



UNC

Universidad  
Nacional  
de Córdoba



FAMAF

Facultad de Matemática,  
Astronomía, Física y  
Computación



# **“Análisis de las capacidades interferométricas de SAOCOM utilizando datos adquiridos en modo TOPSAR”**

Por **Jorge Alejandro Euillades**

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

**MAGÍSTER EN APLICACIONES DE INFORMACIÓN ESPACIAL**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

*Junio, 2023*

©IG-CONAE 2023

©FaMAF-UNC 2023

DIRECTOR

***Dr. Leonardo Daniel Euillades***

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) & Instituto de Capacitación Especial y Desarrollo de la Ingeniería Asistida por Computadora (CEDIAC), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina

CO-DIRECTOR

***Mgter. Yenni Lorena Belén Roa***

CONICET, Mendoza, Argentina & Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell' Ambiente del Consiglio Nazionale delle Ricerche (IREA-CNR), Nápoles, Italia

ASESOR METODOLÓGICO

***Dr. Stefano Perna***

Università degli Studi di Napoli “Parthenope” & IREA-CNR, Nápoles, Italia



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

A mi querida Mema

---

## Agradecimientos

---

Quisiera agradecer en primer lugar a mis padres, mis hermanos y, en especial, a mi novia, quienes siempre me han apoyado y dado todo su cariño en cada una de las aventuras que he decidido emprender. Sin su incondicionalidad y sus consejos, este trabajo no habría sido posible.

Agradezco también:

A mis directores, Leonardo y Yenni, quienes se pusieron este trabajo al hombro y de los cuales aprendí muchísimo.

Al Dr. Stefano Perna, Investigador Asociado del Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell' Ambiente del Consiglio Nazionale delle Ricerche (IREA-CNR) de Italia.

Al director de la Maestría en Aplicaciones de Información Espacial (MAIE), Santiago Seppi, por las oportunidades brindadas y su colaboración en los inicios de este trabajo.

A a cada uno de mis compañeros de maestría. Lamentablemente la pandemia nos llevó a tener que compartir la mayoría de los cursos de forma virtual pero así y todo logramos hacer buenas amistades y compartir grandes momentos juntos.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por la beca otorgada que hizo posible la realización de esta maestría.

A la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). En particular, al Dr. Jorge Milovich por sus contribuciones al desarrollo del presente trabajo.

A Almendra, mi tutora durante el transcurso de la maestría, una persona muy dulce que supo preocuparse y ocuparse de cada uno de sus alumnos.

Por último, a todos los profesores, profesionales y personas que he conocido a lo largo de este camino, de todos me llevo un gran aprendizaje.

---

## Resumen

---

El modo *Terrain Observation by Progressive Scans SAR* (TOPSAR) del Satélite Argentino de Observación CON Microondas (SAOCOM) es el modo utilizado por defecto para cumplir con el objetivo principal de esta misión: la estimación y generación de mapas operativos de humedad del suelo para asistir a actividades agrícolas. Ésta es la razón por la cual existe una gran disponibilidad de imágenes adquiridas en este modo. Si bien SAOCOM tiene por objetivo secundario la generación de productos interferométricos para contribuir al Sistema Ítalo Argentino de Satélites para la Gestión de Emergencias (SIASGE), el modo TOPSAR en SAOCOM no ha sido diseñado para fines interferométricos y, por lo tanto, no cuenta con sincronización de bursts.

Normalmente, el procesamiento interferométrico de datos TOPSAR incorpora una complejidad adicional por la naturaleza propia de este modo de adquisición. El movimiento electrónico de la antena en acimut hace necesario estimar una función de *deramping* que debe extraerse de los datos previo al paso de co-registración. En general, el procesamiento combina un paso de co-registro geométrico seguido de un refinamiento basado en un análisis de diversidad espectral del área de superposición entre bursts a fin de obtener interferogramas coherentes. Sin embargo, la falta de sincronización de bursts trae aparejado algunas dificultades extra en comparación con Sentinel-1, que sí cuenta con esta característica. Por un lado, no existe un marco común de referencia de tiempo para determinar la correspondencia entre bursts que componen distintas imágenes. Por el otro, el limitado ancho de banda en acimut hace que la cantidad de imágenes que puedan combinarse para generar un interferograma sea limitada.

A pesar de estas dificultades, aprovechando la gran disponibilidad de imágenes SAOCOM adquiridas en modo TOPSAR, se presenta en este trabajo una metodología que permite procesarlas con propósitos interferométricos. A fin de demostrar el potencial en este ámbito, se procesó un único swath de un conjunto de 18 imágenes adquiridas en modalidad TOPSAR Narrow B (TNB) sobre una zona ubicada en las provincias de Neuquén y Río Negro (Argentina); y se obtuvieron 48 interferogramas de calidad variable en función de la superposición espectral entre los pares interferométricos evaluados.

**Palabras clave:** *Terrain Observation by Progressive Scans SAR* (TOPSAR), SAOCOM-1, Interferometría Diferencial SAR (DInSAR), Diversidad Espectral Aumentada (ESD).

---

## Abstract

---

SAOCOM TOPSAR mode is the one used by default for accomplish with the main mission goal: the retrieving of soil moisture maps to support the agriculture sector. Therefore, there is a high availability of images acquired in this mode. Although SAOCOM is also intended to contribute to the SIASGE with interferometric products, SAOCOM TOPSAR mode has not been designed for interferometric purposes and, thus, it is not fitted with bursts synchronization.

Typically, the interferometric processing of TOPSAR data involves an extra complexity because of the nature of TOPSAR acquisition mode. The antenna electronical steering in azimuth imposes the estimation of a *deramping* function that needs to be subtracted from the data before performing the co-registration step. Generally, to achieve coherent results, the processing combines a geometrical co-registration step and a refinement one based in spectral diversity analysis of the superposition areas between bursts. However, the lack of bursts synchronization brings with certain constraints compared to Sentinel-1, which has this feature. On the one hand, there is not a common reference time frame for detecting common bursts between images. On the other hand, the number of possible images combination is limited by the narrow azimuth bandwidth.

Despite these issues, an approach for the interferometric processing of SAOCOM TOPSAR images is presented in this work by taking advantage of its high availability. In order to prove the interferometric potential of SAOCOM TOPSAR acquisitions, a single swath of a dataset composed by 18 images acquired in TOPSAR Narrow B (TNB) mode over a region located in Neuquén and Río Negro provinces (Argentina), is processed. A total of 48 interferograms are generated with a variable quality depending on the spectral superposition of the interferometric pairs evaluated.

**Keywords:** Terrain Observation by Progressive Scans SAR (TOPSAR), SAOCOM-1, Differential Interferometry SAR (DInSAR), Enhanced Spectral Diversity (ESD).

---

# Índice de Contenidos

---

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Hipótesis . . . . .	3
1.2. Preguntas introductorias . . . . .	3
1.3. Objetivos . . . . .	3
1.3.1. General . . . . .	3
1.3.2. Específicos . . . . .	3
1.4. Organización de la tesis . . . . .	4
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>5</b>
2.1. Antecedentes . . . . .	5
2.2. Breve Reseña del RADAR . . . . .	6
2.3. Radares Aéreos de Mirada Lateral (SLAR) . . . . .	7
2.4. Radar de Apertura Sintética (SAR) . . . . .	9
2.4.1. Adquisición de datos SAR . . . . .	9
2.4.2. Geometría de adquisición . . . . .	10
2.4.3. Adquisición en Rango . . . . .	12
2.4.3.1. El Chirp . . . . .	12
2.4.3.2. Resolución en Rango . . . . .	13
2.4.4. Adquisición en Acimut . . . . .	13

2.4.4.1.	Principio de Apertura Sintética . . . . .	13
2.4.4.2.	Frecuencia de Repetición de Pulso . . . . .	14
2.4.4.3.	Frecuencia Doppler y Resolución en Acimut . . . . .	15
2.4.5.	Datos RAW y Enfoque de la Imagen . . . . .	15
2.4.5.1.	Estructura de la matriz de datos RAW . . . . .	15
2.4.5.2.	Enfoque de la imagen . . . . .	17
2.5.	Imágenes SAR . . . . .	20
2.5.1.	Amplitud de la imagen SAR . . . . .	20
2.5.2.	Fase de la imagen SAR . . . . .	21
2.5.3.	Speckle . . . . .	22
2.6.	SIASGE . . . . .	23
2.6.1.	SAOCOM . . . . .	24
2.6.1.1.	Modos de adquisición . . . . .	24
2.6.1.2.	Niveles de procesamiento estándar . . . . .	26
2.7.	Interferometría SAR: Principios Básicos . . . . .	27
2.7.1.	<i>Across-track interferometry</i> . . . . .	28
2.7.2.	Interferometría Diferencial SAR . . . . .	32
2.7.3.	Cadena de procesamiento interferométrico . . . . .	33
2.7.4.	Procesamiento interferométrico de adquisiciones TOPSAR . . . . .	36
<b>3.</b>	<b>Metodología</b>	<b>37</b>
3.1.	Ingesta de Datos y Detección de Bursts Comunes . . . . .	37
3.2.	Procesamiento Interferométrico Burst a Burst . . . . .	40
3.2.1.	Función de <i>Deramping</i> . . . . .	41
3.2.2.	Co-registro . . . . .	42
3.2.3.	Unión de Bursts . . . . .	43
3.3.	Requisitos Espectrales en Acimut . . . . .	43
3.4.	Generación del Interferograma . . . . .	45
<b>4.</b>	<b>Caso de Estudio: Procesamiento y Resultados</b>	<b>47</b>
4.1.	Área de Estudio . . . . .	47

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

---

4.2. Procesamiento . . . . .	48
<b>5. Conclusiones, Discusión y Trabajos Futuros</b>	<b>53</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	53
5.2. Discusión y Trabajos Futuros . . . . .	55
<b>Anexos</b>	<b>61</b>
<b>A. Tablas</b>	<b>61</b>
<b>B. Figuras</b>	<b>63</b>



---

## Índice de figuras

---

2.1. Principio de funcionamiento del radar. Tomado de (1) y modificado. . . . .	6
2.2. Geometría de un sistema SLAR. El radar vuela en línea recta a una altitud $H$ y observa la Tierra con un ángulo de vista $\theta_l$ . El ángulo $\theta_i = (90^\circ - \theta_l)$ es el ángulo de incidencia. El tamaño del área iluminada está definido por el ancho del haz $\beta$ y la distancia entre el dispositivo y el suelo $R$ . Nótese que el haz del radar es ancho en la dirección en rango pero es angosto en acimut. El movimiento de avance de la plataforma aérea permite la generación de la imagen. Tomado de (2) y modificado. . . . .	7
2.3. Geometría de adquisición de un sistema SAR. Tomado de (3; 2) y modificado.	11
2.4. Representación de la parte real del chirp definido por la Ec. 2.6 en unidades arbitrarias, para $K_r > 0$ . Tomada de (4) y modificada. . . . .	12
2.5. Geometría de las observaciones utilizadas para formar la apertura sintética de un objetivo $P$ ubicado en la posición $x = 0$ de la trayectoria de vuelo. Tomado de (2) y modificado. . . . .	14
2.6. Ciclos de transmisión y recepción de un sistema SAR. Tomado de (3). . . . .	16
2.7. Esquema de la matriz de datos RAW. Tomado de (5) y modificado. . . . .	16

2.8. Síntesis de los pasos de procesamiento involucrados para enfocar una imagen Radares de Apertura Sintética (SAR). El dato comprimido en rango se obtiene a partir de la convolución del dato Datos Crudos (RAW) con la función de referencia en rango (chirp transmitido). En segunda instancia, la compresión en acimut se lleva a cabo convolucionando el dato comprimido en rango con la función de referencia en acimut (chirp Doppler), la cual va cambiando entre el rango cercano y el rango lejano. El símbolo "*" representa la operación de convolución. Tomado de (6) y modificado. . . . .	18
2.9. Migración de Celdas en Rango (Migración de Celdas en Rango (RCM)). Tomado de (5) y modificado. . . . .	19
2.10. Diagrama en bloques con las principales operaciones desarrolladas en los algoritmos RDA, CSA y Omega-K. (RCM). Tomado de (7). . . . .	20
2.11. Representación esquemática de la relación entre la rugosidad de la superficie y la longitud de onda $\lambda$ : (a) baja, (b) intermedia, y (c) alta rugosidad. Tomado y modificado de (2). . . . .	21
2.12. Producto SIASGE sobre la ciudad de San Carlos de Bariloche, provincia de Río Negro, Argentina, lograda mediante la fusión de una imagen SAOCOM-1A y una imagen COSMO-Skymed. En colores oscuros se ven los cuerpos de agua de los lagos Nahuel Huapi y Gutiérrez, con distintas tonalidades de grises oscuros, debido al cambio de rugosidad del agua, producto de los vientos de la región. En tonos grises más claros, se aprecia el entramado de la ciudad de San Carlos de Bariloche y en tonos más oscuros sus alrededores, dando cuenta de la densidad edilicia y su distribución. En tonos más brillantes resaltan los picos de los cerros circundantes. Tomado de (8). . . .	22
2.13. SIASGE. Tomado y modificado de (9). . . . .	23
2.14. Ilustración de los modos de adquisición Stripmap y ScanSAR. El modo ScanSAR se utiliza para incrementar el tamaño del swath, en comparación con el modo Stripmap. (a) Stripmap. (b) ScanSAR. Tomado y modificado de (6). . . . .	24
2.15. Geometría de adquisición TOPSAR. La figura representa algunas de las posiciones repetidas a lo largo de la órbita del sensor y sus patrones de radiación correspondientes. Tomado de (2). . . . .	25
2.16. Representación gráfica de los modos de adquisición de SAOCOM-1. Aquellos etiquetados como <i>Dual-Pol</i> (polarización doble) incluyen también a los modos <i>Single-Pol</i> (polarización simple). Tomado de (10). . . . .	26

