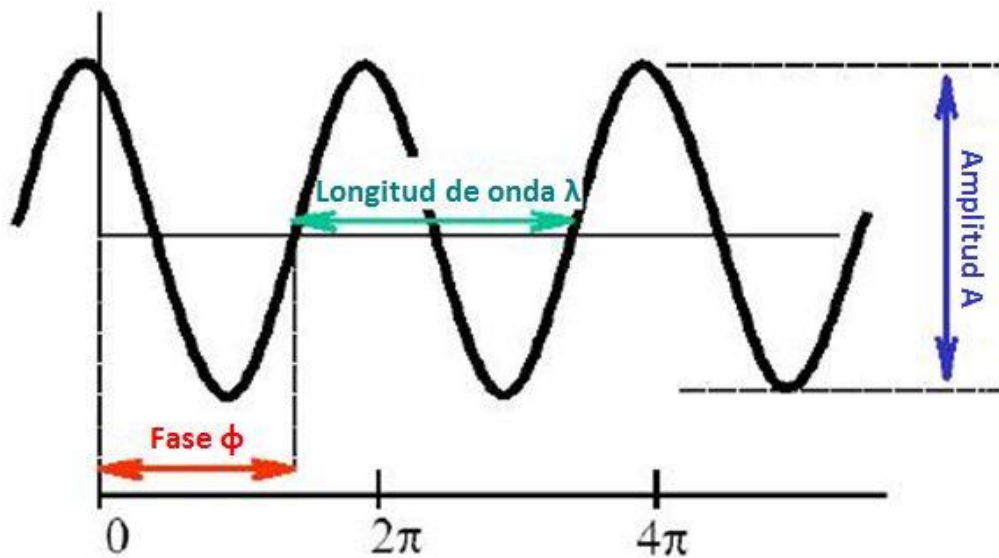


Figura 24: Amplitud y fase, medidas por el radar (Notarnicola, Introduction to SAR: Basic concepts, 2013) .

En las aplicaciones interferométricas la observación principal es la señal de fase relativa en dos dimensiones, modulada en 2π , ya que la fase absoluta es desconocida.

3.1. CONFIGURACIÓN INTERFEROMÉTRICA

En la figura 25 puede verse que con una sola adquisición dos puntos que se encuentran a la misma distancia en rango oblicuo, pero desplazados horizontalmente, no pueden distinguirse. Este problema se puede resolver observando las diferencias angulares entre un punto P' sobre una superficie de referencia y un punto P a cierta altura H_P , que se encuentra a la misma distancia R_1 en rango oblicuo. Esto equivale a medir diferencias angulares acumulativas entre celdas de resolución vecinas.

En definitiva, esto es lo que ofrece la Interferometría SAR al observar dos puntos desde geometrías ligeramente distintas, como se ve en la segunda parte de la figura 25.

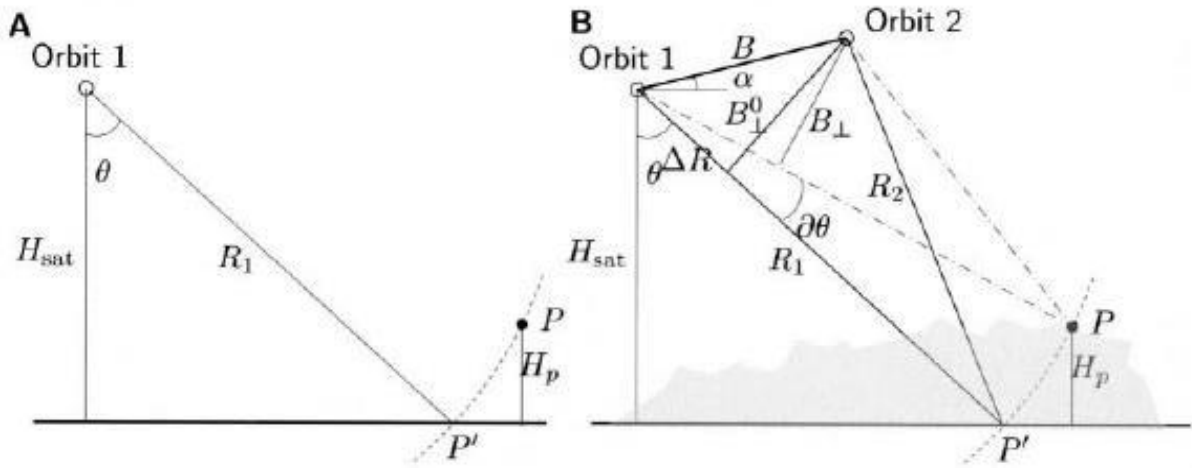


Figura 25: Configuración interferométrica (Hanssen, 2002).

La distancia entre los dos sensores, perpendicular a la dirección de mirada, se denomina **línea de base perpendicular** ($B_{\perp}$). Como el sistema SAR no puede medir directamente pequeñas diferencias angulares, esta información debe derivarse de las mediciones de distancia entre ambos sensores y la celda de resolución en la superficie aplicando trigonometría como se muestra en la figura 25. El problema básico de las técnicas InSAR es la determinación de esas diferencias en distancia.

Descartando en principio los retardos que puede sufrir la señal por la propagación atmosférica, la fase observada para un píxel puede definirse como la suma de un componente proporcional a la distancia y otro vinculado a las propiedades de dispersión de dicha celda. Como la segunda contribución es una magnitud determinística, si se supone un mapeo coherente⁸ será siempre igual. Por lo tanto, el diferencial de fase entre dos sensores se referirá a las diferencias en rango recorrido, ya que el segundo componente se cancelará.

En la práctica este método supone fuertes restricciones sobre la configuración geométrica y el procesamiento interferométrico de los datos SAR. Además, si las adquisiciones se realizan en instantes diferentes, la separación temporal entre ambas adquisiciones (conocida como **línea de base temporal**) puede resultar en cambios en las propiedades dispersoras del blanco por clima, vegetación, actividad humana, etc. Todos estos factores pueden afectar el grado de coherencia hasta llevar a una total decorrelación.

3.2. OBSERVACIONES DE FASE, ALTURA TOPOGRÁFICA Y DEFORMACIÓN DE SUPERFICIE

Siempre refiriéndonos a la figura 25, ambas imágenes SAR están compuestas por una grilla regular con valores complejos γ_1 e γ_2 que se pueden descomponer en amplitud y fase:

$$\gamma_1 = |\gamma_1|e^{(j\psi_1)} \quad (6)$$

$$\gamma_2 = |\gamma_2|e^{(j\psi_2)} \quad (7)$$

⁸ La coherencia mide el grado de similitud entre dos observaciones. Si la medición de fase se realiza bajo las mismas condiciones, arrojará el mismo resultado.

Luego de hacer corresponder las localizaciones de la grilla γ_1 con γ_2 , se puede realizar una multiplicación compleja que da lugar lo que se conoce como **interferograma**:

$$v = \gamma_1 \gamma_2 = |\gamma_1| |\gamma_2| e^{j(\psi_1 - \psi_2)} \quad (8)$$

Los valores de fase observados ψ_1 e ψ_2 para un punto P son:

$$\psi_{1p} = \frac{-2\pi 2R_1}{\lambda} + \psi_{scat,1p} \quad (9)$$

$$\psi_{2p} = \frac{-2\pi 2R_2}{\lambda} + \psi_{scat,2p} \quad (10)$$

Donde R_1, R_2 , son las distancias geométricas y $\psi_{scat,1p}$, $\psi_{scat,2p}$ son las contribuciones de fase relativas a los elementos dispersores. Suponiendo que estos dos términos son iguales y se cancelan, la **fase interferométrica** puede ser escrita como:

$$\Phi_p = \psi_{1p} - \psi_{2p} = -\frac{4\pi(R_1 - R_2)}{\lambda} = -\frac{4\pi\Delta R}{\lambda} \quad (11)$$

Donde λ es la longitud de onda. Y su diferencial es:

$$\partial\Phi_p = -\frac{4\pi}{\lambda}\partial\Delta R \quad \text{donde } \partial\Delta R = B\cos(\theta^0 - \alpha)\partial\theta \quad (12)$$

Donde el valor θ^0 es un ángulo de incidencia obtenido de alguna superficie de referencia, como un elipsoide, y α es el ángulo formado entre la línea de base B y el plano horizontal, como puede observarse en la figura 25. Combinando ambas expresiones, surge que el cambio de fase puede ser expresado en función del cambio en el ángulo θ^0 :

$$\partial\Phi = -\frac{4\pi}{\lambda}B\cos(\theta^0 - \alpha)\partial\theta \quad (13)$$

La altura del satélite es un parámetro conocido que puede ser expresado como:

$$H_{SAT} = R_1 \cos\theta \quad \text{y su derivada como } \partial H_{SAT} = -R_{1P} \sin\theta_p^0 \partial\theta$$

De esa manera puede establecerse una relación entre la altura del punto P H_p y el diferencial de fase $\partial\Phi_p$:

$$H_p = -\frac{\lambda R_{1P} \sin\theta_p^0}{4B_{\perp,p}^0} \partial\Phi_p \quad (14) \quad \text{donde } B_{\perp,p}^0 = B\cos(\theta_p^0 - \alpha)$$

Si en la ecuación anterior se asigna $\partial\Phi_p = 2\pi$, se obtiene la fórmula de la **altura de ambigüedad**, que corresponde al cambio de altura correspondiente a un cambio de fase de 2π :

$$H_{2\pi} = \left| \frac{\lambda R_{1P} \sin\theta_p^0}{2B_{\perp,p}^0} \right| \quad (15)$$

Si se combina entonces la influencia de la topografía H_p y de las deformaciones de terreno D_p con el diferencial de fase $\partial\Phi_p$, se obtiene que:

$$\partial\Phi_p = -\frac{4\pi}{\lambda} \left(D_p - \frac{B_{\perp,p}^0}{R_{1p} \sin\theta_p^0} H_p \right) \quad (16)$$

La fase interferométrica a su vez puede ser pensada como la suma de la fase de referencia ϑ_p (que es la fase esperada del objeto en función de la geometría de adquisición) y las correspondientes desviaciones contenidas en $\partial\Phi_p$:

$$\Phi_p = \vartheta_p + \partial\Phi_p \quad \text{donde} \quad \vartheta_p = \frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta_p^0 - \alpha)$$

La fase interferométrica queda entonces expresada como:

$$\Phi_p = \frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta_p^0 - \alpha) - \frac{4\pi}{\lambda} D_p - \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp,p}^0}{R_{1p} \sin\theta_p^0} H_p \quad (17)$$

En la ecuación anterior quedan diferenciados tres términos:

- El primero, explicado por la curvatura de la tierra y que se conoce como fase de tierra plana; en adelante denotado como Φ_{Flat} .
- El segundo término, relacionado a las deformaciones del terreno, en adelante denotado como Φ_D
- El tercero, relacionado a la topografía (altura del terreno), en adelante denotado como Φ_{Topo}

Conociendo la geometría de adquisición, el término Φ_{Flat} puede ser modelado y cancelado, mediante un proceso conocido como **aplanamiento o achatamiento del interferograma** (*flattening* en inglés). De esa manera, la fase del interferograma aplanado queda referido solo a la topografía y a los desplazamientos de terreno. Si no se han producido deformaciones de terreno, entonces el término Φ_D es igual a cero, y se tiene un **interferograma topográfico** :

$$\Phi_{p\text{FLAT}} = -\frac{4\pi}{\lambda} D_p - \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp,p}^0}{R_{1p} \sin\theta_p^0} H_p \quad (18)$$

Si, en cambio, se cuenta con una fuente de información externa que provee el dato de elevación (un Modelo de Elevación Digital, por ejemplo), el término Φ_{Topo} puede también ser modelado y sustraído, siendo el resultado entonces lo que se conoce como **interferograma diferencial**, que contendrá una fase referida solo a los desplazamientos de terreno:

$$\Phi_{p\text{FLATD}} = -\frac{4\pi}{\lambda} D_p \quad (19)$$

Así como existe la altura de ambigüedad para medir la sensibilidad del sistema para detectar cambios de altura, puede pensarse un análisis similar para el caso de un desplazamiento equivalente a 2π :

$$D_{2\pi} = \frac{\lambda}{2} \quad (20)$$

Esta última observación es importante en el sentido de que para una configuración InSAR, la medición de la deformación de terreno será mucho más precisa que la de la altura. Por ejemplo: Si se tiene un par interferométrico con $\lambda=0.056$ m, $\theta = 23^\circ$, y $R = 850.000$ m, y una línea de base perpendicular $B_{\perp}= 100$ m, entonces se tendrá que:

$$H_{2\pi} = \frac{0.056 * 850000m * \sin(23)}{2 * 100m} = 93 \text{ m}$$

$$D_{2\pi} = \frac{0.056m}{2} = 0.0285 \text{ m}$$

Con lo cual, un cambio de fase en 2π implicará una variación en altura de 93 metros, mientras que en deformación del terreno significará solo 2.85 centímetros. En el caso de la altura, mientras mayor sea la línea de base perpendicular, mayor será la sensibilidad del sistema para detectar variaciones.

Para medir deformaciones del terreno, en cambio, la línea de base perpendicular no influye en la sensibilidad del sistema, pero sí en la manera en que se propagarán los errores de medición de la fase topográfica en el resultado final. Como se ha visto en las ecuaciones precedentes, la fase debida a la deformación puede ser despejada como:

$$\Phi_D = \Phi - \Phi_{TOPO}$$

Pero si se tiene en cuenta que pueden existir errores en la estimación de la fase topográfica, la ecuación anterior debe ser reescrita como:

$$\Phi_D = \Phi - \Phi_{TOPO} \pm \sigma_{\Phi_{topo}} \quad \text{donde} \quad \sigma_{\Phi_{topo}} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}^0}{R_{1P} \sin \theta_p^0} \sigma_Z$$

Donde σ_Z es el error de medición de topografía, que puede ser considerado como la precisión teórica del modelo de elevación digital utilizado en caso de interferometría diferencial. Como puede verse, mientras más grande la línea de base perpendicular, mayor será la propagación de este error en la medición de la deformación. De ahí que para medir deformaciones de terreno, sea preferible contar con líneas de base más cortas.

3.3. COHERENCIA INTERFEROMÉTRICA

Las técnicas InSAR funcionan solo bajo condiciones coherentes; esto es, cuando las señales recibidas están correlacionadas entre ambas adquisiciones SAR. La coherencia espacial es una de las medidas más importantes a considerar para una aplicación interferométrica. Para una imagen con N píxeles puede ser modelada como (Seymour & Cumming, 1994):

$$\gamma = \frac{\left| \sum_{n=1}^N Y_1^{(n)} Y_2^{*(n)} \right|}{\sqrt{\sum_{n=1}^N |Y_1^{(n)}|^2 \sum_{n=1}^N |Y_2^{(n)}|^2}} \quad (21)$$

La pérdida de coherencia, conocida como **decorrelación**, puede ser definida como ruido en la fase presente en los interferogramas debido a distintas causas. Existen distintas fuentes de decorrelación:

- Decorrelación geométrica o por línea de base (γ_{geom}), causada por la diferencia entre los ángulos de incidencia entre ambas adquisiciones.
- Decorrelación por centroide Doppler (γ_{DC}), causada por la diferencia entre los centroides Doppler de ambas adquisiciones.
- Decorrelación volumétrica (γ_{VOL}), causada por la penetración de la onda del radar en el medio dispersor.
- Decorrelación térmica o del sistema ($\gamma_{thermal}$), producida por las características del sistema SAR, como las características de la antena.
- Decorrelación temporal ($\gamma_{temporal}$), debida a cambios físicos en el terreno que afectan a los dispersores locales.
- Decorrelación debida al procesamiento InSAR ($\gamma_{processing}$), que resulta de los algoritmos elegidos para procesar los datos.

La decorrelación por línea de base es una de las más críticas en aplicaciones InSAR. Existe un valor de línea de base a partir del cual la diferencia o salto espectral entre dos adquisiciones supera el ancho de banda B_R , causando que la correlación geométrica sea cero. Esta **línea de base crítica** se conoce como $B_{\perp,crit}$ y es función de la longitud de onda, el ángulo de incidencia y la topografía del terreno:

$$B_{\perp,crit} = \lambda \frac{B_R}{c} R_1 \tan(\theta_{inc} - \zeta) \quad (22)$$

Donde c es la velocidad de la luz y ζ es la pendiente local, que se define positiva desde el satélite. La decorrelación geométrica puede entonces calcularse como:

$$|\gamma_{geom}| = \begin{cases} \frac{B_{\perp,crit} - B_{\perp}}{B_{\perp}}, & |B_{\perp}| \leq B_{\perp,crit} \\ 0 & , |B_{\perp}| > B_{\perp,crit} \end{cases}$$

En la figura 26 se pueden ver ejemplos de decorrelación geométrica en función de $B_{\perp}$.

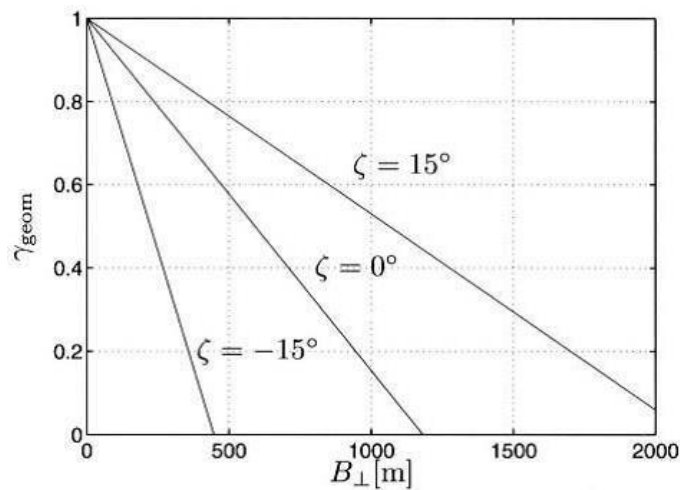


Figura 26: Decorrelación geométrica para un par interferométrico ERS como función de la línea de base perpendicular $B_{\perp}$ y la pendiente del terreno ζ (Hanssen, 2002).

La decorrelación por centroide Doppler es equivalente a la decorrelación geométrica, pero en este caso en el plano azimut. Se explica por las diferencias entre los centroides Doppler (Δf_{DC}) entre ambas adquisiciones. Este factor es mayor mientras mayor sea Δf_{DC} :

$$|\gamma_{gc}| = \begin{cases} 1 - \Delta f_{DC}/B_A & |\Delta f_{DC}| \leq B_A \\ 0 & |\Delta f_{DC}| > B_A \end{cases}$$

Básicamente esta diferencia de centroide Doppler deriva, en el espectro de las frecuencias, en partes donde las señales no se solapan (ver figura 27), produciendo ruido en el interferograma. Esto puede deberse a diferencias en el *squint angle*⁹ de ambos sensores, o por la convergencia de las órbitas.

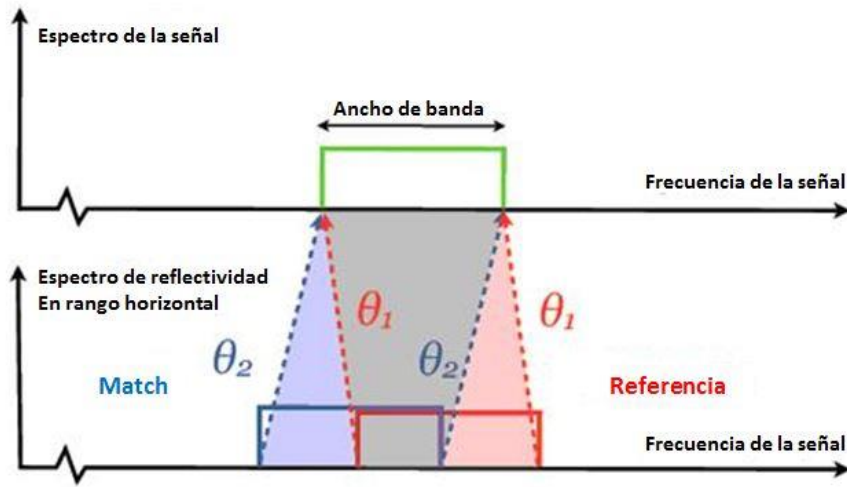


Figura 27: Señales con diferentes centroides Doppler, causando que no haya un solapamiento perfecto (Panozzo, 2015).

La decorrelación temporal y/o volumétrica se da cuando la distribución de las propiedades eléctricas debidas a los distintos dispersores presentes en una celda de resolución cambian como función del tiempo entre la primera y la segunda adquisición. De manera muy simplificada, las observaciones de fase de ambas en los tiempos t_1 , t_2 pueden considerarse formadas por dos componentes determinísticos y uno estocástico debido al ruido:

$$\psi_{t1} = \psi_{geom,t1} + \psi_{scat,t1} + n_{t1} \quad (23)$$

$$\psi_{t2} = \psi_{geom,t2} + \psi_{scat,t2} + n_{t2} \quad (24)$$

Donde $\psi_{geom,ti}$ es el componente determinístico debido a la geometría del sensor y los objetivos sobre la superficie en el instante t_i . La contribución de fase determinística de todos los dispersores comprendidos en la celda de resolución está contenida en $\psi_{scat,ti}$ y n_{ti} es el ruido adicional. Bajo las mismas circunstancias de observación, ψ_{scat} debería ser siempre igual: la decorrelación temporal introduce cambios justamente en ese componente. Por lo tanto, una observación interferométrica es más útil mientras más estable sea ψ_{scat} a lo largo del tiempo. Generalmente se

⁹ El *squint angle* es el ángulo de apuntamiento en el sentido del vuelo. Es negativo si apunta hacia detrás, positivo hacia adelante, y cero si apunta en dirección perpendicular.

obtienen altos valores de coherencia temporal con poca vegetación, o cuando se usan longitudes de onda más largas, menos sensibles a la cobertura del suelo.

La influencia del ruido térmico en la fase interferométrica puede ser calculada de manera teórica calculando el SNR de un sistema específico. El coeficiente de correlación térmica puede expresarse como:

$$\gamma_{thermal} = \frac{1}{1 + SNR^{-1}} \quad (25)$$

Donde el SNR se obtiene como P_r/P_n : P_r es la potencia recibida por el sensor de acuerdo a la Ecuación Fundamental del Radar¹⁰, y P_n es la fuerza o intensidad del ruido térmico en el sistema receptor. El SNR contenido en dicha fórmula está determinado por parámetros del sistema radar y por características propias de la escena, derivadas de los mecanismos de interacción. Como se ha visto, el SNR guarda relación con el coeficiente σ^0 , con lo cual γ_{therm} puede también quedar expresada en función de σ^0 , como se muestra en la figura 28:

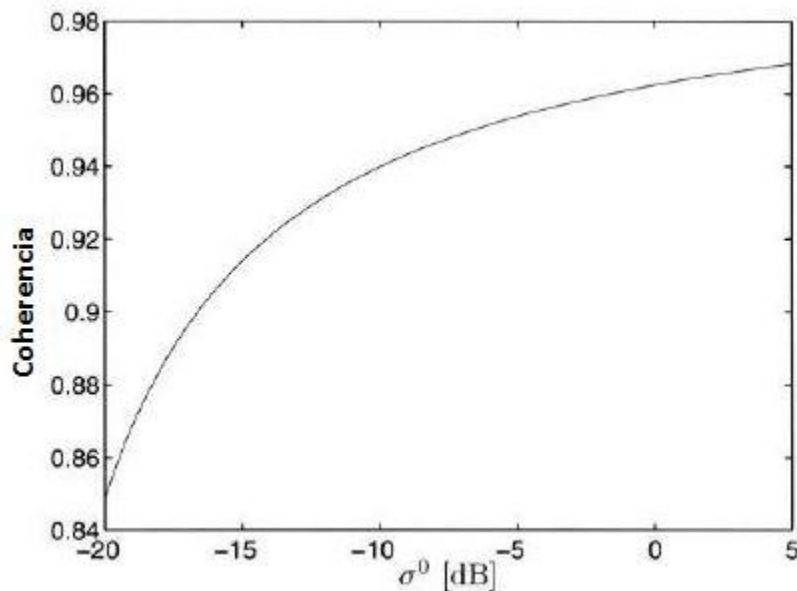


Figura 28: Coherencia basada en el ruido térmico para par interferométrico ERS, como función del Radar Cross Section (RCS, σ^0) (Hanssen, 2002)

3.4. FLUJO DE TRABAJO INSAR

3.4.1. Criterios para seleccionar imágenes

El criterio para seleccionar imágenes variará en función de la aplicación deseada. Los principales factores que condicionan la elección de una u otra imagen son el tipo y disponibilidad de datos, su distribución espacial y temporal y las características del fenómeno a ser modelado.

¹⁰ Para más detalle sobre la Ecuación Fundamental del Radar remitirse a Curlander & McDonough, 1991.

Como se ha visto en secciones precedentes, las características de cada sensor y plataforma definen diversas longitudes de onda, anchos de banda, SNR y ciclos de repetición. El ancho de banda determina la línea de base crítica y la resolución espacial en rango, y la longitud de onda en conjunción con el SNR condicionan la sensibilidad del sistema para modelar la topografía o fenómenos de deformación del terreno. Parámetros como la inclinación orbital y el ciclo de repetición influirán en la cobertura global de cada sensor y en el tiempo de revisita.

Otro importante punto a considerar es la disponibilidad de los datos, tanto desde un punto de vista económico (si son de libre distribución o no), como operacional o técnico. En el último caso, importa saber si el área de interés es iluminada con distintas geometrías, con pasadas ascendentes y/o descendentes, o con el ángulo de mirada requerido para el fenómeno en cuestión. También es importante saber si se pueden solicitar nuevas adquisiciones acordes a los requerimientos del estudio, o si solo se cuenta con imágenes de catálogo ya adquiridas.

Una vez chequeado lo anterior, es muy importante evaluar la distribución de las líneas de base temporales y espaciales. Por ejemplo, para generar modelos digitales de elevación con ERS o ENVISAT¹¹, suele ser conveniente usar líneas de bases perpendiculares de entre 100 y 500 metros, y las líneas de base temporales deberían ser pequeñas para evitar decorrelación. En el caso de interferogramas diferenciales, en cambio, mientras más pequeña sea $B_{\perp}$, menor será el ruido debido a la propagación por errores de topografía, y la línea de base temporal adecuada dependerá de la dinámica del fenómeno monitoreado. Esto es, si es algo que se da de manera continua en el tiempo (como la subsidencia en zonas montañosas), o si es instantáneo como un terremoto. En el último caso, lo ideal es emplear una línea de base temporal corta que abarque un momento anterior y otro posterior al evento.

Deben tenerse en cuenta además algunas características del terreno como el rango de elevación, la cobertura vegetal y la presencia de actividad humana. La presencia de vegetación o de elementos antropogénicos son posibles fuentes de decorrelación, y ponen en consideración la longitud de onda y la separación temporal a emplear para poder compensarla. La presencia de nieve también es otro punto que lleva a tener que seleccionar imágenes de la misma época del año, a riesgo de generar demasiada decorrelación temporal por cambios fenológicos.

Por último, la incidencia de la atmósfera en la señal posee suma importancia. Modelar el ruido atmosférico y sustraerlo de la fase es complejo, pero en la etapa de selección es conveniente evitar fechas con condiciones meteorológicas como la lluvia que, además de provocar decorrelación, suelen magnificar los retardos atmosféricos en la señal, haciendo aún más difícil su procesamiento.

3.4.2. Pre-procesamiento

Si se parte de datos RAW, es necesario realizar un proceso de focalización, el cual básicamente lleva la imagen al nivel Single Look Complex (SLC), a partir del cual inicia siempre la cadena de procesado

¹¹ Esta aclaración es importante, dado que según la longitud de onda empleada, varían las restricciones sobre las líneas de base.

interferométrico. Para más detalles sobre el proceso de focalización remitirse a Curlander y Mc. Donnough (2006).

3.4.3. Coregistración

Uno de los requisitos fundamentales para generar un interferograma es que las imágenes empleadas estén coregistradas a nivel de sub-píxel. En función de las órbitas, entre las imágenes SAR puede producirse un desplazamiento de hasta varios cientos de líneas en la dirección azimut, y de varias decenas en la dirección rango (Hanssen, 2002, pág. 45).

Generalmente la coregistración se divide en dos subprocesos: la coregistración gruesa (*coarse coregistration*) y la coregistración fina (*fine coregistration*). En la primera, se aproximan los desplazamientos definiendo puntos en común entre ambas imágenes, sea visualmente o empleando las órbitas del satélite. En la segunda coregistración se aplican normalmente técnicas de autocorrelación para obtener un alineamiento con una exactitud por debajo de un píxel (Hanssen, 2002, pág. 46).

3.4.4. Formación del interferograma

Como se expone en las secciones precedentes, el interferograma se construye a partir de la multiplicación compleja de la información de la señal proveniente de ambas imágenes (ver fórmula 8).

Si bien en interferometría lo que más importa es la información de fase, el interferograma complejo suele conservarse para cálculos posteriores. Además del hecho de que la información de amplitud contiene información relevante relacionada al SRN de la fase observada, la representación compleja no contiene saltos artificiales de fase modulados en 2π . Esto es útil cuando se quieren sustraer ciertos gradientes de fase debidos a las órbitas.

Una operación habitual al momento de generar el interferograma es el *multilooking*¹², empleado para reducir el ruido. Consiste en promediar los datos del interferograma usando una ventana móvil o *kernel*. Generalmente el *multilooking* genera como salida píxeles cuadrados, al aplicar un ratio de rango-azimut que puede ser de 1:5, 2:10, 4:20, etc.

Además del *Multilooking* realizado durante la generación del interferograma, la mayoría de las aplicaciones realizan otros filtrados posteriores a su creación con el objetivo de mejorar aún más la calidad del interferograma. Uno de los más empleados es el filtro adaptativo (Goldstein & Werner, Radar interferogram filtering for geophysical applications, 1998), que suaviza el espectro del interferograma en parches empleando el dato de amplitud. El suavizado se realiza de manera selectiva; el filtro asume que las áreas con ruido poseerán baja amplitud y serán removidas del interferograma, mientras que las áreas con amplitud más grande serán conservadas. De ahí su naturaleza adaptativa: cambia según las características del terreno (Hanssen, 2002, pág. 54).

¹² Como ya se ha mencionado en la sección 2.6, no debe confundirse el término *Multilooking* en el contexto de la creación del interferograma, con el concepto ya explicado de *Multilooking* que se refiere a una operación habitualmente realizada en el procesamiento de la amplitud para reducir la incerteza radiométrica.

3.4.5. Desenrollado de fase

En un interferograma la fase absoluta (desconocida) se encuentra modulada en ciclos de 2π (ver figura 29). Si bien enrollar o modular la fase absoluta es fácil, el problema inverso (esto es, desenrollarla) es muy complicado cuando esta no se conoce. La presencia de ruido y de distorsiones geométricas como el *layover* y el *foreshortening* son las principales causas por las cuales fallan muchas técnicas de desenrollado de fase.

En efecto, la fase absoluta puede ser expresada como (Hanssen, 2002):

$$\Phi = 2\pi k + \Phi_N \quad (26)$$

Es decir, que la fase absoluta es igual a la suma del ruido propio de la fase Φ_N más una cantidad entera K de ciclos de 2π , donde k suele ser denominado ambigüedad. En el desenrollado de fase, el principal problema consiste en encontrar el verdadero valor de k . Entre los algoritmos más utilizados se pueden mencionar *Minimum Spanning Tree* (Goldstein, Zebker, & Werner, 1988), *Mínimos Cuadrados* (Ghiglia & Romero, 1994), *Minimum Cost Flow* (Constantini, 1998).

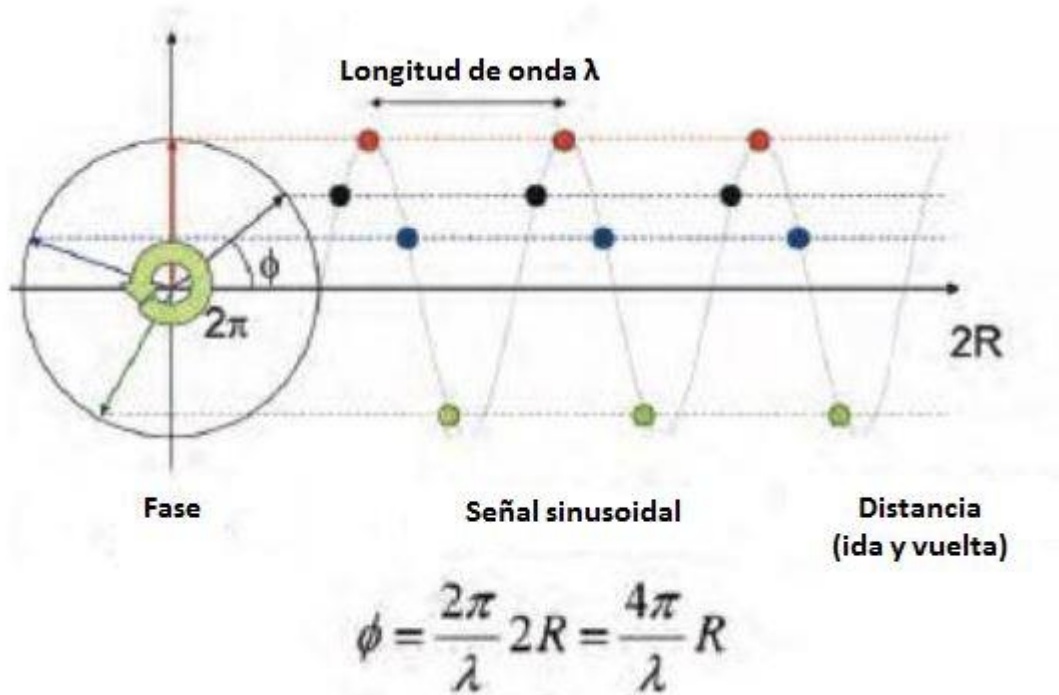


Figura 29: Fase de la señal, moduladas en ciclos de 2π (Ferretti, Monti-Guarnieri, Prati, & Rocca, 2007).

3.4.6. De fase desenrollada a deformación o altura

Una vez desenrollada la fase, el paso siguiente es vincularla a la altura o a la deformación que representa, según sea el caso. Aquí entran en juego las fórmulas presentadas en la sección 3.2 (ecuaciones 15 y 20), de manera tal de obtener la magnitud real que importa para la aplicación en cuestión. En el caso de DinSAR, la conversión es simple: basta con multiplicar por el factor $\lambda/2$; mientras que si se busca mapear alturas deben tenerse en cuenta el ángulo de incidencia, el rango sensor-objetivo y la línea de base perpendicular.

3.4.7. Geocodificación

Finalmente, se realiza una transformación de coordenadas, pasando de la geometría SAR (rango, azimut, deformación/altura) a un sistema cartográfico convencional, como WGS84 (latitud, longitud, deformación/altura). Cabe destacar que, según el software utilizado, puede ocurrir que la geocodificación se realice primero, para luego convertir la fase desenrollada y geocodificada a magnitudes reales.

4. SERIES DE DEFORMACIÓN

Las aplicaciones DinSAR pueden emplearse no solo para monitorear eventos de deformación en fechas determinadas, sino también para analizar la evolución temporal de fenómenos más continuos, creando series de deformación con más de dos imágenes.

Un punto interesante de construir series temporales DinSAR es que se pueden tratar dos problemas presentes en la interferometría diferencial clásica: el ruido atmosférico presente en la señal, y la propagación de los errores de medición de la fase topográfica (Casu, 2006). En el campo de las series temporales DinSAR se han desarrollado dos grandes familias de algoritmos: Permanent Scatterers o PS (Ferretti, Prati, & Rocca, Permanent Scatterers in SAR Interferometry, 2001), y Small Baselines Subset o SBAS (Berardino, Fornaro, & Lanari, 2002). La principal diferencia entre ambas radica en el criterio de selección de pares interferométricos y en la forma en que representan el fenómeno estudiado.

4.1. PRINCIPIOS TEÓRICOS DE SBAS

Una de las maneras de seleccionar pares interferométricos es guiarse por la necesidad de preservar la correlación espacio-temporal. Esto puede lograrse estableciendo un umbral máximo de separación espacial y temporal, que en otros términos quiere decir que se eligen solo interferogramas con líneas de base cortas (Casu, 2006, pág. 53). Esta es la idea central de la familia de algoritmos *Small Baseline Subset* o SBAS (Berardino, Fornaro, & Lanari, 2002).

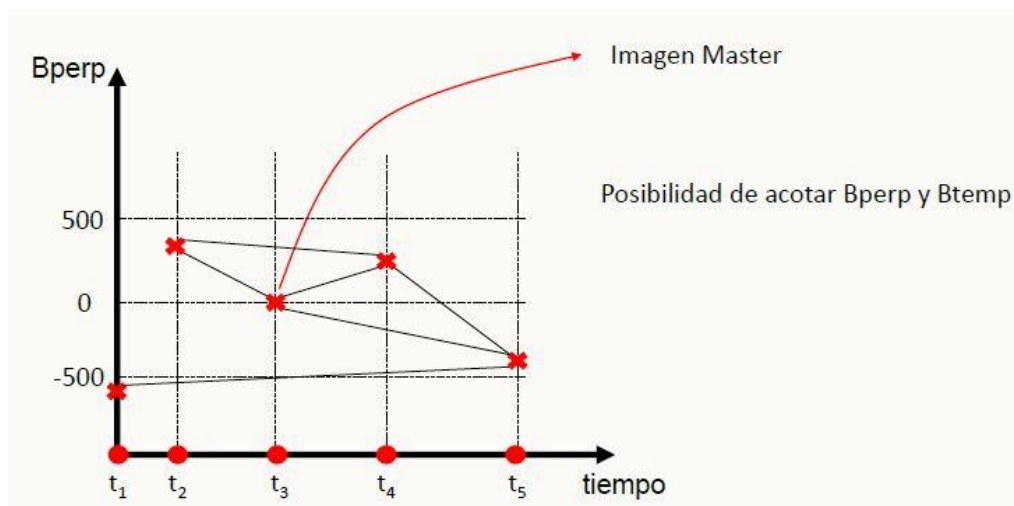


Figura 30: Distintos subconjuntos de pares interferométricos conectados por líneas de base cortas. Cada cruz representa una escena o imagen, mientras que las líneas que los unen representan los interferogramas a generar por cada par de imágenes. El número de conexiones y subconjuntos variará en función de los umbrales aplicados (Euillades, 2015).

Supongamos que tenemos $N+1$ imágenes SAR cubriendo la misma área en diferentes momentos de adquisición t_0 a t_N , y si se asume que cada imagen puede combinarse con al menos otra y que todas se encuentran co-registradas respecto a una única imagen que se conoce como Máster. La idea básica subyacente en SBAS implica la creación de un número M de interferogramas con las adquisiciones mencionadas. Considerando un pixel P de coordenadas (x, r) en rango y azimuth, la

expresión matemática de los interferogramas generados entre dos instantes t_A y t_B quedaría como sigue (Berardino, Fornaro, & Lanari, 2002):

$$\psi_j(x, r) = \frac{4\pi}{\lambda} [D_j(t_B, x, r) - D_j(t_A, x, r)] + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp,j}^0}{R_{1p} \sin \theta_p^0} \Delta H_p + \frac{4\pi}{\lambda} [D_{atm}(t_B, x, r) - D_{atm}(t_A, x, r)] + n_j$$

$$\forall j = 1, \dots, M \quad (27)$$

Donde $D_p(t_B, x, r)$ y $D_p(t_A, x, r)$ representan el desplazamiento acumulado en los tiempos t_B y t_A con respecto a un instante inicial t_0 . Como se trata de un diferencial de fases, el segundo término que contiene los artefactos topográficos se expresa como un delta. Los términos D_{atm} introducen el componente de ruido atmosférico, que introduce grandes distorsiones en las mediciones; y el término n_j resume el resto de los efectos de decorrelación ya mencionados en anteriores secciones.

A partir de lo anterior se pueden definir dos vectores indexados por cada instante de adquisición:

$$IS = [IS_1, \dots, IS_M], IE = [IE_1, \dots, IE_M] \quad (28)$$

Donde IE corresponde al vector de imágenes master, e IS al vector de imágenes esclavas. Considerando esta expresión vectorial, la ecuación original puede re expresarse como:

$$\psi_j(x, r) = \varphi(t_{IE_j}) - \varphi(t_{IS_j}) \quad \forall j = 1, \dots, M \quad (29)$$

De esta manera, se puede pensar en un sistema de M ecuaciones con N incógnitas que en expresión matricial puede escribirse como $\mathbf{A}^* \Phi = \Psi$, donde $\mathbf{A}$ es una matriz $M \times N$ que depende directamente de los interferogramas generados. Si todas las adquisiciones pertenecen a un mismo subconjunto entonces se tiene que $M \geq N$ y que $\mathbf{A}$ es una matriz de rango N . De esa forma se obtiene un sistema de ecuaciones determinado, el cual puede ser solucionado a través de la siguiente expresión (Casu, 2006, pág. 58):

$$\Phi = \mathbf{A}^+ \cdot \Psi = ((\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T) \cdot \Psi, \text{ donde } \mathbf{A}^+ \text{ es la matriz inversa izquierda de } \mathbf{A}.$$

Sin embargo, las adquisiciones SAR generalmente vienen agrupadas en diferentes subconjuntos. Si, por ejemplo, se tiene un número L de subconjuntos, la matriz $\mathbf{A}$ tendrá rango $N-L+1$ y presentará una deficiencia en rango, con lo cual $\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}$ será singular (no invertible) y el sistema tendrá infinitas soluciones. Para estos casos, el método SVD (Singular Value Decomposition) puede ser una buena alternativa (Strang, 1987). Al aplicar este método normalmente lo que sucede es que se fuerza a que la solución sea lo más cercana posible a cero, introduciendo discontinuidades en la deformación acumulada obtenida, resultado que no tiene relevancia física (Berardino, Fornaro, & Lanari, 2002, pág. 2377).

Una manera de superar este inconveniente es manipular el sistema de ecuaciones $\mathbf{A}^* \Phi = \Psi$ reemplazando las incógnitas por la velocidad media de fase entre adquisiciones adyacentes:

$$V_d^t = \left(V_{1d} = \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{t_1 - t_0}, V_{2d} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{t_2 - t_1}, \dots, V_{Nd} = \frac{\varphi_N - \varphi_{N-1}}{t_N - t_{N-1}} \right) \quad (30)$$

Reemplazando estas nuevas incógnitas en $\mathbf{A}^* \Phi = \Psi$, se obtiene una nueva ecuación $\mathbf{B}^* \mathbf{V}_d = \Psi$, donde $\mathbf{B}$ es una matriz $M \times N$ y $\mathbf{V}_d$ es el vector de velocidad para el cual no se producen discontinuidades en la solución final. Luego de resolverse el sistema, se requerirá un paso de integración adicional a partir de este vector $\mathbf{V}_d$ para computar el componente de fase Φ_d . Por otro lado, es fundamental realizar una estimación de los artefactos topográficos y atmosféricos.

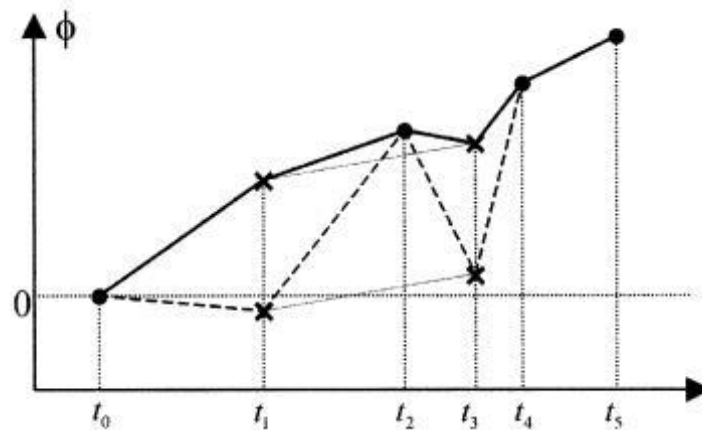


Figura 31: La línea punteada representa la solución a la que se arriba cuando las incógnitas son los valores de fase. La línea continua muestra el resultado al emplear las velocidades de fase como incógnitas (Berardino, Fornaro, & Lanari, 2002).

4.1.1. Flujo de trabajo SBAS

La primer parte del flujo de trabajo SBAS es prácticamente igual a la descrita para el procesamiento convencional con dos imágenes: Coregistración, formación del interferograma y desenrollado de fase. La diferencia es que en este caso el proceso se realiza para M interferogramas, número que dependerá del criterio de apareamiento entre las imágenes disponibles; es decir, de los umbrales de línea de base temporal y espacial empleados para agrupar las adquisiciones. Por otro lado, habitualmente en SBAS todas las imágenes se coregistran con respecto a una escena de referencia única que suele ser llamada la *Super Master*.

Luego de finalizar el desenrollado de todos los interferogramas, se estiman conjuntamente lo que se conoce como componente de paso bajo (*Low Pass* o LP) de la deformación por un lado, y los artefactos topográficos (ΔH) por el otro. Incluso en presencia de líneas de base muy cortas, para las cuales ΔH tiende a propagarse en menor medida, es importante estimarlo porque su amplitud puede superar ampliamente la precisión del Modelo Digital de Elevación empleado, degradando significativamente la calidad de los interferogramas.

Después de lo anterior, los componentes LP y topográficos calculados son sustraídos de cada interferograma reduciendo sus franjas. Estos interferograma vuelven a ser desenrollados y se les vuelve a sumar el componente LP de deformación, teniendo como producto final una fase desenrollada mucho más refinada.

A partir de este paso se puede realizar la inversión con el mencionado método SVD, estimándose así la velocidad de la deformación para cada pixel y para cada instante t_i . Sin embargo, estos

resultados aún contienen los distintos efectos de decorrelación y los artefactos atmosféricos, que deben ser removidos. En cuanto a los primeros, las operaciones de filtrado y *multilooking* que se realizan durante la formación del interferograma contribuyen a mitigar el ruido significativamente. La presencia del componente de fase atmosférico en cambio representa un tema crítico porque puede reducir la precisión de la deformación detectada e incluso ocultarla completamente. Por ello, para mitigar los efectos de la atmósfera es necesario aplicar un filtrado adicional a los resultados de la inversión por SVD. La aplicación de este filtro se basa en el conocimiento de que la fase atmosférica se caracteriza por una muy alta correlación espacial y una muy baja correlación temporal. Por lo tanto, para estimar el componente atmosférico se remueve primero el componente LP ya calculado, y a continuación se aplica un filtrado espacial de paso bajo (LP) en rango y azimut, y uno de paso alto (HP) temporal.

Una vez que se ha estimado el componente o artefacto atmosférico, se sustrae de la señal de fase y finalmente se realiza la conversión a unidades de deformación como en una cadena de procesamiento DinSAR simple.

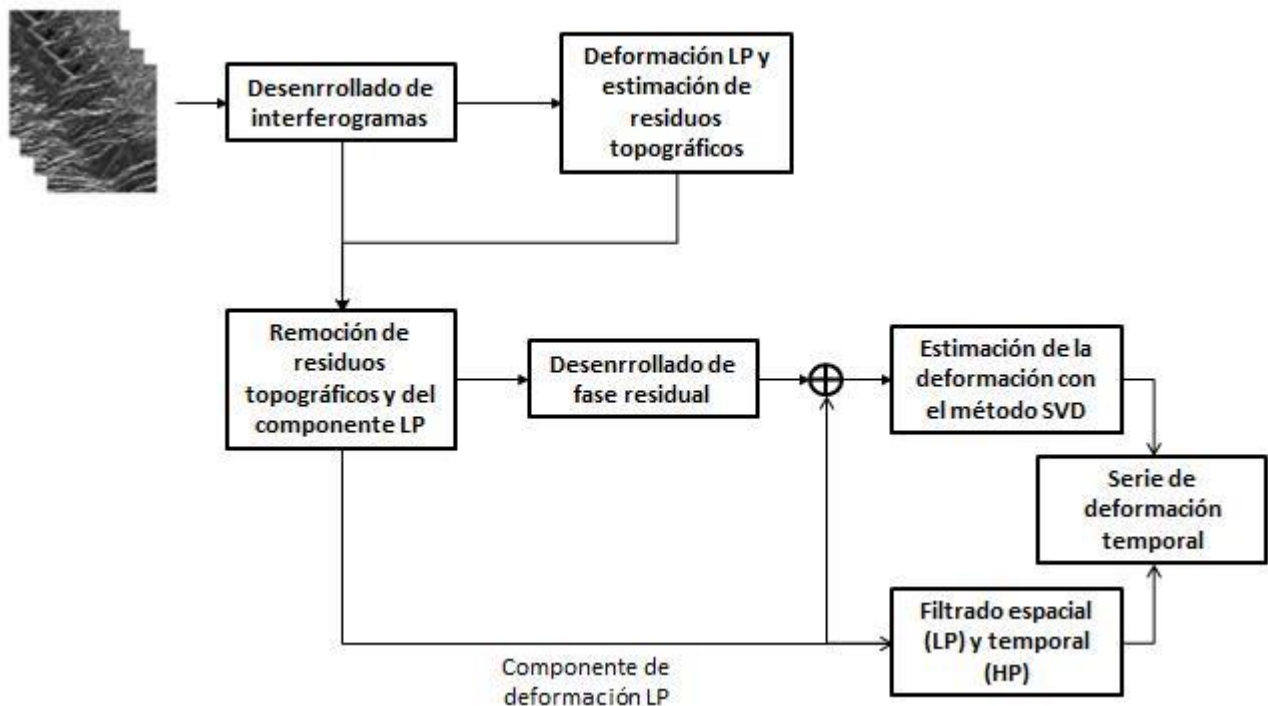


Figura 32: Flujo general de trabajo SBAS (Berardino, Fornaro, & Lanari, 2002).

4.2. PRINCIPIOS TEÓRICOS PS

La idea central de la familia de algoritmos Permanent Scatterers (PS) es hacer uso de la información de fase de aquellos puntos que mantienen sus propiedades de retrodispersión a lo largo del tiempo. A diferencia de SBAS, en PS los pares interferométricos se forman entre cada imagen y una imagen master que suele ubicarse en el baricentro espacio-temporal del conjunto. Como el foco está puesto sobre puntos que presentan gran estabilidad temporal, se presupone que estos no estarán

afectados por los problemas de decorrelación **temporal** derivados de usar líneas de base muy largas, aunque sí se darán problemas de decorrelación espacial.

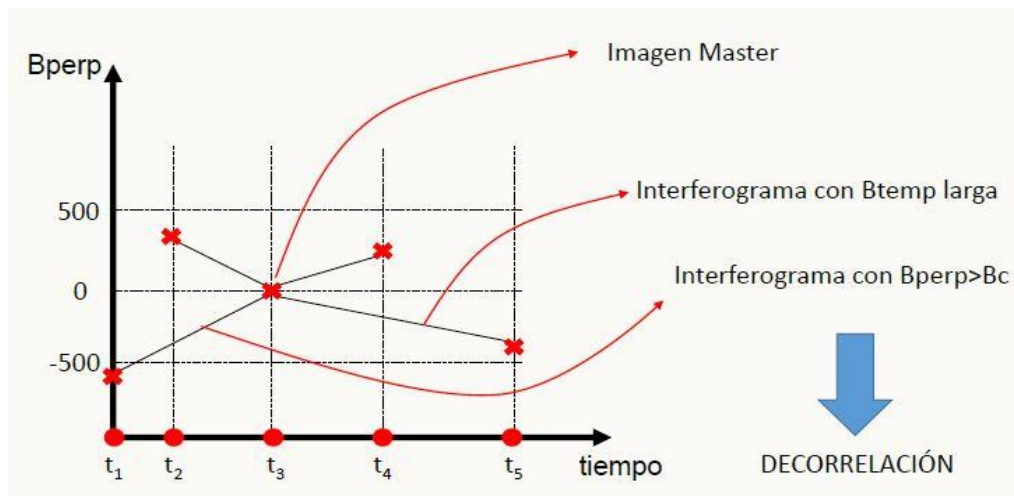


Figura 33: Configuración interferométrica en PS. Todas las imágenes se refieren a una única master (Euillades, 2015).

La interferencia, sea constructiva o destructiva, produce una variación en la fase y en la amplitud medidas para una celda de resolución. Sin embargo, si uno de los dispersores dentro de esta celda es mucho más brillante que el resto, su contribución en amplitud y fase termina siendo predominante, dejando poco margen de interferencia a los demás. A este tipo de blancos se los denomina Dispersores Permanentes (Hooper, 2006, pág. 13), o PS por sus siglas en inglés.

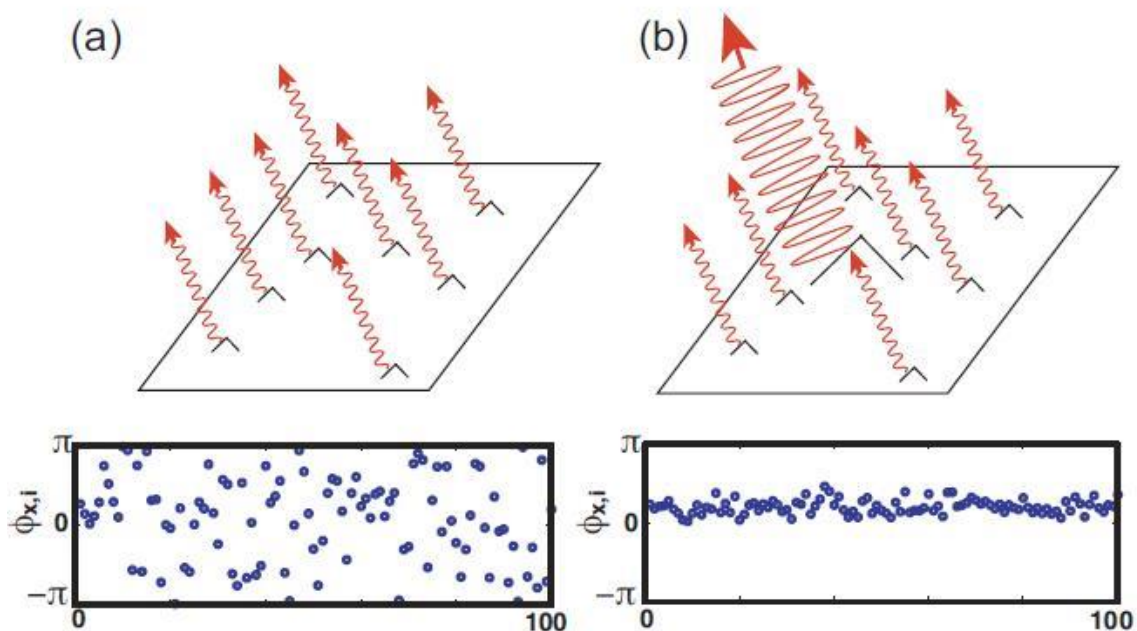


Figura 34: Simulaciones de fase para un píxel con dispersores distribuidos (a) y otro con un dispersor dominante o permanente (b). Los gráficos respectivos muestran las simulaciones de fase en 100 iteraciones (Hooper, 2006).

El punto crítico es entonces cómo determinar si un dispersor es estable o no. En torno a este problema surgen las principales diferencias entre distintos algoritmos de la familia PS. Algunos emplean como parámetro de selección la estabilidad de la amplitud a lo largo del tiempo (Casu,

2006, pág. 53), mientras que otros se basan más en la estabilidad temporal de la fase de la señal (Hooper, 2006, pág. 16). Aquí se presenta el criterio de selección adoptado por Ferretti *et al* (2001), que en definitiva es el empleado en la presente tesis.

Un primer intento para seleccionar potenciales PS (en adelante PSC o Candidatos PS) es emplear la coherencia espacial proveniente de cada interferograma. Sin embargo, debido a la alta variabilidad de líneas de base y por los errores de los Modelos de Elevación Digital empleados, muchos de los mapas de coherencia generados pueden no ser útiles. De hecho, en general utilizar la coherencia espacial como parámetro de selección de PSC suele ser confiable solo para pares interferométricos con líneas de base menores a los 200-300 metros¹³ (Ferretti, Prati, & Rocca, Permanent Scatterers in SAR Interferometry, 2001, pág. 11).

Otra posibilidad es analizar la estabilidad temporal de la amplitud de cada píxel en la región de interés. La amplitud de la señal presenta la ventaja de ser independiente de la mayor parte de las contribuciones de la fase (APS, artefactos topográficos, errores orbitales, etc.). Es por ello que un píxel que muestra valores de amplitud constantes es plausible de ser seleccionado como un PSC.

Existen diversas maneras de medir la estabilidad de la amplitud. Ferretti (2001) propone un Índice de Dispersión D_A que aplica para medir el comportamiento tanto de la amplitud como de la fase. Puede demostrarse que la dispersión de amplitud y de fase se encuentran fuertemente correlacionadas para valores de SNR altos. La estabilidad de la amplitud puede entonces ser considerada como un parámetro confiable para seleccionar posibles dispersores estables.

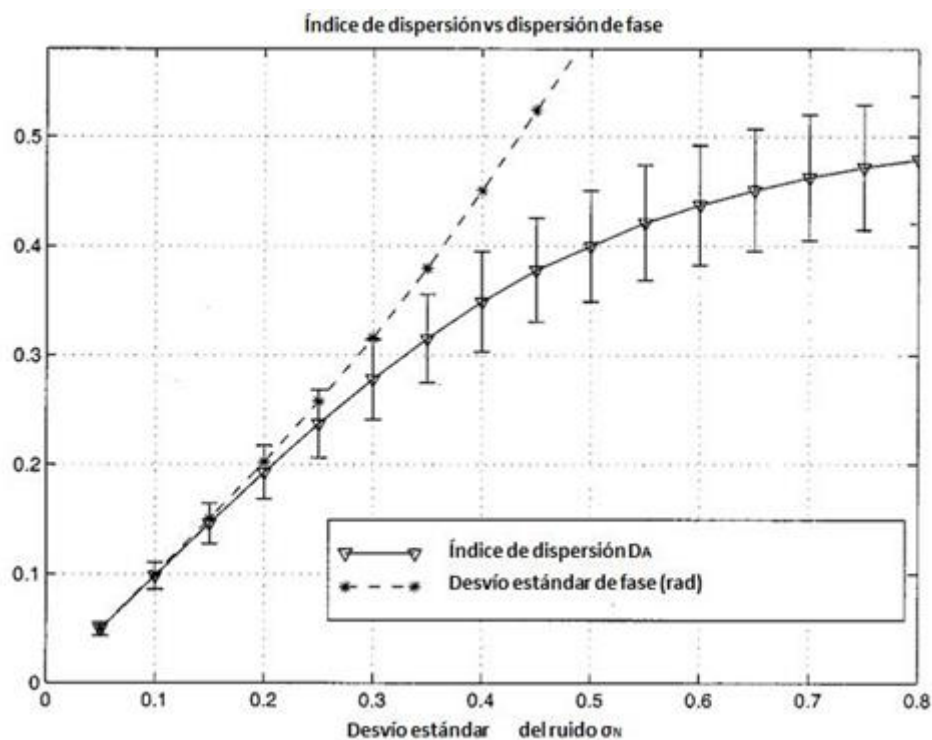


Figura 35: Simulación numérica. Como se aprecia en el gráfico, el índice de dispersión D_A es un buen estimador de la dispersión de fase para niveles de ruido bajo, es decir, para un SNR alto (Ferretti, Prati, & Rocca, Permanent Scatterers in SAR Interferometry, 2001).

¹³ Nuevamente, debe aclararse que estos valores son válidos para sensores como ERS o ENVISAT, usados como ejemplo.

El índice de dispersión D_A propuesto por Ferretti se calcula como:

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \cong \sigma_V \quad (31)$$

Donde σ_A y μ_A son el desvío y la media de los valores de amplitud respectivamente, y σ_V es la dispersión de fase, que como se ha indicado puede ser aproximada por D_A . Típicamente como umbral de selección se usan valores de D_A entorno a los 0.25-0.30 (Ferretti, Prati, & Rocca, 2001, pág. 12). Debe aclararse, sin embargo, que existen otros índices para expresar la estabilidad de la amplitud. Algunos autores proponen emplear directamente un índice de estabilidad (que sería la inversa de un índice de dispersión) o incluso un índice de estabilidad normalizado como las medidas de coherencia (de 0 a 1).

4.2.1. Flujo de trabajo PS

Considerando siempre un conjunto de $N+1$ imágenes, cuando se procesa con técnicas PS se selecciona una única master y se genera un interferograma entre esta y cada una de las otras imágenes. Algunos de estos interferogramas pueden tener líneas de base espaciales demasiado largas (cercanas o mayores a la crítica), con las consecuentes implicancias en la señal de fase (Casu, 2006, pág. 53) pero puede demostrarse que los puntos PS no son afectados por estos factores.

Si se denomina Φ a la matriz $N \times J$ de fases interferométricas $\phi_N(x,r)$ de J píxeles considerados como posibles dispersores estables (PSC), la N -ésima fila de Φ contiene la fase interferométrica de la imagen N respecto a la imagen master (m) para J píxeles ordenados por un índice de columnas j (Ferretti, Prati, & Rocca, 2001):

$$\Phi = a^T + p_\xi \xi^T + p_\eta \eta^T + Bq^T + Tv^T + E \quad (32)$$

Donde:

- $a[N \times 1]$ son las constantes de fase.
- $p_\xi[N \times 1]$ y $p_\eta[N \times 1]$ son las pendientes o gradientes de los componentes lineales de fase en azimut $\xi[J \times 1]$ y en rango oblicuo $\eta[J \times 1]$.
- $B[N \times 1]$ contiene las líneas de base referidas a la imagen master m .
- $q[J \times 1]$ contiene la elevación de cada punto PS.
- $T[N \times 1]$ contiene el intervalo temporal entre la N -ésima esclava y la master m .
- $v[J \times 1]$ contiene la velocidad en rango de cada PS.
- $E[N \times J]$ contiene los residuos, incluyendo los efectos atmosféricos, el ruido debido a la decorrelación especial, temporal y por centroide Doppler. El componente atmosférico, en adelante denotado como **APS**, es una de las distorsiones más importantes a ser eliminadas.

Al igual que en SBAS, si se conocieran los valores de fase desenrollada de Φ , se tendría un sistema de ecuaciones lineal de $N \times J$ ecuaciones y $3N + 2J$ incógnitas: a, p_ξ, p_η, q, v . Así el sistema podría ser invertido como matriz para obtener la topografía local, la velocidad y las contribuciones de fase lineales y constantes. Sin embargo, el problema radica justamente en que los valores de fase están enrollados, dando lugar a un sistema no lineal que requiere de algoritmos iterativos y de un Modelo de Elevación Digital para su resolución.

Como se ha expuesto anteriormente, la contribución geométrica de la fase (originada por las diferencias orbitales entre la master y las esclavas) puede compensarse empleando datos orbitales y un Modelo Digital de Elevación. De esa manera, las N imágenes esclavas pueden re-expresarse como si hubieran sido adquiridas desde la misma órbita, y la ecuación anterior quedaría expresada como:

$$\Delta\Phi = a^T + p_\xi \xi^T + p_\eta \eta^T + B\Delta q^T + T v^T + E \quad (33)$$

Donde p_ξ y p_η ahora contienen los residuos lineales de la contribución geométrica de fase. El nuevo sistema puede resolverse bajo las siguientes suposiciones:

- El SNR es alto, lo cual quiere decir que los píxeles seleccionados están poco afectados por decorrelación.
- La velocidad se rige por un modelo lineal.
- La máscara APS puede ser aproximada como una rampa de fase.

Una vez seleccionados los PSC, el sistema de ecuaciones presentado puede resolverse por medio de algún algoritmo iterativo que calcule de manera precisa los errores por topografía Δq y las velocidades v de los puntos, así como los componentes lineales y constantes del APS. Al igual que en el caso de SBAS, los residuos contenidos en el término E pueden explicarse por los efectos atmosféricos y por el ruido por otras fuentes de decorrelación:

$$E = E_{ATM} + E_{NOISE}$$

Debido a la alta autocorrelación espacial de la atmósfera, los residuos de fase pueden ser suavizados y filtrados, permitiendo descartar el término E_{NOISE} . Es habitual que en este paso se apliquen filtros LP y HP como en SBAS. Una vez estimada la APS para cada PSC, puede ser interpolada en base a una grilla regular para ser sustraída de cada imagen.

Debido a posibles limitaciones en los métodos de selección, siempre es posible que no todos los puntos PS hayan sido realmente identificados. Es por ello que resulta conveniente compensar el error APS en cada imagen para poder calcular los errores del DEM y la velocidad a nivel de cada pixel: al reducir el ruido fase, se deberían poder identificar aún más PS.

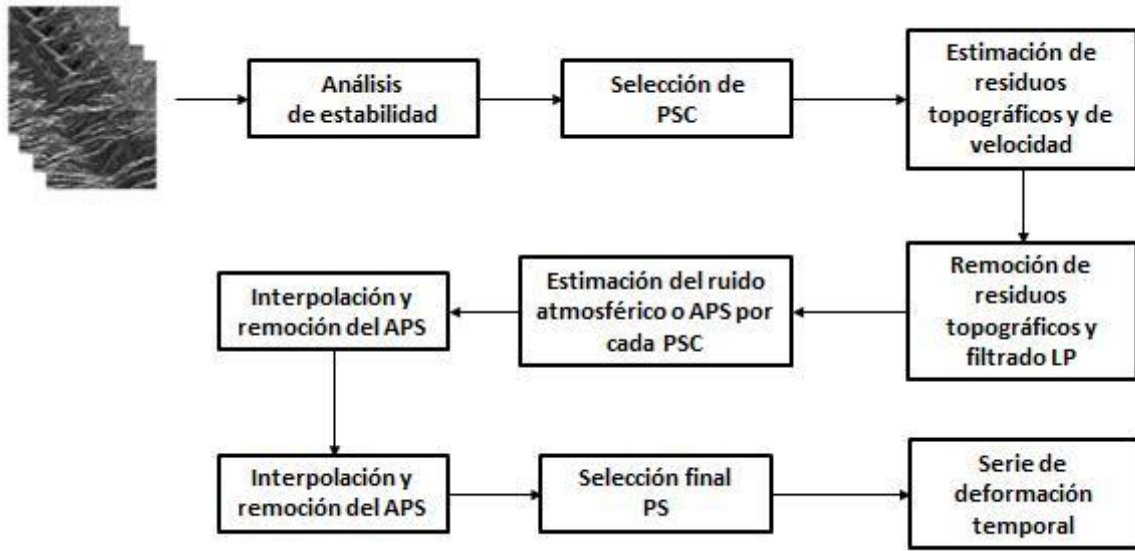


Figura 36: Flujo de trabajo PS (elaboración propia).

4.3. CÓMO MEDIR CALIDAD DE LOS RESULTADOS DE LAS SERIES DE DEFORMACIÓN

Cuando se trabaja con series de deformación, ya sea con PS o SBAS, la efectividad con la cual el modelo empleado logra remover los términos ruidosos de la fase de cada píxel se mide a través de la **coherencia temporal**. Esta no debe confundirse con la coherencia espacial de un interferograma, definida en la ecuación 21, y se calcula de la siguiente manera (Perissin, Piantanida, Piccagli, & Rocca, 2007):

$$\xi_p = \sum_{i=1}^N \frac{e^{j(\Delta\varphi_p^{i,k} - \Delta\bar{\varphi}_{TOPO}^{i,k} - \Delta\bar{\varphi}_{DEF}^{i,k})}}{N} \quad (34)$$

Donde N es el número de interferogramas, $\Delta\varphi_p^{i,k}$ es la diferencia de fase original (enrollada) del interferograma de las imágenes i y k , $\Delta\bar{\varphi}_{TOPO}^{i,k}$ es el término dependiente de la topografía, y $\Delta\bar{\varphi}_{DEF}^{i,k}$ es el término dependiente de la deformación (en ambos casos se refiere a las estimaciones derivadas del procesamiento). Si estos artefactos han sido correctamente estimados (y el ruido de fase correctamente compensado), entonces $\xi_p \rightarrow 1$ con lo cual los errores producidos se supondrán mínimos.

4.4. ¿PS O SBAS?

La efectividad de uno u otro algoritmo para mapear distintos fenómenos varía mucho según la naturaleza de los mismos. PS está orientado al estudio de objetivos puntuales. Sus resultados se centran en dispersores locales que se caracterizan por presentar una alta coherencia o estabilidad temporal. El número de adquisiciones empleadas es muy importante: Si no se usan suficientes imágenes, se puede dar que la coherencia sea demasiado alta, sobreestimándose el número de PSC, con los consecuentes errores en la medición de las deformaciones.

Para aplicar técnicas PS, generalmente se sugiere emplear al menos 20 imágenes con una separación temporal regular, siendo 30 un número óptimo (Ferretti, Prati, & Rocca, 2001). Es por ello que este enfoque suele aplicarse a zonas urbanas o regiones donde hay dispersores que presentan una alta estabilidad radiométrica y de fase, como por ejemplo zonas de roca desnuda, techos orientados hacia el sensor, etc. Dadas estas condiciones la precisión de los desplazamientos medidos puede ser del orden de pocos milímetros, mientras que la máxima velocidad detectable dependerá de la longitud de onda y de la mínima distancia temporal entre las adquisiciones disponibles. En cuanto a la altitud, las técnicas PS ofrecen en los blancos puntuales una medición más exacta que SBAS, sobre todo en áreas afectadas por el efecto *layover* donde SBAS tiende a suavizar los resultados.

SBAS en cambio se orienta al mapeo de objetivos distribuidos en el espacio, de naturaleza continua en lugar de puntual. Los productos derivados de SBAS son en esencia los mismos provenientes de un procesamiento DinSAR simple: la diferencia radica en que SBAS permite el análisis de series temporales abarcando muchas imágenes. Con respecto a PS, SBAS es menos sensible a la cantidad de adquisiciones porque usa una coherencia distribuida espacialmente en lugar de considerar puntos individuales. De cualquier manera, el número de imágenes sigue siendo importante para la estimación de los artefactos atmosféricos, ya que mientras mayor sea el número más efectiva será su remoción.

En cuanto al modelado de deformaciones de terreno, generalmente SBAS no se encuentra limitado exclusivamente a un modelo lineal de velocidad, como sucede al aplicarse PS. Respecto a la máxima deformación detectable SBAS no presenta las restricciones temporales mencionadas para PS, pero sí está condicionado por la variabilidad espacial que impone el desenrollado de fase.

Por último, cabe señalar que SBAS en general es más robusto que PS en el sentido que aprovecha la redundancia derivada por la existencia de muchos interferogramas.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. DATOS SAR

5.1.1. Imágenes Cosmo Skymed

Cosmo Skymed es una misión de la Agencia Espacial Italiana (ASI) lanzada en 2007 y operativa de forma completa desde 2010. Se trata de una constelación de 4 satélites equipados con un sensor SAR en banda X. Orbitan a una altura aproximada de 620 km sobre la superficie terrestre, con un ciclo de repetición de 16 días. La constelación opera tanto en modo descendente como ascendente, con la posibilidad de mirar tanto a derecha como a izquierda; aunque en la práctica, salvo requerimientos especiales, solo mira a derecha.

La misión ofrece imágenes adquiridas en tres modos de resolución: Spotlight, Stripmap y Scansar, cuyas características se resumen en la siguiente tabla:

MODO	Spotlight	Stripmap		ScanSAR	
PARÁMETRO		HIMAGE	Ping Pong	Wide Region	Huge Region
Polarización	Single	Single	Dual	Single	Single
Ancho barrido (km x km)	10X10	40X40	30X30	100X100	200X200
Área Accesible	~620 km				
Resolución Geométrica (m)	1	3	15	30	100

Tabla 1: Modos de adquisición disponibles para las imágenes Cosmo Skymed (ASI, 2007).

Normalmente los productos Cosmo-Skymed se ofrecen en los siguientes niveles:

- **Raw (L0):** Corresponde al nivel de procesamiento más bajo, imagen sin focalizar.
- **Single Look Complex Slant (SCS / L1A):** Imagen focalizada en rango oblicuo, en format complejo.
- **Detected Ground Multilooked (MDG / L1B):** Producto focalizado, ecualizado radiométricamente, y proyectado en rango horizontal.
- **Geocoded Ellipsoid Corrected (GEC / L1C):** Producto focalizado, geolocalizado empleando un elipsoide de referencia y representado con un sistema cartográfico específico.
- **Geocoded Terrain Corrected (GTC / L1D):** Producto focalizado proyectado sobre una elevación de referencia sobre una grilla regular obtenida de un sistema cartográfico definido. La escena se localiza de manera precisa y rectificada mediante el uso de puntos de control y un modelo de elevación digital.

Para Corvara, en el marco del proyecto Corvara PSI Feasability, se adquirieron 35 imágenes Stripmap HIMAGE con polarización HH. Las mismas correspondían al *beam* H4-14 con un ángulo de incidencia

nominal de 41°. De ese conjunto, para el presente trabajo se emplearon 27 de esas imágenes, cubriendo el período Abril 2014-Agosto 2015.

FECHA	NIVEL	MODO	ÓRBITA	POLARIZACIÓN	LOOK SIDE	ÁNGULO DE MIRADA
05/04/2014	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
21/04/2014	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
03/05/2014	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
04/06/2014	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
20/06/2014	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
22/07/2014	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
07/08/2014	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
23/08/2014	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
08/09/2014	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
24/09/2014	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
10/10/2014	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
26/10/2014	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
11/11/2014	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
13/12/2014	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
14/01/2015	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
15/02/2015	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
03/03/2015	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
19/03/2015	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
04/04/2015	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
20/04/2015	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
06/05/2015	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
22/05/2015	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
07/06/2015	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
23/06/2015	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
06/07/2015	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
25/07/2015	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41
10/08/2015	L1A-SLC	STR_HIMAGE	Descendente	HH	R	41

Tabla 2: Listado de imágenes Cosmo-Skymed utilizadas.