<p>2.17. La <i>across-track interferometry</i> utiliza antenas que se mueven siguiendo trayectorias de vuelo paralelas pero mutuamente desplazadas. El rango oblicuo <math>r_0</math>, el ángulo de incidencia <math>\theta_i</math> y la línea de base perpendicular <math>B_{\perp}</math>, están definidos en un plano perpendicular a las trayectorias de vuelo. Un cambio <math>\Delta h</math> en la altura de la superficie genera un cambio <math>\Delta r</math> en la diferencia en rango. Tomado de (6). . . . .</p>	<p>29</p>
<p>2.18. Interferogramas SAR y modelo digital de elevación (DEM) del desierto de Atacama (Chile). Los datos fueron adquiridos por el sistema interferométrico <i>single-pass TanDEM-X</i>. (a) Antes de remover la fase correspondiente a la Tierra plana. (b) Luego de remover la Tierra plana. (c) Fase desenrollada convertida en valores de altura. La escala de colores en (a) indica la fase interferométrica enrollada que varía cíclicamente entre 0 y <math>2\pi</math>. Tomado de (6). 30</p>	<p>30</p>
<p>3.1. Ilustración de las tres situaciones posibles de configuración de <i>bursts</i>: (a) Sin offset a nivel de burst. (b) La imagen secundaria está “adelantada” dos <i>bursts</i> respecto a la imagen de referencia. (c) El primer <i>burst</i> de la imagen secundaria aparece un <i>burst</i> después del inicio de la referencia. Las cruces rojas representan <i>bursts</i> que no tienen correspondencia en la otra imagen. Aquellos <i>bursts</i> coincidentes están representados con el mismo color. Las flechas verdes representan la distancia Euclideana mínima entre <i>bursts</i>. En (c), los dos primeros <i>bursts</i> de la imagen de referencia están apuntando a un único <i>burst</i> en la imagen secundaria. En este caso, el B1 de la referencia no coincide en realidad con el B1 de la imagen secundaria (flecha roja), ya que es el B2 de la imagen de referencia el que presenta el menor valor de distancia (flecha verde). Tomado y modificado de (11). . . . .</p>	<p>39</p>
<p>3.2. Cadena de procesamiento interferométrico adaptada para datos TOPSAR. . . . .</p>	<p>40</p>
<p>3.3. Ilustración de la unión de <i>bursts</i> de adquisiciones TOPSAR de SAOCOM. En (a), las áreas de superposición entre <i>bursts</i> consecutivos están representadas en color rojo. En color anaranjado está representada la zona donde la diferencia de frecuencia Doppler es mayor que el ancho de banda en acimut del sistema. En (b), el interferograma formado se compone de áreas coherentes (representadas en color verde) intercaladas con áreas ruidosas (representadas en color azul). Tomado y modificado de (11). . . . .</p>	<p>44</p>
<p>4.1. Área de estudio. Los rectángulos ilustrados en colores rojo y azul representan la máxima extensión del área cubierta por el conjunto de datos TOPSAR utilizado. Cada adquisición se compone de tres swaths en polarización doble (S5DP, S6DP y S7DP). El área común correspondiente al S5DP se encuentra ilustrada en color verde y constituye el área procesada. . . . .</p>	<p>48</p>

4.2.	Gráfico de Frecuencia Doppler [Hz] vs Fecha [año] de adquisición. Cada punto representa una imagen y los pares de fechas vinculados por una línea roja corresponden a un interferograma calculado. . . . .	49
4.3.	Id. 5. (a) Interferograma correspondiente a las fechas 15-FEB-2020 y 02-MAR-2020. (b) Mapa de coherencia. (c) Histograma de coherencia. . . . .	50
4.4.	Id. 6. (a) Interferograma correspondiente a las fechas 15-FEB-2020 y 21-MAY-2020. (b) Mapa de coherencia. (c) Histograma de coherencia. . . . .	50
4.5.	Id. 25. (a) Interferograma correspondiente a las fechas 15-FEB-2020 y 29-NOV-2020. (b) Mapa de coherencia. (c) Histograma de coherencia. . . . .	51
4.6.	Id. 11. Interferograma correspondiente a las fechas 24-JUL-2020 y 03-ENE-2022. (a) Original (b) Con corrección orbital aplicada. . . . .	52
B.1.	Interferogramas con corrección por ESD aplicada. Tomado y modificado de (11). . . . .	64
B.2.	Interferogramas a los que no se pudo aplicar la corrección por ESD. Tomado y modificado de (11). . . . .	65
B.3.	Interferogramas de la Figura B.1 con la corrección orbital aplicada. Tomado y modificado de (11). . . . .	66
B.4.	Histogramas de coherencia de todos los interferogramas generados. . . . .	67

---

## Índice de tablas

---

2.1. Lista de sensores SAR existentes y proyectados. Tomado de (2) y modificado.	10
2.2. Principales características de los productos SAOCOM de nivel 1 para cada modo de adquisición y combinación de polarizaciones (polarización simple (SP), dual (DP) y cuádruple (QP)) (10) . . . . .	27
3.1. Variables necesarias para calcular la función de <i>deramping</i> con su correspondiente ubicación en los metadatos. . . . .	42
4.1. Valores de corrección de la variación en acimut de la línea de base paralela y la línea de base perpendicular, aplicada a los interferogramas corregidos por ESD. . . . .	52
A.1. Lista de los 48 interferogramas calculados. Los ID. 1-17 corresponden a los interferogramas a los cuales se pudo aplicar la corrección por ESD. En los interferogramas ID. 18-48 no se pudo aplicar la corrección por ESD. Tomada y modificada de (11). . . . .	61

---

## Acrónimos

---

**ASI** Agencia Espacial Italiana

**CEDIAC** Instituto de Capacitación Especial y Desarrollo de la Ingeniería Asistida por Computadora

**CONAE** Comisión Nacional de Actividades Espaciales

**CONICET** Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

**COSMO-SkyMed** *COnstellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation*

**CUSS** Servicio de Segmento de Usuarios de CONAE

**DEM** Modelos Digitales de Elevación

**DI** *Detected Image*

**DInSAR** Interferometría Diferencial SAR

**ESD** Diversidad Espectral Aumentada

**GACOS** *Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR*

**GEC** *Ground Ellipsoid Corrected*

**GTC** *Geocoded Terrain Corrected*

**InSAR** Interferometría SAR

**IREA-CNR** Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente del Consiglio Nazionale delle Ricerche

**MAIE** Maestría en Aplicaciones de Información Espacial

**OL** *Off Line*

**OLF** *Off Line Fast*

**OLVF** *On Line Very Fast*

**PRF** Frecuencia de Repetición de Pulso

**PRT** Tiempo de Repetición de Pulso

**RAW** Datos Crudos

**RCM** Migración de Celdas en Rango

**SAOCOM** Satélite Argentino de Observación Con Microondas

**SAR** Radares de Apertura Sintética

**SIASGE** Sistema Ítalo Argentino de Satélites para la Gestión de Emergencias

**SLAR** Radar Aéreo de Mirada Lateral

**SLC** *Single Look Complex*

**SM** Stripmap

**TNA y TNB** TOPSAR Narrow

**TOPSAR** *Terrain Observation by Progressive Scans SAR*

**TW** TOPSAR Wide



# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

---

La teledetección hace referencia a la adquisición de datos de la superficie terrestre utilizando sensores remotos (es decir, sin contacto directo), así como a su procesamiento e interpretación. Estos sensores pueden ser pasivos o activos. Los sensores pasivos se valen de la energía emitida por el sol y reflejada por la superficie de la Tierra; en tanto que los sensores activos utilizan una fuente de iluminación propia para obtener información del terreno. Dentro de estos últimos se encuentran los SAR, utilizados para la adquisición de imágenes de la superficie terrestre gracias a las ventajas que ofrecen, como son su capacidad de adquirir imágenes tanto diurnas como nocturnas y su baja sensibilidad ante la presencia de nubes (12).

Este tipo de radares se utiliza en aplicaciones de geodesia y sensado remoto tales como la construcción de Modelos Digitales de Elevación (DEM) y mapas de deformación, por medio de técnicas conocidas como Interferometría SAR (InSAR) e Interferometría Diferencial SAR (DInSAR) (12; 13; 14; 15; 16; 17). La interferometría consiste en un conjunto de técnicas basadas en la interferencia constructiva y destructiva de ondas electromagnéticas provenientes de fuentes, de igual frecuencia y coherentes, ubicadas en dos o más puntos de observación.

En el caso de InSAR, el patrón de interferencia es construido a partir del cálculo de la diferencia de fase entre dos imágenes SAR de una misma área de estudio, adquiridas en posiciones ligeramente diferentes o en distintos instantes de tiempo (o ambos) (18).

La técnica DInSAR surge como una evolución de InSAR y consiste en utilizar un conjunto de imágenes de una misma zona de interés y combinarlas para estimar la deformación producida durante el período de tiempo abarcado por dichas imágenes (19; 20). Esto permite estudiar los fenómenos que pudieran estar afectando la zona de estudio (actividades volcánicas, eventos sísmicos, movimiento y extracción de fluidos generados durante el desarrollo actividades productivas, etc.) (21; 22; 23; 24).

En los últimos años, la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) ha desarrollado y lanzado una constelación de dos satélites, conocidos como SAOCOM, que tienen a bordo instrumentos SAR de alta resolución, full-polarimétricos y que operan a 1.275 GHz (banda L): el SAOCOM1-A (lanzado en 2018) y el SAOCOM1-B (lanzado en 2020).

Los dos satélites SAOCOM y los cuatro satélites de la constelación italiana *Constellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation* (COSMO-SkyMed) de la Agencia Espacial Italiana (ASI), forman parte del SIASGE. El objetivo principal de esta misión es estimar y generar mapas operativos de humedad del suelo para asistir a actividades agrícolas, además de contribuir al sistema de emergencias mediante el monitoreo de eventos tales como deslizamientos, actividades volcánicas, inundaciones y terremotos (25).

Los instrumentos SAR a bordo de los satélites SAOCOM operan en tres modos de adquisición que proporcionan diferentes resoluciones espaciales y coberturas. Estos modos son: Stripmap (SM), TOPSAR Narrow (TNA y TNB) y TOPSAR Wide (TW). Las características de estos modos y una descripción comparativa puede, encontrarse en la Sección 2.6.1.1.

Un problema que suele presentarse cuando se quiere procesar imágenes SAOCOM es que no suele haber suficientes adquisiciones en modo Stripmap que cuenten con todas las especificaciones necesarias para ser utilizadas en aplicaciones interferométricas, es decir, que hayan sido adquiridas utilizando una configuración común, lo cual es una condición necesaria si se quiere aplicar interferometría. Esta situación se repite a lo largo de las zonas más frecuentemente adquiridas (principalmente en Argentina). Además, la mayoría de las adquisiciones Stripmap son tomadas del lado oeste de Argentina.

Sin embargo, si el área de interés está ubicada en la parte central u oriental del país (específicamente en la Región Pampeana de Argentina), se encuentra que la mayoría de las imágenes disponibles han sido adquiridas en modo TOPSAR Narrow debido a que este modo es el que se utiliza por defecto para la estimación de la humedad del suelo (26).

En este sentido, para utilizar imágenes adquiridas en modo TOPSAR con fines interferométricos, las mismas deben haber sido adquiridas de forma que permitan observar el mismo objetivo con el mismo ángulo de *squint*. La manera de garantizar que esto ocurra es a través de la *sincronización de bursts*. Dicha sincronización se refiere al hecho de que el instrumento debe comenzar a adquirir los datos del *burst* correspondiente, en pasadas repetidas de la órbita, exactamente al mismo tiempo sobre el mismo sitio en tierra. Esto es importante para aplicaciones de interferometría ya que la ausencia de superposición espectral debido a una falta de sincronización de *bursts* produce decorrelación y pérdida de resolución en azimuth en el interferograma que no puede recuperarse posteriormente (27).

Sin embargo, el modo TOPSAR en SAOCOM no tiene sincronización de *bursts* debido a que no ha sido diseñado con fines interferométricos. No obstante, gracias al gran volumen de datos disponible en este modo de adquisición, resulta de interés sacar provecho del mismo y establecer una metodología que permita encontrar y procesar pares de imágenes que sean útiles para propósitos interferométricos.

### 1.1. Hipótesis

Bajo ciertas condiciones sería posible utilizar datos de SAOCOM adquiridos en modo TOPSAR Narrow para generar productos interferométricos.

### 1.2. Preguntas introductorias

1. ¿Es posible generar productos interferométricos a partir de imágenes adquiridas bajo el modo TOPSAR Narrow de SAOCOM? ¿Qué particularidades deben tener los datos para lograr este objetivo?
2. ¿Dichos productos interferométricos son útiles para el análisis de campos de deformación?
3. ¿Qué características **es necesario** tener en cuenta para llevar a cabo un correcto procesamiento de las imágenes?
4. ¿Qué algoritmos de procesamiento existen? ¿Se puede partir de la base de algoritmos diseñados para procesar imágenes adquiridas en otros modos (Stripmap, por ejemplo) o para otros sensores (Sentinel-1, por ejemplo)? ¿Pueden o necesitan ser revisados y mejorados?
5. ¿Puede realizarse de forma sistemática o se trata de un procesamiento de oportunidad que sólo puede aplicarse en determinadas situaciones?

### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. General

Analizar la capacidad de los datos SAOCOM adquiridos en modalidad TOPSAR Narrow para ser utilizados en la caracterización de campos de deformación a través de la aplicación de técnicas interferométricas.

#### 1.3.2. Específicos

- Revisar las bases teóricas del procesamiento de datos de Radar de Apertura Sintética (SAR) a fin de obtener productos interferométricos de utilidad.
- Identificar ventajas y desventajas de los diferentes modos de adquisición de SAOCOM y sus implicancias en el procesamiento.
- Definir una metodología de procesamiento interferométrico para datos TOPSAR de SAOCOM, a partir de la adaptación de metodologías ya existentes.
- Usar datos SAOCOM adquiridos en la modalidad TOPSAR Narrow a fin de analizar su potencial para aplicaciones interferométricas.

## 1.4. Organización de la tesis

El presente trabajo está estructurado como se detalla a continuación:

**Capítulo 1:** Se presenta una introducción al trabajo, realizando una revisión general de SAOCOM y poniendo en evidencia la problemática que se busca resolver. Se plantea la hipótesis de trabajo y los objetivos generales y específicos que se desea alcanzar.

**Capítulo 2:** Se realiza una breve explicación de los fundamentos de SAR, presentando algunas definiciones y características que son útiles para comprender el trabajo realizado. Se describe la cadena de procesamiento interferométrico general y se hace énfasis en lo que respecta a las características del modo TOPSAR, particularmente, para SAOCOM.

**Capítulo 3:** Se presenta el esquema de procesamiento propuesto para obtener productos interferométricos coherentes utilizando imágenes TOPSAR de SAOCOM, partiendo desde los productos *Single Look Complex* (SLC) hasta la generación del interferograma. Esto incluye la ingesta de los datos y la detección de *bursts* comunes, el cálculo de la función de fase que se presenta en los datos debido al movimiento de la antena, el co-registro de las imágenes, y las estrategias de combinación de los *bursts* para generar escenas completas. También se detalla cómo identificar pares interferométricos útiles a partir de comparar las diferencias de frecuencia Doppler de las imágenes consideradas con el ancho de banda en acimut del sistema. Por último, se presenta una estrategia para remover los saltos de fase residuales que aparecen en los interferogramas en las zonas de transición entre *bursts* contiguos.

**Capítulo 4:** Se describe brevemente el área de estudio y el conjunto de imágenes utilizado para probar la metodología propuesta. Se realiza el procesamiento de los mismos y se muestran los resultados obtenidos.

**Capítulo 5:** Se exponen las conclusiones y se proponen trabajos futuros vinculados a las problemáticas que surgieron del desarrollo de esta investigación.

En este capítulo se realiza una revisión general de los fundamentos teóricos básicos de SAR, los principales conceptos que hacen a la interferometría SAR y los pasos de procesamiento que deben realizarse para generar productos interferométricos. También se describe brevemente la misión SAOCOM, sus objetivos y las características principales de sus modos de adquisición, haciendo énfasis particularmente en el modo TOPSAR y las consideraciones que deben tenerse en cuenta al realizar procesamientos interferométricos con imágenes adquiridas en esta modalidad.

### 2.1. Antecedentes

Numerosos trabajos se han llevado a cabo utilizando datos adquiridos en modalidad TOPS o TOPSAR. Esta modalidad ha sido analizada en comparación con el modo ScanSAR en diversos trabajos (27; 28), y sus principales características, en lo que respecta al ámbito del procesamiento interferométrico, han sido exploradas en (27; 29; 30). En particular, Yague-Martinez et al. presentan en (29) la metodología de procesamiento interferométrico para datos TOPS adquiridos por Sentinel-1. Por su parte, Miranda analiza en (30) las particularidades de la función de *deramping*, necesaria para realizar adecuadamente el procesamiento interferométrico de datos adquiridos bajo esta modalidad.

En lo que se refiere al procesamiento interferométrico de datos adquiridos por SAOCOM, existen algunos trabajos en los cuales se han aplicado técnicas interferométricas tales como (31; 32; 33). En dichos trabajos, se han utilizado datos adquiridos en modalidad Stripmap con diferentes objetivos: evaluar las capacidades interferométricas de SAOCOM (31), analizar el comportamiento de la coherencia interferométrica en zonas boscosas (32) o estimar el Equivalente de Agua de Nieve (EAN) utilizando técnicas de interferometría diferencial (33).

Hasta el día de la fecha, no se han presentado trabajos en los que se haya analizado la factibilidad de utilizar imágenes TOPSAR adquiridas por SAOCOM con fines interferométricos.

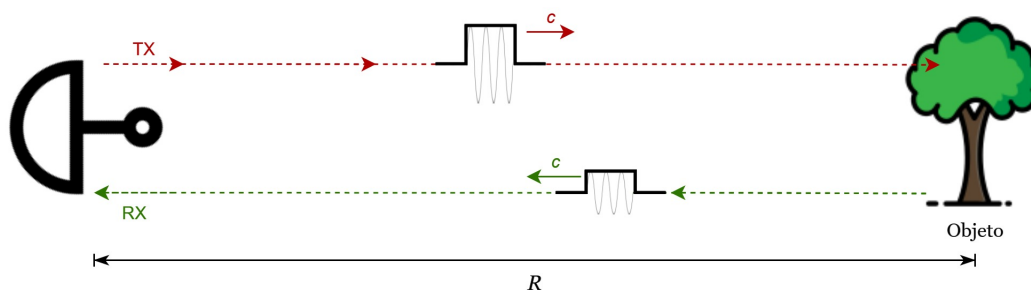
## 2.2. Breve Reseña del RADAR

Un RADAR (acrónimo en inglés de *Radio Detection And Ranging*) es un sistema activo, es decir, genera sus propias ondas electromagnéticas y las transmite mediante una antena hacia un objetivo. Estas ondas viajan a través del espacio e interactúan con el objeto apuntado, produciéndose una dispersión de energía. Dependiendo de las propiedades del objeto dispersor (su tamaño, forma y composición) y de las características de la adquisición (principalmente de la longitud de onda de la onda electromagnética transmitida y la geometría de adquisición), parte de la energía dispersada puede ser absorbida por el objeto, otra puede pasar a través de él y otra puede ser reflejada. De este modo, la antena del radar recibirá toda, parte o nada de la energía de las ondas.

En un sistema de radar, la señal transmitida viaja durante un periodo de tiempo  $t$  proporcional a la distancia existente entre el objeto apuntado y la antena, lo cual permite conocer la distancia o *rango*  $R$  entre la antena y el elemento dispersor a partir de la siguiente ecuación (Figura 2.1):

$$R = \frac{1}{2}ct \quad (2.1)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz.



**Figura 2.1:** Principio de funcionamiento del radar. Tomado de (1) y modificado.

La invención del radar como un concepto para la detección y localización de objetos en el espacio tridimensional, data de alrededor del siglo XX y es típicamente atribuida tanto al inventor y emprendedor alemán Christian Huelsmeyer (1881-1957), creador de un sistema de microondas activo para detectar objetos metálicos distantes conocido como “*Telemobiloscope*”, como al ingeniero británico Robert Watson-Watt, quien en junio de 1935 demostró el funcionamiento de un sistema de detección y localización capaz de localizar con precisión objetos aéreos a una distancia de hasta 30 km aproximadamente.

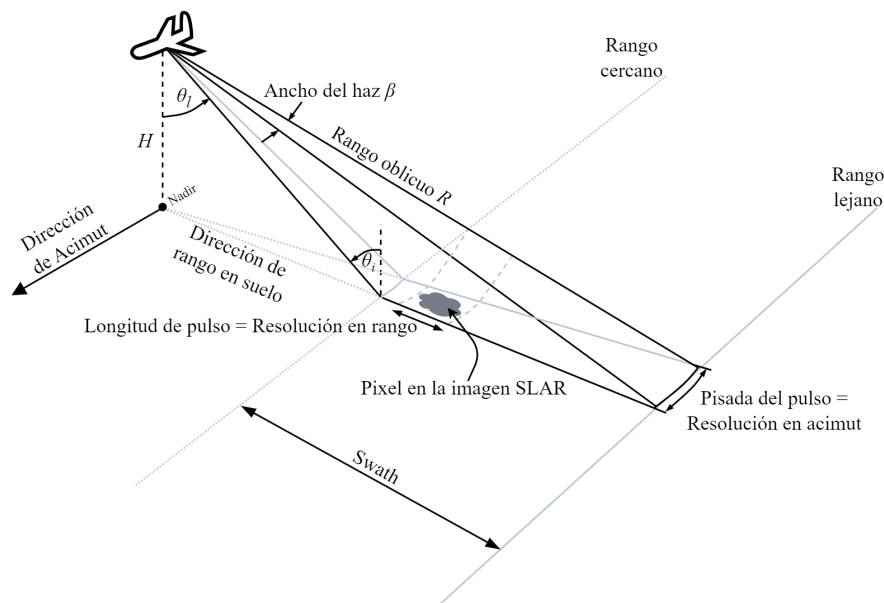
Una vez inventada, la tecnología de radar fue desarrollada rápidamente durante la Segunda Guerra Mundial, motivada principalmente por cuestiones vinculadas a la defensa y vigilancia aérea. A inicios de la década de 1940, los radares ya eran lo suficientemente pequeños como para ser montados en aviones, extendiendo su ámbito de aplicación hacia una serie de nuevos campos, incluyendo la creciente disciplina de observación de la Tierra.

El atractivo en el uso de radares para la adquisición de imágenes proviene principalmente del hecho de que este tipo de sistemas es capaz de hacerlo prácticamente en cualquier condición climática y en cualquier momento del día (diario o nocturno). Estas capacidades son ventajosas en numerosas aplicaciones de vigilancia, permitiendo mapear regularmente áreas afectadas por coberturas densas de nubes, lluvias persistentes, o zonas con baja iluminación.

Adicionalmente, las señales de radar interactúan de forma diferente con la superficie iluminada respecto otros sistemas de sensado existentes, proporcionando nueva información sobre el entorno observado (2).

### 2.3. Radares Aéreos de Mirada Lateral (SLAR)

Con el desarrollo de los sistemas de Radar Aéreo de Mirada Lateral (SLAR) en los años '50, apareció el primer sistema de radar aéreo con un desempeño confiable para la toma de imágenes. Este tipo de sistemas consiste, esencialmente, en un sensor de radar montado sobre una plataforma aérea (o espacial) que se mueve a lo largo de una trayectoria rectilínea a una altura  $H$  (véase la Figura 2.2). A diferencia de la mayoría de los sistemas ópticos para adquisición de imágenes que apuntan sus sensores hacia el nadir (punto de la superficie terrestre situado directamente debajo del sensor (34)), la antena de un sistema SLAR (y de cualquier otro radar para la toma de imágenes) se aleja de este punto formando un ángulo llamado *ángulo de vista* ( $\theta_l$ ) de manera tal que ilumina una franja (*swath*) continua de la superficie terrestre a medida que la aeronave avanza (2).



**Figura 2.2:** Geometría de un sistema SLAR. El radar vuela en línea recta a una altitud  $H$  y observa la Tierra con un ángulo de vista  $\theta_l$ . El ángulo  $\theta_i = (90^\circ - \theta_l)$  es el ángulo de incidencia. El tamaño del área iluminada está definido por el ancho del haz  $\beta$  y la distancia entre el dispositivo y el suelo  $R$ . Nótese que el haz del radar es ancho en la dirección en rango pero es angosto en acimut. El movimiento de avance de la plataforma aérea permite la generación de la imagen. Tomado de (2) y modificado.

Mientras vuela a lo largo de su trayectoria, el radar va transmitiendo una secuencia de pulsos de microondas de corta duración  $\tau_p$ , cada uno de los cuales ilumina, en un instante dado, un área sobre la superficie que normalmente es conocida como pisada o *footprint* de la antena. El tamaño  $S$  de esa pisada, tanto en la dirección de rango (dirección perpendicular a la de vuelo) como en la dirección de acimut (dirección paralela a la trayectoria de vuelo), está definida por la relación entre la longitud de onda  $\lambda$  del sistema y la longitud lateral  $L$  de la antena en dirección acimutal (siendo el ancho del haz de la antena  $\beta = \lambda/L$ ), así como también por la distancia  $R$  entre el sensor del radar y el suelo (2), a través de la siguiente

ecuación:

$$S \approx \frac{\lambda}{L} R = \beta \cdot R \quad [m] \quad (2.2)$$

Para formar una imagen bidimensional, los ecos recibidos desde el suelo deben ser ordenados según su tiempo de arribo al sensor en ambas direcciones, rango y acimut. En la dirección en rango, los ecos del suelo llegan progresivamente desde el rango cercano al rango lejano del swath. Los objetos físicamente ubicados en diferentes rangos pueden ser distinguidos si su separación en esta dirección es mayor que la mitad de la longitud del pulso transmitido. De esta manera, la resolución en rango para un sistema SLAR está definida por:

$$\rho_R = \frac{c \cdot \tau_p}{2} \quad [m] \quad (2.3)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz. La variable  $\rho_R$  en la Ec. 2.3 es conocida como la **resolución en rango oblicuo** (del inglés *slant range resolution*) de un sistema SLAR ya que describe la capacidad de distinguir objetos a diferentes distancias (oblicuas) desde el radar. Sin embargo, normalmente hay un mayor interés en conocer la **resolución de rango en suelo** (del inglés *ground range resolution*)  $\rho_G$ , que describe la habilidad de discriminar objetos que están ubicados en el suelo y es calculada a partir de  $\rho_R$  a través del ángulo de incidencia local  $\theta_i$ , por medio de la siguiente fórmula:

$$\rho_G = \frac{\rho_R}{\sin(\theta_i)} \quad [m] \quad (2.4)$$

La Ec. 2.4 muestra que la resolución  $\rho_G$  no es constante a lo largo del swath sino que mejora a medida que nos alejamos del nadir (dado que se incrementa el  $\theta_i$ ). Esto es contrario al comportamiento de la mayoría de los sistemas ópticos para los cuales la resolución en suelo se deteriora conforme se incrementa  $\theta_i$  (2).