La razón de la elección del ángulo de 41° y de la órbita descendente no es trivial. De acuerdo a análisis previos (Iasio, Corsini, Mair, Schneiderbauer, & Tamburini, 2011) se evidencia que los desplazamientos se han producido en su mayoría en una dirección comprendida entre los 180° y 340° en azimut¹⁴. Esto implica que el terreno en general discurre en una dirección casi paralela al azimut de la línea de vista del satélite (LOS) de una Cosmo Skymed correspondiente al *beam* H4-14. En relación a ello, los desplazamientos medidos con GPS, proyectados a la LOS de una imagen CSK descendente con el mencionado ángulo corresponden a cerca de un 68% del movimiento real en el terreno (Iasio, Corsini, Mair, Schneiderbauer, & Tamburini, 2011, pág. 1252).

¹⁴ No confundir el ángulo de azimut entendido como aquel que se mide desde el Norte en sentido horario, con el azimut como dimensión geométrica de una imagen SAR.

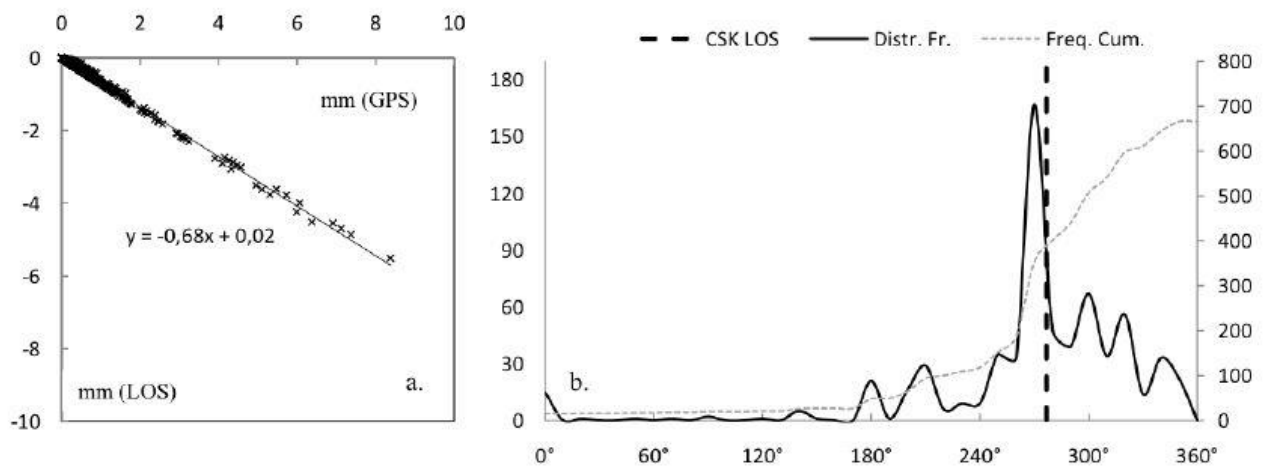


Figura 37: Análisis de los desplazamientos en el deslizamiento de Corvara. En la parte A se visualiza la relación entre el desplazamiento 2D real (derivado de las mediciones GPS realizadas en el marco del proyecto LAWINA) y el mismo proyectado en LOS. En la parte B se representa la relación entre las direcciones predominantes de desplazamiento y el azimut de la LOS elegida (Iasio, Corsini, Mair, Schneiderbauer, & Tamburini, 2011).

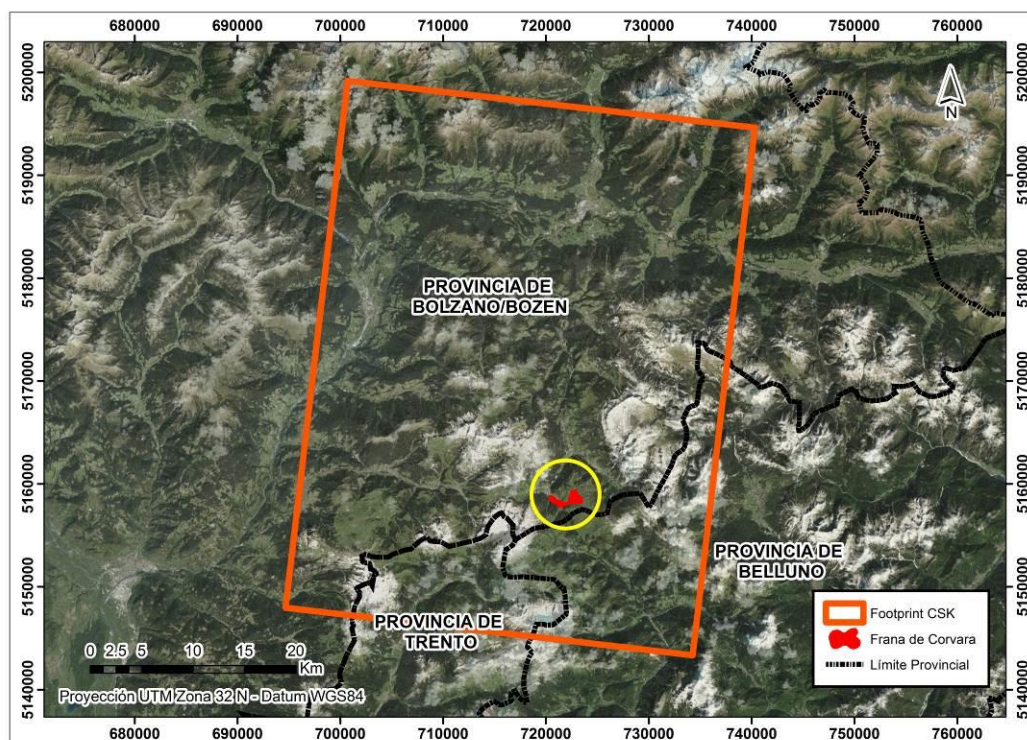


Figura 38: Área aproximada cubierta por las imágenes CSK y ubicación del deslizamiento de Corvara (Elaboración propia).

5.1.2. Imágenes Sentinel-1A

La misión Sentinel-1 perteneciente a la ESA (Agencia Espacial Europea) consta de dos satélites de órbita polar a una altura aproximada de 700 km. El primero de ellos, Sentinel-1A fue lanzado en abril de 2014, y el segundo (Sentinel-1B) el 28 de Abril de 2016 y aún no se encuentra completamente operativo.

El principal instrumento presente en estas plataformas es un sensor radar en banda C que permite la adquisición en diversos modos como en el caso de Cosmo Skymed.

MODO	Wave Mode (WM)	Stripmap (SM)	Interferometric Wide Swath (IW)	Extra Wide Swath (EW)
Polarización	Single	Dual	Dual	Dual
Ancho barrido (km x km)	20	80	250	400
Resolución Geométrica (rango x azimut)	5x5	5x5	5x20	20x40

Tabla 3: Modos de adquisición Sentinel-1 (ESA).

Los productos Sentinel-1 se ofrecen en los siguientes niveles de procesamiento:

- Level-0 (Raw): Imagen SAR comprimida y no focalizada. Solo disponible para los modos SM, IW y EW.
- Level-1 (SLC): Corresponde al nivel de procesamiento que se alcanza luego de focalizar un producto L0. Contienen información orbital para su georreferenciación y proyectados en rango oblicuo. Solo disponible para los modos SM, IW y EW.
- Level-1 (GRD): Los productos Ground Range Detected se obtienen luego de aplicar *multilooking* sobre la imagen SLC y de proyectarla a rango horizontal usando un elipsoide de referencia. Solo disponible para los modos SM, IW y EW.
- Level-2 (OCN): Las imágenes L2 consisten en productos con información geofísica georreferenciada derivada de los productos L1. Actualmente se generan tres tipos de productos: Ocean Wind Field (OWI), Ocean Swell Spectra (OSW) y Surface Radial Velocity (RVL). La disponibilidad de los mismos depende del modo de adquisición.

Las imágenes Sentinel-1A utilizadas en el estudio de Corvara corresponden al modo IW. Este tipo de productos se generan adquiriendo en modalidad TopSAR, que ha sido explicada brevemente en la sección teórica. Cada imagen IW consta de 3 barridos o *swaths*, con un ángulo de mirada que es fijo para cada adquisición y varía según el *swath* considerado.

Swath	IW1	IW2	IW3
Ángulos de mirada a la mínima altura orbital	27.53-32.48	32.38-36.96	36.87-40.40
Ángulos de mirada a la máxima altura orbital	26.00-30.96	30.86-35.43	35.35-38.88

Tabla 4: Ángulos de mirada según SWATH empleado para imágenes Sentinel-1A modo IW (ESA)

En el caso de imágenes Sentinel de órbita descendente, Corvara queda cubierta por el *Swath* 3, cuyo ángulo de mirada varía entre 35.35° y 40.40°. En cambio, bajo una pasada ascendente la misma

zona se adquiere con el *Swath 1*, correspondiente a ángulos de mirada que van de 26.00° a 32.48° (ver mapa).

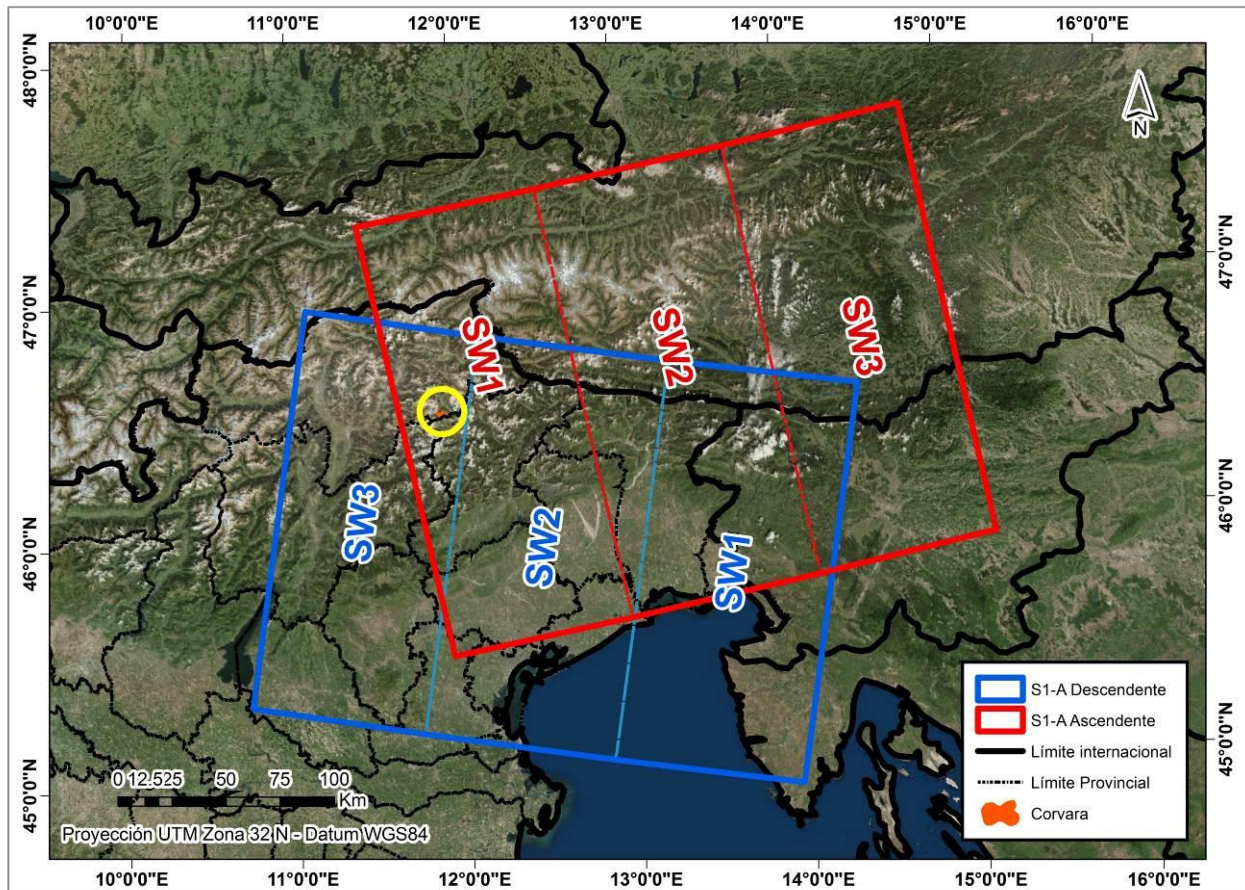


Figura 39: Cobertura de las imágenes Sentinel-1A Ascendentes y Descendentes. Como se observa, el deslizamiento de Corvara queda barrido por la porción correspondiente *swath 1* de la escena ascendente, mientras que la imagen descendente la cubre con su *swath 3* (Elaboración propia).

Esta información, en conjunción con lo expuesto sobre las imágenes Cosmo Skymed, sugiere que las imágenes Sentinel en órbita descendente presentan mejores condiciones geométricas que las ascendentes para registrar un movimiento como el que se produce en Corvara.

FECHA	NIVEL	MODO	SWATH	ÓRBITA	POLARIZACIÓN	LOOK SIDE	ÁNGULO DE MIRADA
09/02/2015	SLC	IW	3	Descendente	VV	R	43.8
21/02/2015	SLC	IW	3	Descendente	VV	R	43.8
05/03/2015	SLC	IW	3	Descendente	VV	R	43.8
17/03/2015	SLC	IW	3	Descendente	VV	R	43.8
29/03/2015	SLC	IW	3	Descendente	VV	R	43.8
10/04/2015	SLC	IW	3	Descendente	VV	R	43.8
22/04/2015	SLC	IW	3	Descendente	VV	R	43.8
04/05/2015	SLC	IW	3	Descendente	VV	R	43.8
16/05/2015	SLC	IW	3	Descendente	VV	R	43.8
09/06/2015	SLC	IW	3	Descendente	VV	R	43.8
03/07/2015	SLC	IW	3	Descendente	VV	R	43.8
15/07/2015	SLC	IW	3	Descendente	VV	R	43.8
08/08/2015	SLC	IW	3	Descendente	VV	R	43.8
20/08/2015	SLC	IW	3	Descendente	VV	R	43.8
01/09/2015	SLC	IW	3	Descendente	VV	R	43.8
13/09/2015	SLC	IW	3	Descendente	VV	R	43.8
18/04/2015	SLC	IW	1	Ascendente	VV	R	33.5
30/04/2015	SLC	IW	1	Ascendente	VV	R	33.5
12/05/2015	SLC	IW	1	Ascendente	VV	R	33.5
24/05/2015	SLC	IW	1	Ascendente	VV	R	33.5
05/06/2015	SLC	IW	1	Ascendente	VV	R	33.5
17/06/2015	SLC	IW	1	Ascendente	VV	R	33.5
29/06/2015	SLC	IW	1	Ascendente	VV	R	33.5
11/07/2015	SLC	IW	1	Ascendente	VV	R	33.5
23/07/2015	SLC	IW	1	Ascendente	VV	R	33.5
04/08/2015	SLC	IW	1	Ascendente	VV	R	33.5
16/08/2015	SLC	IW	1	Ascendente	VV	R	33.5
28/08/2015	SLC	IW	1	Ascendente	VV	R	33.5
09/09/2015	SLC	IW	1	Ascendente	VV	R	33.5
21/09/2015	SLC	IW	1	Ascendente	VV	R	33.5
03/10/2015	SLC	IW	1	Ascendente	VV	R	33.5
27/10/2015	SLC	IW	1	Ascendente	VV	R	33.5
20/11/2015	SLC	IW	1	Ascendente	VV	R	33.5

Tabla 5: Imágenes Sentinel-1A utilizadas

5.1.3. Análisis de las distorsiones geométricas

Como se mencionó en la sección teórica, las imágenes SAR son susceptibles de sufrir distorsiones vinculadas a su geometría de adquisición. El efecto de *foreshortening* puede ser corregido con el uso de un Modelo Digital de Elevación externo. Los efectos de *layover* y *shadowing*, en cambio, no pueden ser removidos y por lo tanto las áreas afectadas por ellos no permiten extraer ninguna información de utilidad. Un punto importante para este trabajo de tesis ha sido el de poder estimar las posibles zonas sujetas a estas distorsiones, particularmente dentro del deslizamiento.

Para ello se generaron las máscaras de *layover* y *shadowing* correspondientes a los tres conjuntos de datos (Cosmo Skymed, Sentinel-1A Ascendente y Sentinel-1A Descendente) teniendo en cuenta la geometría de adquisición específica para cada una y empleando el Modelo Digital de Elevación. En general, puede apreciarse que la zona correspondiente al desplazamiento de Corvara no se encuentra mayormente afectado por estas distorsiones.

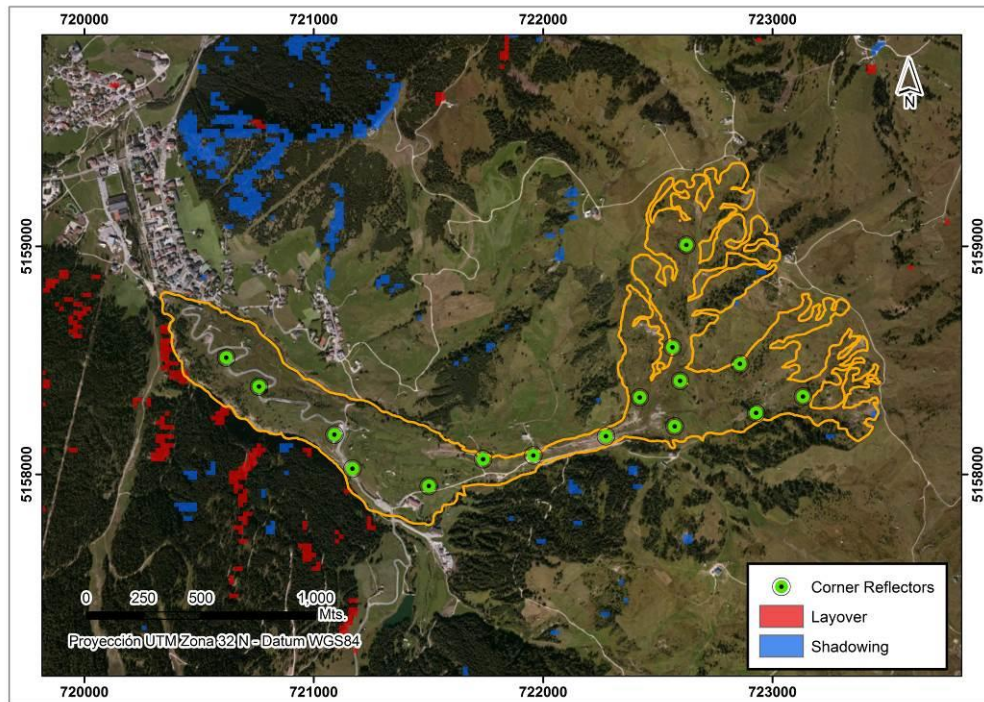


Figura 40: Distorsiones geométricas correspondientes a una imagen Sentinel-1A Descendente para la zona de Corvara.

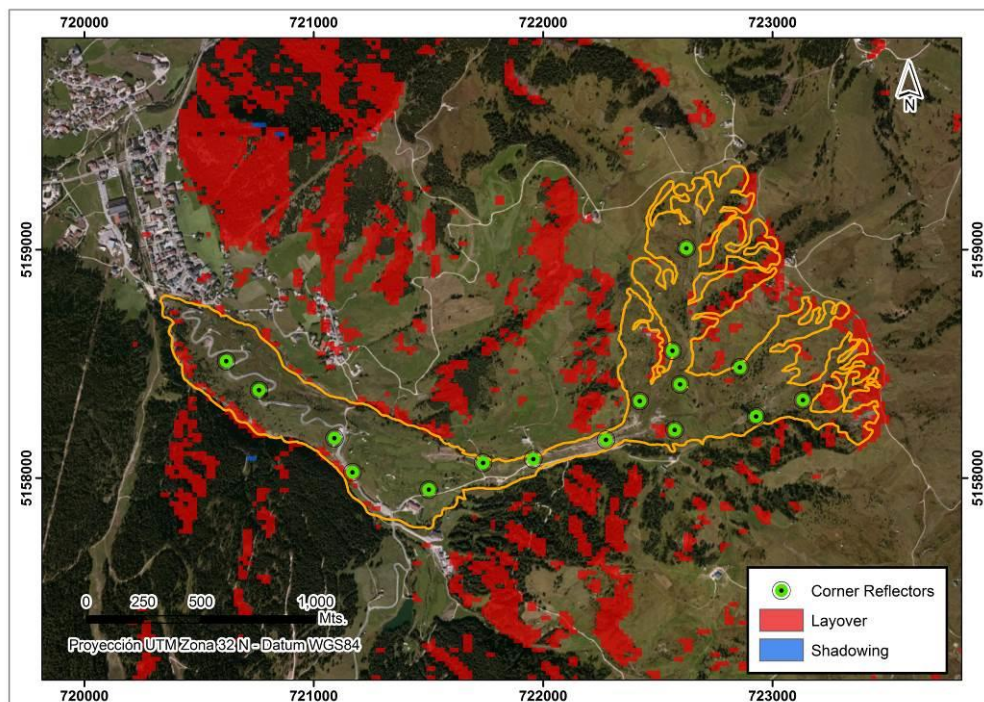


Figura 41: Distorsiones geométricas correspondientes a una imagen Sentinel-1A Ascendente para la zona de Corvara.

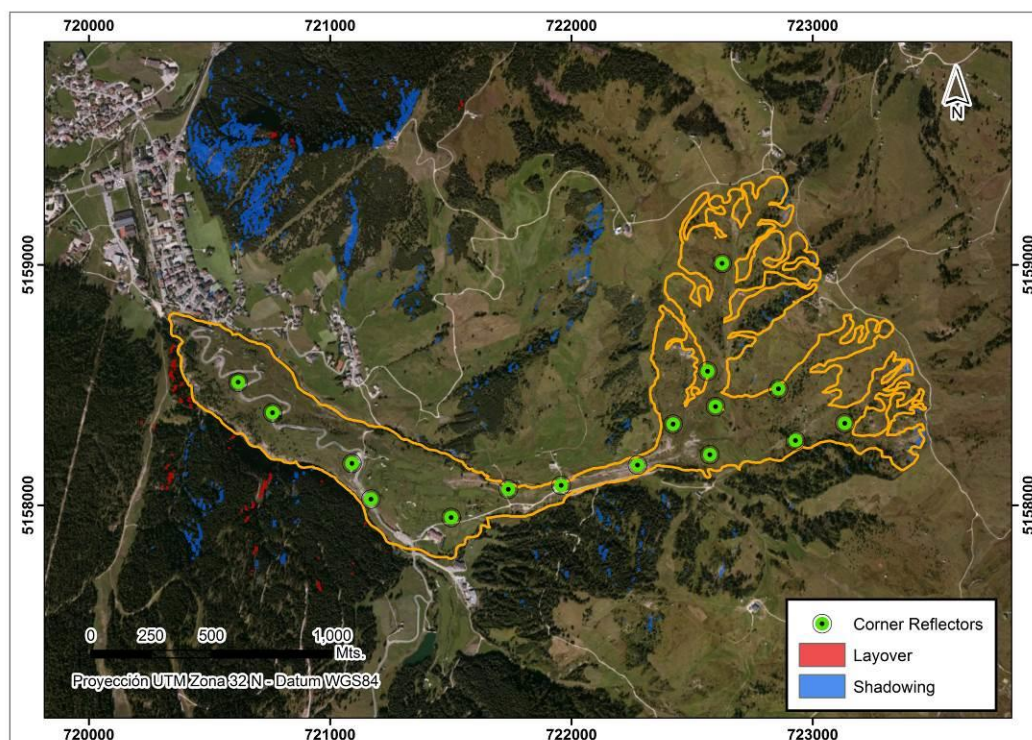


Figura 42: Distorsiones geométricas correspondientes a una imagen Cosmo Skymed Descendente para la zona de Corvara.

5.2. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (DEM)

El Modelo Digital de Terreno empleado para el procesamiento interferométrico proviene de la repartición de Naturaleza, Paisaje y Desarrollo Territorial de la Provincia de Bolzano. El mismo fue generado a partir de un relevamiento LIDAR¹⁵ aéreo. Las primeras adquisiciones datan de los años 2004/2005 y se fueron completando y actualizando hasta obtener la última versión del modelo, del año 2010. La zona de Corvara en tanto corresponde a las campañas de relevamiento del año 2006. Este dato es importante porque si bien el Modelo cuenta con una alta resolución espacial (2.5 metros, con una precisión media de 40 cm.), es probable que para un terreno sujeto a deslizamientos constantes se encuentre desactualizado. Esto último tiene implicancias directas en aplicaciones interferométricas por la propagación del error topográfico en la fase de la señal.

Las alturas del modelo aquí empleado están referidas al Elipsoide WGS84. La razón por mantener alturas elipsoidales y no geoidales se debe a que todos los productos InSAR (sea altura o deformación), toman como referencia el elipsoide del sistema de referencia de salida; en este caso, WGS84.

¹⁵ LIDAR quiere decir *Light Detection and Ranging*. Un Sistema LIDAR consiste de un telémetro que opera sobre una plataforma (sea terrestre o aerotransportada) que barre la superficie emitiendo su propio pulso y va registrando la distancia entre el sensor y cada objetivo que va relevando.

5.3. METODOLOGIA

5.3.1. Permanent Scatterers (PSI)

Para el procesamiento de las imágenes Cosmo-Skymed con el algoritmo PS, se empleó el software propietario SarProz¹⁶. Si bien este programa permite procesar imágenes SAR empleando diversos enfoques (SBAS, PS y métodos híbridos entre ambos), a los fines de este trabajo solo se empleó la metodología PS convencional.

El flujo de trabajo seguido consiste en las siguientes etapas:

- a) Importación de datos: Se crea un *set* de datos, se define un área de interés, y se selecciona la imagen Master. Para elegir la master se busca la imagen que se encuentre en el baricentro de la distribución de las líneas de base temporales y espaciales.
- b) Análisis de la reflectividad: Se genera un mapa de reflectividad (amplitud) media y para cada pixel se computa un índice de estabilidad, que se puede emplear para identificar posteriormente los PSC.
- c) Selección de puntos de control en tierra para la geocodificación de los productos a generar, y para la proyección del Modelo Digital de Elevaciones a coordenadas SAR.
- d) Proyección del Modelo Digital de Elevaciones a coordenadas SAR.
- e) Cálculo de las constantes de altura: Se estima la componente topográfica de la fase para su posterior remoción.
- f) Cálculo de las constantes de aplanamiento: Se estima la componente de fase correspondiente a la tierra plana. Esto es, la necesaria para realizar el explicado *flattening* de la fase.
- g) Selección de los PSC, basado en un parámetro que mida la dispersión de la amplitud o de la fase.
- h) Estimación preliminar de parámetros buscados. En este paso resulta de gran utilidad tener una noción de la magnitud del movimiento a estudiar y de los posibles errores derivados del Modelo Digital de Elevación. Estos dos puntos se plasman al especificar el rango de valores para la velocidad de deformación y para la altura residual¹⁷. Esta estimación inicial de los parámetros se emplea en combinación con un filtrado espacial para individualizar la máscara atmosférica o APS.
- i) Remoción del APS y estimación final de los resultados.
- j) Exportación y geocodificación de los resultados.

¹⁶ www.sarproz.com

¹⁷ En este contexto se entiende a la altura residual como la resultante de la diferencia entre la altura estimada por el algoritmo y aquella que proporciona el Modelo Digital de Elevación. Se entiende que esta altura existirá basándose en la asunción de que el MDE tiene errores.

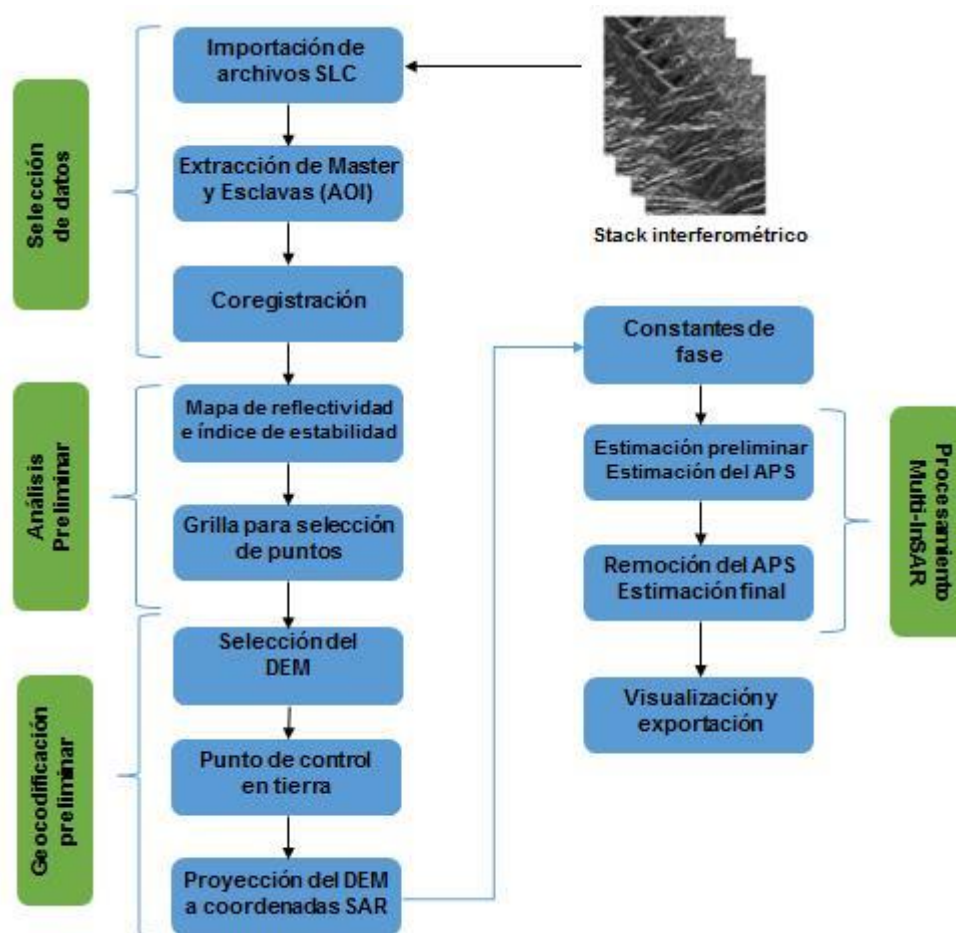


Figura 43: Flujo de trabajo PS convencional en SarProz (elaboración propia).

Algo importante a señalar es que al hacerse la primera estimación de parámetros (paso H), para la estimación se hace sobre una red de conexiones, en vez de emplear las fases puntuales de los PSC. Esto se debe a que los errores propios del sensor y por retardos de la señal se reducen significativamente si en lugar de tomar las fases de puntos separados, se consideran las diferencias entre fases de distintos puntos (Kampes, 2006, pág. 45)

5.3.2. Small Baselines Subset (SBAS)

Para el procesamiento de las imágenes Sentinel-1A con SBAS se empleó otro software propietario, Sarscape, que funciona como una extensión del programa comercial ENVI. El procesamiento SBAS sigue un flujo de trabajo muy similar al presentado en la figura 32. Operativamente consiste en los siguientes pasos:

- Grafo de conexiones: Este es un paso importante en términos de SBAS. Aquí se define el criterio con el cual se aparean las imágenes para formar interferogramas. Se definen los umbrales máximos de separación (líneas de base) temporal y espacial para conectar dos imágenes.

- b) Proceso interferométrico: Se coregistran los pares interferométricos, se forman los interferogramas, se realiza un primer filtrado para remover ruido, se genera el mapa de coherencia y se realiza el primer desenrollado de fase.
- c) Refinamiento orbital y re-achatamiento: Por un lado se busca estimar y remover cualquier componente de fase remanente que pueda deberse a la fase por tierra plana (re-achatamiento). Por otro lado, se corrigen posibles errores orbitales y errores vinculados a las líneas de base (refinamiento).
- d) Primera inversión: En este paso se hace la primer estimación, o estimación preliminar, del desplazamiento producido y de la altura de los píxeles procesados. Este último parámetro se emplea para volver a aplicar un nuevo achatamiento de fase sobre los interferogramas, y proceder con un nuevo desenrollado de fase. La idea de este paso es generar una fase aún más limpia de artefactos topográficos, permitiendo aislar aún más el ruido atmosférico.
- e) Segunda Inversión: En este paso se produce la estimación final de los parámetros buscados. Se emplean los interferogramas desenrollados de la primera inversión, teóricamente optimizados, y se aplican los filtros de paso bajo (espacial o LP) y paso alto (temporal o HP) para aislar el ruido atmosférico y eliminarlo.
- f) Geocodificación: Una vez sustraídos los artefactos atmosféricos, se realiza la conversión de unidades de fase a unidades de desplazamiento y se georreferencian los productos finales.

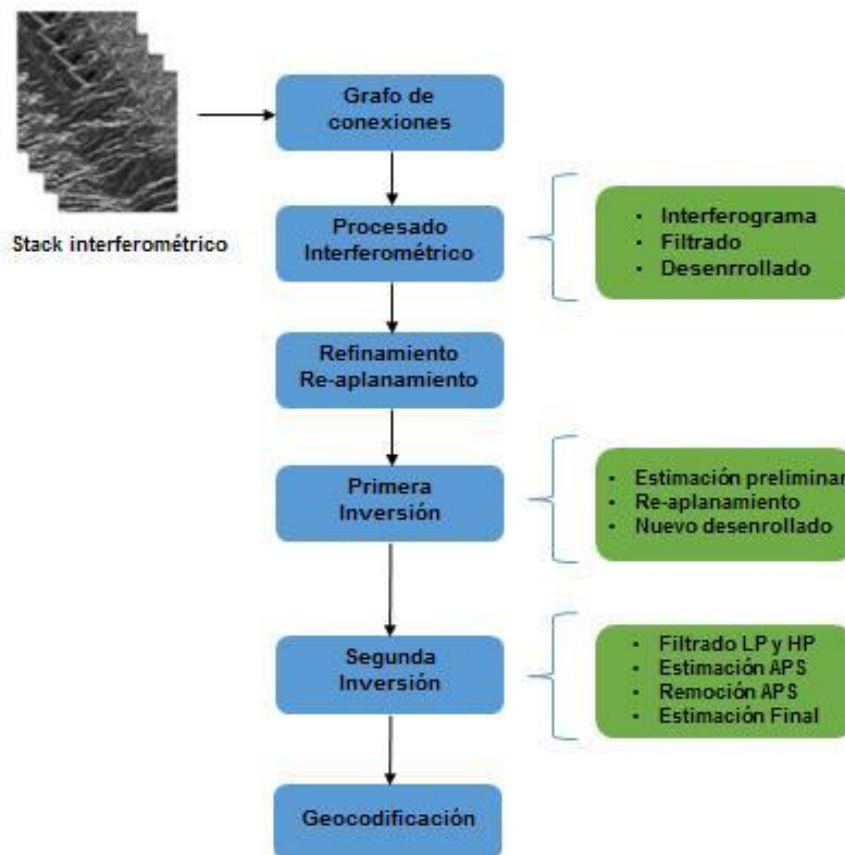


Figura 44: Flujo de trabajo SBAS en Sarscape (elaboración propia).

5.3.3. Validación de los Resultados

Para realizar la validación de los resultados se tomaron como puntos de control los Corner Reflectors que sirvieron a su vez como estaciones de medición GPS.

El resultado de los procesamientos SBAS y PS son series de deformación que muestran, para cada fecha de adquisición, el desplazamiento estimado acumulado. Estas series se encuentran proyectadas a la línea de vista del sensor (LOS), que en cada caso corresponde a la geometría de la imagen empleada como master para cada serie. A su vez, a partir de estas series puede obtenerse la velocidad del movimiento anualizada.

Por otro lado, se cuenta con una serie de deformación proveniente de las mediciones GPS que provee el desplazamiento en tres direcciones: Este-Oeste, Norte-Sur y vertical. Para comparar las series GPS con las resultantes de InSAR es necesario proyectar las primeras a la línea de vista (LOS) de cada serie SBAS/PS. La fórmula empleada para dicha proyección es la propuesta por Hanssen (2002):

$$d_{LOS} = d_u \cos(\theta_{inc}) - \sin(\theta_{inc}) d_n \cos\left(\alpha_h - \frac{3\pi}{2}\right) - d_e \sin(\theta_{inc}) \sin\left(\alpha_h - \frac{3\pi}{2}\right) \quad (35)$$

Donde:

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

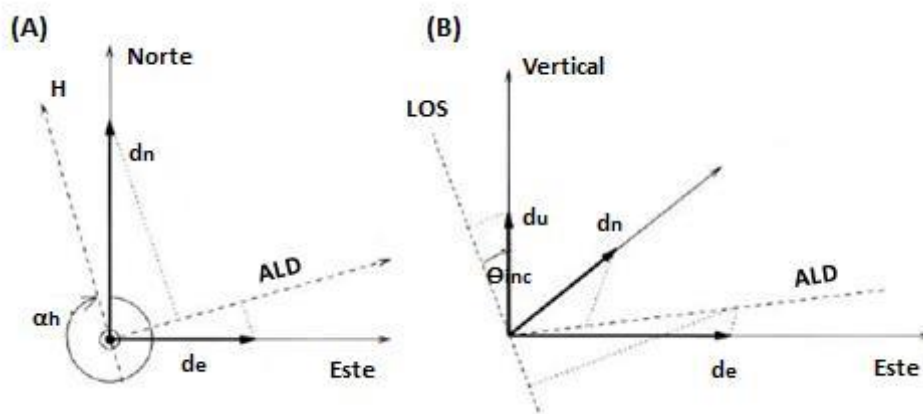


Figura 45: Proyección de los tres componentes de deformación sobre la línea de vista del sensor. (A) muestra la vista desde arriba de los componentes Este y Norte proyectados sobre la dirección de mirada en azimuth (ALD), perpendicular a la trayectoria del satélite indicada con α_h . (B) muestra un esquema 3D incluyendo la proyección del componente vertical a la línea de vista del sensor empleando el ángulo de incidencia (Hanssen, 2002, pág. 163).