En la dirección en acimut, el suelo es escaneado por el movimiento del radar a lo largo de su trayectoria de vuelo. En el caso de los sistemas SLAR, la **resolución en acimut**  $\rho_{Az}$  (la capacidad de discriminar objetos en dicha dirección) está definida por el ancho de la pisada de la antena en acimut  $S_{Az}$ , que a su vez está limitada por la longitud lateral de la antena  $L_{Az}$  en esa dirección. Por lo tanto, siguiendo la ecuación 2.2, la resolución en acimut queda expresada como:

$$\rho_{Az} = S_{Az} \approx \frac{\lambda}{L_{Az}} R = \beta_{Az} \cdot R \quad [m] \quad (2.5)$$

La Ec. 2.5 indica que la resolución en acimut  $\rho_{Az}$  se deteriora linealmente a medida que se incrementa la distancia  $R$  entre el sensor y el suelo. Esto tiene dos implicancias importantes para los sistemas SLAR: primero, a medida que  $R$  cambia, desde el rango cercano hasta el rango lejano del swath, la resolución en acimut no se mantiene constante. Segundo, y más importante, la dependencia de  $\rho_{Az}$  con la distancia  $R$  hace que la utilización de sistemas SLAR en plataformas de gran altitud, o incluso espaciales, sea impracticable. Para ilustrar este punto, se considera un sistema SLAR en banda C ( $\lambda = 0,03 \text{ m}$ ) que utiliza una antena de  $L = 3 \text{ m}$  de longitud. Si está montada sobre un avión que vuela a  $H = 3000 \text{ m}$  de altitud y observa con un ángulo de vista de  $\theta_l = 30^\circ$ , este sistema alcanzará una resolución aceptable en acimut de  $\rho_{Az} = 0,01 \cdot 3000 \cdot 2 = 60 \text{ m}$ . Sin embargo, si el mismo sistema es operado desde una plataforma espacial a  $H = 800 \text{ km}$ ,  $\rho_{Az}$  será de  $16 \text{ km}$ , lo cual es inaceptable para la mayoría de las aplicaciones de observación de la Tierra (2).

Una solución directa para mantener la resolución en acimut del sistema a niveles aceptables, incluso para aplicaciones espaciales, es aumentar la longitud de la antena utilizada por el



sistema hasta alcanzar el valor de resolución  $\rho_{Az}$  deseado. Matemáticamente es posible, sin embargo, físicamente es impracticable. Considerando el ejemplo anterior, se puede encontrar que se necesita una longitud de antena de alrededor de  $L = 800 \text{ m}$  para alcanzar una resolución de  $\rho_{Az} = 60 \text{ m}$  desde el espacio. Una solución más elegante y práctica para resolver este inconveniente fue desarrollada en 1952 (el principio de apertura sintética) (2).

A pesar de sus limitaciones en resolución, los sistemas SLAR siguen siendo populares para muchas aplicaciones basadas en aire y en tierra. Esta popularidad se debe en gran medida a su simplicidad tanto de diseño como en sus requerimientos para el procesamiento de datos.

### 2.4. Radar de Apertura Sintética (SAR)

En 1952, el ingeniero Carl Wiley (1918-1985) hizo un descubrimiento fundamental que proveía una solución al problema de resolución en acimut que afectaba a la tecnología SLAR. En términos técnicos, observó que existía una correspondencia uno a uno entre la posición de un objeto reflectante en la dirección en acimut y el desplazamiento Doppler instantáneo de la señal reflejada por ese objeto. Además, postuló que un análisis de frecuencia de las señales registradas permitiría alcanzar una mayor precisión en la resolución en acimut que la lograda por los sistemas SLAR convencionales. El descubrimiento de Wiley, usualmente conocido como *síntesis de apertura*, es el elemento clave detrás de todos los sistemas de radar modernos para la toma de imágenes de alta resolución (2).

El principio de síntesis de apertura permite crear (o “sintetizar”) una antena de longitud efectiva mucho mayor (conocida como **apertura sintética**) a partir de una secuencia de adquisiciones realizadas con una antena más pequeña, a medida que ésta se mueve a lo largo de la trayectoria de vuelo. Como la longitud de la antena está íntimamente relacionada con las capacidades de resolución de un sistema de radar (véase la Ec. 2.5), esta antena sintética de mayor longitud permite mejorar la resolución del sistema utilizando antenas de un tamaño físicamente razonable, incluso cuando el radar esté montado sobre una plataforma espacial. En la Sección 2.4.4 se retomará y explicará con mayor profundidad este concepto.

De este modo, se pueden resolver las limitaciones presentes en los sistemas SLAR, registrando y procesando una sucesión de ecos provenientes de los objetos situados en la zona de interés iluminada, para formar una imagen.

#### 2.4.1. Adquisición de datos SAR

Un sistema SAR permite generar mapas de retrodispersión de la superficie terrestre utilizando un esquema de mirada lateral. Es decir, a medida que el radar se desplaza a cierta velocidad a lo largo de su trayectoria de vuelo, va transmitiendo ondas electromagnéticas en forma perpendicular a esta trayectoria y con un ángulo de visión, respecto del nadir, distinto de cero. De esta manera, se evitan las ambigüedades que se presentarían por la llegada simultánea de dos ecos correspondientes a distintos blancos en tierra que pudieran encontrarse ubicados en posiciones equidistantes respecto del nadir (5).

La Tabla 2.1 muestra una lista de las plataformas SAR más relevantes hasta el momento. Los sensores están ordenados según su período de operatividad. Para cada instrumento, se indica su longitud de onda de operación, polarizaciones disponibles, resolución y tamaño de las imágenes adquiridas, y tiempo de revisita (2).

## 2.4 RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (SAR)

**Tabla 2.1:** Lista de sensores SAR existentes y proyectados. Tomado de (2) y modificado.

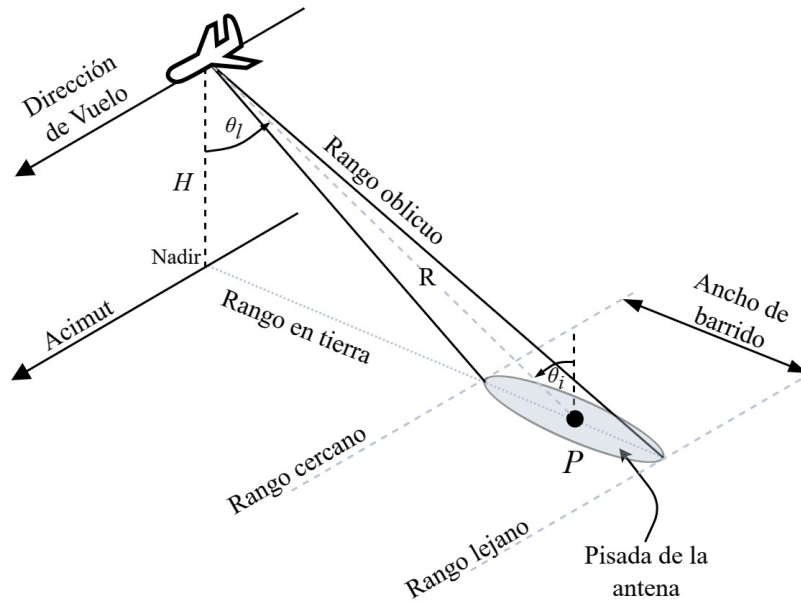
Sensor	Duración	Longitud de onda $\lambda$	Polarización	Resolución	Tamaño de la adquisición	Período de revisita
Seasat	1978	24.6 cm (Banda L)	HH	Az: 25 m Rg: 25 m	100 km	-
ERS-1	1991-2001	5.6 cm (Banda C)	VV	Az: 6-30 m Rg: 26 m	100 km	35 días
JERS-1	1995-1998	24.6 cm (Banda L)	HH	Az: 18 m Rg: 18 m	75 km	44 días
ERS-2	1995-2011	5.6 cm (Banda C)	VV	Az: 6-30 m Rg: 26 m	100 km	35 días
ENVISAT	2002-2012	5.6 cm (Banda C)	HH, VV, VV/HH, HH/HV, VV/VH	Az: 28 m Rg: 28 m	100 km	35 días
ALOS-1	2006-2011	24.6 cm (Banda L)	FBS: HH, VV FBD: HH/HV, HH/VH PLR: HH/HV /VH /VV ScanSAR: HH, VV	FBS: 10x10 m FBD: 20x10 m PLR: 30x10 m ScanSAR: 100 m	FBS: 70 km FBD: 70 km PLR: 30 km ScanSAR: 250-350 km	46 días
Radarsat-1	1995-2013	5.6 cm (Banda C)	HH	Standard: 25x28m Fine: 9x9m Wide1: 35x28m Wide2: 35x28m ScanSAR: 50x50-100x100m	Standard: 100 km Fine: 45 km Wide1: 165 km Wide2: 150 km ScanSAR: 305-510 km	24 días
TerraSAR-X TanDEM-X	2007- 2010-	3.5 cm (Banda X)	Simple: HH, VV Doble: HH/VV, HH/HV, VV/VH Twin: HH/VV, HH/VH, VV/VH	Spotlight: 0.2x1.0-1.7x3.5m Stripmap: 3x3m ScanSAR: 18-40m	Spotlight: 3-10 km Stripmap: 50x30 km ScanSAR: 150x100-200x200 km	11 días
Radarsat-2	2007-	5.6 cm (Banda C)	Simple: HH, VV, HV, VH Doble: HH/HV, VV/VH Cuádruple: HH/HV/VH/VV	Spotlight: ~1.5m Stripmap: ~3x3-25x25m ScanSAR: 35x35-100x100m	Spotlight: 18x8 km Stripmap: 20-170 m ScanSAR: 300x300- 500x500 km	24 días
COSMO -SkyMed	2007-	3.5 cm (Banda X)	Simple: HH, VV, HV, VH Doble: HH/HV, HH/VV, VV/VH	Spotlight: $\leq 1$ m Stripmap: 3-15m ScanSAR: 30-100m	Spotlight: 10x10 km Stripmap: 40x40 km ScanSAR: 100x100 - 200x200 km	Satélite: 16 días Constelación: ~hrs
ALOS-2 PALSAR-2	2014-	24.6 cm (Banda L)	Simple: HH, VV, HV, VH Doble: HH/HV, VV/VH Cuádruple: HH/HV/VH/VV	Spotlight: 1x3m Stripmap: 3-10m ScanSAR: 25-100m	Spotlight: 25x25 km Stripmap: 55x70-70x70 km ScanSAR: 355x355 km	14 días
Sentinel-1	2014-	5.6 cm (Banda C)	Simple: HH, VV Doble: HH/HV, VV/VH	Interferometric Wide Swath (IW): 5x20m Extra Wide Swath (EW): 20-40m	Stripmap: 375 km IW: 250 km EW: 400 km	Satélite: 12 días Constelación: 6 días
SAOCOM	2018-	24.6 cm (Banda L)	Simple: HH, VV Doble: HH/HV, VV/VH Cuádruple: HH/HV/VH/VV	Stripmap: 10x10m TopSAR: 100x100m	Stripmap: >65 km TopSAR: 320 km	Satélite: 16 días Constelación: 8 días
PAZ SAR	2018-	3.5 cm (Banda X)	*Ver TerraSAR/TanDEM-x	*Ver TerraSAR/TanDEM-x	*Ver TerraSAR/TanDEM-x	11 días
RCM	2019	5.6 cm (Banda C)	Simple: HH, VV, VH, HV Doble: HH/HV, VV/VH, HH/VV Compacto Cuádruple	Modos very high, high, medium, y low-res (3-100 m)	20x20-500x500 km	Satélite: 12 días Constelación: ~hrs
NISAR	2021	24.6 cm (Banda L)	Simple: HH, VV, VH, HV Doble: HH/HV, VV/VH, HH/VV Cuádruple	3-20 m (según el modo)	250 km	12 días
BIOMASS	2021	70 cm (Banda P)	Cuádruple	$\leq 60$ x50 m	160 km	17 días
TanDEM-L	2023	24.6 cm (Banda L)	Modos simple, doble y cuádruple	12x12 m	350 km	Satélite: 16 días Constelación: 8 días

### 2.4.2. Geometría de adquisición

La Figura 2.3 representa la geometría de adquisición general de un sistema SAR. Como se puede observar, la representación es prácticamente idéntica a la mostrada en la Figura 2.2 ya que la base teórica de la geometría de los radares SAR es esencialmente la misma que la de los sistemas SLAR. Simplemente se han agregado algunos parámetros a la Figura 2.3 para poder definirlos y comprender los conceptos básicos que involucra una adquisición SAR.

Asumiendo que la tierra es plana y que el radar se mueve a una velocidad constante  $V$ , siguiendo una trayectoria rectilínea, los parámetros que componen la geometría de adquisición SAR son:

- **Objetivo o blanco  $P$ :** es el blanco o punto que se quiere detectar. Normalmente se usa este punto para realizar los cálculos pero, en realidad, se captura información de todo el entorno (35; 36).
- **Acimut (*cross-range*):** es la dimensión correspondiente a la dirección alineada con el vector de velocidad de la plataforma sobre la que está montada el radar (35; 36).



**Figura 2.3:** Geometría de adquisición de un sistema SAR. Tomado de (3; 2) y modificado.

- **Nadir:** se trata del punto sobre la superficie de la Tierra que está situado directamente debajo del sensor SAR. El movimiento de la plataforma provoca que este punto recorra una trayectoria sobre la superficie terrestre, definida como la trayectoria de vuelo del radar (35; 36).
- **Rango:** suele haber cierta ambigüedad cuando se hace referencia a este término, por lo cual es conveniente establecer ciertas definiciones (35; 36):
  - Rango oblicuo (del inglés, *Slant Range*): es la dirección de observación del radar y es la que normalmente se la conoce como *rango*. El rango determina la distancia que existe entre el sensor y el objetivo  $P$  (3).
  - Rango en tierra (del inglés, *Ground Range*): es la proyección del rango oblicuo sobre el suelo (3).
  - Rango cercano (del inglés, *Near Range*): es la distancia más cercana a la que se encuentran los blancos iluminados, medida desde el sensor (3).
  - Rango lejano (del inglés, *Far Range*): es la distancia más lejana a la que se encuentran los blancos iluminados, medida desde el sensor (3).
- **Ancho de barrido (del inglés, *swath*):** es la franja que el SAR es capaz de iluminar en dirección perpendicular a la de vuelo. Se trata del ancho de la imagen en la dirección de rango en tierra, desde el rango cercano al rango lejano (35; 36).
- **Ancho de haz (del inglés, *beamwidth*):** corresponde al ancho del diagrama de radiación de la antena. Para aplicaciones SAR se consideran el ancho del haz en elevación y en acimut (35; 36).
- **Pisada de la antena (del inglés, *footprint*):** se trata de la proyección del diagrama de radiación de la antena sobre la superficie terrestre, para un pulso electromagnético determinado. La posición y la forma están dadas por el haz de la antena y la geometría de la Tierra (35; 36).