Una vez proyectada la serie GPS, se procedió a interpolarla a las fechas de adquisición de cada imagen, ya que no en todos los casos eran coincidentes. Esto fue particularmente necesario en el caso de las imágenes Sentinel-1, ya que se observaba una desfase temporal más importante entre las distintas fechas de cada imagen y las campañas de relevamiento.

Para cada punto y cada fecha de adquisición SAR se calculó la diferencia entre el valor de desplazamiento acumulado calculado por PS/SBAS, y el correspondiente a la serie GPS. Sobre estas diferencias se computó la media (μ) de esos errores:

$$\mu = \frac{\sum_j^N (\overline{d^j} - d_{GPS}^j)}{N} \quad (36)$$

Donde $\overline{d^j}$ es el desplazamiento (acumulado) estimado para la fecha de adquisición j , d_{GPS}^j es el desplazamiento (acumulado) de la serie GPS para la fecha de adquisición j , y N es el número de adquisiciones. Por otra parte también se calculó la desviación estándar (σ) de dichos errores:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_j^N (x_j - \mu)^2}{N}} \quad (37)$$

Donde x_j es el error o diferencia InSAR vs GPS para cada fecha de adquisición j y μ es la media calculada en (36), siempre para cada punto. Finalmente se obtuvo un promedio tanto de las desviaciones σ como de las medias μ de todos los puntos:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \dots + \sigma_n}{n} \quad (38)$$

$$\bar{\mu} = \frac{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \dots + \mu_n}{n} \quad (39)$$

Donde $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ y $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ son las desviaciones estándar y la media de los errores de cada uno de los n puntos.

Como último comentario sobre la proyección a LOS: debe tenerse en cuenta que en este trabajo se emplean adquisiciones SAR en geometría tanto ascendente como descendente. La magnitud y la dirección del desplazamiento proyectado a LOS varían en función de la configuración geométrica empleada, que incide de manera directa en los ángulos α_h y θ_{inc} de la fórmula de proyección.

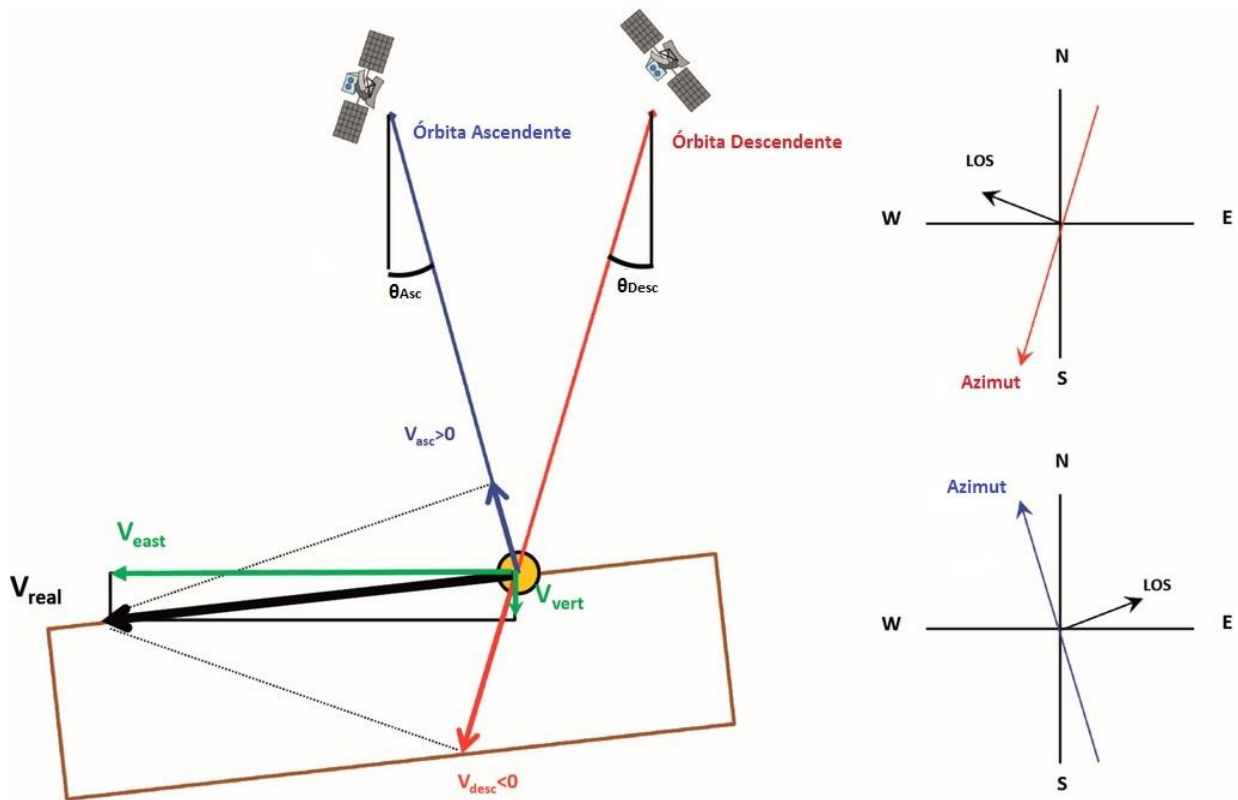


Figura 46: Proyección de los vectores de desplazamiento E-O y vertical a la línea de vista del sensor para una geometría ascendente y otra descendente. Nótese que un mismo vector se proyecta de manera negativa con la órbita descendente y positiva en el caso ascendente. A su vez, para este movimiento en particular la magnitud “captada” por la geometría descendente es mayor a lo registrado por la geometría ascendente (Tofani, Raspini, Catani, & Casagli, 2013).

6. PROCESAMIENTO PS

Para el procesamiento PSI, las 27 imágenes Cosmo Skymed fueron coregistradas y procesadas tomando como imagen master la correspondiente a la fecha 03/03/2015, como se muestra en el gráfico:

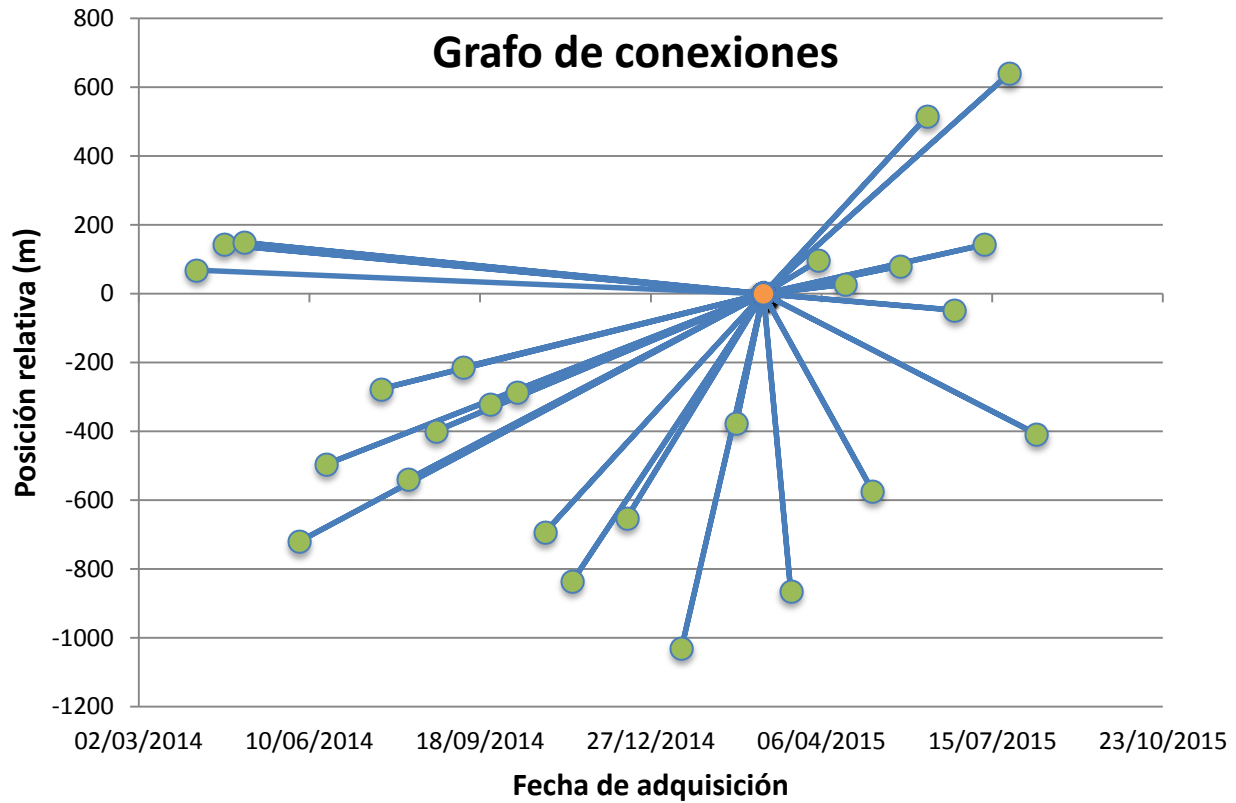


Figura 47: Distribución espacio-temporal de las imágenes procesadas. La imagen master se resalta en color naranja, y se ubica en el baricentro espacio-temporal del conjunto.

6.1. IDENTIFICACIÓN DE LOS PSC

El primer paso a realizar fue la identificación de los candidatos PS (PSC), poniendo especial atención en los Corner Reflectors. Para ello, en SarProz se analizó el comportamiento temporal de la amplitud de cada pixel del área de interés. Para cada punto se obtuvo entonces una media de amplitudes y una desviación estándar de dichas medias.

A partir de ellos se computó un índice de estabilidad de la Amplitud, que expresa la misma idea del índice de dispersión de la amplitud presentado en la sección 4.2, solo que normalizado de 0 a 1:

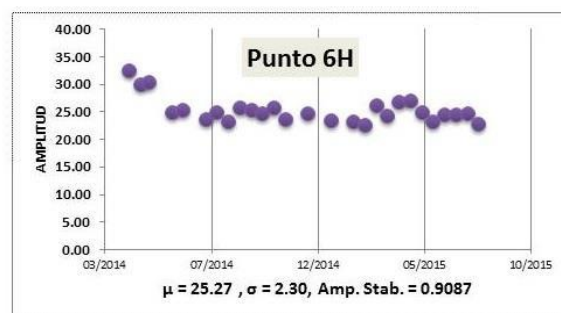
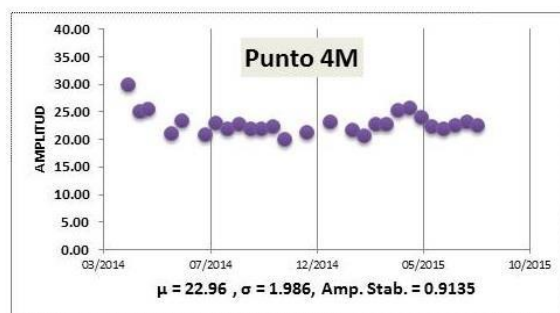
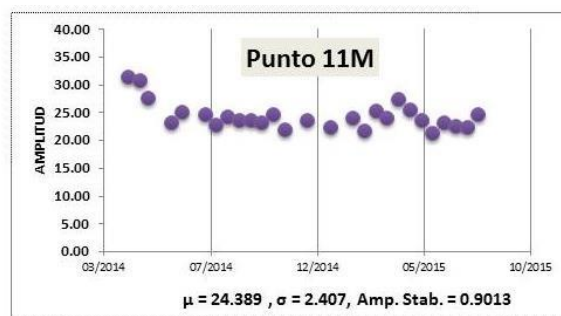
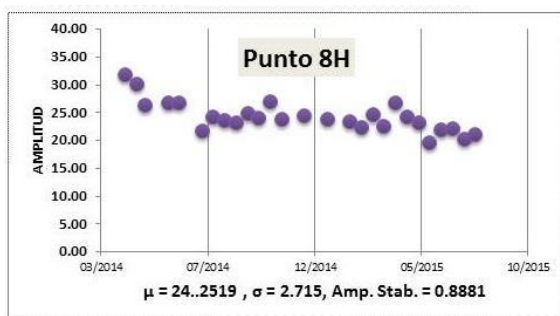
$$Amp. Stab. = 1 - \frac{\sigma}{\mu} \quad (40)$$

Donde μ es la media y σ es la desviación estándar. Esto es, cuanto mayor sea la desviación estándar (menos estable el punto en el tiempo), menor será el índice de estabilidad, y viceversa.

Una característica particular de la zona afectada por el deslizamiento de Corvara es la escasez de puntos plausibles de ser identificados como PS, explicado por una conjunción de factores. En primer lugar, la falta de dispersores que mantengan sus propiedades de retrodispersión a lo largo del tiempo. Esto se debe a que la mayoría de los dispersores son elementos naturales, y tanto por su dinámica (fenología, nieve, lluvia, etc) como por el movimiento propio del deslizamiento, sufren distintos efectos de decorrelación explicados en la sección teórica. Por otro lado, la longitud de onda de las imágenes empleadas para realizar el procesamiento PS (banda X), se muestra proclive a sufrir aún más los efectos de decorrelación por su baja capacidad de penetración en las distintas cubiertas presentes en el área. Esto se evidencia sobre todo en relación a la nieve y los cambios de cobertura vegetal, que hacen que la respuesta de un píxel presente una gran variación estacional.

La baja densidad de dispersores estables hace que sea complicado obtener una estimación de parámetros representativa de todo el área, y lleva a que el análisis deba centrarse en los puntos más estables. La mayor parte de los puntos considerados PSC son las construcciones artificiales presentes en el área, grupo dentro del cual se encuentran los Corner Reflectors. Es por ello que el procesamiento PSI así como la validación de resultados se ha centrado en este grupo de puntos.

El análisis de la estabilidad permitió detectar como estables ($D_A < 0.35$ o Índice de Estabilidad > 0.65) a 12 de los 16 Corner Reflectors. Los cuatro puntos que no lograron ser identificados como PSC (51, 54, 55 y 56) sufrieron desplazamientos de gran magnitud en sentido horizontal, de entre 3.5 y 46 metros. Ante tal magnitud y dirección de movimiento, que supera la celda de resolución de las imágenes Cosmo Skymed, resultó imposible asociar estos Corner Reflectors con un mismo píxel a lo largo del tiempo. Lo anterior queda reflejado en el índice de estabilidad de los píxeles correspondientes a los Corner Reflectors, que para los puntos 51,54,55 y 56 muestra valores muy bajos. A continuación se muestran las series temporales de amplitud para los 12 puntos identificados como PSC:



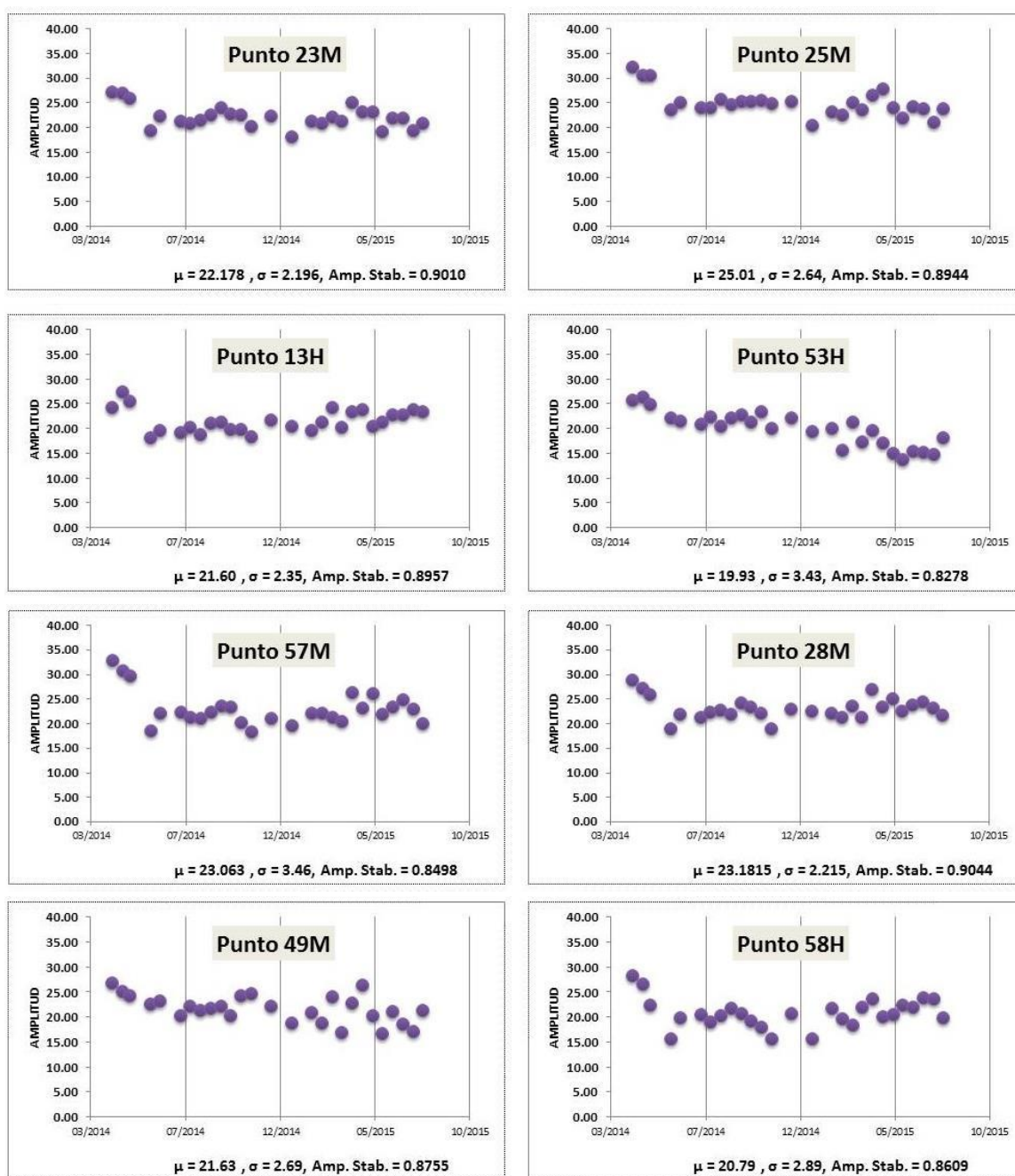


Figura 48: Series temporales de amplitud para los 12 puntos PSC

Punto	μ	σ	$1 - \sigma/\mu$	Punto	μ	σ	$1 - \sigma/\mu$
4M	22.963	1.986	0.913	23M	22.178	2.196	0.901
6H	25.270	2.307	0.909	25M	25.011	2.640	0.894
8H	24.252	2.715	0.888	57M	23.063	3.464	0.850
11M	24.389	2.407	0.901	28M	23.181	2.216	0.904
13H	21.607	2.254	0.896	49M	21.633	2.693	0.876
53H	19.937	3.433	0.828	58H	20.793	2.892	0.861

Tabla 6: Resumen de valores de μ , σ y $1 - \sigma/\mu$ para los 12 puntos.

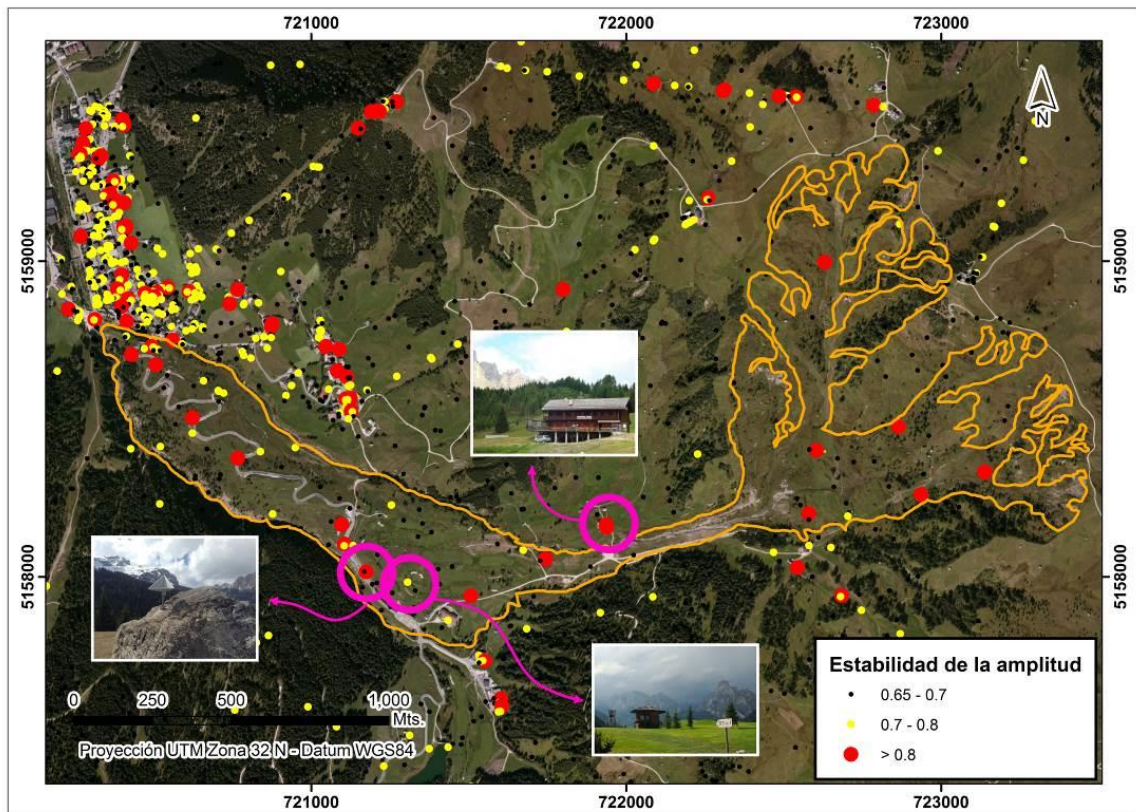


Figura 49: Puntos con índice de estabilidad mayor a 0.65. En su mayoría se trata de los Corner Reflectors o elementos artificiales, como se puede observar en las imágenes de ejemplo.

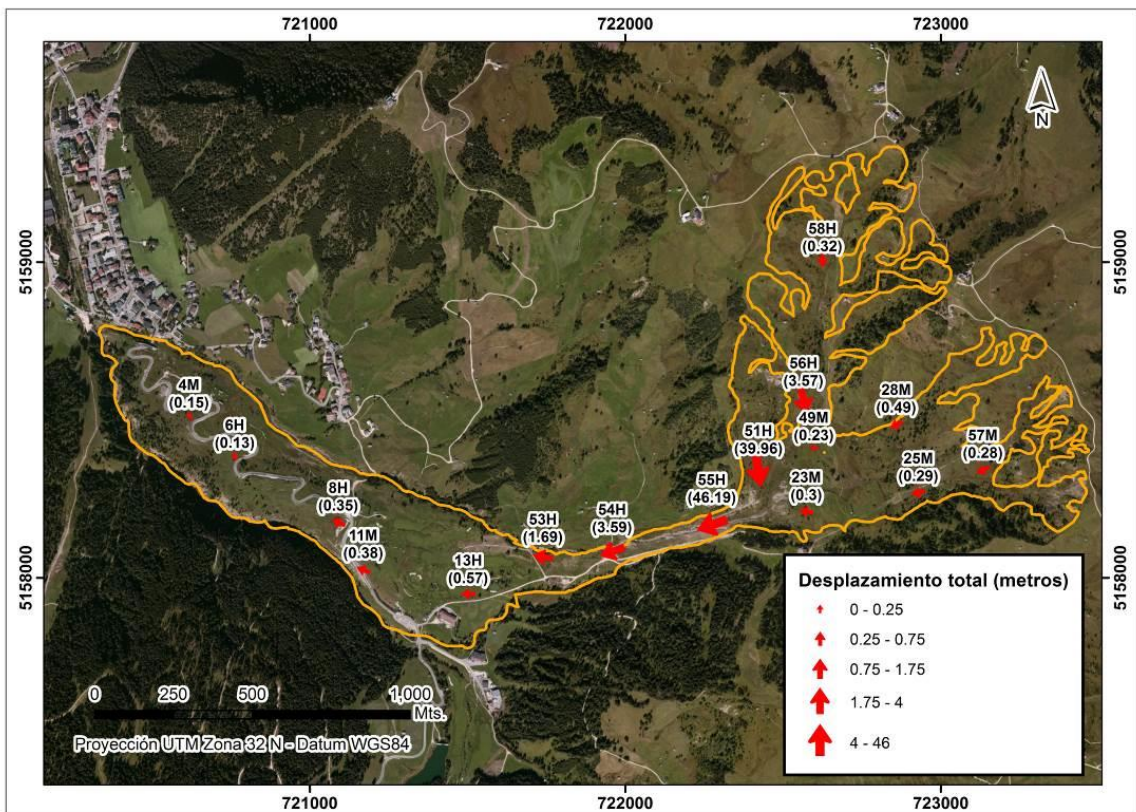


Figura 50: Desplazamiento plano registrado para los CR entre Abril de 2014 y Agosto de 2015 (Elaboración Propia).

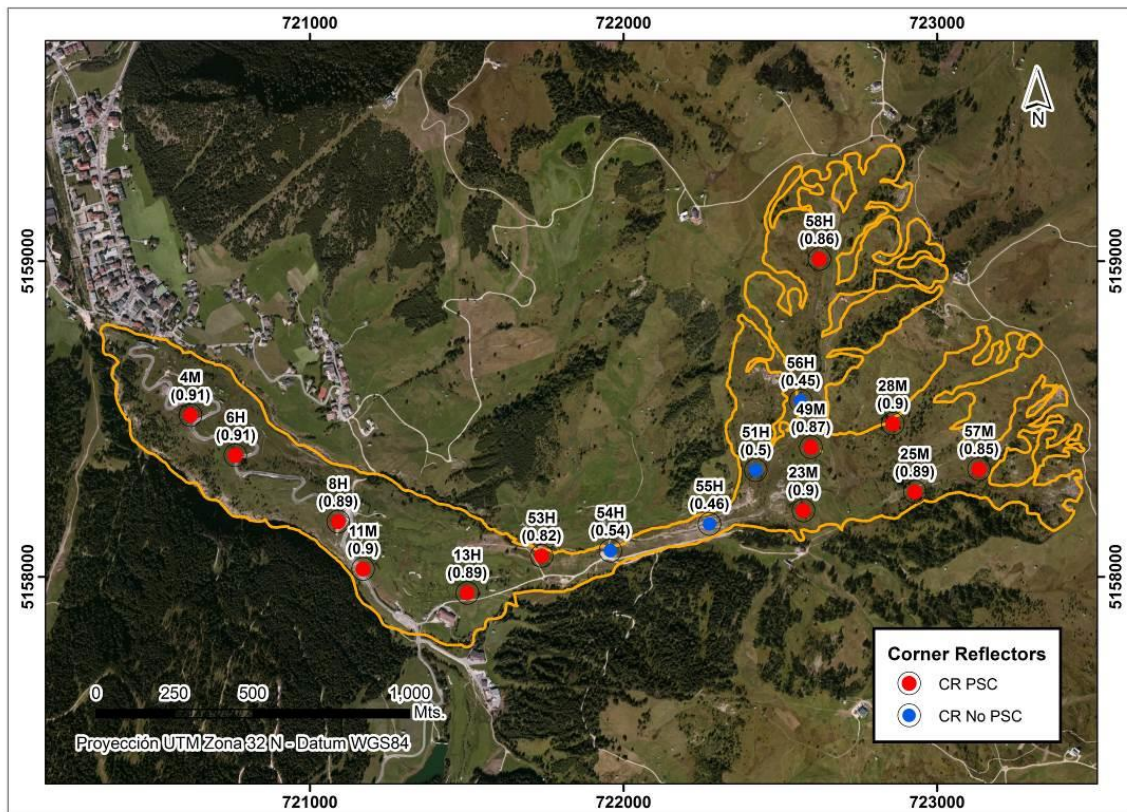


Figura 51: Índice de estabilidad calculado para los Corner Reflectors. Aquellos plausibles de ser identificados como PSC muestran valores superiores a 0.8.

6.2. AGRUPAMIENTO DE LOS DATOS POR SECTOR

Dado que el procesamiento PS implica el manejo de rangos de valores para realizar las estimaciones, se agruparon de manera separada los Corner Reflectors correspondientes a las zonas de acumulación, transporte y alimentación respectivamente. Esta segregación se hizo para evitar procesar de manera conjunta puntos que se movieron muy rápido en el período analizado, con puntos que mostraron mucha más estabilidad. De esa manera se buscó evitar sobreestimar o subestimar parámetros.

De hecho, al analizar la velocidad de los puntos (proyectada a línea de vista del sensor) correspondientes a los tres sectores del deslizamiento, para el período Abril-2014/Agosto-2015, se verifican las diferencias comentadas.

Si bien no existen diferencias sustanciales entre la zona de acumulación y la de alimentación en cuanto a velocidad, no se encuentran espacialmente conectadas, ya que entre ellas se encuentra la zona de transporte (de movimientos mucho más rápidos).

Zona	Punto	Vel. (mm/año)	Vel. Media(mm/año)
Acumulación	4M	-64.00	-129.44
	6H	-61.00	
	8H	-179.78	
	11M	-213.00	
Transporte	13H	-305.40	-636.71
	53H	-968.03	
Alimentación	23M	-176.24	-166.51
	25M	-173.74	
	57M	-146.45	
	28M	-335.42	
	49M	-141.32	
	58H	-25.90	

Tabla 7: Velocidades proyectadas a la línea de vista del satélite considerando la geometría de las imágenes Cosmo Skymed (período Abril 2014 – Agosto 2015). Destaca el sector de transporte (punto 53H) como mucho más veloz que el resto de los puntos.

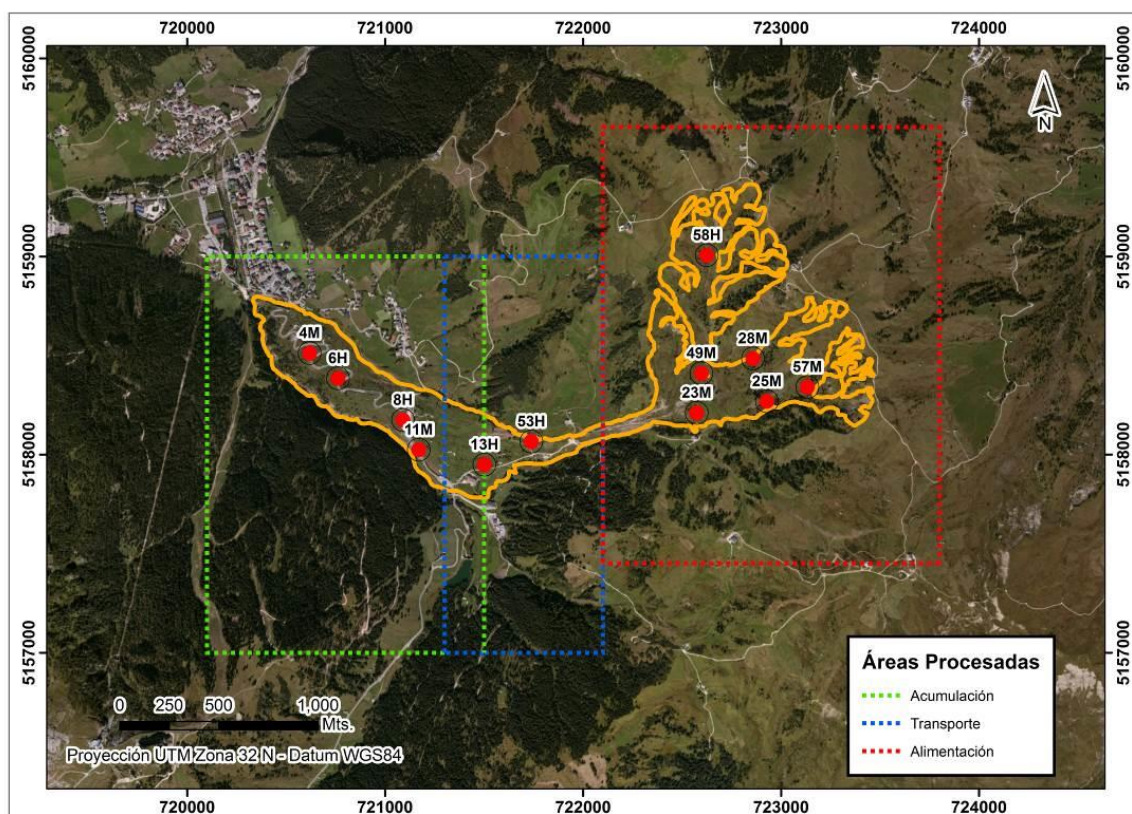


Figura 52: Delimitación de las tres áreas demarcadas para procesar los sectores de acumulación, transporte y alimentación.

6.3. PROCESADO DEL ÁREA DE ACUMULACIÓN

Los puntos 4M, 6H, 8H y 11M fueron procesados dentro del área verde desplegada en la figura 52. Los mismos muestran un comportamiento en amplitud acorde a sus altos índices ya expuestos en la sección anterior.

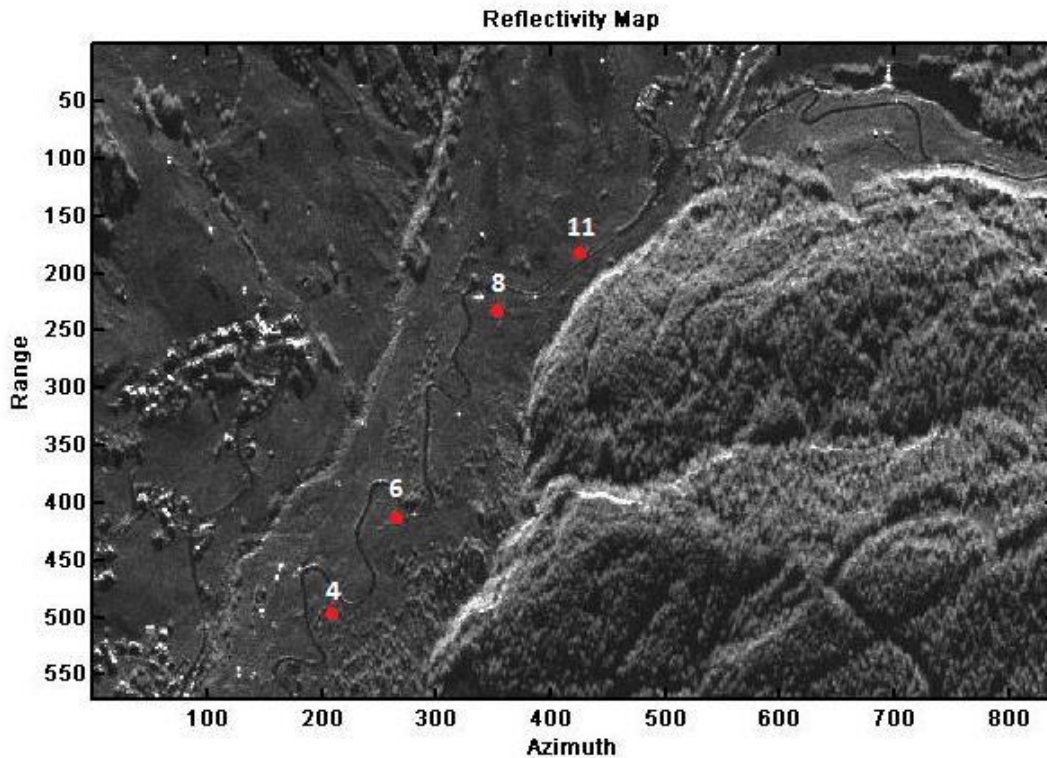


Figura 53: Mapa de reflectividad para la zona de acumulación en Slant Range. Corner Reflectors indicados con puntos rojos.

Al realizarse la primer estimación, con el objetivo de computar la máscara APS, se emplearon como rangos de referencia ± 215 mm/año para la velocidad, y ± 10 metros para la altura residual¹⁸. El primer rango de valores surge en función de la información presentada en la tabla 7, mientras que el segundo rango se basa en la presunción de que el Modelo de Elevación Digital empleado se encuentra desactualizado. Dada la precisión de este Modelo, se estableció que esta diferencia no debería superar los 10 metros. El empleo de rangos simétricos se debe a que la primera estimación se hace sobre una red de conexión entre los PSC, como se explicara en la sección metodológica. Esto quiere decir que según el sentido en que se mida la diferencia (esto es, de A hacia B o de B hacia A), el signo cambiará.

Como la máscara APS surge de una interpolación sobre una grilla regular, es preciso que los PSC empleados para este fin muestren una distribución espacial equilibrada. A ello obedece el hecho de haber empleado un umbral de estabilidad de amplitud de 0.65 para seleccionar los PSC, cuando en

¹⁸ Con altura residual se hace referencia a la diferencia entre la altura proporcionada por el Modelo Digital de Elevación y la estimación de altura propia del procesamiento PS.

realidad la mayoría de los autores proponen como mínimo valor 0.75 (o de 0.25 como máximo si se lo expresa como dispersión).