- **Ángulo de incidencia  $\theta_i$** : es el ángulo formado entre la normal a la superficie que atraviesa el blanco  $P$  y el rango oblicuo  $R$  al mismo (3; 35). Este ángulo se incrementa desde el rango cercano al rango lejano (3).
- **Ángulo de mirada  $\theta_r$** : es el ángulo formado entre el nadir y el rango oblicuo (35; 36).

### 2.4.3. Adquisición en Rango

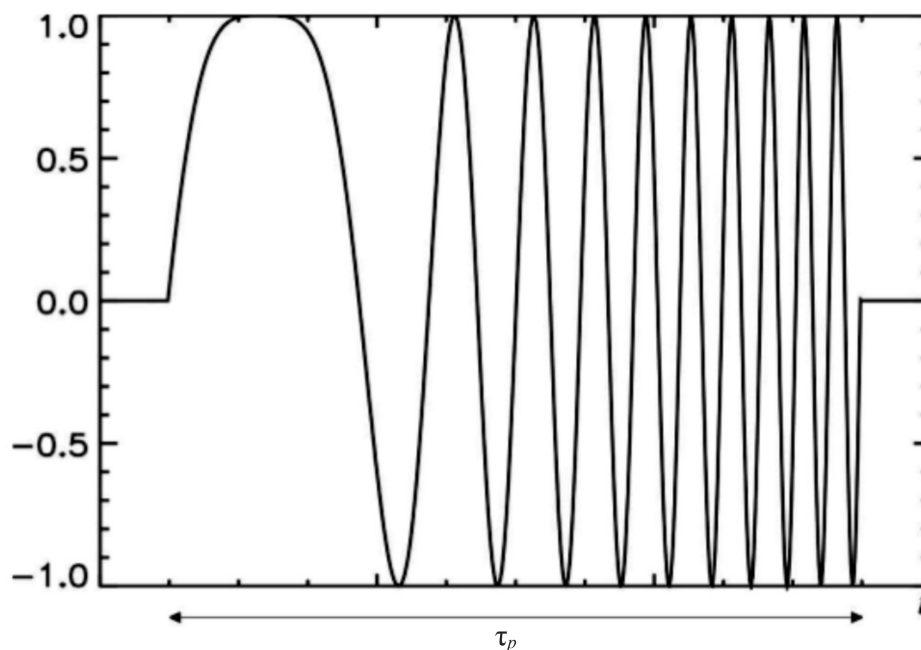
#### 2.4.3.1. El Chirp

Al igual que los sistemas SLAR, los SAR envían pulsos de microondas de corta duración a medida que el radar se traslada a lo largo de su trayectoria. Sin embargo, como se observó en la Ec. 2.3, la resolución en rango de un sistema SLAR es inversamente proporcional a la duración de los pulsos transmitidos. Esto implica que, para lograr aumentar la resolución en rango, es necesario transmitir pulsos muy cortos y de alta energía, lo cual constituye un desafío constructivo desde el punto de vista de la electrónica necesaria del radar (5).

Esta limitación es superada en los sistemas SAR mediante el envío de pulsos cortos **modulados linealmente en frecuencia**, conocidos con el nombre de *chirp*. Cada chirp es enviado en dirección aproximadamente perpendicular a la dirección de vuelo y está definido en su forma compleja por la siguiente ecuación (3; 4):

$$s(t) = \exp[j2\pi(f_c t + K_r t^2/2)] \cdot \text{rect}\left[\frac{t}{\tau_p}\right] \quad (2.6)$$

donde  $t$  es la variable de tiempo,  $\text{rect}[t/\tau_p]$  es un pulso rectangular de duración  $\tau_p$ , por lo que  $\tau_p$  representa la duración del chirp en  $[s]$ ,  $f_c$  es la frecuencia central del chirp en  $[Hz]$  y  $K_r$  su tasa de variación de frecuencia en  $[Hz/s]$ . La Figura 2.4 muestra una representación de la parte real del chirp definido por la Ec. 2.6 para un valor de  $K_r > 0$ , de manera que la frecuencia de la señal crece a medida que transcurre el tiempo  $t$ .



**Figura 2.4:** Representación de la parte real del chirp definido por la Ec. 2.6 en unidades arbitrarias, para  $K_r > 0$ . Tomada de (4) y modificada.

El rango de frecuencias abarcadas por el chirp define el ancho de banda  $B$  de la señal. Dado que el chirp está linealmente modulada en frecuencia, el valor de  $B$  es directamente proporcional a su duración  $\tau_p$  (3).

### 2.4.3.2. Resolución en Rango

Como se definió en la Sección 2.3, la resolución espacial en rango describe la habilidad del sistema de radar para discriminar objetos que están ubicados a diferentes distancias. Es decir, define la distancia mínima de separación a la que deben encontrarse dos objetos para poder ser distinguidos como tales (3).

De acuerdo a esta definición, la resolución en rango oblicuo puede ser calculada a partir de la Ec. 2.3. Para radares convencionales, la duración del pulso es inversamente proporcional al ancho de banda  $B$  del mismo ya que se necesita un mayor número de frecuencias para poder representar dicho pulso en el espectro (dominio de frecuencias) (3). De este modo, la resolución en rango oblicuo queda representada por la ecuación:

$$\rho_R = \frac{c}{2B} \quad (2.7)$$

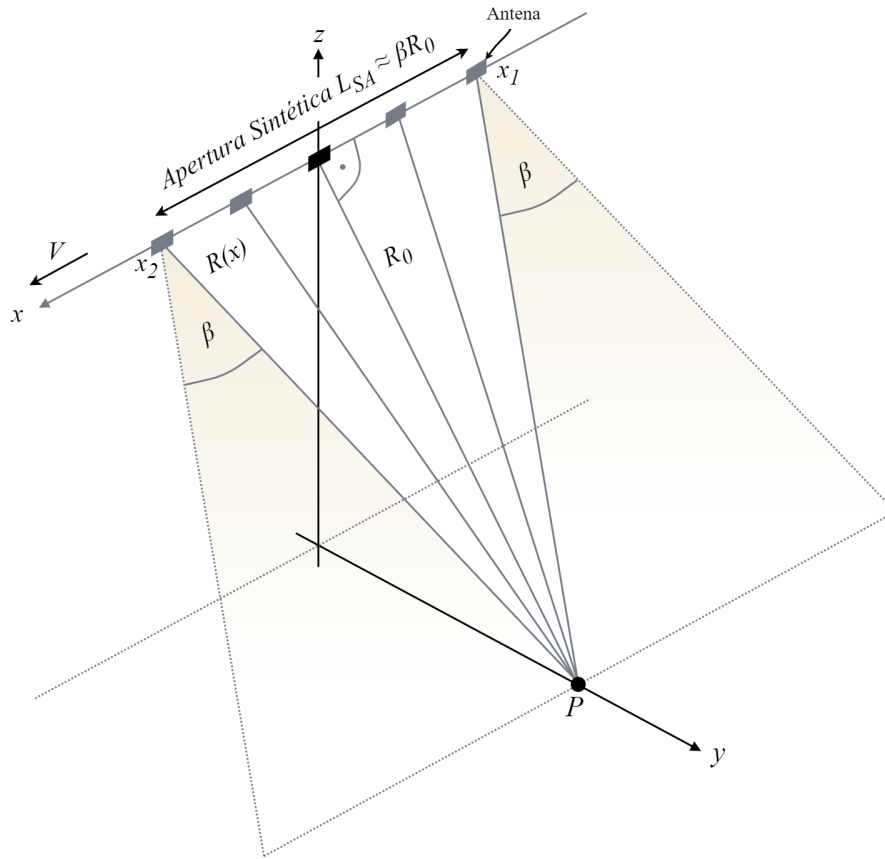
Para el caso de los sistemas SAR, al estar el pulso (chirp) modulado linealmente en frecuencia, se consigue un mayor ancho de banda  $B$  utilizando pulsos de mayor duración (3). Así, al aumentar la duración del pulso, se obtienen mejores resoluciones y se logra superar la limitación observada en los sistemas de radar convencionales.

## 2.4.4. Adquisición en Acimut

### 2.4.4.1. Principio de Apertura Sintética

La Figura 2.5 representa de manera simplificada el concepto de Wiley. Una antena de radar de longitud razonablemente corta, se mueve a una velocidad  $V$  a lo largo de su trayectoria de vuelo de derecha a izquierda. A medida que se mueve, el radar está constantemente transmitiendo pulsos cortos de energía electromagnética y recibiendo ecos provenientes de los objetos ubicados en el suelo. Cada pulso de radar ilumina un área de tamaño  $S$  sobre la superficie terrestre, de modo que, durante el tiempo de escucha, el radar registra ecos que han rebotado en la superficie terrestre, cuya amplitud y fase están relacionadas con las características del terreno (37). Para aplicaciones espaciales, la longitud  $L$  de la antena del radar (Ec. 2.2) da lugar a una pisada que típicamente mide algunos kilómetros, resultando en la limitada resolución que típicamente afecta a los sistemas SLAR.

Para aplicar el concepto de síntesis de apertura de Wiley, hay que asegurarse que el objeto  $P$  en la superficie de la Tierra es captado por varios pulsos de radar consecutivos a medida que el haz de la antena barre el suelo. Este requisito se ilustra en la Figura 2.5 mediante varias posiciones de la antena que iluminan el objeto  $P$  a medida que el sensor se mueve desde el punto  $x_1$  (primera vez que el objeto  $P$  es visto) hacia el punto  $x_2$  (última vez que  $P$  es observado). Una vez que los datos del radar son adquiridos, un post-procesamiento (conocido como proceso de *focalización*) es aplicado para combinar todas las adquisiciones realizadas entre  $x_1$  y  $x_2$  y, dentro de un único conjunto de datos, se vería como si hubiese sido adquirido con una antena de un tamaño mucho mayor. Esta antena virtualmente más larga es conocida como “apertura sintética”, ya que fue sintetizada a partir de un cierto número



**Figura 2.5:** Geometría de las observaciones utilizadas para formar la apertura sintética de un objetivo  $P$  ubicado en la posición  $x = 0$  de la trayectoria de vuelo. Tomado de (2) y modificado.

de adquisiciones con antenas de menor longitud. La longitud  $L_{SA}$  de esta apertura sintética puede ser calculada del siguiente modo:

$$L_{SA} = \frac{\lambda}{L} \cdot R_0 \approx \beta \cdot R_0 \quad (2.8)$$

Esto es equivalente a la huella  $S$  iluminada por la antena real (de menor longitud) instalada en la nave espacial (véase la Ec. 2.2) (2).

El conjunto de datos obtenido a partir de este proceso de síntesis de apertura es conocido como imagen SAR y está dotado de una mayor resolución que las imágenes SLAR adquiridas desde la misma distancia.

Este concepto de síntesis de apertura es la base de todos los sistemas modernos de radar aunque algunas modificaciones se han ido introduciendo en el concepto básico de adquisición de imágenes para maximizar ya sea la resolución de la imagen o bien su cobertura (algunas de los cuales se explorarán en las siguientes secciones).

#### 2.4.4.2. Frecuencia de Repetición de Pulso

Un sistema SAR envía un tren de chirps regularmente con una frecuencia conocida como Frecuencia de Repetición de Pulso (PRF). Es decir, una vez que se envía un chirp de duración  $\tau_p$  existe un tiempo de escucha o recepción durante el cual el radar no transmite y puede captar los ecos reflejados por los blancos de la superficie (3). El tiempo comprendido entre el inicio de un chirp enviado y el siguiente se conoce como Tiempo de Repetición de Pulso (PRT) y es la inversa de la PRF.

Durante el tiempo de recepción se abre una ventana de muestreo de los ecos, comúnmente denominada **Sampling Window Time** (SWT). Esta ventana se abre antes de la recepción del eco procedente del rango cercano y se cierra luego de la recepción del eco proveniente del rango lejano (3).

De este modo, la PRF constituye un parámetro fundamental en el diseño del radar ya que los ecos de la escena captada deben caer dentro de la SWT (3).

### 2.4.4.3. Frecuencia Doppler y Resolución en Acimut

Un blanco es iluminado por la antena durante un tiempo que se conoce como *tiempo de integración*  $T_i$ . Este tiempo, según la Figura 2.5, es aquel que transcurre mientras el radar se desplaza desde la posición  $x_1$  hacia la posición  $x_2$ . La señal reflejada que retorna hacia la antena durante este tiempo, es recibida con un cambio de frecuencia debido al efecto Doppler, el cual produce un cambio en la frecuencia de la señal provocado por movimiento relativo de la fuente respecto al objeto observado. Esta frecuencia es denominada frecuencia Doppler y es positiva o negativa según el radar se aproxime o se aleje del blanco observado, respectivamente (3).

La variación de la frecuencia Doppler es aproximadamente lineal con respecto al tiempo y es por ello que puede pensarse como un *chirp* en acimut (3; 38). Este *chirp Doppler* está determinado por un tiempo de duración ( $T_i$ ), una frecuencia central conocida como Centroide Doppler  $f_{DC}$  y una tasa de variación de la frecuencia conocida como Tasa Doppler  $k_a$  (3; 38; 30). Estos dos últimos parámetros se calculan a partir de datos tales como la velocidad relativa entre el sensor y el blanco, la distancia entre ambos y la longitud de onda.

El chirp Doppler presenta un ancho de banda  $B_{az}$  que se incrementa a medida que el tiempo de integración es mayor, por lo que la resolución en acimut mejora a medida que el ancho de banda de la señal aumenta. De este modo, la resolución en acimut está representada por la siguiente ecuación (3):

$$\rho_A = \frac{0,886 \cdot V}{B_{az}} \quad (2.9)$$

donde  $V$  representa la velocidad relativa sensor-blanco. El ancho de banda Doppler  $B_{az}$  puede calcularse mediante la siguiente ecuación (3):

$$B_{az} = 0,886 \frac{2 \cdot V}{L} \quad (2.10)$$

siendo  $L$  la longitud de la antena en la dirección de acimut.