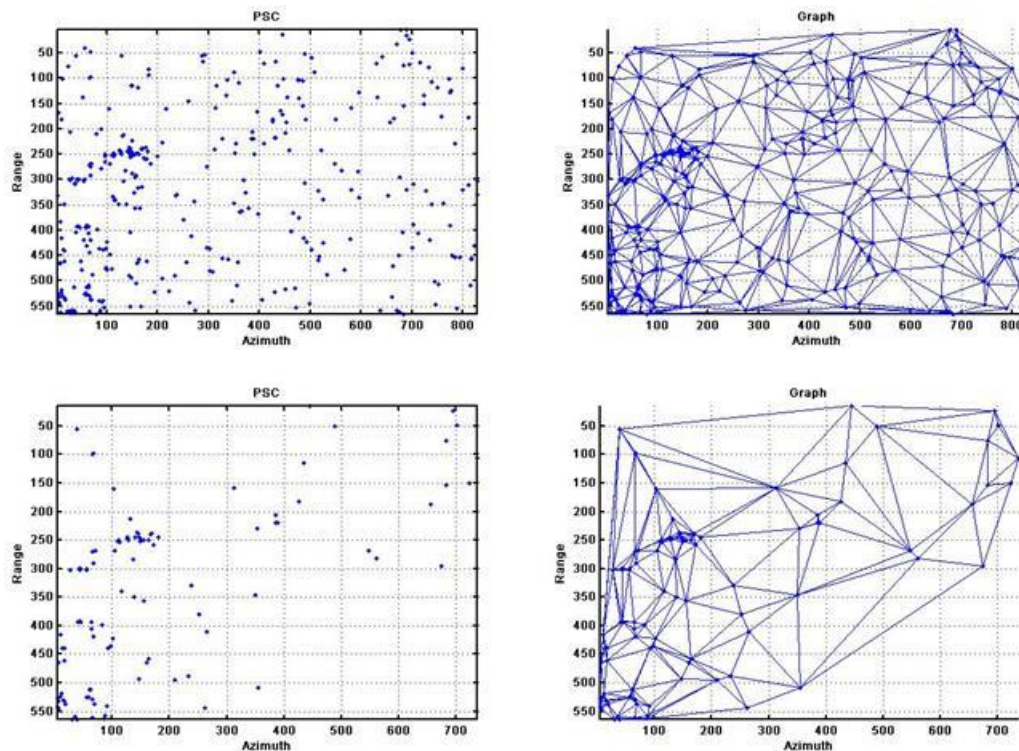


Figura 54: Zona de acumulación. Arriba: PSC seleccionados empleando un umbral de estabilidad de 0.65, con su red de conexiones correspondiente. Abajo: PSC seleccionados empleando un umbral de estabilidad de 0.7, con su red de conexiones correspondiente. Se aprecia que en el segundo caso la densidad de puntos es mucho menor, y sobre todo su distribución espacial es más desigual.

El cálculo del componente de fase debido a la atmósfera se realiza una vez calculados estos parámetros. Para cada fecha, SarProz genera la correspondiente máscara atmosférica que luego será removida de la señal de su correspondiente imagen. Una vez removida la máscara APS de cada imagen, se realiza la estimación final de los parámetros, entre ellos la velocidad y el desplazamiento acumulado. Este último muestra valores acordes a los rangos empleados para estimar la velocidad.

Para cada uno de los puntos del sector, se muestran en la figura 56 el desplazamiento acumulado estimado junto al correspondiente deslizamiento registrado por GPS, proyectado a LOS. Puede apreciarse el supuesto de linealidad subyacente en los modelos aplicados por el algoritmo PS. Cuando la serie GPS proyectada a LOS sigue también un comportamiento lineal, entonces la serie PS aproxima muy bien la misma tendencia. En cambio, cuando se producen saltos o aceleraciones determinando una serie GPS no tan lineal, el método falla en seguir esta tendencia, como sucede especialmente con el punto 11M.

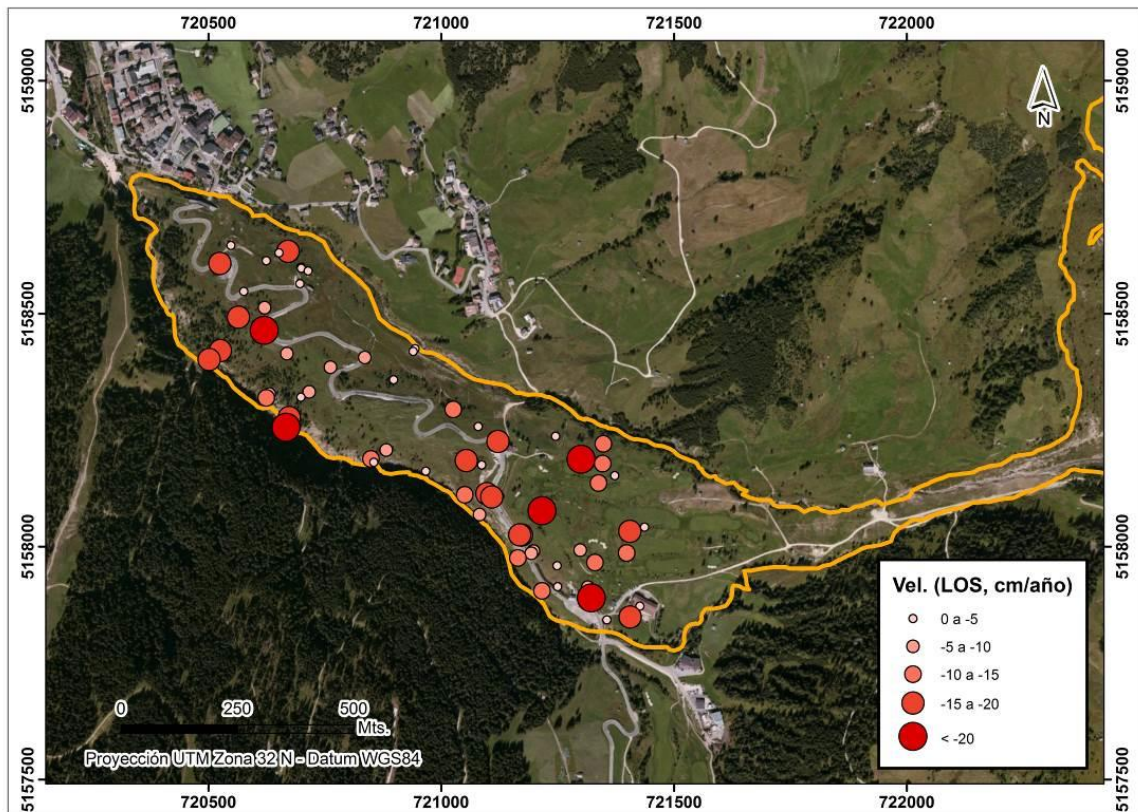


Figura 55: Velocidad estimada para los PS en la zona de acumulación. Los valores corresponden a un rango de velocidad propio de la zona de acumulación, de entre 0 y 21,5 cm/año.

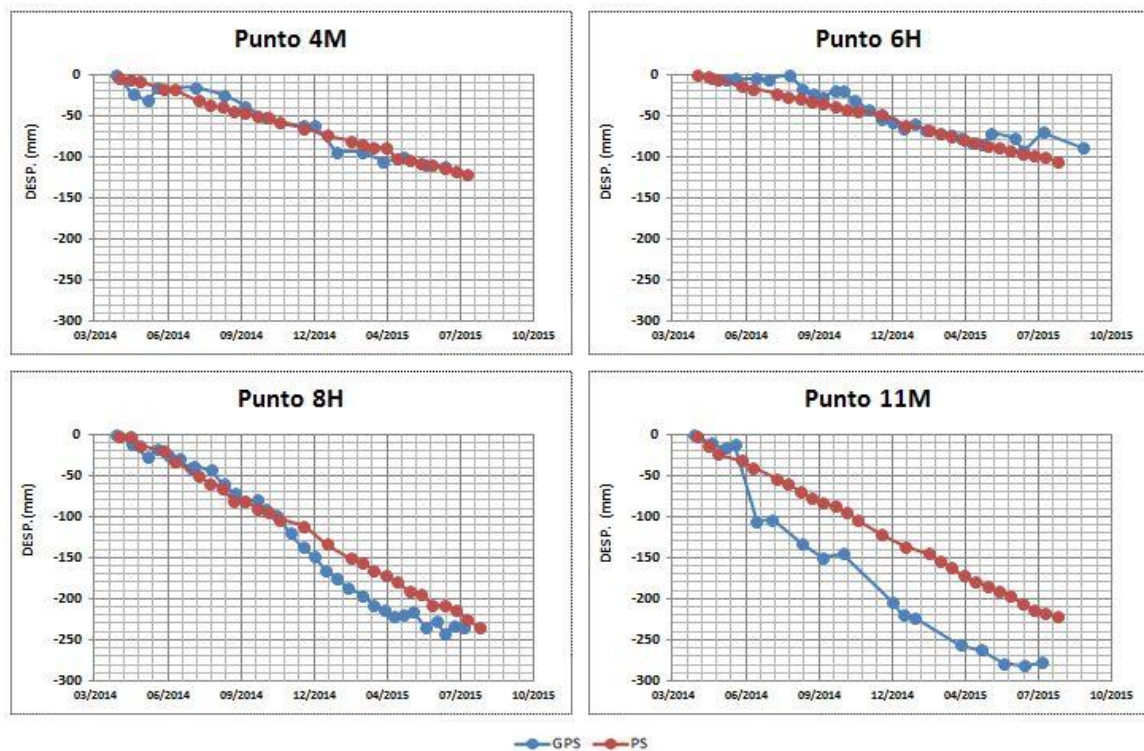


Figura 56: Comparación de series temporales de deformación para los puntos del área de acumulación. La mayor divergencia entre las series GPS y PS se observa en el punto 11, que registra un fuerte salto en Mayo de 2014 que no logra ser correctamente modelado.

6.4. PROCESADO DEL ÁREA DE TRANSPORTE

Como ya se ha comentado, el área de transporte fue la que registró los movimientos más intensos en el período analizado. Es por ese mismo motivo que de los CR que se desplazaron más rápido (51H, 53H, 54H, 55H y 56H) solamente el 53H pudo ser identificado como PSC. El punto 13H fue procesado junto a este ya que su velocidad era significativamente superior a la del grupo de Acumulación.

El sector procesado corresponde al área azul en la figura 52 los Corner Reflector 13H y 53H destacan por su alta reflectividad, así también como por su amplitud estable en el tiempo. Cabe señalar que el punto 53H es el que menor índice de estabilidad arrojó para todos los Corner Reflectors analizados, y ello se explica principalmente porque es el que más se movió.

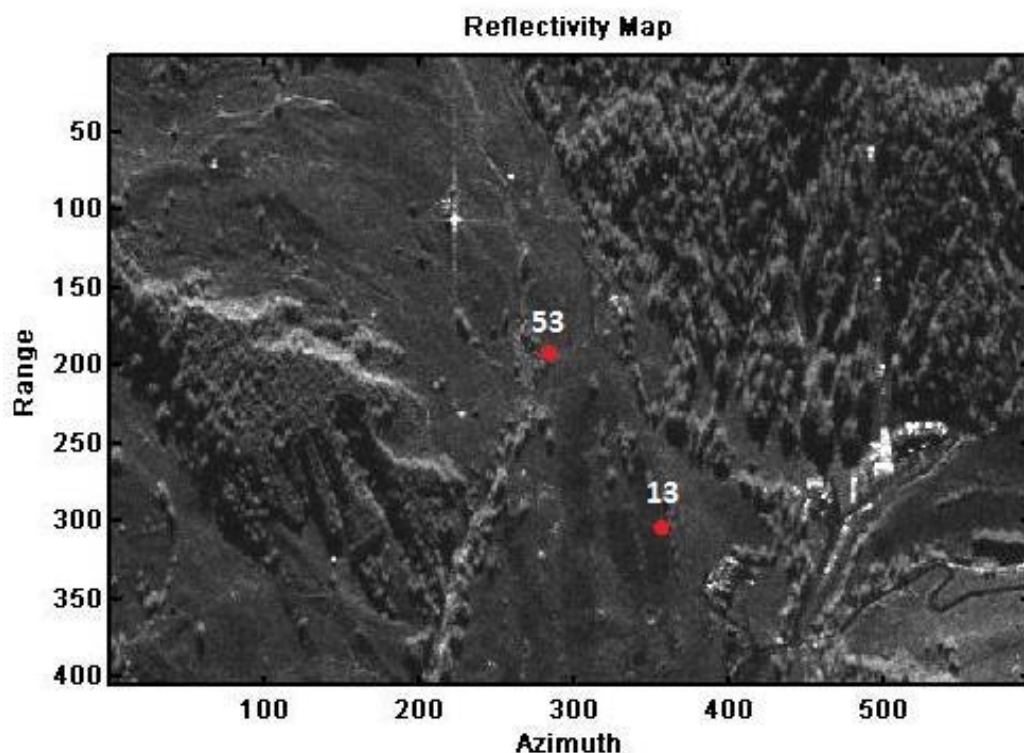


Figura 57: Mapa de reflectividad para la zona de transporte en rango oblicuo. Corner Reflectors indicados con puntos rojos.

Para adoptar un umbral de selección de los PSC nuevamente se analizó la distribución espacial de los mismos empleando valores de índice de estabilidad de la amplitud de 0,7 y 0,65 respectivamente. Al igual que en el área de acumulación, emplear un umbral de 0,7 implicaba contar con una red de puntos demasiado escasa, por lo que nuevamente se empleó un umbral de 0,65.

El rango de valores empleado como parámetro de estimación de la velocidad fue de ± 1000 mm/año. Este intervalo resulta muy amplio, en correspondencia con el fuerte desplazamiento registrado por el punto 53. En cuanto a la altura residual, se mantuvo el margen de ± 10 metros aplicado en la zona de acumulación.

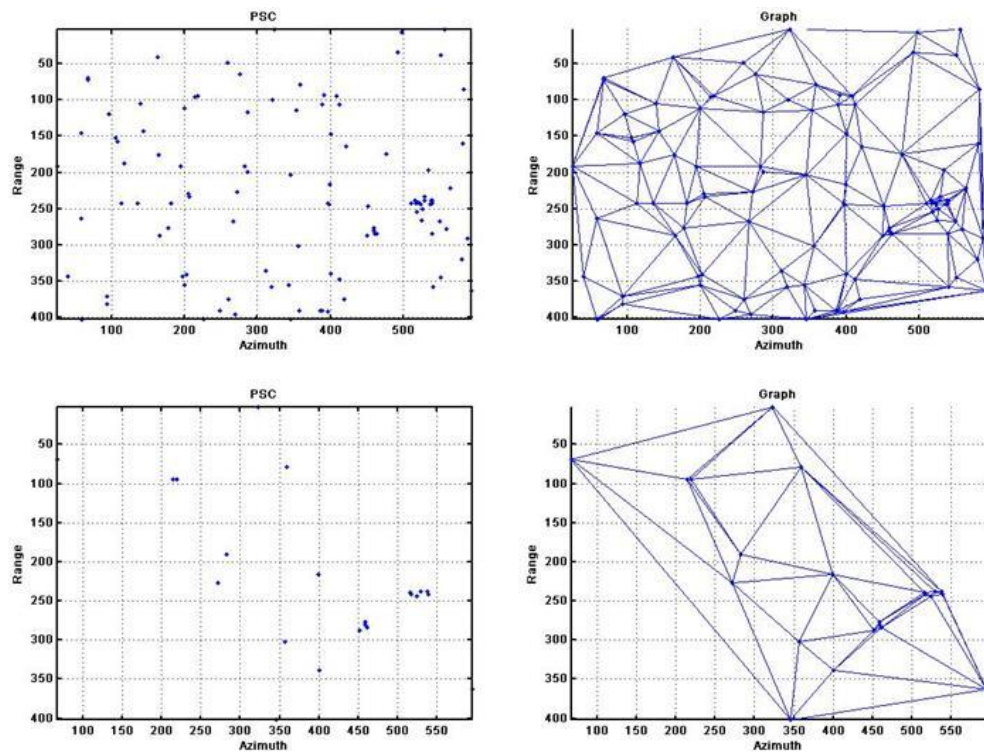


Figura 58: Zona de transporte. Arriba: PSC seleccionados empleando un umbral de estabilidad de 0.65, con su red de conexiones correspondiente. Abajo: PSC seleccionados empleando un umbral de estabilidad de 0.7, con su red de conexiones correspondiente. Se aprecia que en el segundo caso la densidad de puntos es mucho menor, y sobre todo su distribución espacial es menos regular o uniforme que en el primer caso.

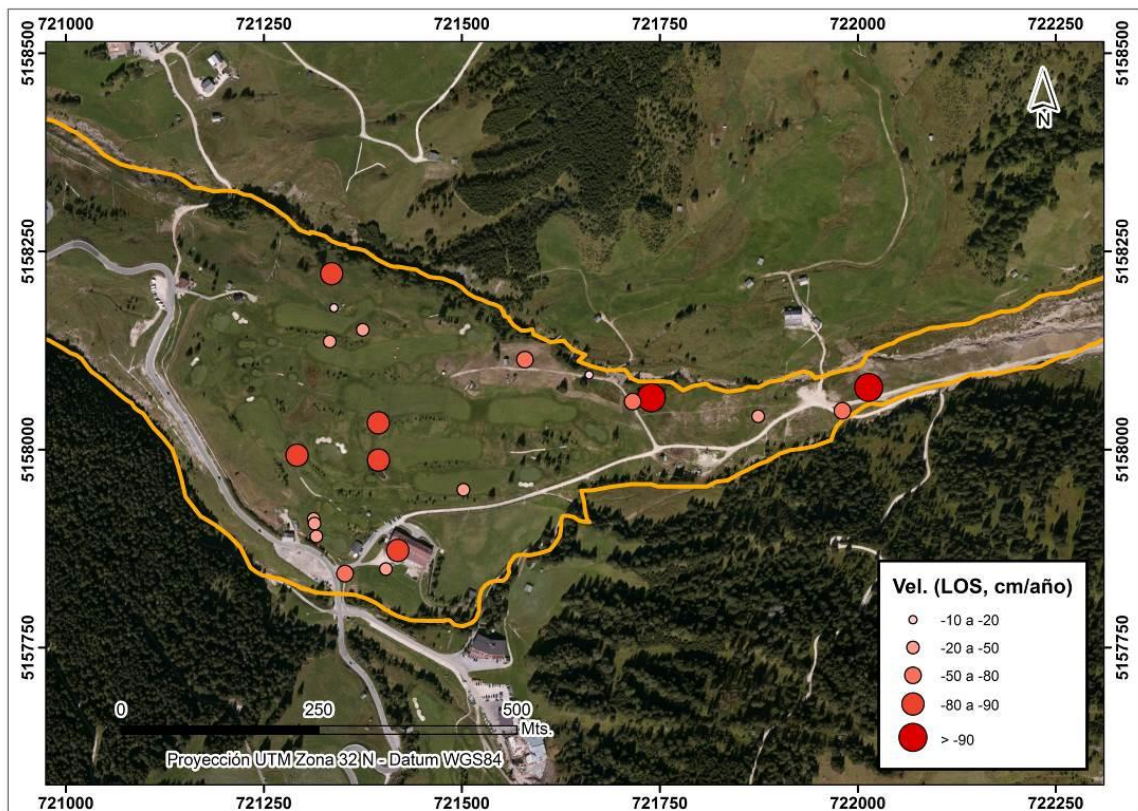


Figura 59: Velocidad estimada para los PS en la zona de transporte. Los valores corresponden a un rango de velocidad propio de este sector, de entre 0 y 100 cm/año.

Tal como sucede en la zona de acumulación, el modelo lineal empleado en el procesamiento PSI no logra seguir la serie GPS cuando esta muestra algún patrón de no linealidad. Esto se observa para ambos puntos: si bien el desplazamiento acumulado total es similar entre las series PS-GPS, existen momentos de divergencia entre ambas series debidas a una aceleración del movimiento. El orden de magnitud de las diferencias es más grande para el punto 53 ya que el orden de magnitud de sus desplazamientos es mucho mayor.

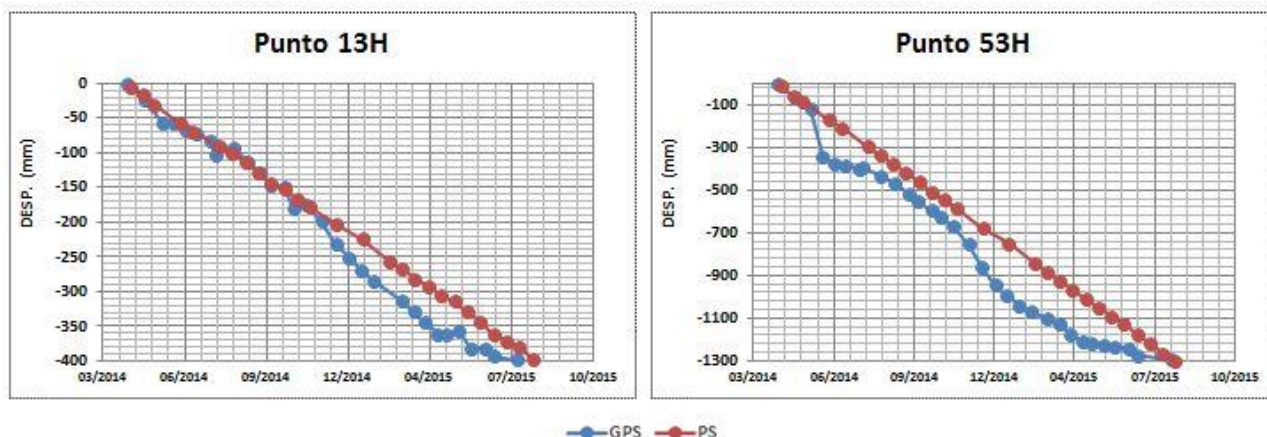


Figura 60: Comparación de series temporales de deformación para los puntos del área de transporte..

6.5. PROCESADO DEL ÁREA DE ALIMENTACIÓN

El área de alimentación presenta en general velocidades de deslizamiento similares a las del sector de acumulación, con la excepción del punto 58H que se mueve muy lentamente, y el punto 28M que se mueve significativamente más rápido que el resto. Como se aprecia en la figura 52, se trata del sector más grande del deslizamiento y con más Corner Reflectors Analizados.

El rango de referencia empleado en este caso para realizar estimar la velocidad fue de +/- 335 mm/año, en función de la información proporcionada en la tabla 7. En correspondencia con esto, el desplazamiento acumulado estimado se mueve en un rango de entre 0 y -435 mm para todo el período analizado.

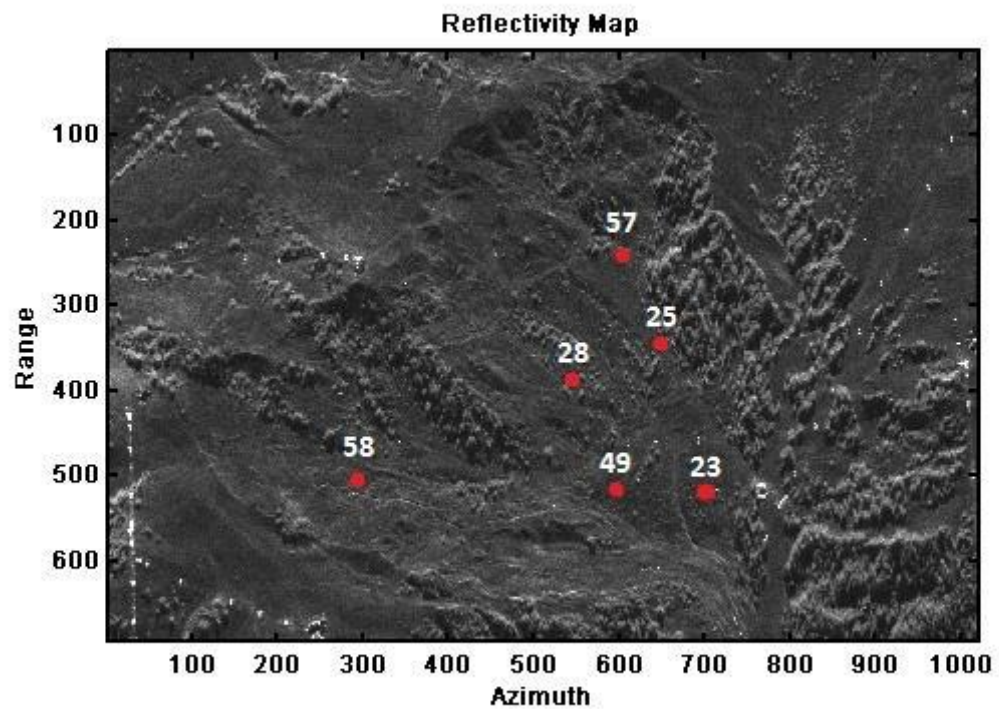


Figura 61: Mapa de reflectividad para la zona de alimentación en rango oblicuo. Corner Reflectors indicados con puntos rojos.

Nuevamente se hizo un análisis de los PSC seleccionados con umbrales de 0,65 y 0,7 y de la misma manera se determinó emplear el umbral de 0,65 para garantizar una densidad y distribución de PSC adecuadas.

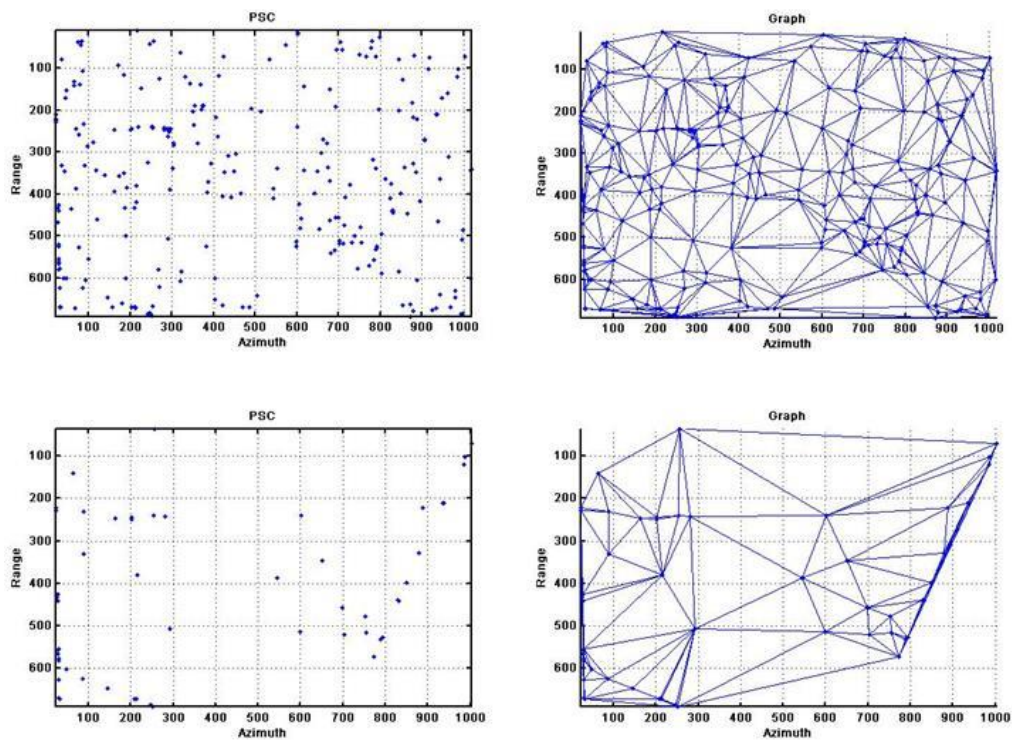


Figura 62: PSC seleccionados empleando un umbral de estabilidad de 0.65, con su red de conexiones correspondiente. Abajo: PSC seleccionados empleando un umbral de estabilidad de 0.7, con su red de conexiones correspondiente. Se aprecia que en el segundo caso la densidad de puntos es mucho menor, y sobre todo su distribución espacial es más desigual.

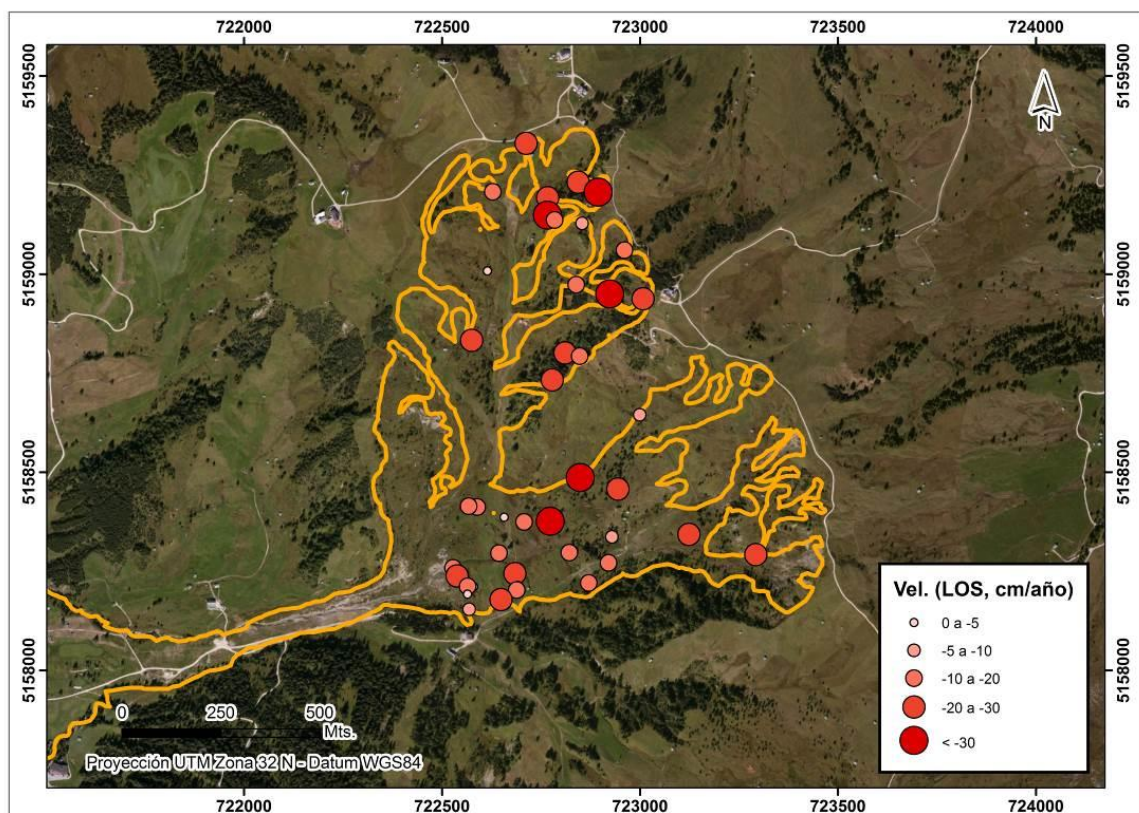


Figura 63: Velocidad estimada sobre los puntos procesados. Los valores corresponden a un rango de velocidad propio de la zona de alimentación, de entre 0 y 33,5 cm/año.

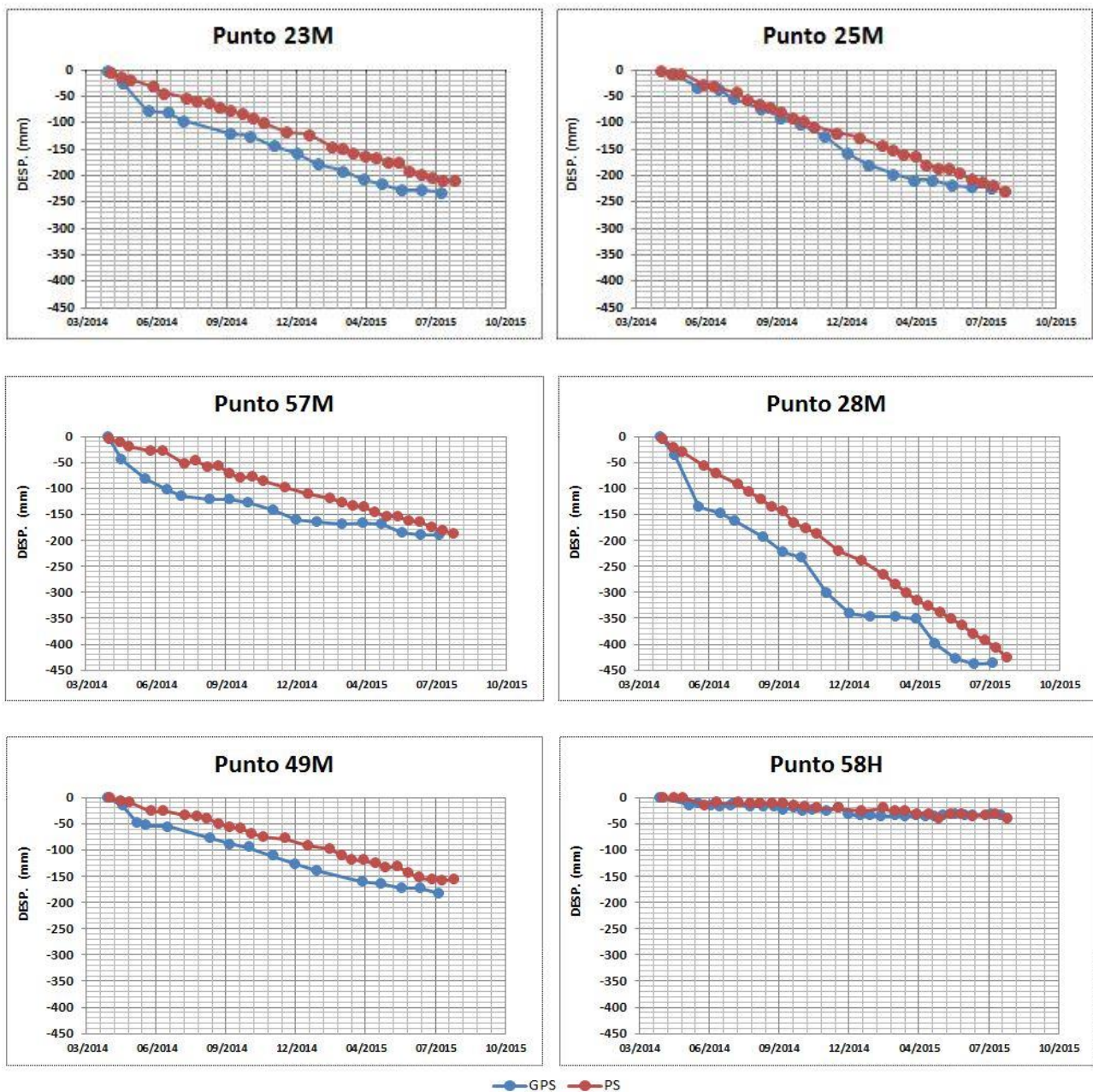


Figura 64: Comparación de series temporales de deformación para los puntos del área de alimentación.

6.6. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

La serie de desplazamiento acumulado en LOS obtenida a partir del procesamiento PSI fue comparada con la correspondiente serie GPS proyectada en LOS, calculando las medias y desviaciones de los errores para cada punto. Los resultados se presentan en la tabla 8:

Zona	Punto	Vel. GPS (cm/año)	Vel. PSI (cm/año)	μ (cm)	σ (cm)
Acumulación	4M	8.246	8.932	0.535	1
	6H	6.015	7.849	0.609	1.019
	8H	18.083	17.174	0.766	1.917
	11M	21.093	16.294	0.658	2.629
Transporte	13H	30.292	29.158	0.706	2.069
	53H	95.956	95.679	2.863	7.122
Alimentación	23M	17.154	15.171	0.558	0.971
	25M	20.1	16.974	0.66	1.532
	57M	13.826	13.509	0.744	1.884
	28M	32.707	31.173	1.225	2.239
	49M	13.729	11.484	0.477	0.833
	58H	2.456	2.953	0.437	0.49
μ medio (cm)			0.85		
σ media (cm)			1.97		

Tabla 8: Comparación de velocidades estimadas por PSI para cada punto, con la correspondiente a la serie GPS en LOS.

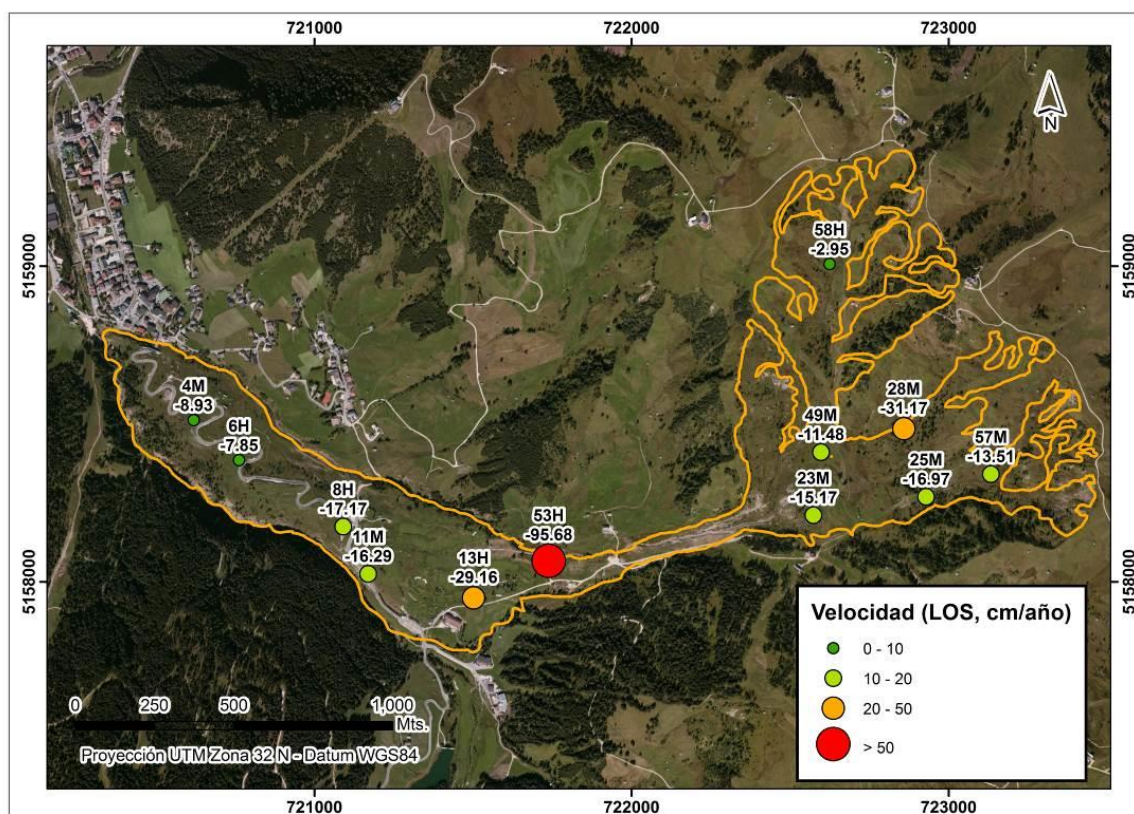


Figura 65: Velocidad calculada para cada CR, en línea de vista del sensor.

La comparación arroja un error medio de 0.85 cm y un desvío de 1.97 cm, este último parámetro con un máximo de 7.12 cm para el punto 53 y un mínimo de 0.49 cm para el punto 58H. Si se mira el mapa de velocidades junto a la tabla de errores, algo a destacar es que en general las desviaciones más grandes se observan para los puntos que se movieron más. Para cuantificar esta relación se calculó el coeficiente de correlación R^2 entre los valores de desviación y la velocidad estimada por PSI para cada punto, el cual arroja un valor de **0,925**.

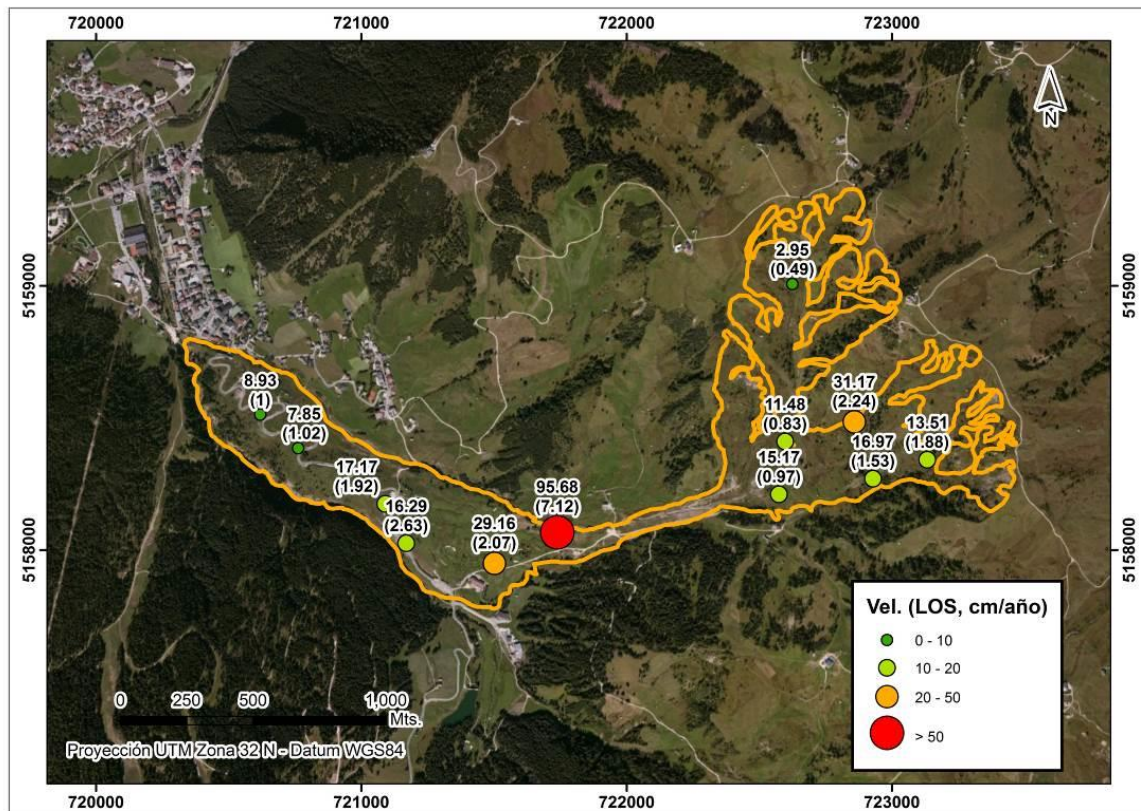


Figura 66: Velocidades estimadas por PSI junto a la desviación estándar calculada para cada punto.

Para interpretar estos resultados es importante además tener en cuenta el ruido presente en la fase de la señal de cada punto. Es decir, ver en qué medida el procesamiento ha logrado limpiar la señal de distintas distorsiones, sobre todo la atmosférica. Para ello se hizo un análisis de la coherencia temporal antes y después de la estimación y remoción de la fase atmosférica.

Observando los histogramas de coherencia antes y después de la corrección atmosférica, se advierte una mejora en general en la coherencia temporal. Sin embargo, si se analiza con cuidado, este mejoramiento en verdad se ve sobre todo en las colas bajas de los histogramas: la cantidad de píxeles con muy baja coherencia (≤ 0.4) ha mejorado y han pasado a tener valores medios. En cambio, no se observa una mejora en la cantidad de píxeles con coherencia alta (> 0.7).

El hecho de haber trabajado con puntos que en algunos casos no presentaban un índice de estabilidad en su amplitud muy alto (entre 0.65 y 0.75) explica también el hecho de que tantos de ellos muestren una coherencia intermedia o baja.

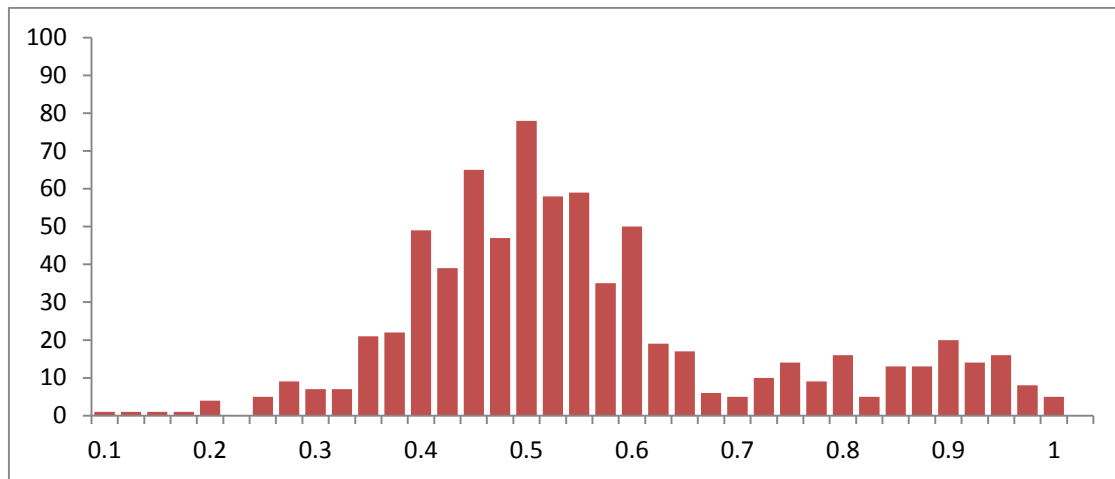


Figura 67: Histograma de distribución de coherencia antes de la corrección atmosférica.

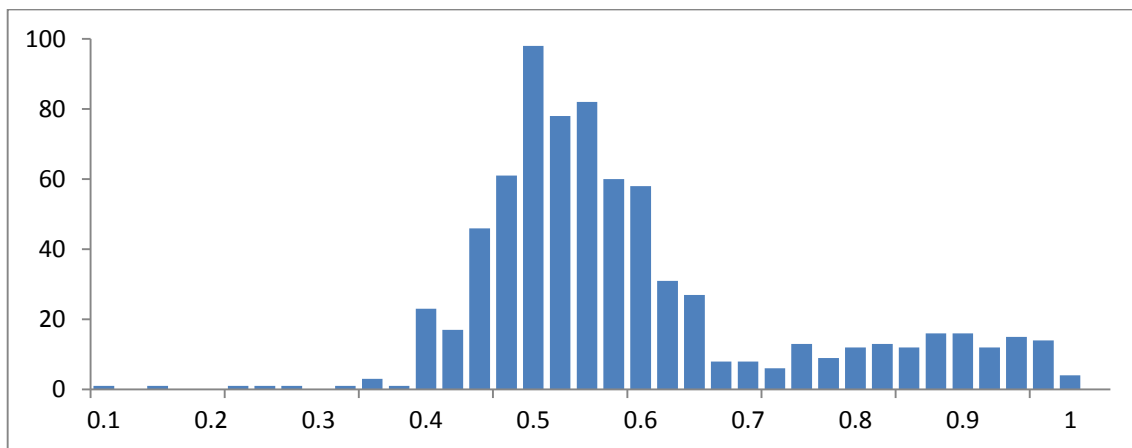


Figura 68: Histograma de distribución de coherencia después de la corrección atmosférica.

Zona	Punto	γ	γ_{atm}
Acumulación	4M	0.860	0.860
	6H	0.430	0.590
	8H	0.750	0.820
	11M	0.410	0.500
Transporte	13H	0.660	0.720
	53H	0.530	0.530
Alimentación	23M	0.480	0.490
	25M	0.515	0.515
	57M	0.430	0.480
	28M	0.440	0.500
	49M	0.470	0.590
	58H	0.770	0.770

Tabla 9: Coherencia temporal antes (γ) y después (γ_{atm}) de la corrección atmosférica para los Corner Reflectors identificados como PSC en el procesamiento.

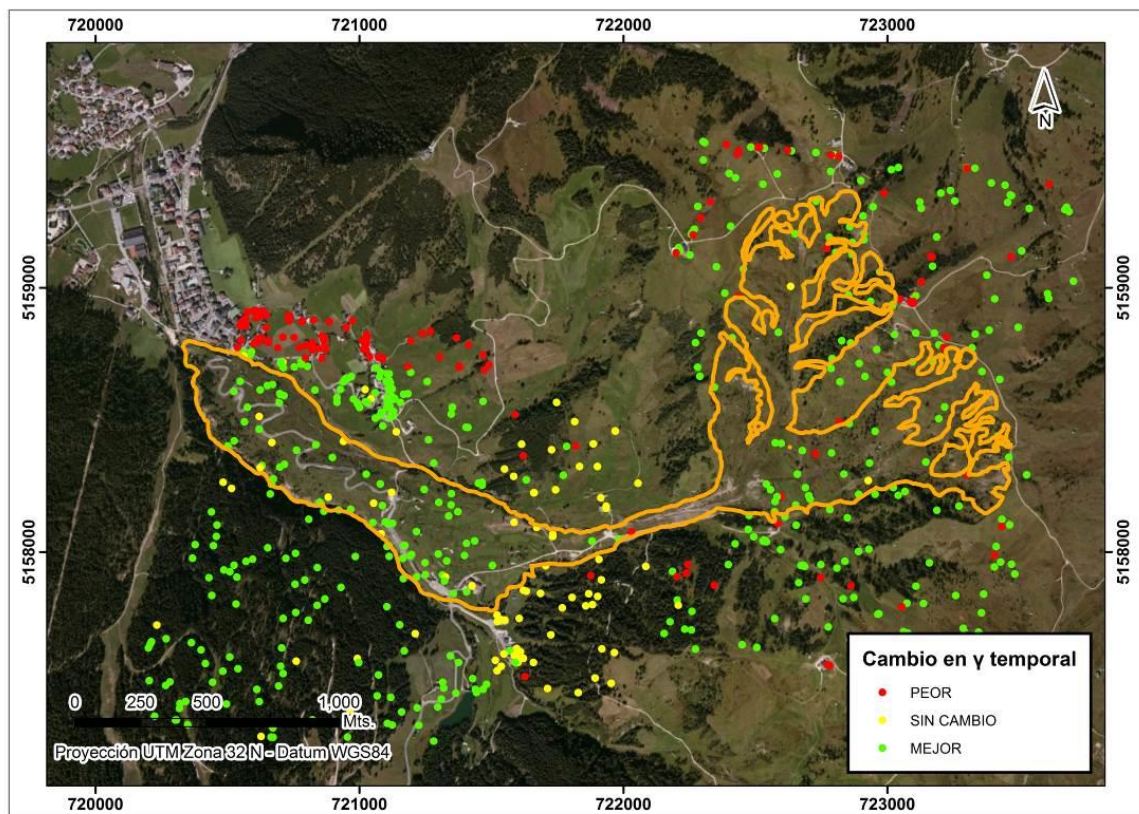


Figura 69: Estado del cambio en la coherencia temporal luego de la corrección atmosférica. Dentro del deslizamiento se pasó de una coherencia media de 0.54 a un promedio de 0.59.

7. PROCESAMIENTO SBAS

7.1. ELECCIÓN DE UMBRALES DE SEPARACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL

Como las imágenes Sentinel-1A fueron procesadas con el algoritmo SBAS, como paso previo se realizó un análisis de la línea de base tanto temporal como espacial entre las mismas, con el fin de determinar el mejor criterio para agruparlas en el subsiguiente procesamiento.

Para poder tener una idea global de la magnitud de estos valores entre las distintas imágenes disponibles, se construyeron grafos de conexiones para ambos conjuntos de datos sin restricciones. Esto es, en este paso preliminar se usaron para ver todas las posibles combinaciones de separación espacio-temporal.

En cuanto a la línea de base normal, los gráficos de distribución muestran que en ambos casos la misma no supera los 260 metros para ningún par de imágenes, concentrándose la mayor parte de los valores entre 0 y 150 metros. Teniendo en cuenta que los valores de línea de base críticos rondan en torno a los 4.900 metros (caso Ascendente) y 5.850 metros (caso Descendente), desde el punto de vista espacial estas imágenes muestran una buena configuración para monitorear deformaciones de terreno.

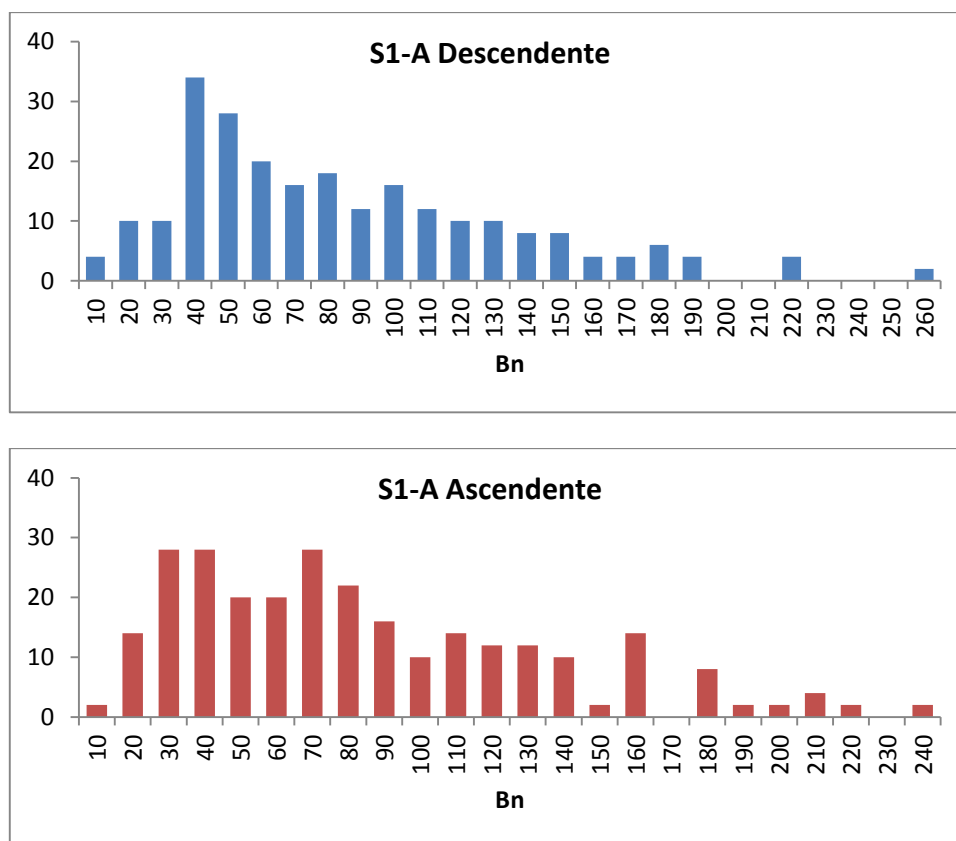


Figura 70: Histogramas de distribución de líneas de base espaciales para las imágenes Sentinel-1A

El análisis de la separación temporal resultó algo más complicado. Con un ciclo de repetición de 12 días, existen condiciones bajo las cuales la decorrelación temporal puede ser mayor o menor. Para

poder determinar la máxima línea de base temporal permitida se construyeron interferogramas entre imágenes a diferentes distancias en el tiempo y se computó la coherencia en cada caso.

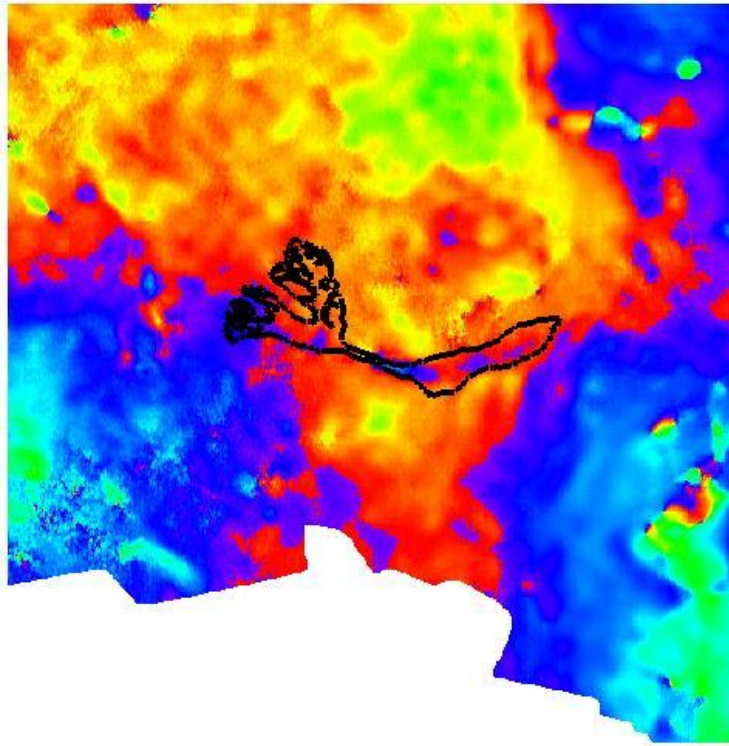


Figura 71: Interferograma diferencial para imágenes Sentinel-1A descendentes. $B_{temp} = 12$ días; $B_N = 5.54$ m. Coherencia media dentro del deslizamiento: 0,602. Fechas master/slave: 01-09-2015/13-09-2015.

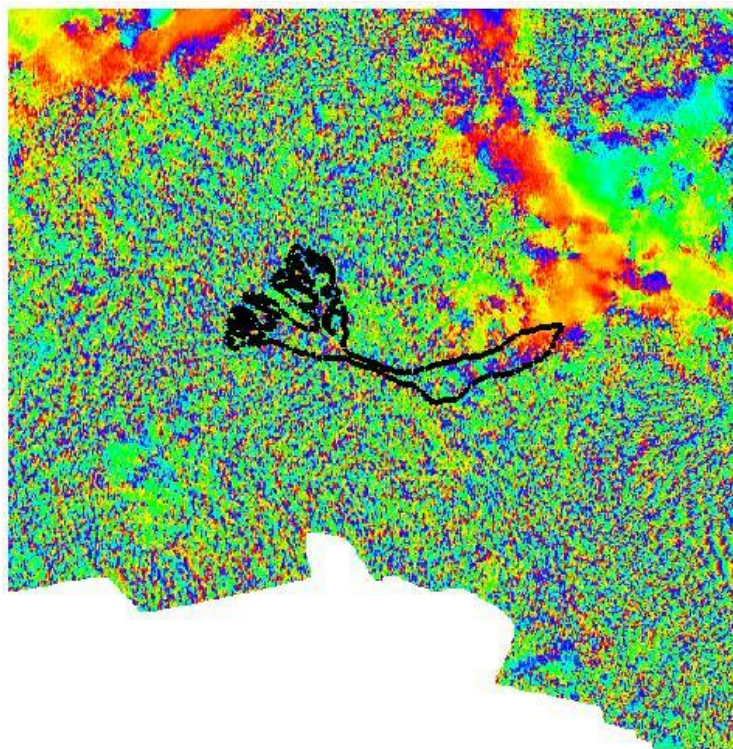


Figura 72: Interferograma diferencial para imágenes Sentinel-1A descendentes. $B_{temp} = 24$ días; $B_N = 224.25$ m. Coherencia media dentro del deslizamiento: 0,363. Fechas master/slave: 22-04-2015/04-05-2015.

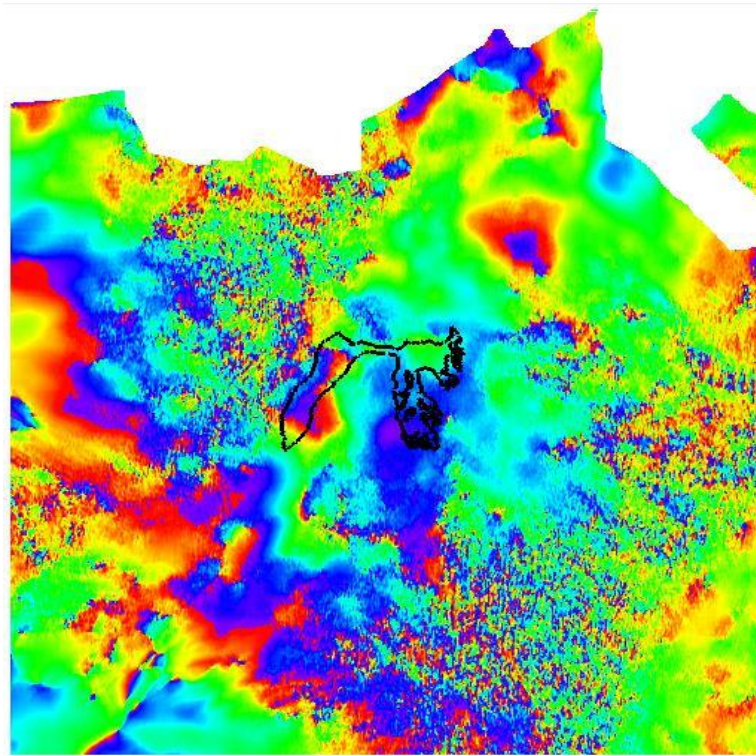


Figura 73: Interferograma diferencial para imágenes Sentinel-1A ascendentes. Btemp = 36 días; $B_N = 95.15$ m. Coherencia media dentro del deslizamiento: 0,52. Fechas master/slave: 04-08-2015/28-08-2015.

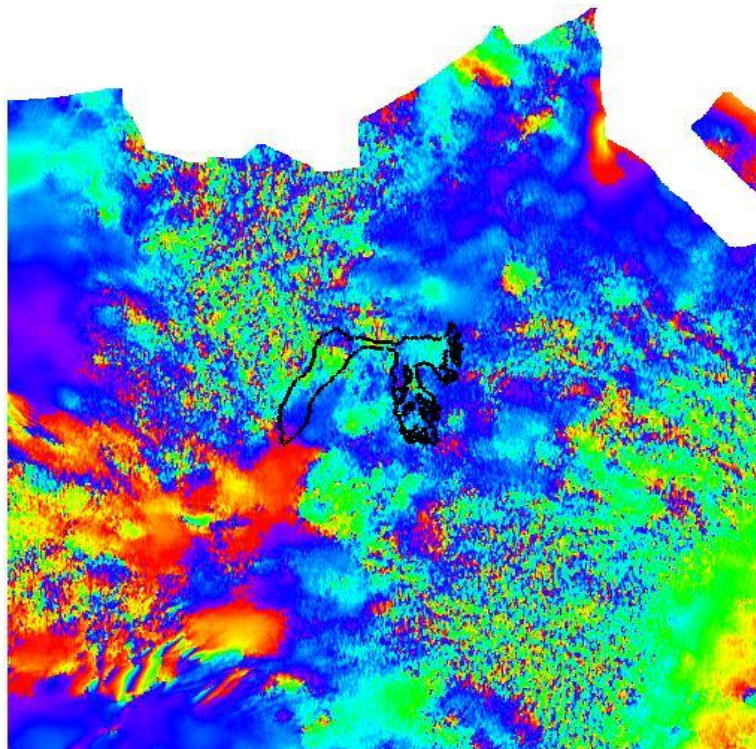


Figura 74: Interferograma diferencial para imágenes Sentinel-1A ascendentes. Btemp = 48 días; $B_N = 76.62$ m. Coherencia media dentro del deslizamiento: 0,47. Fechas master/slave: 09-09-2015/23-07-2015.

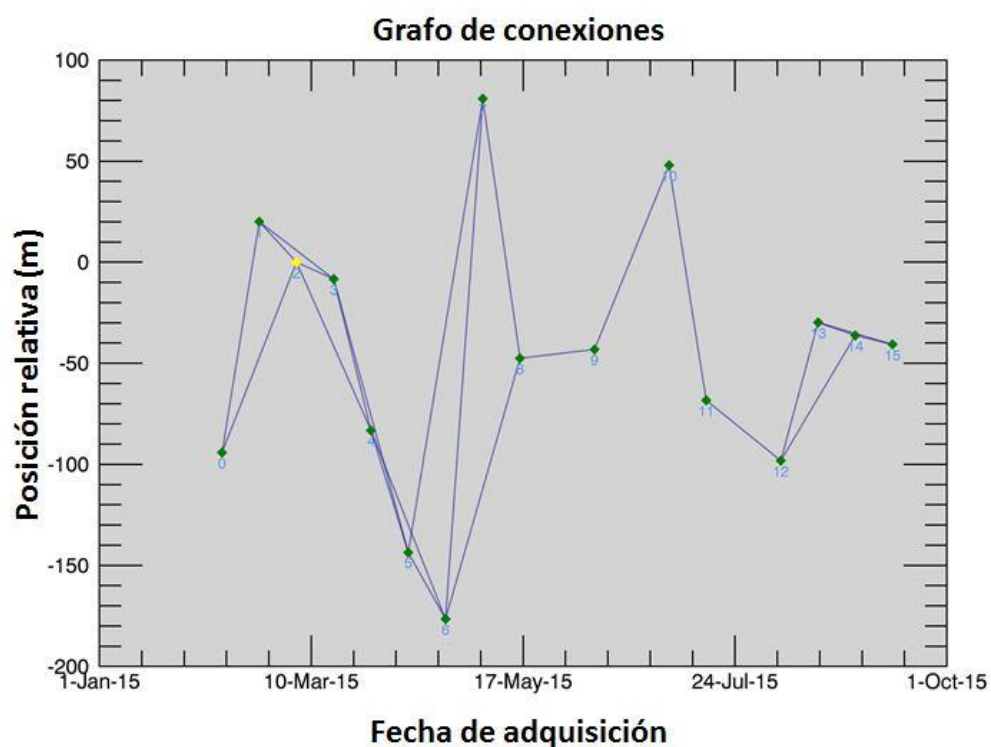


Figura 75: Grafo de conexiones para imágenes Sentinel-1A Descendentes, mostrando todas las combinaciones posibles empleando un umbral de $B_{TEMP} = 24$ días.

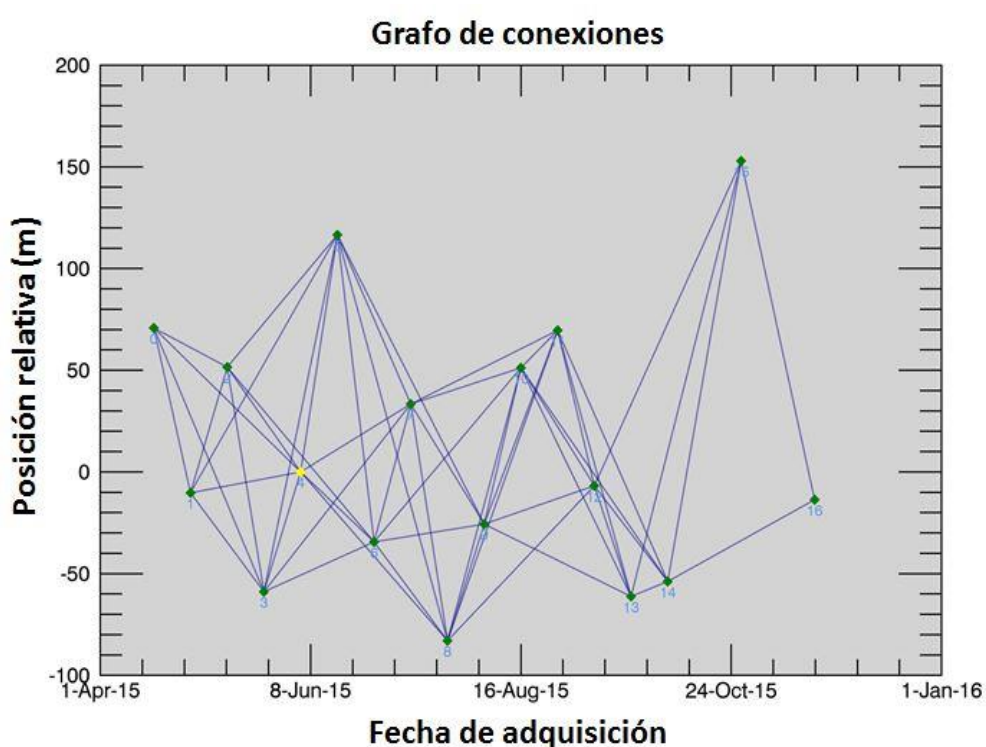


Figura 76: Grafo de conexiones para imágenes Sentinel-1A Ascendentes, mostrando todas las combinaciones posibles empleando un umbral de $B_{TEMP} = 48$ días.

En el caso de las imágenes descendentes, se observó que los interferogramas mostraban coherencia aceptable (mayor a 0.4) para la zona del deslizamiento con líneas temporales de hasta 24 días. Luego

de ese límite temporal, la decorrelación era muy grande, lo cual no permitiría extraer información útil de casi ningún pixel. Por lo tanto, como umbral de B_{Temp} para las imágenes descendentes, se decidió emplear un rango de 24 días.

Al revisar algunos interferogramas de las imágenes ascendentes, se advirtió que la decorrelación se daba a partir de intervalos de tiempo algo más largos. De hecho algunos de los interferogramas probados con $B_{Temp} = 24$ días e incluso con 36 y 48 días arrojaron un nivel aceptable de coherencia. Es por ello que para este conjunto de imágenes se decidió relajar la restricción temporal para conectar imágenes, y se fijó el umbral de B_{Temp} en 48 días.

Empleando estos umbrales de separación espacial y temporal, se construyeron los grafos de conexiones que guiarían el procesamiento interferométrico subsiguiente. Al ser mayor el umbral de separación temporal para las imágenes ascendentes, la cantidad de interferogramas a procesar fue de 69, mientras que en el caso de las descendentes fue de solo 26.

Este desbalance en el número de interferogramas entre ambos conjuntos se mantuvo incluso después de descartar una gran cantidad de interferogramas de la serie ascendente, lo cual contribuye a explicar los resultados del procesamiento que en adelante se comentarán.

7.2. PROCESADO INTERFEROMÉTRICO

A las 17 imágenes ascendentes y a las 16 descendentes se les aplicó un *Multilooking*, con el objetivo de lograr una primera eliminación de ruido en la fase y mejorar la coherencia. Sarscape ejecuta el *Multilooking* cuando se forman los interferogramas: Dada la resolución de las imágenes Sentinel empleadas (5 x 20 metros), se aplicó un *Multilooking* de 4 en rango por 1 en azimut. De esa manera se definió además la resolución espacial final de los productos a generar, que sería de 20 x 20 metros.

Con los interferogramas ya formados se calculó la coherencia para cada uno y se les aplicó un filtrado adaptativo de Goldstein, cuya lógica de funcionamiento responde a lo expuesto en la sección 3.4 .

Dos parámetros definen la forma en que se implementa el filtrado en Sarscape : el tamaño del *kernel* o ventana de filtrado, y los coeficientes *Alpha*. Estos coeficientes se aplican de manera diferencial según la coherencia del pixel: Existe un coeficiente α máximo que se aplica cuando la coherencia es 0 (máximo filtrado) y un α mínimo empleado cuando la coherencia es 1 (mínimo filtrado). En el caso de Corvara, y basado en experiencias de procesamiento anteriores, se empleó una ventana de filtrado de 32x32, un $\alpha_{max} = 3$ y un $\alpha_{Min} = 1,5$.

El desenrollado de fase se realizó sobre estos interferogramas ya filtrados, aplicando el algoritmo *Minimun Cost Flow* (Constantini, 1998) y desechándose aquellos píxeles con coherencia espacial menor a 0.4 en el caso ascendente, y de 0.2 en el caso descendente. Esto se debe a que el conjunto de imágenes descendentes generó una serie de interferogramas con mucho más ruido que las imágenes ascendentes, y en consecuencia con mucho menor coherencia espacial. Emplear un umbral de 0.4 para el desenrollado hubiera implicado desechar prácticamente todos los píxeles, no

pudiéndose obtener casi ningún resultado. De todos modos, como se puede apreciar en la figura 77, los píxeles ocupados por Corner Reflectors (empleados en adelante como puntos de validación) presentaron una buena coherencia espacial, particularmente en el caso descendente. Esto se debe a que los Corner Reflectors estaban orientados para la geometría de las imágenes Cosmo Skymed, similar a la de las Sentinel de órbita descendente.

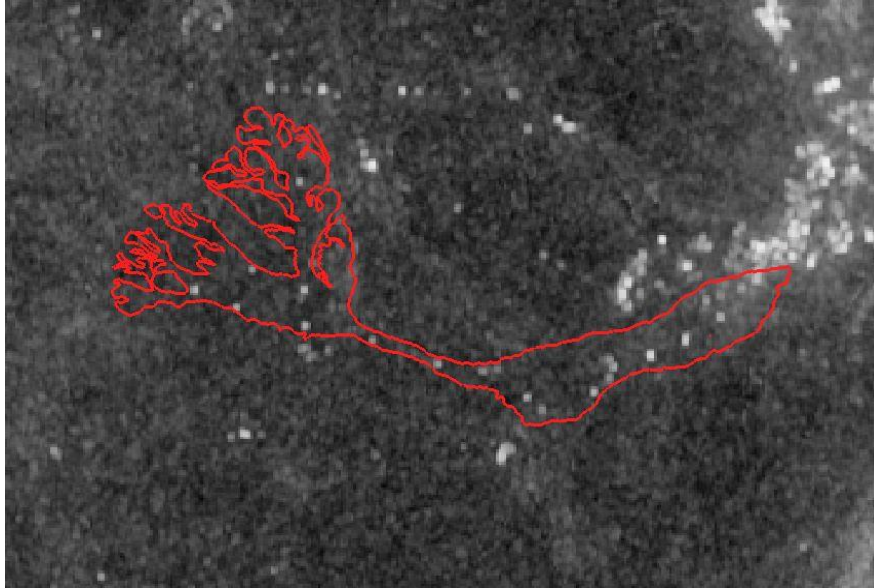


Figura 77: Mapa de coherencia espacial promedio en Slant Range. Órbita Descendente. Destacan las locaciones de los Corner Reflectors como puntos de alta coherencia. Valor mínimo: 0.28 ; Valor Máximo: 0.86; Valor promedio dentro del deslizamiento: 0.44.