A partir de estas ecuaciones se puede deducir que la resolución óptima en acimut es la mitad de la longitud de la antena en esa dirección (3):

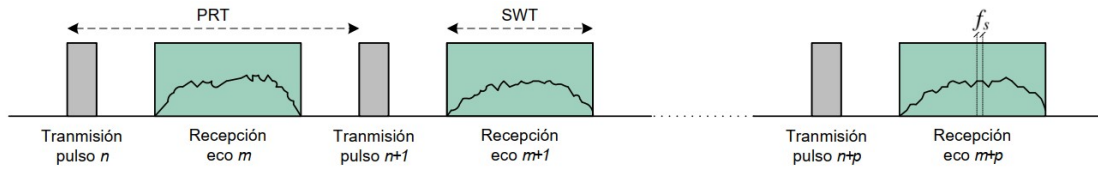
$$\rho_A = \frac{L}{2} \quad (2.11)$$

## 2.4.5. Datos RAW y Enfoque de la Imagen

### 2.4.5.1. Estructura de la matriz de datos RAW

La matriz de RAW, correspondiente al dato sin ningún tipo de procesamiento previo, está conformada por la suma coherente de una inmensa cantidad de ecos correspondientes a

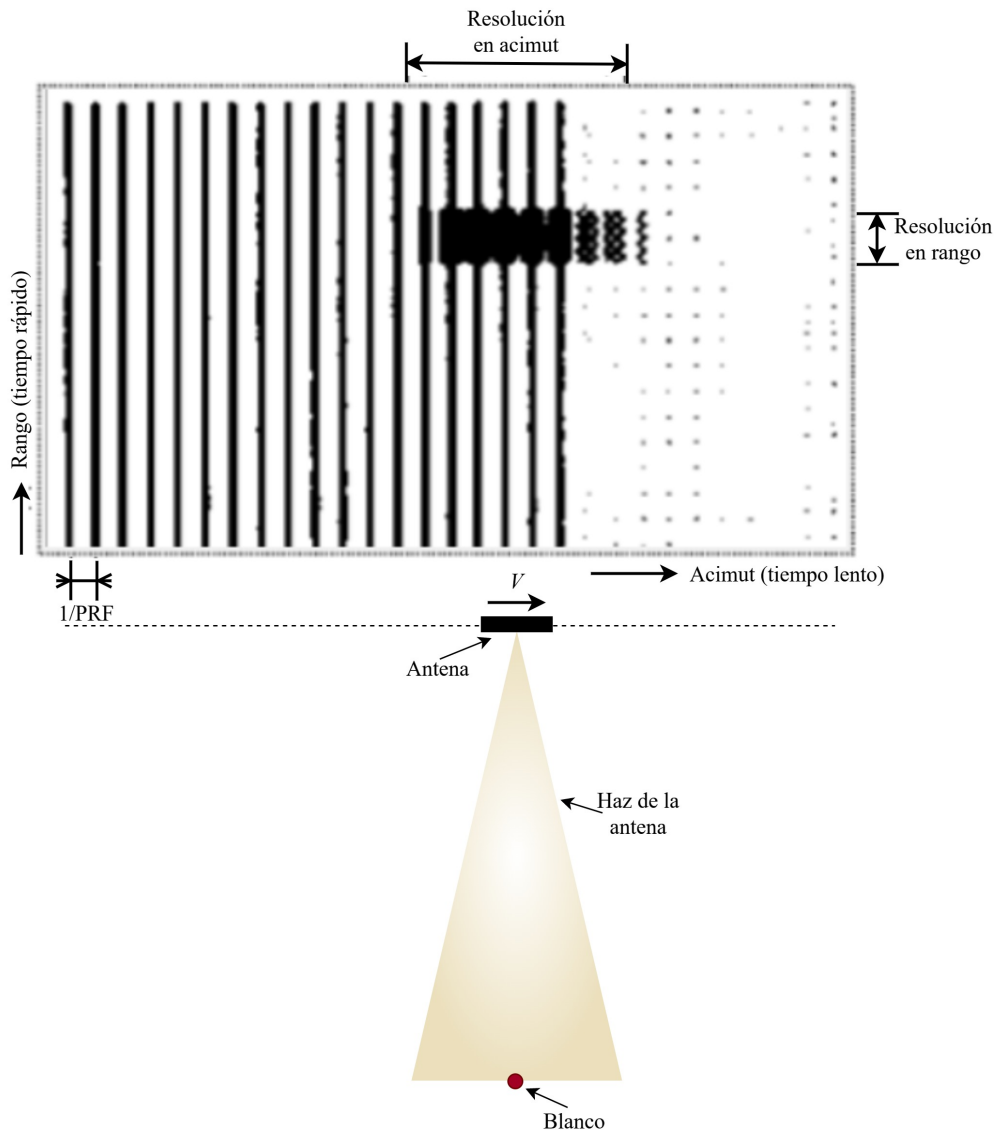
## 2.4 RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (SAR)



**Figura 2.6:** Ciclos de transmisión y recepción de un sistema SAR. Tomado de (3).

distintos blancos retrodispersores distribuidos en la escena (5). Tal como se desarrolló en la Sección 2.4.4, el radar emite un pulso y muestrea los ecos recibidos durante el tiempo de duración de la SWT. Este proceso se repite periódicamente con una frecuencia PRF a lo largo de la trayectoria de vuelo. La Figura 2.6 representa estos ciclos de transmisión y recepción de pulsos.

De este modo, las muestras digitalizadas de cada eco recibido durante la apertura de la ventana SWT son almacenadas y constituyen una fila de la matriz de datos RAW, donde la separación entre filas está dada por el PRT (5).



**Figura 2.7:** Esquema de la matriz de datos RAW. Tomado de (5) y modificado.

Por otra parte, las columnas de la matriz de datos RAW están constituidas por las muestras



obtenidas de cada eco recibido. Es decir, cada celda de cada fila corresponde a una muestra del eco recibido, donde la separación entre celdas está dada por la frecuencia de muestreo  $f_s$  y el tiempo correspondiente  $t_c = 1/f_s$  (5).

La diferencia en los órdenes de magnitud de los tiempos  $t_c$  ( $\sim \mu s$ ) y PRT ( $\sim ms$ ) es la razón por la cual se suele llamar al primero *tiempo rápido* y al último *tiempo lento* (3). La Figura 2.7 representa la organización de los datos de la matriz RAW, donde  $V$  es la velocidad de la plataforma (5).

### 2.4.5.2. Enfoque de la imagen

A diferencia de los sensores ópticos, los datos crudos RAW como tales no proporcionan información útil de la escena observada. Para poder obtener una imagen a partir de los datos crudos RAW es necesario llevar a cabo algún tipo de procesamiento. Este procesamiento recibe el nombre de *enfoque* ya que permite reconstruir la información de cada punto de la escena (6; 3; 35).

La imagen así obtenida, recibe el nombre de *Single Look Complex* (SLC) dado que cada píxel de la misma está representado por un valor complejo. De este modo, al almacenar los datos en formato complejo, se conserva tanto la información de amplitud como de fase de la señal recibida (3; 35). En la Sección 2.5 se analizarán algunos aspectos adicionales respecto a la amplitud y la fase de la imagen SAR.

De manera simplificada, el procesamiento puede entenderse como dos operaciones separadas de *matched filter* realizadas en rango y acimut.

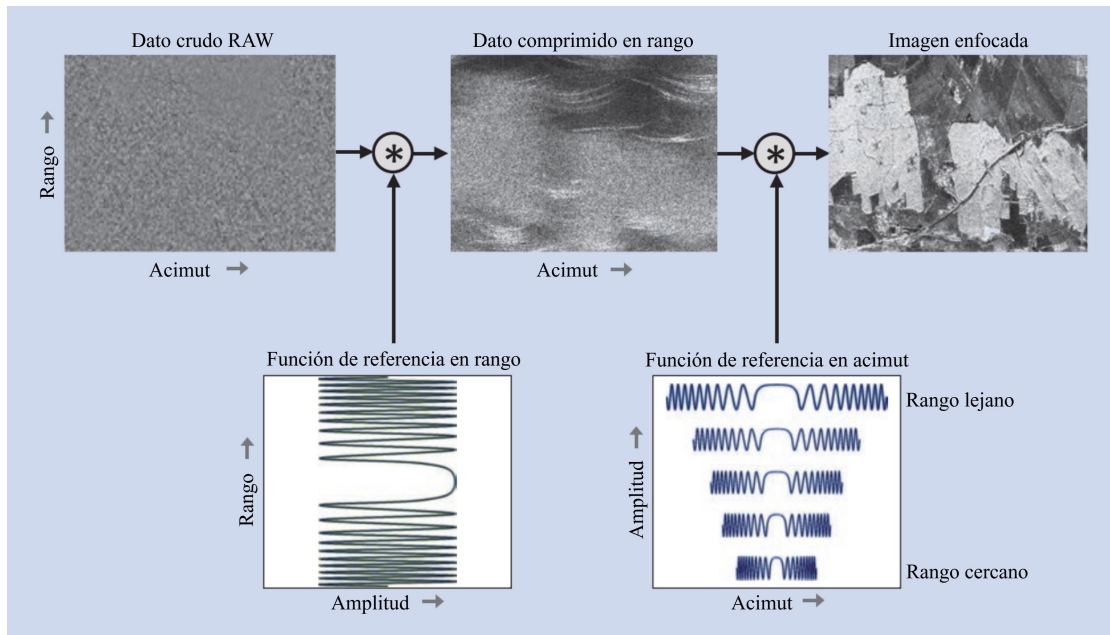
La técnica *Matched Filtering* consiste en realizar la correlación de los datos crudos RAW con el complejo conjugado del pulso emitido por el SAR para resolver el problema inverso y obtener la reflectividad de la superficie (3). La correlación se lleva a cabo convolucionando una función de referencia con la señal recibida (dato RAW), utilizando el chirp transmitido como función de referencia en rango y el chirp Doppler como función de referencia en acimut (5; 6). Este proceso recibe el nombre de *compresión*.

En general, en lugar de realizar el proceso de convolución en el dominio del tiempo, se suele llevar a cabo una multiplicación en el dominio de la frecuencia ya que es su operación dual y es menos demandante en términos computacionales (6).

De este modo, cada línea en rango es multiplicada en el dominio de la frecuencia por el complejo conjugado del espectro del chirp transmitido. El resultado obtenido es una imagen comprimida en rango, la cual únicamente proporciona información sobre la distancia relativa entre el radar y cualquier punto ubicado en tierra. El mismo razonamiento se sigue para la compresión en acimut (6).

La Figura 2.8 sintetiza los pasos de procesamiento básicos que involucra el enfoque de la imagen SAR.

Como se verá en las secciones que siguen, la imagen SAR normalmente es mostrada en términos de valores de intensidad de manera que cada píxel constituya un indicador de la reflectividad del punto en el terreno que está representando. Para lograr esto, son necesarios ciertos pasos adicionales en lo que hace al procesamiento de la imagen. Uno de ellos es la calibración, que asegura que cada valor de intensidad representa efectivamente el valor de reflectividad que corresponde. Otro paso es la geocodificación de la imagen, la cual asegura que la localización de cada píxel en la imagen SAR está directamente asociada a una posición



**Figura 2.8:** Síntesis de los pasos de procesamiento involucrados para enfocar una imagen SAR. El dato comprimido en rango se obtiene a partir de la convolución del dato RAW con la función de referencia en rango (chirp transmitido). En segunda instancia, la compresión en acimut se lleva a cabo convolucionando el dato comprimido en rango con la función de referencia en acimut (chirp Doppler), la cual va cambiando entre el rango cercano y el rango lejano. El símbolo "\*" representa la operación de convolución. Tomado de (6) y modificado.

determinada en el terreno (6).

Otra de las correcciones que se aplican a los datos obtenidos es conocida con el nombre de RCM. Se trata de una corrección que se aplica a los datos obtenidos luego de la compresión en rango y surge debido a que la distancia entre el radar y cualquier punto fijo en el terreno está cambiando dentro del tiempo de la apertura sintética (6; 5). Geométricamente, esta distancia puede ser representada mediante el teorema de Pitágoras como (6; 5):

$$RCM(t) = \sqrt{R_0^2 + (V \cdot t)^2} - R_0 \approx \frac{(V \cdot t)^2}{2R_0} \quad (2.12)$$

La Figura 2.9 esquematiza gráficamente la situación mencionada. La RCM se puede observar como una curvatura de la señal comprimida en rango, la cual también se percibe en el dato comprimido en rango de la Figura 2.8 (5). Si esta curvatura no se corrige, la RCM provocará un desenfoque en acimut cuando su valor máximo  $RCM_{max} = RCM(t = T_{ill}/2) > \rho_R/2$  (donde  $T_{ill}$  es el tiempo de iluminación que está dado aproximadamente por  $T_{ill} \approx \lambda R_0 / VL$ ), ya que la energía del blanco  $P$  estará distribuida en varias celdas de rango. Por este motivo, previo a realizar la compresión en acimut, esta curvatura debe ser corregida para que la energía correspondiente al blanco  $P$  a lo largo del tiempo de integración esté contenida en una única columna en rango (5). Es así que la correcta corrección de RCM es uno de los aspectos más desafiantes del enfoque SAR (6).