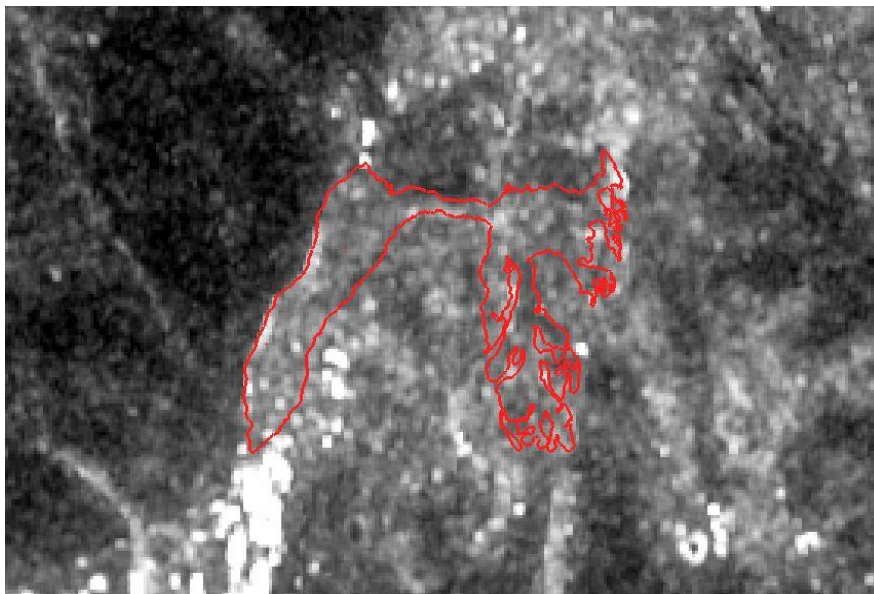


Figura 78: Mapa de coherencia espacial promedio en Slant Range. Órbita Ascendente. Se observa en general una coherencia más alta y menos concentrada espacialmente como en el caso descendente. Valor mínimo: 0.41 ; Valor Máximo: 0.73; Valor promedio dentro del deslizamiento: 0.52.

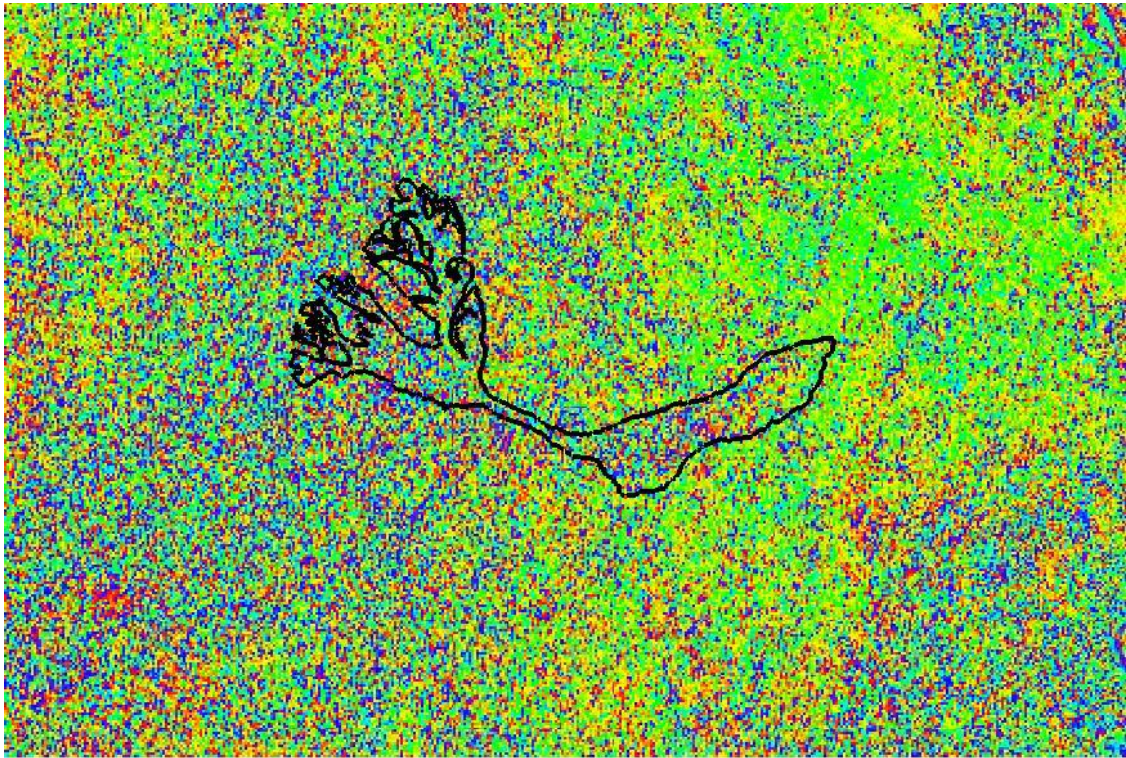


Figura 79: Interferograma diferencial antes de ser filtrado. Fecha Imagen Master 10/04/2015; Fecha imagen Slave 22/04/2015. Órbita Descendente.

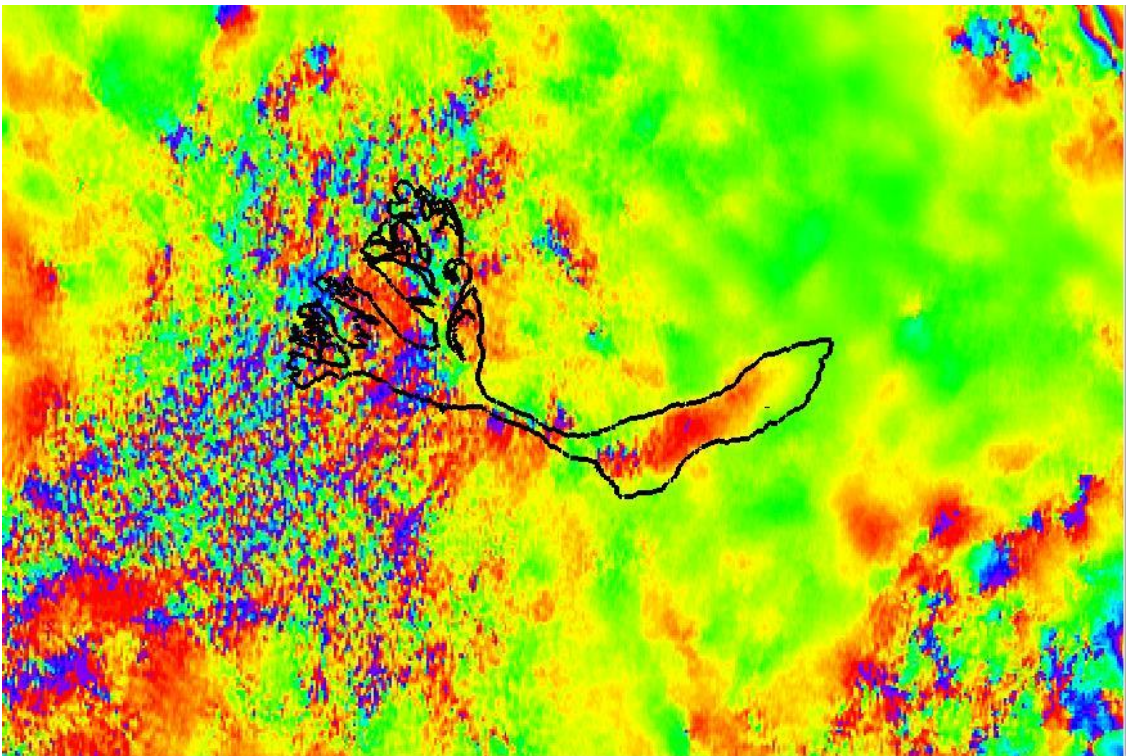


Figura 80: Interferograma filtrado. Fecha Imagen Master 10/04/2015; Fecha imagen Slave 22/04/2015. Órbita Descendente.

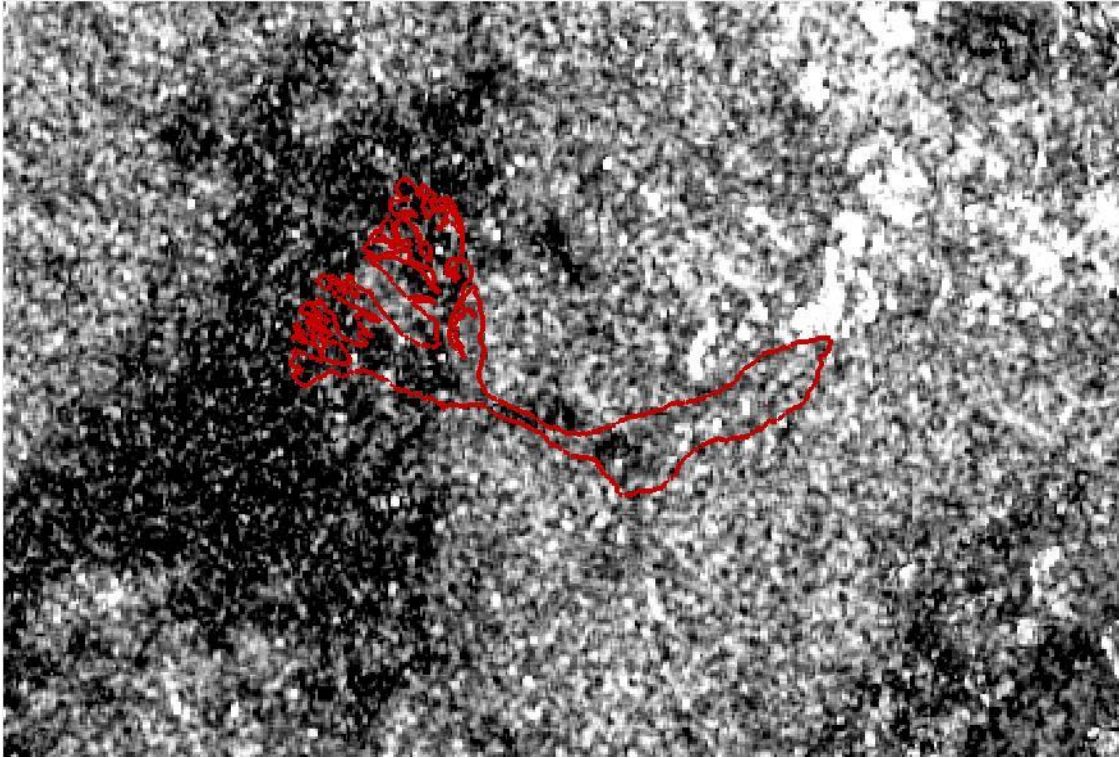


Figura 81: Mapa de coherencia espacial para un interferograma. Valores cercanos a 0 aparecen oscuros, valores cercanos a 1 aparecen más brillantes. Fecha Imagen Master 10/04/2015; Fecha imagen Slave 22/04/2015. Órbita Descendente.

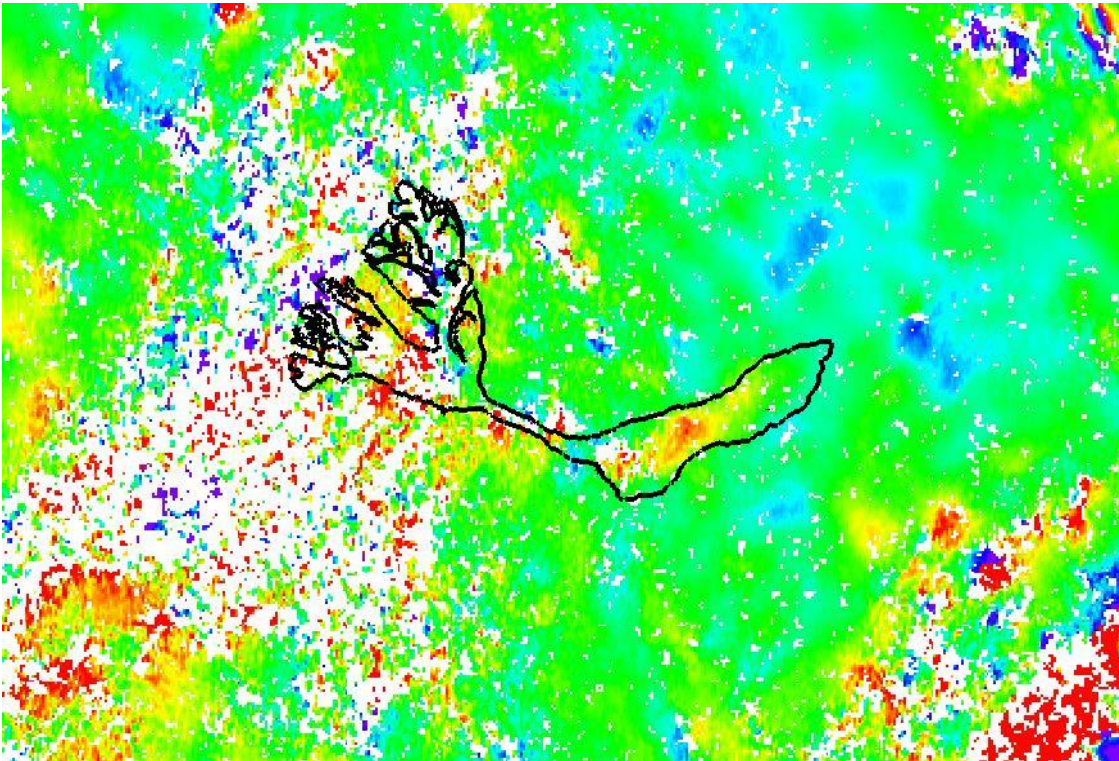


Figura 82: Interferograma desenrollado. Fecha Imagen Master 10/04/2015; Fecha imagen Slave 22/04/2015. Órbita Descendente. Los píxeles con coherencia menor a 0.2 han sido descartados.

Antes de aplicar la corrección orbital y de remover rampas residuales en los interferogramas, se hizo una nueva revisión para descartar aquellos donde la decorrelación, temporal o geométrica, fuera muy fuerte. Este paso es necesario debido a que, si bien se definieron inicialmente umbrales máximos de línea de base, eso no quita que existan interferogramas dentro de esos rangos que presentan demasiado ruido.

La redundancia en el número de conexiones y la cantidad de interferogramas a procesar son factores importantes en un procesamiento tipo SBAS. A costa de no perder esa redundancia muchas veces se conservan interferogramas que en otros contextos serían descartados. Es imperioso llegar a un buen equilibrio entre cantidad y calidad que debe evaluarse según las características de cada conjunto de datos.

Como resultado de la revisión, se descartaron 36 interferogramas en el caso de las imágenes ascendentes y 6 interferogramas en el caso de las descendentes. De esa manera, quedaron 33 pares interferométricos ascendentes y 20 descendentes. En el caso ascendente cada imagen quedó conectada en promedio con otras 4, mientras que en el caso descendente el número se redujo a 2,5.

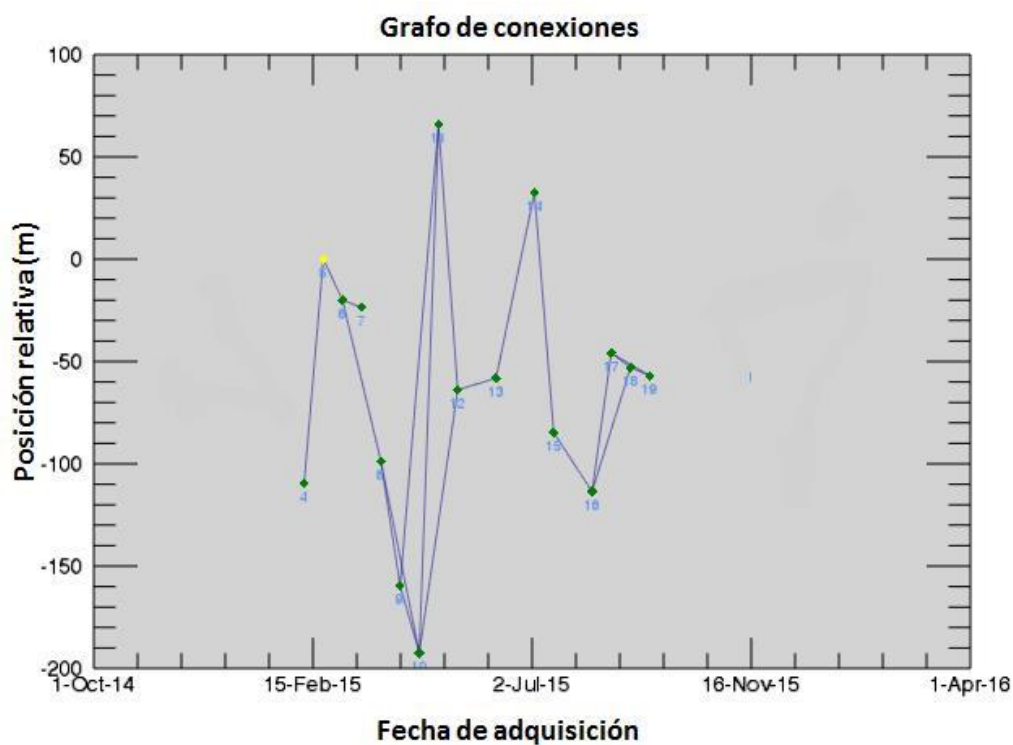


Figura 83: Grafo de conexiones para las imágenes descendentes luego de descartar interferogramas muy ruidosos.

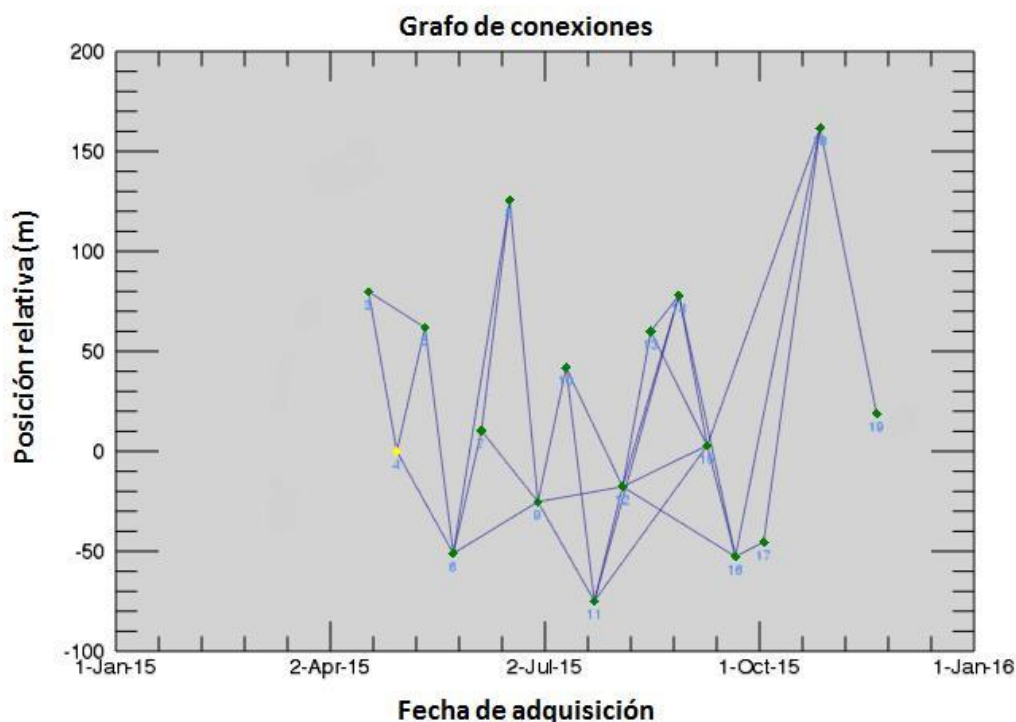


Figura 84: Grafo de conexiones para las imágenes ascendentes luego de descartar interferogramas muy ruidosos.

7.3. INVERSIÓN Y ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

Al realizar la primera inversión es necesario indicar qué modelo de desplazamiento se supone para el área de estudio. El mismo puede ser lineal, donde se estimarán altura y velocidad; cuadrático, donde a esos parámetros se agrega la estimación de la aceleración; y cúbico donde a todos los parámetros mencionados se le suma una estimación de la variación de la aceleración.

Sin embargo, los modelos que incluyen aceleración y comportamientos no lineales requieren una alta redundancia de conexiones entre imágenes, y una coherencia muy buena, condiciones que no se dan para Corvara. Es por ello que se optó, al igual que con el procesamiento PS, por un modelo lineal, más estable y robusto.

Para la remoción de los artefactos atmosféricos se aplicó un filtro espacial LP de 300 metros y un filtro temporal HP de 180 días. La ventana espacial de 300 metros, que implica un filtro más fuerte (por defecto el programa sugiere una ventana de 1200 metros) se explica por el hecho de que hay una importante variación topográfica en el sector y en consecuencia una mayor variación espacial de la componente atmosférica. Como salida final de este procesamiento, lo obtenido fue un mapa de deformación para toda el área del deslizamiento. Debe aclararse que los píxeles con coherencia por debajo de 0.4 fueron descartados e interpolados desde celdas vecinas.

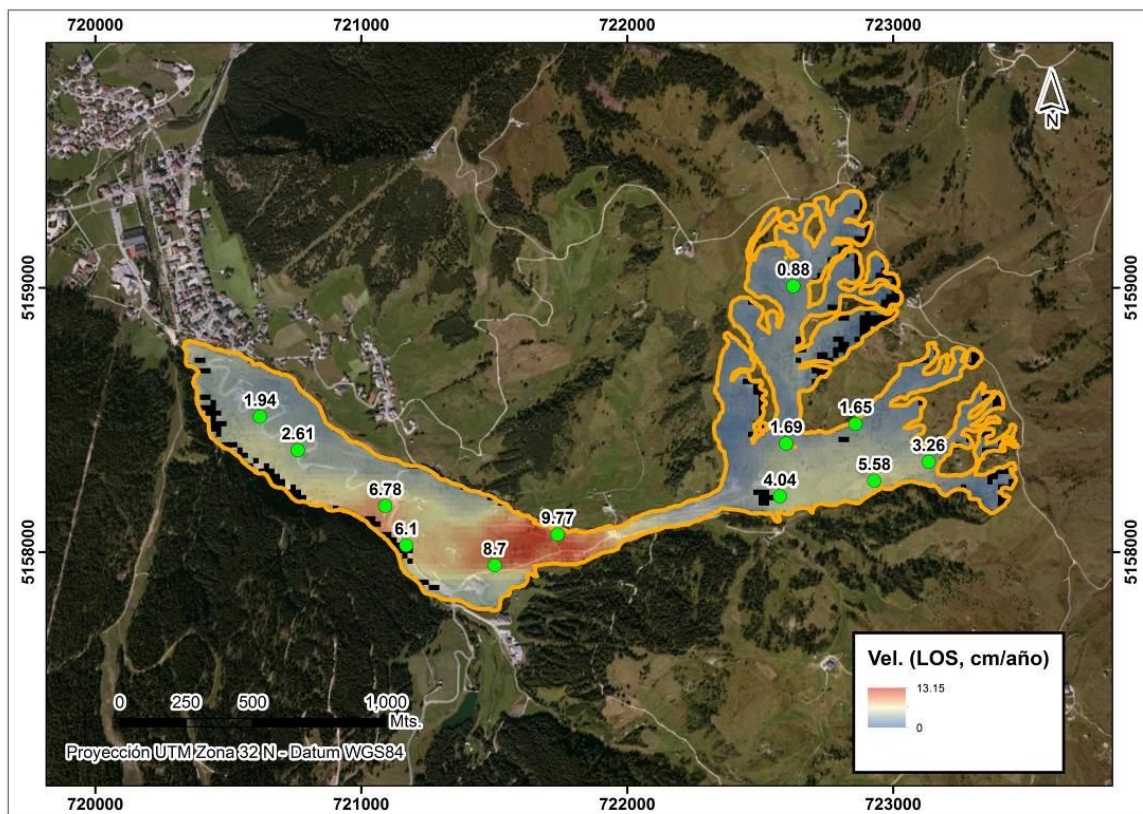


Figura 85: Mapa de deformación para el deslizamiento de Corvara derivado de las imágenes Sentinel Ascendentes. Se muestra la velocidad calculada para cada uno de los Corner Reflectors. Las áreas afectadas por Layover han sido marcadas en negro.

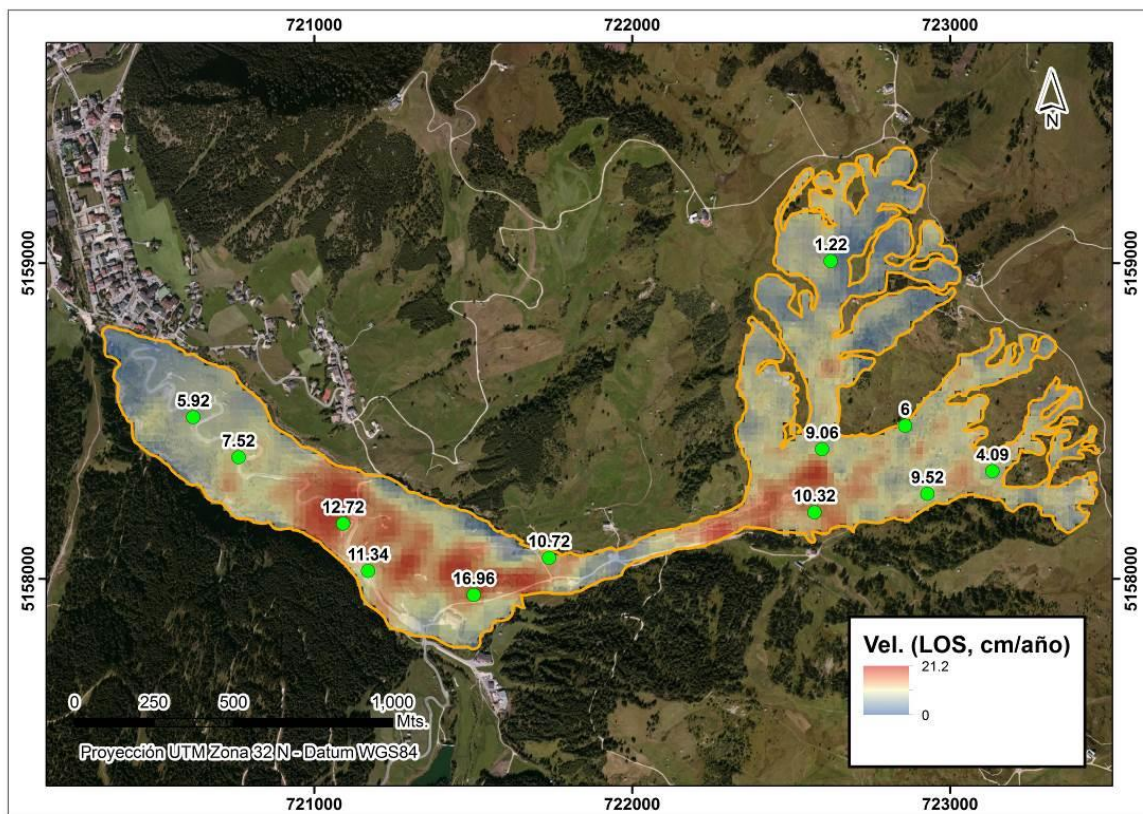


Figura 86: Mapa de deformación para el deslizamiento de Corvara derivado de las imágenes Sentinel Descendentes. Se muestra la velocidad calculada para cada uno de los Corner Reflectors.

Área de acumulación – S1A Descendente

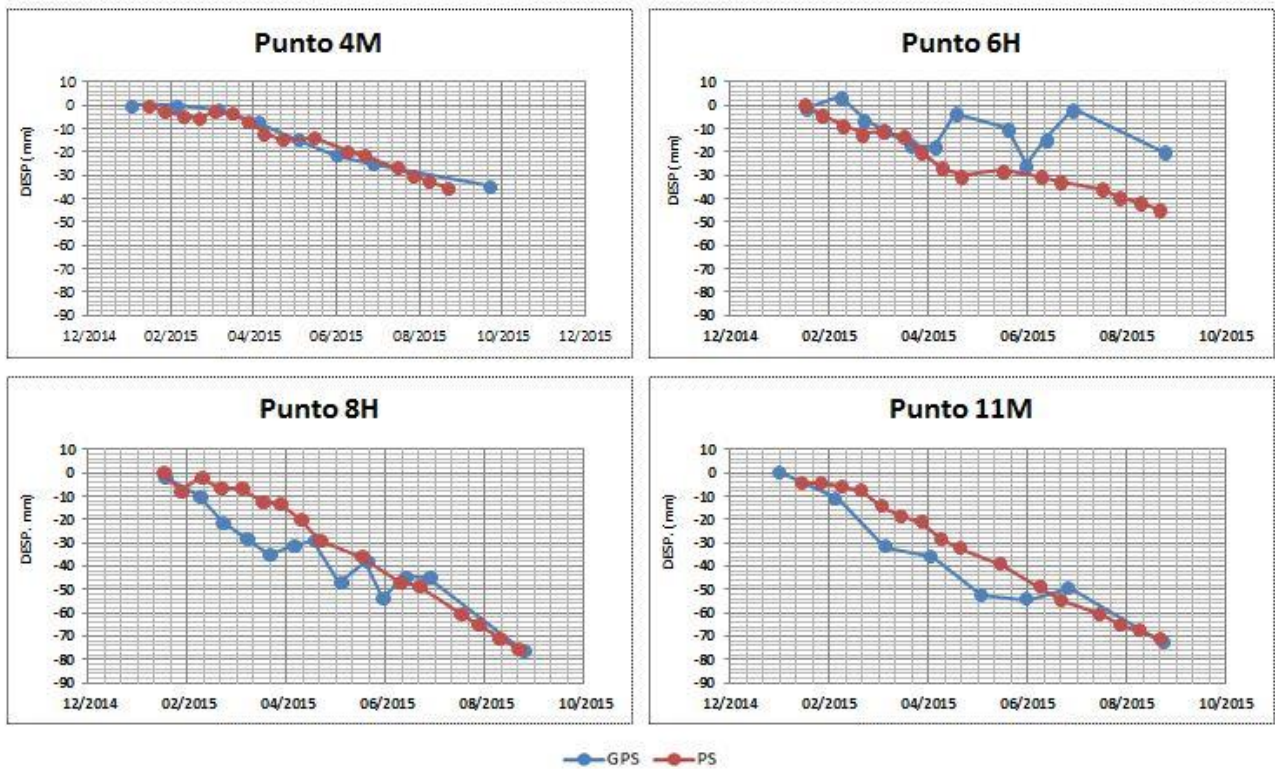


Figura 87: Series de deformación para la zona de acumulación. Imágenes Sentinel-1A descendentes.

Área de acumulación – S1A Ascendente

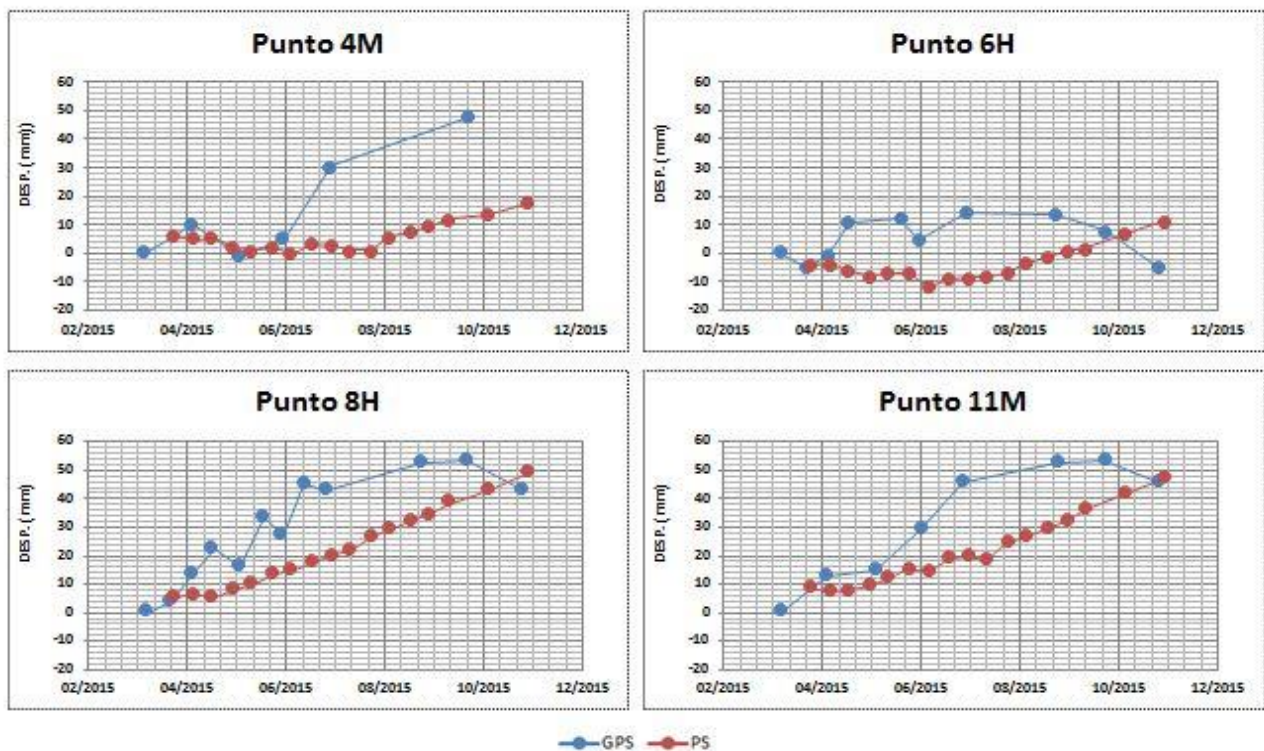


Figura 88: Series de deformación para la zona de acumulación. Imágenes Sentinel-1A ascendentes.

Área de transporte – S1A Descendente

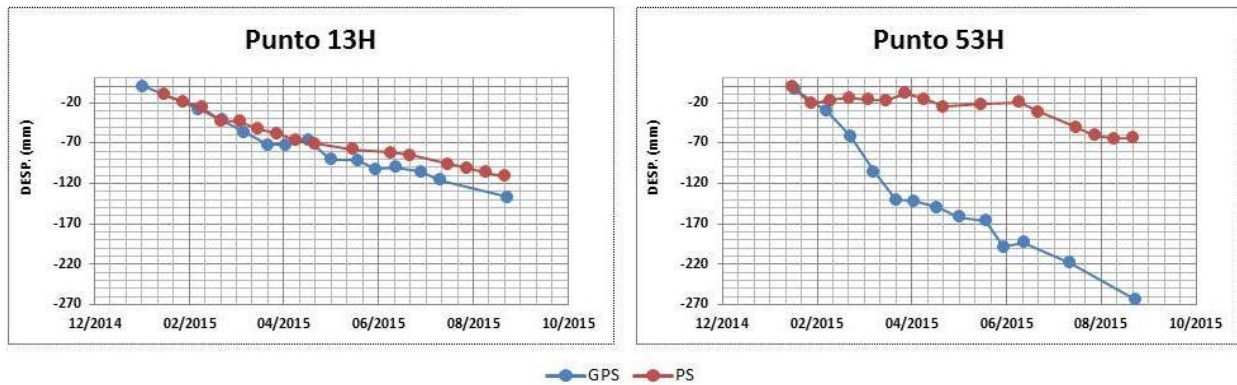


Figura 89: Series de deformación para la zona de transporte. Imágenes Sentinel-1A descendentes.

Área de alimentación– S1A Descendente

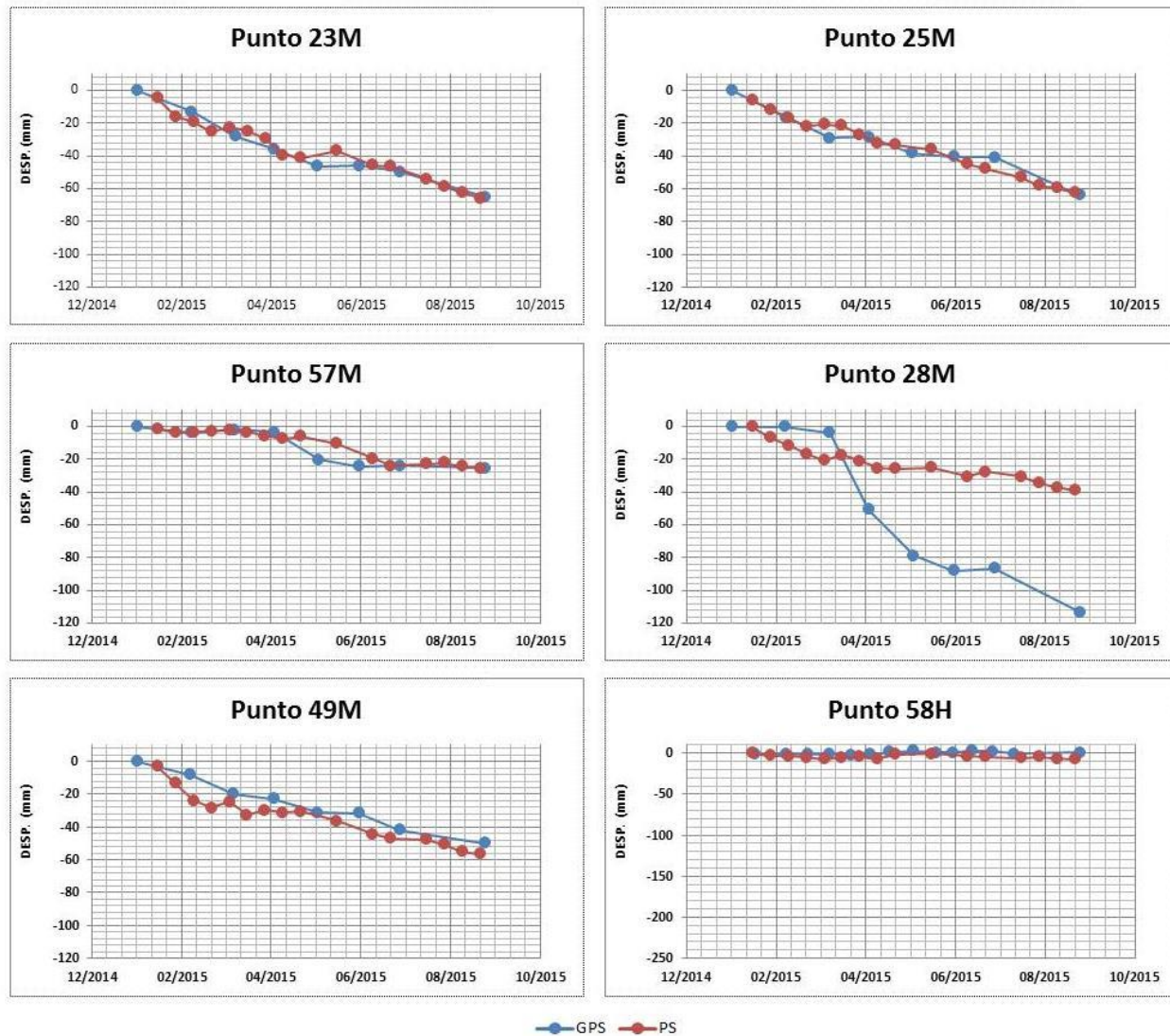


Figura 90: Series de deformación para la zona de alimentación. Imágenes Sentinel-1A descendentes.

Área de transporte – S1A Ascendente

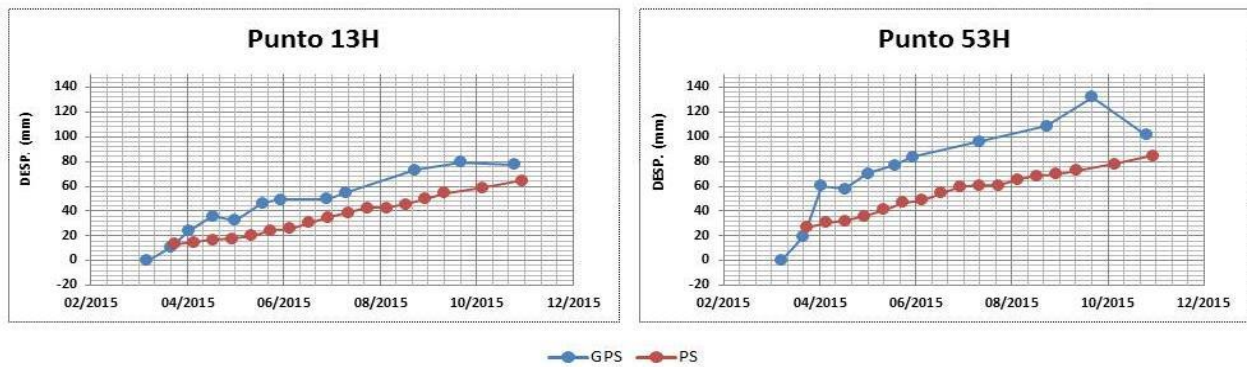


Figura 91: Series de deformación para la zona de transporte. Imágenes Sentinel-1A ascendentes.

Área de alimentación– S1A Ascendente

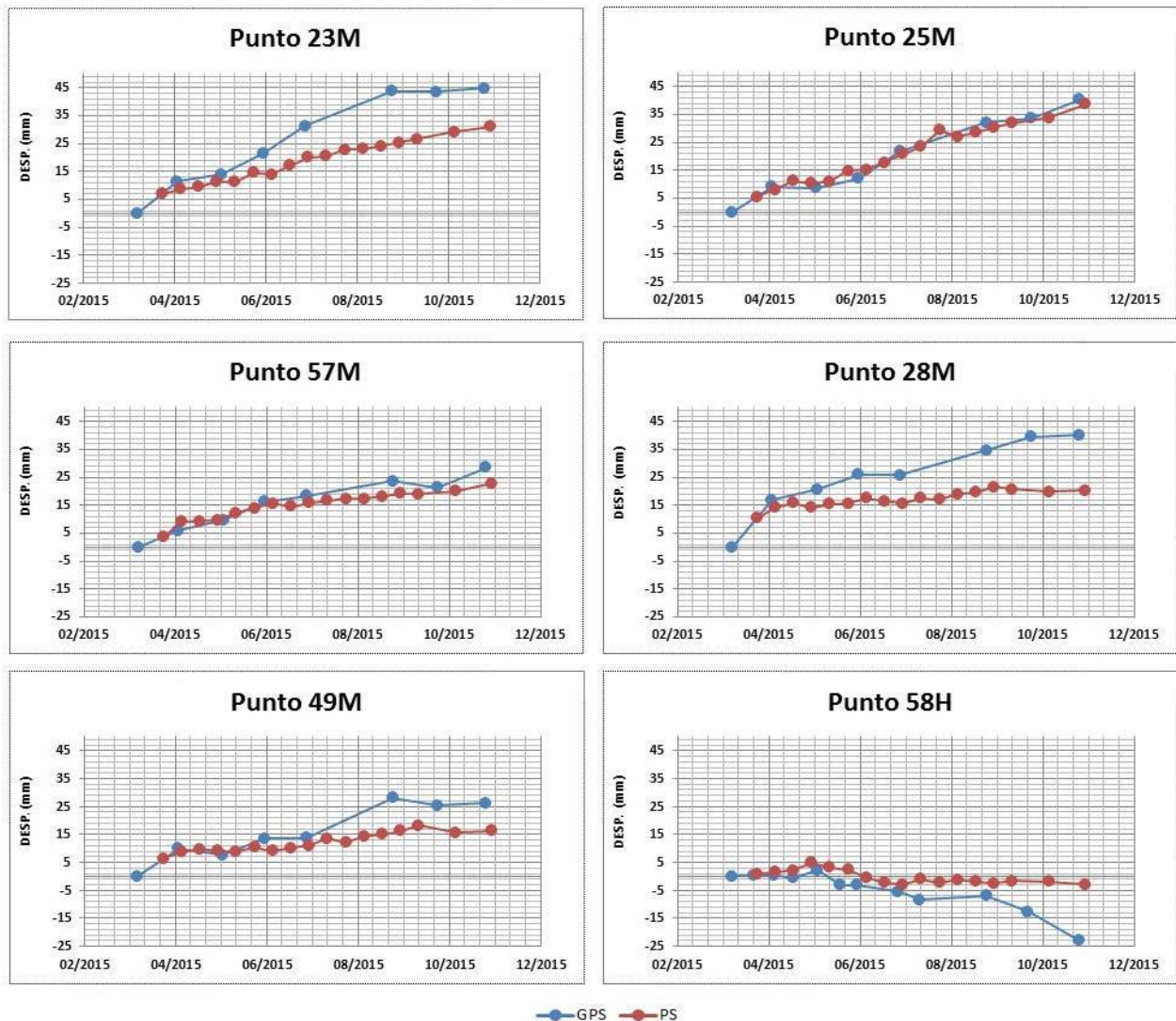


Figura 92: Series de deformación para la zona de alimentación. Imágenes Sentinel-1A ascendentes.

7.4. VALIDACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Como puede apreciarse, las velocidades derivadas con las imágenes en órbita descendente son mayores a las velocidades obtenidas con las imágenes en órbita ascendente. De la tabla 10 se desprende una velocidad estimada promedio de 8.83 cm/año para el caso descendente y de 4.4 cm/año para el caso ascendente. Las velocidades de las series GPS proyectadas a LOS para cada geometría dan un promedio de 12.27 y 6.342 cm/año respectivamente.

SENTINEL-1A ASCENDENTE					
Zona	Punto	Vel. GPS (cm/año)	Vel. SBAS (cm/año)	μ (cm)	σ (cm)
Acumulación	4M	8.078	1.935	0.638	1.503
	6H	0.125	2.612	0.414	0.995
	8H	6.37	6.781	0.58	0.664
	11M	6.623	6.101	0.492	0.803
Transporte	13H	11.26	8.698	0.661	0.393
	53H	13.231	9.765	0.908	0.686
Alimentación	23M	6.608	4.042	0.473	0.559
	25M	6.053	5.581	0.471	0.198
	57M	4.199	3.264	0.384	0.243
	28M	5.135	1.655	0.424	0.507
	49M	3.427	1.694	0.366	0.427
	58H	3.922	0.875	0.306	0.59
μ medio (cm)		0.51			
σ media (cm)		0.63			
SENTINEL-1A DESCENDENTE					
Zona	Punto	Vel. GPS (cm/año)	Vel. SBAS (cm/año)	μ (cm)	σ (cm)
Acumulación	4M	5.192	5.918	0.191	0.271
	6H	3.283	7.515	0.539	1.035
	8H	12.67	12.722	0.358	0.893
	11M	11.438	11.339	0.3	0.726
Transporte	13H	21.224	16.959	0.396	0.882
	53H	44.219	10.072	1.519	5.372
Alimentación	23M	10.018	10.321	0.334	0.439
	25M	9.564	9.519	0.266	0.401
	57M	4.071	4.09	0.237	0.363
	28M	18.851	5.999	0.768	3.241
	49M	7.878	9.055	0.376	0.353
	58H	0.117	1.218	0.198	0.189
μ medio (cm)		0.45			
σ media (cm)		1.18			

Tabla 10: Resultados y validación del procesamiento SBAS

Para las imágenes en órbita descendente se observa que la magnitud del error es en general más grande cuanto mayor ha sido el movimiento del punto, como ocurre con los resultados del procesamiento PSI con Cosmo Skmed. En efecto, al calcular la correlación entre σ y el desplazamiento de cada punto se obtiene un coeficiente R^2 de **0,75**. Para las imágenes en órbita ascendente se tiene una velocidad y error estándar promedio menores que para el caso descendente. Sin embargo, no se observa ninguna clara relación entre σ y velocidad o desplazamiento en cada punto ($R^2 \sim 0$).

Más allá de que los períodos cubiertos por cada conjunto de datos no son equivalentes, la principal diferencia entre estos resultados debe buscarse en el nivel de ruido presente en los interferogramas en cada caso. Como se ha mencionado en la sección teórica, la efectividad del modelo empleado para estimar los parámetros para remover el ruido en la señal debe medirse a través de la coherencia temporal. Si se observan los mapas de coherencia temporal antes y después de la remoción atmosférica, se verifica que hubo una mejora en el ruido. Sin embargo, para los puntos de control este ruido se mantiene más alto en las imágenes descendentes que en las ascendentes, como se observa en la tabla 11.

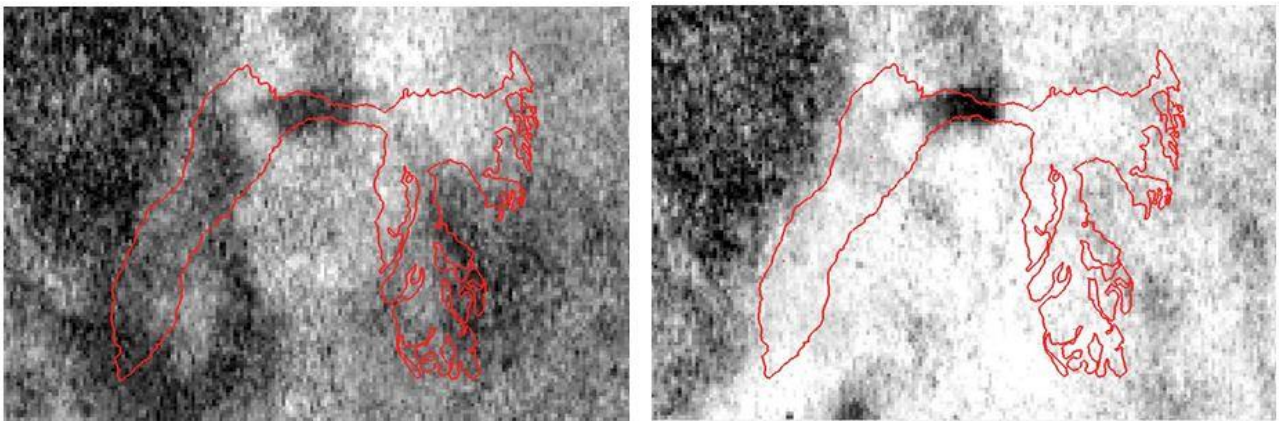


Figura 93: Mapa de coherencia temporal en *Slant Range* antes y después de la corrección atmosférica. Imágenes Sentinel-1A en órbita ascendente. Se muestran los límites del deslizamiento: dentro del mismo la coherencia temporal promedio aumentó de 0.41 a 0.74.

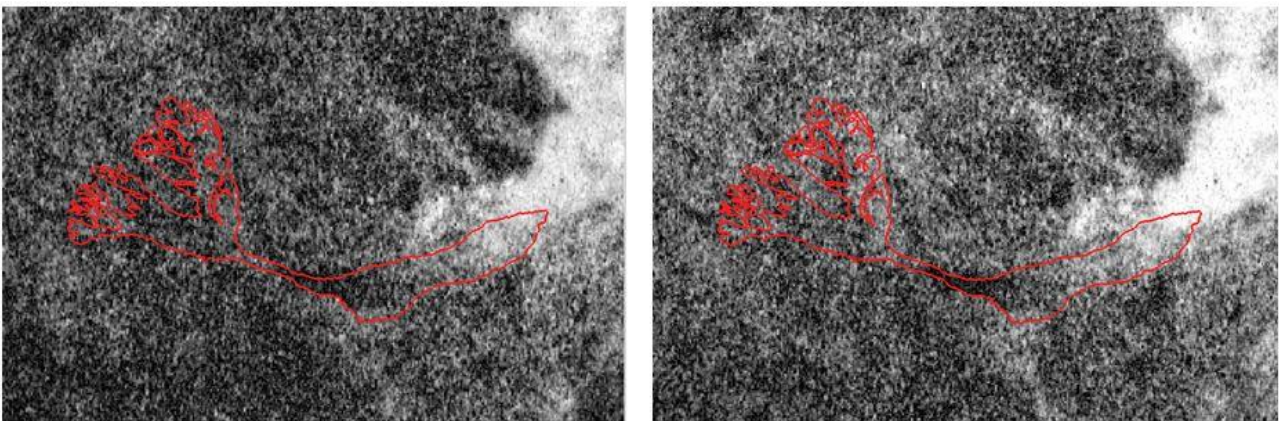


Figura 94: Mapa de coherencia temporal en *Slant Range* antes y después de la corrección atmosférica. Imágenes Sentinel-1A en órbita ascendente. Se muestran los límites del deslizamiento: dentro del mismo la coherencia temporal promedio aumentó de 0.34 a 0.42.

Órbita	Ascendente		Descendente	
Punto	γ	γ_{atm}	γ	γ_{atm}
4M	0.28	0.75	0.73	0.77
6H	0.37	0.75	0.64	0.70
8H	0.34	0.82	0.46	0.54
11M	0.41	0.76	0.53	0.66
13H	0.54	0.75	0.12	0.23
53H	0.33	0.42	0.12	0.24
23M	0.62	0.80	0.28	0.50
25M	0.56	0.74	0.24	0.41
57M	0.53	0.68	0.55	0.75
28M	0.60	0.79	0.32	0.38
49M	0.49	0.78	0.32	0.44
58H	0.45	0.79	0.37	0.66

Tabla 11: Valores de coherencia temporal antes (γ) y después de la corrección atmosférica (γ_{atm}) para cada uno de los píxeles ocupados por los puntos de control. En ambos casos se observa una mejora pero la coherencia temporal, en general, sigue siendo más alta para el caso ascendente.

Otro factor que permite explicar los diferentes resultados es la sensibilidad de cada geometría al movimiento del deslizamiento. En función de lo expuesto en la figura 46, dada la dirección de los desplazamientos producidos en Corvara, es de esperar que la geometría descendente capte dichos cambios en mayor medida que una ascendente. Esto se verifica al comparar el vector 2D (plano) de desplazamiento de cada uno de los Corner Reflectors con su correspondiente proyección a la línea de vista del sensor.

Órbita	Ascendente		Descendente	
Punto	Vel. 2D (cm/año)	Vel. LOS (cm/año)	Vel. 2D (cm/año)	Vel. LOS (cm/año)
4M	18.69	8.90	29.65	-4.79
6H	13.36	-0.78	14.56	-3.24
8H	22.06	6.89	23.42	-12.61
11M	18.62	7.31	21.01	-11.50
13H	30.53	12.38	35.59	-21.65
53H	106.03	16.22	119.72	-43.98
23M	16.31	7.18	16.45	-10.18
25M	16.89	6.48	16.61	-10.04
57M	13.47	4.56	9.60	-4.01
28M	35.09	6.45	24.09	-17.77
49M	11.03	4.19	11.61	-7.87
58H	20.40	-3.67	14.05	0.40
R²	0.43		0.83	

Tabla 12: Vector de velocidad 2D y correspondiente proyección a LOS, para cada punto y para cada configuración geométrica empleada con las imágenes Sentinel-1A. Se ha calculado el coeficiente de correlación ajustado R^2 entre el vector 2D y su proyección a LOS, evidenciándose que la geometría descendente es más sensible a captar el movimiento del deslizamiento, respecto a la ascendente.

8. DISCUSIÓN Y COMENTARIOS FINALES

8.1. ¿PS O SBAS? ¿COSMO SKYMED O SENTINEL-1A?

En la siguiente tabla se resumen las principales características de las imágenes empleadas en el procesamiento y sus resultados:

Sensor	Cosmo Skymed	Sentinel 1A (DESC)	Sentinel 1A (ASC)
λ (cm)	3	5	5
N Imágenes	27	16	17
Período cubierto	04/2014 - 08/2015	02/2015 - 09/2015	04/2015 - 11/2015
Vel. Media - cm/año (GPS - LOS)	23.3	12.35	6.25
Vel. Media - cm/año (INSAR - LOS)	22.2	8.72	4.42
μ (cm)	0.85	0.45	0.51
σ (cm)	1.97	1.18	0.63

Tabla 13: Resumen del procesamiento PSI y SBAS

Lo primero que se observa al mirar la información es que los tres conjuntos de imágenes no cubren exactamente los mismos períodos de tiempo, y que a su vez estos no presentan la misma duración (16 meses en el caso de las Cosmo Skymed, contra 7 meses en el caso de las Sentinel-1A). Inmediatamente después se advierte que la velocidad estimada por cada algoritmo es significativamente superior en el caso de las imágenes Cosmo Skymed (PSI) respecto a las Sentinel-1 (SBAS). La magnitud del error (μ y σ) acompaña estas relaciones: es más alto para las Cosmo-Skymed que para las imágenes Sentinel-1A. En correspondencia, además, la velocidad promedio verdadera (esto es, la provenientes de las series GPS proyectada a la LOS), es mayor para el período de las Cosmo Skymed, en segundo lugar viene el período cubierto por las Sentinel-1A descendentes y por último el de las Sentinel-1A ascendentes.

Para comparar los movimientos sobre la misma base temporal, se midió el ajuste de la serie PS/SBAS a la serie GPS proyectada a la LOS para el período en común que tienen estos tres conjuntos de imágenes: Abril/2015-Agosto/2015. Lo que puede apreciarse en esta nueva tabla es que para el período Abril-Agosto de 2015 no se dan desplazamientos de la magnitud observada para Abril-2014 – Agosto 2015. La magnitud del error para la serie Cosmo Skymed se reduce (tanto μ como σ), pero aun así sigue siendo superior respecto a las series Sentinel-1A, sobre todo respecto a las ascendentes.

Si bien la comparación mencionada debe relativizarse por el hecho que debería provenir de un reprocesamiento completo de los datos para el nuevo período, esto último no hubiera sido viable por el menor número de imágenes disponibles. En cambio, estos números sí dan la pauta de que el

procesamiento realizado con las imágenes Cosmo Skymed ha sido más afectado por componentes ruidosos en la fase respecto al procesamiento SBAS. Esto puede vislumbrarse poniendo los datos de coherencia temporal para los puntos de control en una sola tabla.

Sensor	Cosmo Skymed	Sentinel 1A (DESC)	Sentinel 1A (ASC)
λ (cm)	3	5	5
Período cubierto	04/2015 – 08/2015	04/2015 – 08/2015	04/2015 – 08/2015
Vel. Media – cm/año (GPS – LOS)	10.63	10.6	8.93
Vel. Media – cm/año (INSAR – LOS)	22.27	8.86	4.15
μ (cm)	2.35	2.25	0.51
σ (cm)	1.38	0.71	0.46

Tabla 14: Resumen de resultados tomando período temporal en común (Abril/15 – Agosto/15)

Zona	Punto	CSK	S1AD	S1AA
Acumulación	4M	0.86	0.77	0.75
	6H	0.59	0.70	0.75
	8H	0.82	0.54	0.82
	11M	0.50	0.66	0.76
Transporte	13H	0.72	0.23	0.75
	53H	0.53	0.24	0.42
Alimentación	23M	0.49	0.50	0.80
	25M	0.52	0.41	0.74
	57M	0.48	0.75	0.68
	28M	0.50	0.38	0.79
	49M	0.59	0.44	0.78
	58H	0.77	0.66	0.79

Tabla 15: Niveles de coherencia temporal alcanzados con cada set de imágenes en cada uno de los puntos empleados para confrontar los resultados.

La tabla muestra de manera clara que la serie Sentinel-1A ascendente presenta un nivel de coherencia temporal significativamente superior a la resultante de la serie Cosmo Skymed. Sin embargo, la diferencia entre esta última y la serie Sentinel-1A descendente no es grande: de hecho, es mejor para la serie Cosmo Skymed. Esto impone la necesidad de considerar también la sensibilidad de la geometría de las imágenes Cosmo Skymed para medir los deslizamientos producidos.

Si se observa la tabla 16, donde se ha puesto la magnitud del vector plano representada por su proyección a la geometría Cosmo Skymed y Sentinel-1A (estas últimas ya presentadas con anterioridad), se evidencia la fuerte sensibilidad de la geometría de adquisición de la primera

respecto a Sentinel descendente, y sobre todo respecto a Sentinel ascendente. Esto permite entender que errores en el procesamiento, fundamentalmente en el desenrollado, se propaguen en mayor medida en el caso Cosmo SKymed respecto al caso de las Sentinel-1A.

Otro punto que hay que tener en cuenta son las limitaciones propias de cada procesamiento para el área de estudio. En el procesamiento PS se ha mostrado cómo se ha empleado una red de puntos con una distribución espacial equilibrada, a expensas de emplear puntos que no en todos los casos eran buenos PSC. Esto aplica sobre todo a aquellos puntos con una dispersión de su amplitud mayor a 0.25 (o un índice de estabilidad menor a 0.75). Esta elección fue resultado de trabajar con un área de estudio que se mueve muy rápidamente, muy pobre en coherencia espacio-temporal, y en consecuencia con pocos puntos que se presentaran como muy estables. Esto no supone una limitación tanto de parte del algoritmo, sino más bien un condicionamiento del ambiente analizado, que sumado a la corta longitud de onda empleada (banda X) hace que sea un caso complejo para obtener resultados con alta coherencia (poco ruido).

En cambio, al trabajar con SBAS y con banda C ha sido posible extraer información válida de una mayor cantidad de píxeles, lográndose tener un mapeo espacializado del fenómeno del deslizamiento. Sin embargo, la dinámica de la deformación del terreno en Corvara impone aquí también sus limitaciones: La geometría más adecuada para captar de mejor manera los deslizamientos (la descendente) se ve mucho más afectada que la geometría ascendente por los efectos de decorrelación. Como se ha expuesto esto sucede justamente porque los cambios en los dispersores que dan lugar a dicha decorrelación tienen mayor impacto para una geometría de adquisición descendente que para una ascendente. Es decir, para un conjunto de imágenes el deslizamiento se mueve mucho más rápido que para otro conjunto, siempre refiriéndonos al plano de vista (LOS) de cada geometría.

	S1-A Ascendente		S1-A Descendente		Cosmo Skymed	
Punto	Vel. 2D (cm/año)	Vel. LOS (cm/año)	Vel. 2D (cm/año)	Vel. LOS (cm/año)	Vel. 2D (cm/año)	Vel. LOS (cm/año)
4M	18.69	8.08	29.65	5.19	11.49	8.25
6H	13.36	0.13	14.56	3.28	10.11	6.01
8H	22.06	6.37	23.42	12.67	25.91	18.08
11M	18.62	6.62	21.01	11.44	29.23	21.09
13H	30.53	11.26	35.59	21.22	42.22	30.29
53H	106.03	13.23	119.72	44.22	126.39	95.96
23M	16.31	6.61	16.45	10.02	23.35	17.15
25M	16.89	6.05	16.61	9.56	23.57	20.10
57M	13.47	4.20	9.60	4.07	21.65	13.83
28M	35.09	5.14	24.09	18.85	39.24	32.71
49M	11.03	3.43	11.61	7.88	17.33	13.73
58H	20.40	3.92	14.05	0.12	23.88	2.46
R ²	0.51		0.84		0.96	

Tabla 16: Vector plano de desplazamiento junto a su correspondiente proyección para cada geometría. Se aprecia que la geometría Cosmo Skymed es la que conserva la mayor magnitud del vector original en su proyección.

8.2. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha buscado evaluar la adaptabilidad de dos longitudes de onda y de dos algoritmos de procesamiento diferentes para apoyar el monitoreo del deslizamiento de Corvara empleando datos satelitales SAR.

Los resultados de los procesamientos demuestran que las técnicas de Interferometría con series de imágenes son capaces de identificar y seguir fenómenos de este tipo a lo largo del tiempo. Sin embargo, las limitaciones son evidentes cuando el movimiento es tan grande que no logra medirse por efectos de decorrelación (caso puntos 51,54,55 y 56), o se mide con grandes errores (caso punto 53). Otro problema que se enfrenta es cuando se tienen movimientos que no necesariamente son lineales, como momentos de aceleración o desaceleración. Para estos casos es necesario pensar en modelos no paramétricos, quizá menos estables y robustos, pero capaces de captar estas tendencias no lineales.

En cuanto al procesamiento PS con imágenes en banda X, desde un punto de vista experimental ha resultado de gran interés probar cómo responde esta familia de algoritmos con dicha longitud de onda para monitorear un fenómeno de deslizamiento como el que se da en Corvara. Los resultados, amén de las mencionadas limitaciones, han sido muy satisfactorios en los Corner Reflectors, que hicieron las veces de puntos de control. Para que esta técnica cobre mayor interés desde el punto de vista de su aplicabilidad al monitoreo del deslizamiento, sería de gran interés pensar en repetir en el futuro el mismo esquema de monitoreo con Corner Reflectors adaptados a una longitud de onda más larga, como la banda C. De esa manera se aprovecharía la amplia disponibilidad de imágenes Sentinel-1, que son de libre descarga y ofrecen a futuro una excelente cobertura espacio-temporal del área de estudio. La idea de usar una longitud de onda mayor es poder obtener información coherente (libre de ruido) de más puntos en el terreno o, dicho de otra manera, seleccionar más PSC sobre una base confiable.

En relación a las imágenes Sentinel-1, a través del procesamiento SBAS se ha logrado mostrar el potencial que presentan las imágenes Sentinel-1A para monitorear el deslizamiento de Corvara. Si solo con 16 imágenes empleadas ha sido posible obtener los resultados expuestos, es de esperar que con el lanzamiento de Sentinel-1B se logre una mayor resolución temporal, ya que el ciclo de repetición de la constelación será de 6 días. Ello podría contribuir a mejorar las series obtenidas particularmente con el conjunto descendente, que para este caso en particular resulta la mejor geometría de adquisición para detectar la deformación del terreno, y que se ha mostrado más afectado por la decorrelación. Dada la coherencia que se ha obtenido en general empleando esta longitud de onda, emplear imágenes que trabajen en banda L (como el satélite japonés ALOS-2 o el argentino SAOCOM, a ser lanzado) seguramente permitiría obtener aún mejores resultados. Sin embargo, estos conjuntos de imágenes no presentan la ventaja de las Sentinel de ser de libre distribución.

El área de Corvara presenta un escenario complicado para el análisis interferométrico dada las diversas fuentes de decorrelación presentes: cobertura variable de nieve y vegetación, cambios

fenológicos a lo largo del tiempo, y sobre todo movimientos de masa importantes en ciertos sectores. Estos últimos se propagan sobre todo en los artefactos topográficos, ya que el Modelo de Elevaciones utilizado va quedando desactualizado a medida que cambia el terreno en el área de estudio. Es por ello que resulta necesario compensar estas limitaciones empleando longitudes de onda más largas y mejorando la resolución temporal, como maneras de aumentar la coherencia. En línea con lo anterior, las mediciones de altura derivadas del procesamiento interferométrico (por medio de la altura residual) podrían utilizarse como fuente de datos para mejorar y actualizar el Modelo de Elevación Digital disponible.

No obstante las anteriores observaciones, la interferometría no debe concebirse como la única fuente de monitoreo para el deslizamiento de Corvara, sino como un complemento de otras mediciones como los relevamientos GPS con un objetivo claro: Generar y mantener un sistema de información que sirva de alerta y respuesta temprana ante situaciones que pongan en riesgo las vidas e infraestructuras locales en Corvara.

9. REFERENCIAS Y FUENTES CITADAS

- Airbus Defense and Space. (2014). *TerraSAR-X Image Product Guide*. Les Mureaux, Francia.
- Alaska Earthquake Center. (s.f.). Obtenido de <http://www.aeic.alaska.edu>
- ASI. (2007). *COSMO-SkyMed System Description & User Guide*.
- Bárcena Humanes, J., Gómez Hoyo, P., Jarabo Amores, M., Mata Moya, D., & De Rey, N. (2015). Feasibility Study of EO SARs as Opportunity Illuminators in Passive Radars: PAZ-Based Case Study. *Sensors*, 80-106.
- Berardino, P., Fornaro, G., & Lanari, R. (2002). A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING* (págs. 2375-2383). Toronto: IEEE.
- Caroli, N. (2009). *Elaborazione di misure GPS riferite alla Frana di Corvara in Badia nel periodo 2001-2008*. Modena: Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia .
- Casu, F. (2006). *The Small Baseline Subset Technique: Performance assessment and new developments for surface deformation analysis of very extended areas*. Cagliari: Università di Cagliari.
- CCRS. (2006). *Satellite Imagery and Products*. Obtenido de <http://www.nrcan.gc.ca/home>
- Constantini, M. (1998). A Novel Phase Unwrapping Method Based on Network Programming. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING* (págs. 813-821). Albuquerque: IEEE.
- Corsini, A., Marchetti, M., & Soldati, M. (2001). Holocene slope dynamics in the area of Corvara in Badia (Dolomites, Italy). *Geografia Fisica e Quaternaria*, 127-139.
- Corsini, A., Panizza, M., & Pasuto, A. (1998). Indagini preliminari per la definizione della pericolosità da frana nella conca di Corvara in Badia (Dolomiti). *Memorial. Società Geologica*, (págs. 207-224).
- Corsini, A., Pasuto, A., Soldati, M., & Zannoni, A. (2004). Field monitoring of the Corvara Landslide (Dolomites, Italy) and its relevance for Hazard assesment. *Geomorphology*, 146-165.
- Corsini, A., Soldati, M., & Pasuto, A. (1999). Geomorphological Investigation and Management of the Corvara Landslide (Dolomites, Italy). *Transactions on the Japanese Geomorphological Union*, (págs. 169-186).
- Cumming, I., & Wong, F. (2005). *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*. Artech House Remote Sensing Library.
- Curlander, J. C., & McDonough, R. N. (1991). *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing* . Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- De Zan, F., & Monti Guarnieri, A. (2006). TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* , 2532-2560. Obtenido de <https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/products-algorithms/level-1-algorithms/topsar-processing>

- Elizavetin, I. (2010). *Radiometric Artifacts in SAR Images*. Moscú, Rusia.
- Euillades, P. (Septiembre de 2015). Series Temporales de Deformación DinSAR. Córdoba, Córdoba, Argentina.
- EURAC Research. (2015). *Feasibility study for improving SAR multi-interferometry application for monitoring slow ground deformations: the Corvara landslide case study*. Bolzano, Italia.
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., & Rocca, F. (2007). *Guidelines for SAR Interferometry: Processing and Interpretation*. Noordwijk, Holanda: ESA Publications.
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (págs. 8-20). Sidney: IEEE.
- Franceschetti, G., & Lanari, R. (1999). *Synthetic Aperture Radar Processing*. CRC Press.
- Freeman, A. (2006). On Ambiguities in SAR Design. *ResearchGate*.
- Ghiglia, D., & Romero, L. (1994). Robust Two-Dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and interativa methods. *Journal of the Optical Society of America*, 107-117.
- Goldstein, R., & Werner, C. (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 4035-4038.
- Goldstein, R., Zebker, H., & Werner, C. (1988). Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 713-720.
- Hanssen, R. (2002). *Radar interferometry: Data interpretation and Error Analysis*. New York: Kluwer Academic Publishers.
- Henderson, F., & Lewis, A. (1998). *Radar Fundamentals: The Geoscience Perspective*. John Wiley and Sons Inc.
- Hooper, A. (2006). *Persistent Scatterer Radar Interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation*. Stanford: Stanford University.
- Iasio, C., Corsini, A., Mair, V., Schneiderbauer, S., & Tamburini, A. (2011). Sperimentazione di corner per banda X nel monitoraggio di colate di terra lente con COSMO SkyMed. *15 Conferenza Nazionale ASITA*, (págs. 1249-1259). Reggio di Colorno.
- Kampes, B. (2006). *Radar Interferometry: Persistent Scatterers Technique*. Dordrecht, NL: Springer.
- Maitre, H. (2001). *Processing of Synthetic Aperture Radar Images*. John Wiley and Sons, Inc.
- Mayorga Torres, T. (2013). *Determinación de la deformación del terreno por movimientos en masa usando interferometría SAR*. Córdoba: UNC.
- Mulas, M., Petitta, M., Corsini, A., Schneiderbauer, S., Mair, F., & Iasio, C. (2015). Long-term Monitoring of a deep-seated, slow-moving Landslide by mean of C-Band and X-Band advanced Interferometric Products: The Corvara in Badia case study (Dolomites, Italy). *Proceedings on the 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment* (págs. 827-829). Berlin: 2015.

- Nagler, T. (1996). *Methods and Analysis of Synthetic Aperture Radar data from ERS-1 and X-SAR for Snow and Glacier Applications*. Innsbruck: University of Innsbruck.
- Notarnicola, C. (2013). *Introduction to SAR: Basic concepts*. Bolzano, Italia: EURAC Research.
- Notarnicola, C. (2013). *Introduction to SAR: Basic concepts*. Bolzano, Italia.
- Panozzo Zénere, M. (2013). *Focalización de imágenes SAR utilizando el algoritmo Omega-K. Simulación y Validación*. Córdoba: UNC.
- Panozzo Zénere, M. (15 de Septiembre de 2015). *Introducción a la teoría de los Radares de Apertura Sintética*. Córdoba, Argentina.
- Perissin, D., Piantanida, R., Piccagli, D., & Rocca, F. (2007). Landslide in Dossena (BG): Comparison between interferometric Techniques. *Proceedings of BIOGEOSAR*, (págs. 25-28). Bari.
- Provincia di Bolzano. (2006). *Definizione della pericolosità e di possibili interventi di mitigazione della Frana di Corvara in Badia*. Bolzano: Ufficio di Geologia.
- Richards, J. (1993). *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. Nueva York: Springer-Verlag.
- Richards, J., & Jia, X. (2005). *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. Springer.
- SARMAP. (2008). *Synthetic Aperture Radar and Sarscape*. Purasca, Suiza.
- Schmitt, M., Shahzad, M., & Xiang Zhu, X. (2015). Reconstruction of Individual Trees from Multi-Aspect TomoSAR Data. *ResearchGate*, 175-185.
- Seymour, M., & Cumming, I. (1994). *Maximum likelihood estimation for SAR interferometry*. Pasadena, Canada: IEEE.
- Solorza, R. (2012). *Estimación de la humedad superficial del suelo mediante el uso combinado de modelos electromagnéticos y el enfoque bayesiano. Estudio exploratorio en imágenes SARAT*. Córdoba: UNC.
- Strang, G. (1987). *Linear Algebra And Its Applications*. Orlando: Harcourt Brace Jovanovich College Publishers.
- Strozzi, T., Farina, P., Corsini, A., Ambrosi, C., Thüning, M., Zilger, J., . . . Werner, C. (2005). Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry. *Landslides*, 193-201.
- Tofani, V., Raspini, F., Catani, F., & Casagli, N. (2013). Persistent Scatterer Interferometry (PSI) Technique for Landslide Characterization and Monitoring. *Remote Sensing*, 1045-1065.
- Ulaby, F., Moore, R., & Fung, A. (1986). *Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Volume II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.