A lo largo de los años se han desarrollado distintos algoritmos de enfoque, siendo algunos de los más conocidos los descriptos brevemente a continuación:

- **Range-Doppler (RDA):** desarrollado entre 1976 y 1978, este algoritmo utiliza la técnica *Matched Filtering* para realizar la focalización en rango y en acimut. El problema de la RCM se soluciona con una interpolación en el dominio *range-Doppler*. El algoritmo

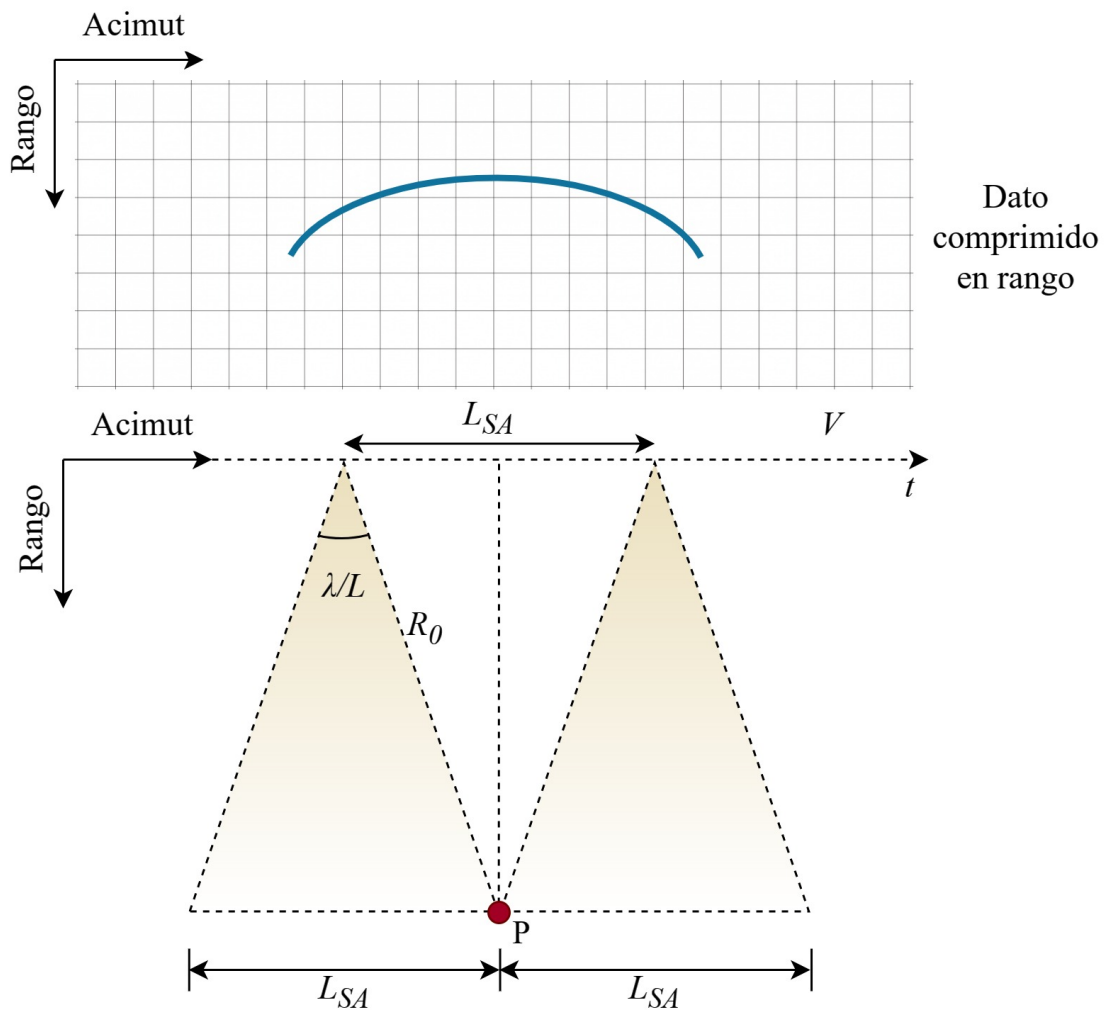


Figura 2.9: Migración de Celdas en Rango (RCM). Tomado de (5) y modificado.

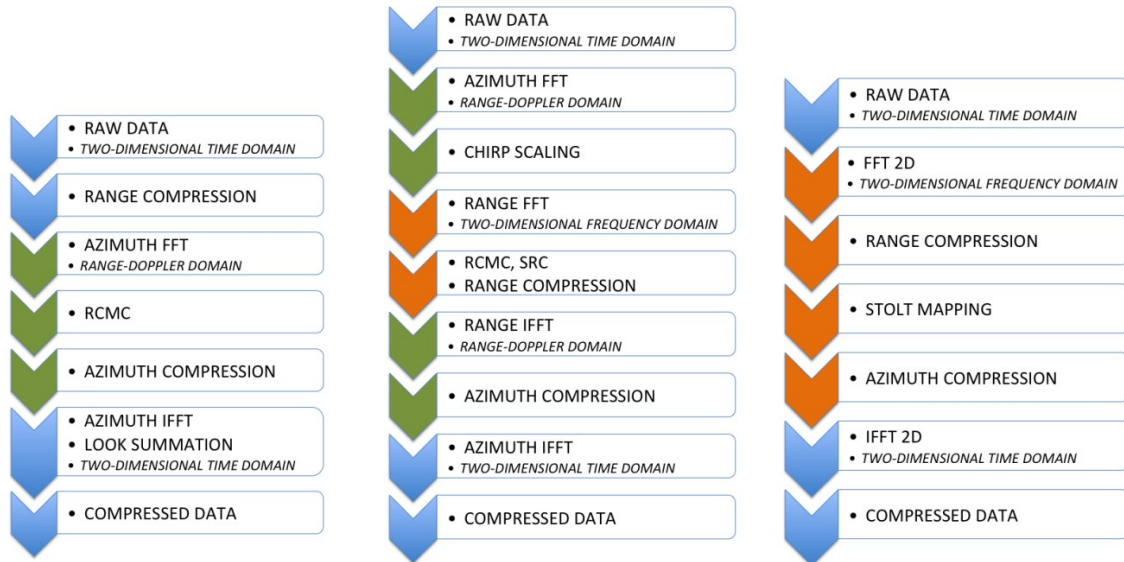
está diseñado con el objetivo de lograr eficiencia en el procesamiento utilizando operaciones en el dominio de las frecuencias tanto en rango como en acimut. Sin embargo, presenta algunos inconvenientes como la pérdida de precisión en la corrección de la curva de migración y la demanda de recursos computacionales en tiempo y espacio para llevar a cabo la interpolación (3; 7).

- **Chirp-Scaling (CSA):** presentado en 1992, fue creado para eliminar el uso de la interpolación para la corrección de RCM. Para ello, busca ecualizar la curva de migración en rango mediante una multiplicación con una determinada fase en el dominio *range-Doppler* (3; 7).
- **Omega-K:** propuesto en 1991, el algoritmo  $\omega - k$  resuelve el problema de focalización mediante técnicas de migración sísmica. El algoritmo utiliza íntegramente operaciones realizadas en el dominio bidimensional de las frecuencias, trabajando con la frecuencia angular  $\omega$  en rango y con el número de onda  $k_x$  en acimut. Su principal ventaja es la posibilidad de procesar datos adquiridos con grandes aperturas sintéticas en acimut o elevados ángulos de *squint*, a diferencia de los algoritmos mencionados anteriormente (3; 7).

La Figura 2.10 muestra una representación en bloques de las operaciones que se llevan a cabo en cada algoritmo mencionado. Las operaciones destacadas en color azul corresponden

a operaciones realizadas en el dominio del tiempo; en naranja, las realizadas en el dominio de la frecuencia; y en verde, las desarrolladas en el dominio *range-Doppler* (7).

No se analizarán más detalles sobre estos algoritmos en la presente tesis, pudiendo encontrarse más información sobre los mismos en las siguientes publicaciones: *Range-Doppler* (39; 40); *Chirp-Scaling* (41; 42); y *Omega-K* (43; 44).



(a) Algoritmo *Range-Doppler*. (b) Algoritmo *Chirp Scaling*. (c) Algoritmo  $\omega$ -k.

**Figura 2.10:** Diagrama en bloques con las principales operaciones desarrolladas en los algoritmos RDA, CSA y Omega-K. (RCM). Tomado de (7).

## 2.5. Imágenes SAR

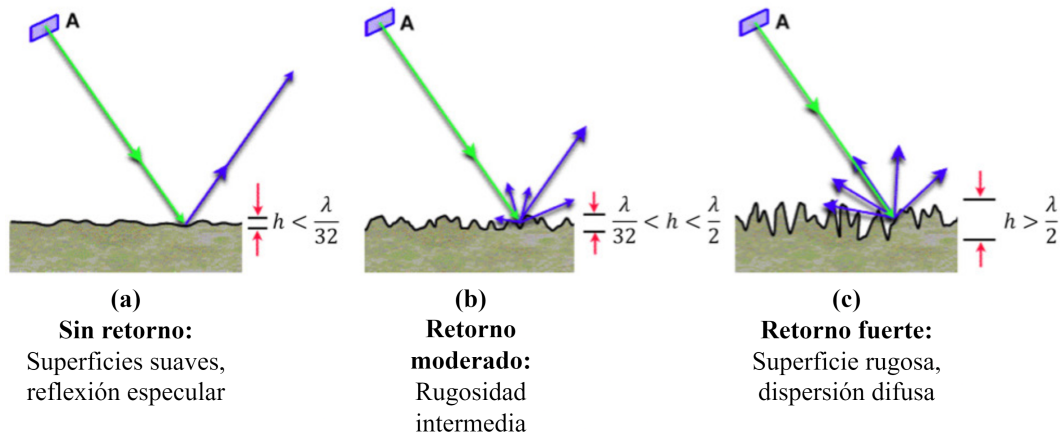
Como se mencionó en la Sección 2.4.5, el SAR es un sistema de sensado coherente en el cual se miden la amplitud y fase de la señal retrodispersada por objetos que están ubicados en el suelo. En este sentido, una imagen SAR puede ser vista como un mosaico (es decir, un arreglo bidimensional formado por columnas y filas) conformado por pequeños elementos de imagen (píxeles), donde cada píxel corresponde a un área reducida de la superficie terrestre (lo cual se conoce como *celda de resolución*) y viene dado por un número complejo que representa la información de amplitud y fase de las señales retrodispersadas por los diferentes elementos (rocas, vegetación, edificios, etc.) que se encuentran comprendidos dentro de la proyección en tierra de la celda de resolución correspondiente (12).

### 2.5.1. Amplitud de la imagen SAR

La imagen SAR detectada contiene medidas de amplitud de la radiación retrodispersada hacia el radar por objetos (que desde la perspectiva del radar pueden modelarse como un conjunto de *dispersores* en función de su geometría y la longitud de onda del sistema) que se encuentran dentro de una celda de resolución. Esta amplitud depende más de las características físicas (rugosidad) de los objetos dispersores del terreno que de su composición química. Típicamente, las rocas expuestas y las áreas urbanas presentan amplitudes fuertes, mientras que las superficies planas y lisas (como las cuencas de agua) muestran amplitudes bajas,

ya que la radiación es principalmente dispersada hacia otras direcciones y no directamente hacia el radar. La Figura 2.11 muestra una representación esquemática de la interacción de la señal del radar con la superficie, en función de la rugosidad de la misma y la longitud de onda  $\lambda$  de la señal enviada.

La imagen SAR normalmente es visualizada utilizando una escala de grises como muestra el ejemplo de la Figura 2.12. Los píxeles más brillantes corresponden a áreas donde la radiación retrodispersada es más fuerte (por ejemplo, áreas urbanas), mientras que los píxeles oscuros corresponden a zonas de baja radiación retrodispersada (por ejemplo, cuerpos de agua serenos) (12).



**Figura 2.11:** Representación esquemática de la relación entre la rugosidad de la superficie y la longitud de onda  $\lambda$ : (a) baja, (b) intermedia, y (c) alta rugosidad. Tomado y modificado de (2).

### 2.5.2. Fase de la imagen SAR

La radiación transmitida desde el radar debe alcanzar elementos dispersores ubicados en el suelo y luego retornar al mismo para formar la imagen SAR (es decir, es un camino de ida y vuelta desde y hacia el radar). Los objetos ubicados a diferentes posiciones en rango, introducen diferentes retardos en la transmisión y recepción de la radiación.

Debido a la naturaleza de la señal transmitida, este retardo  $\tau$  es equivalente al cambio de fase  $\phi$  entre la señal transmitida y la recibida. De este modo,  $\phi$  es proporcional al recorrido de ida y vuelta  $2R$  realizado por la radiación, dividido por la longitud de onda  $\lambda$  de la señal transmitida, como indica la siguiente ecuación:

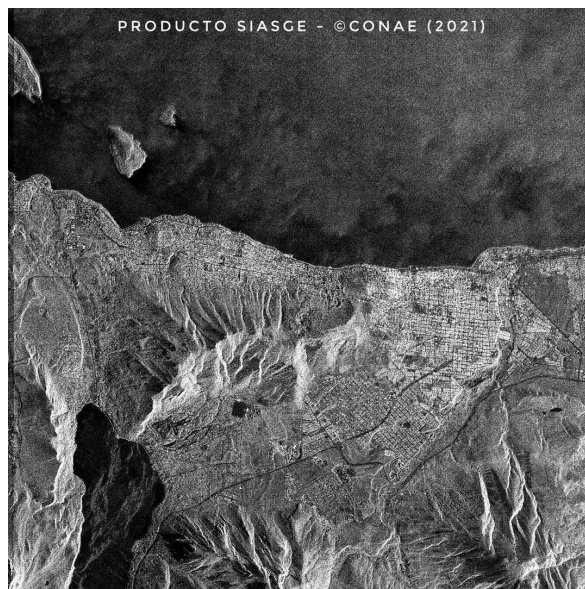
$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2R = \frac{4\pi}{\lambda} R \quad (2.13)$$

Sin embargo, debido a la naturaleza periódica de la señal, aquellos recorridos que difieren en un múltiplo entero de la longitud de onda introducen exactamente el mismo cambio de fase. En otras palabras, la fase de la señal SAR es una medida de solo la última fracción de ese recorrido ida y vuelta, el cual es menor que la longitud de onda transmitida.

En la práctica, debido a la diferencia existente entre la dimensión de la celda de resolución (del orden de los metros) y la longitud de onda (del orden de los centímetros), el cambio de fase al pasar de un píxel a otro en la misma imagen SAR parece aleatorio y no tiene una utilidad práctica (12).

### 2.5.3. Speckle

La presencia de varios elementos dispersores dentro de una misma celda de resolución genera un efecto conocido como *speckle* que es común en todos los sistemas de adquisición de imágenes de naturaleza coherente. Es decir, el speckle está presente en SAR pero no en imágenes ópticas.



**Figura 2.12:** Producto SIASGE sobre la ciudad de San Carlos de Bariloche, provincia de Río Negro, Argentina, lograda mediante la fusión de una imagen SAOCOM-1A y una imagen COSMO-Skymed. En colores oscuros se ven los cuerpos de agua de los lagos Nahuel Huapi y Gutiérrez, con distintas tonalidades de grises oscuros, debido al cambio de rugosidad del agua, producto de los vientos de la región. En tonos grises más claros, se aprecia el entramado de la ciudad de San Carlos de Bariloche y en tonos más oscuros sus alrededores, dando cuenta de la densidad edilicia y su distribución. En tonos más brillantes resaltan los picos de los cerros circundantes. Tomado de (8).

Las áreas homogéneas del terreno que se extienden a través de varias celdas de resolución SAR, son representadas con diferentes amplitudes en cada celda. Esto deriva en un efecto visual similar a un *salpimentado* superpuesto sobre una imagen de amplitud uniforme.

El speckle es una consecuencia directa de la superposición de señales reflejadas por varios elementos dispersores elementales (aquellos que tienen una dimensión comparable con la longitud de onda del radar) dentro de una celda de resolución. Estas señales, que tienen una fase aleatoria debido a las múltiples reflexiones entre los elementos dispersores, interfieren entre sí de forma constructiva (se suman), parcial o destructiva (se restan). Entonces, se puede intuir que la amplitud resultante dependerá del balance entre señales con signo positivo y negativo (12). En la Figura 2.12 se puede observar este efecto característico de las imágenes SAR que se presenta como un granulado disperso en toda la extensión de la imagen.

El speckle impacta en la calidad y utilidad de las imágenes SAR. Sin embargo, existen diversas técnicas para reducir su presencia, algunas de las cuales reciben el nombre general de *multilooking* y otras se basan en la utilización de filtros.

Una opción consiste en promediar píxeles adyacentes de una misma imagen SAR. Este proceso recibe el nombre de *multilooking espacial*. Otra alternativa es tomar varias imágenes de la misma área en diferentes momentos o desde posiciones ligeramente diferentes y promediarlas (12). En este caso, el proceso recibe el nombre de *multilooking temporal*. Una tercera opción es conocida como *multilooking en frecuencia*, la cual se basa en combinar una cierta

cantidad de imágenes obtenidas a partir de porciones no solapadas del espectro del mismo dato SAR (45). Por lo general, la subdivisión espectral se realiza sólo en la dirección de acimut.

Otra de las técnicas para reducir el speckle es la utilización de filtros locales que recorren la imagen como ventanas móviles (*kernels*). Estos filtros se basan en modelos estadísticos y pueden ser adaptativos (adaptan sus pesos en la ventana dependiendo del nivel de speckle) o no adaptativos (aplican los mismos pesos de forma uniforme a toda la imagen) (46).

## 2.6. SIASGE

El Sistema Ítalo Argentino de Satélites para la Gestión de Emergencias (SIASGE) está integrado por dos satélites conocidos como Satélite Argentino de Observación Con Microondas (SAOCOM) provistos por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y por cuatro satélites de la constelación italiana COSMO-SkyMed (del inglés, *Constellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation*) provistos por la Agencia Espacial Italiana (ASI). Este conjunto de satélites permiten obtener información certera y actualizada de incendios, inundaciones, erupciones, terremotos, avalanchas, derrumbes y deslaves (9).

Los 6 satélites se encuentran ubicados en órbitas polares a la misma altura, en distintos planos orbitales, de manera de lograr que el conjunto funcione como un instrumento capaz de alcanzar una gran cobertura terrestre. Esto permite el monitoreo en tiempo casi real, ya que es posible obtener información actualizada cada 12 horas (Figura 2.13), lo cual es esencial para el seguimiento de catástrofes (9).

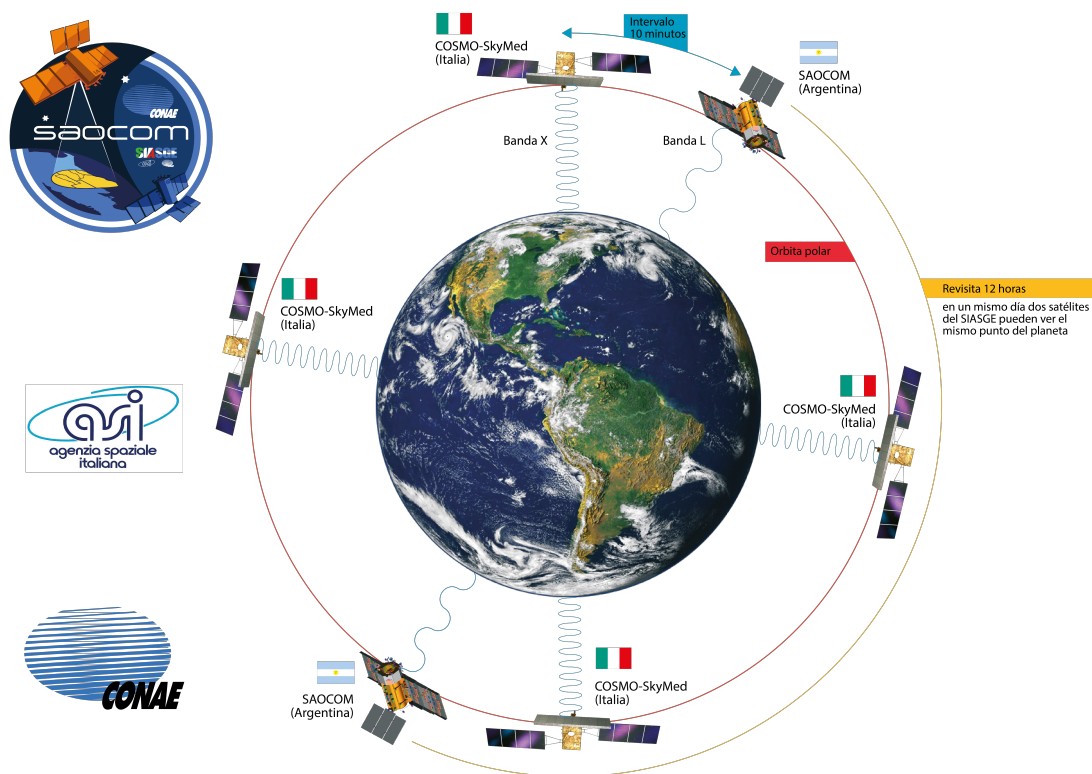


Figura 2.13: SIASGE. Tomado y modificado de (9).

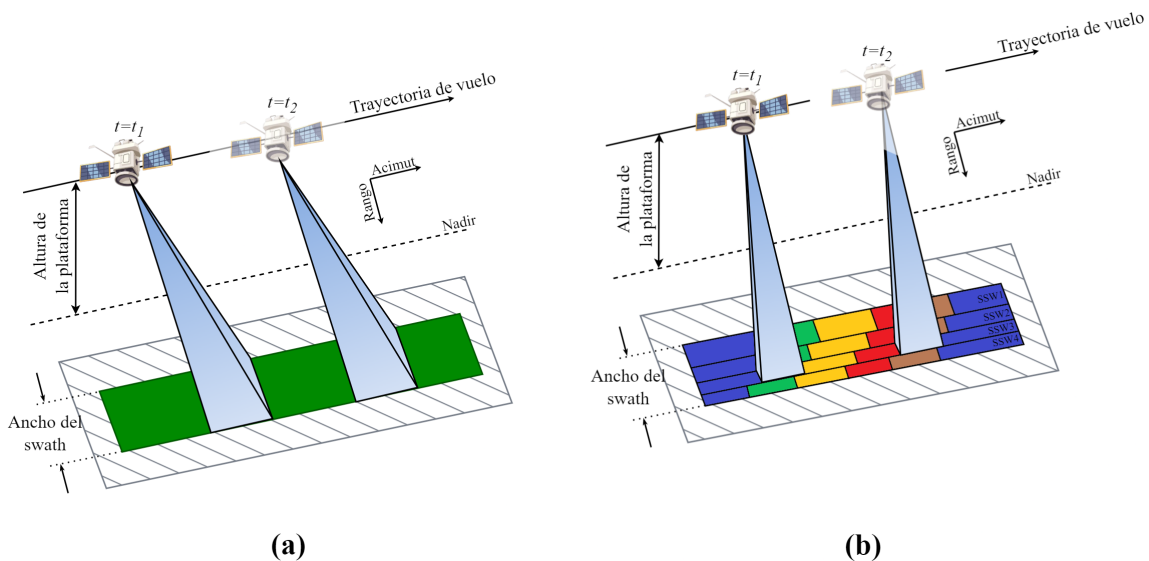
### 2.6.1. SAOCOM

La misión SAOCOM consistió en la puesta en órbita de dos satélites SAR de alta resolución, full-polarimétricos: el SAOCOM-1A (lanzado en 2018) y el SAOCOM-1B (lanzado en 2020). Ambos satélites comparten idénticas características, operan en banda L (1.275 GHz), y permiten alcanzar tiempos de revisita de 16 días (un solo satélite) u 8 días (operando conjuntamente) (25). Su objetivo principal está centrado en la estimación y generación de mapas operativos de humedad del suelo a fin de asistir a actividades agrícolas, además de contribuir al SIASGE mediante el monitoreo de eventos tales como deslizamientos, actividades volcánicas, inundaciones y terremotos (25).

#### 2.6.1.1. Modos de adquisición

Los instrumentos SAR a bordo de los satélites SAOCOM operan en tres modos de adquisición que proporcionan diferentes resoluciones espaciales y coberturas. Estos modos son: *Stripmap* (SM), *TOPSAR Narrow* (TNA y TNB) y *TOPSAR Wide* (TW).

En el modo Stripmap (Fig. 2.14a), la dirección de apuntamiento de la antena se mantiene constante a medida que la plataforma se mueve, de manera que el haz de la antena barre el suelo a una velocidad prácticamente uniforme y va tomando una imagen continua del terreno. Así, una franja (*strip*) del terreno es adquirida y su tamaño depende de la distancia que recorre el sensor y el tiempo que se mantiene encendido el radar (34). Este modo es el más común cuando se busca un balance entre resolución y extensión del área iluminada.



**Figura 2.14:** Ilustración de los modos de adquisición Stripmap y ScanSAR. El modo ScanSAR se utiliza para incrementar el tamaño del swath, en comparación con el modo Stripmap. (a) Stripmap. (b) ScanSAR. Tomado y modificado de (6).

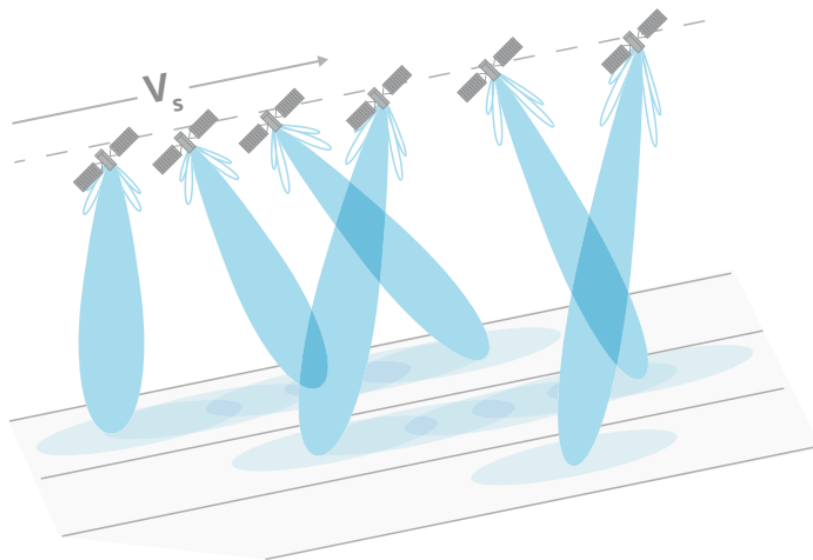
*Terrain Observation by Progressive Scans SAR* (TOPSAR) surge como una evolución del modo ScanSAR (Fig. 2.14b). Este último permite obtener un swath con una mayor cobertura del terreno modificando periódicamente la elevación del haz de la antena hacia distintos sub-swaths en rango. El cambio periódico en la posición del haz significa que el sensor adquiere una secuencia finita de ecos, es decir, un *burst* para cada uno de los sub-swaths adquiridos. A su vez, para cada sub-swath, los *bursts* son escaneados cíclicamente durante un tiempo



de permanencia que se repite periódicamente. Este sistema de adquisición en *bursts* permite generar un swath de mayor tamaño a costa de una degradación de la resolución en acimut. La mejor resolución que puede obtenerse corresponde al producto entre la resolución alcanzable por el modo Stripmap y el número de swaths escaneados (34; 6; 27).

A pesar de permitir adquirir información de áreas más grandes en términos espaciales, el modo ScanSAR presenta una serie de desventajas que se desprenden de su esquema de adquisición. En particular, cuando el radar ilumina distintos objetivos ubicados en diferentes posiciones en acimut, cada uno presenta una respuesta diferente debido a que la ganancia de la antena no es uniforme en toda su extensión y, por lo tanto, todos los puntos de la imagen no reciben la misma potencia. Sin embargo, la desventaja más importante radica en que muchos objetivos en la escena sólo pueden ser observados por los bordes del haz principal de la antena, lo cual se traduce en un menor retorno de energía proveniente de dichos puntos en comparación con aquellos que pueden ser iluminados por el centro del haz. Este efecto produce un problema en la recepción conocido como *scalloping*, que visualmente se evidencia como una secuencia de rayas oscuras y brillantes con una estructura dentada, orientadas en la dirección de rango (27).

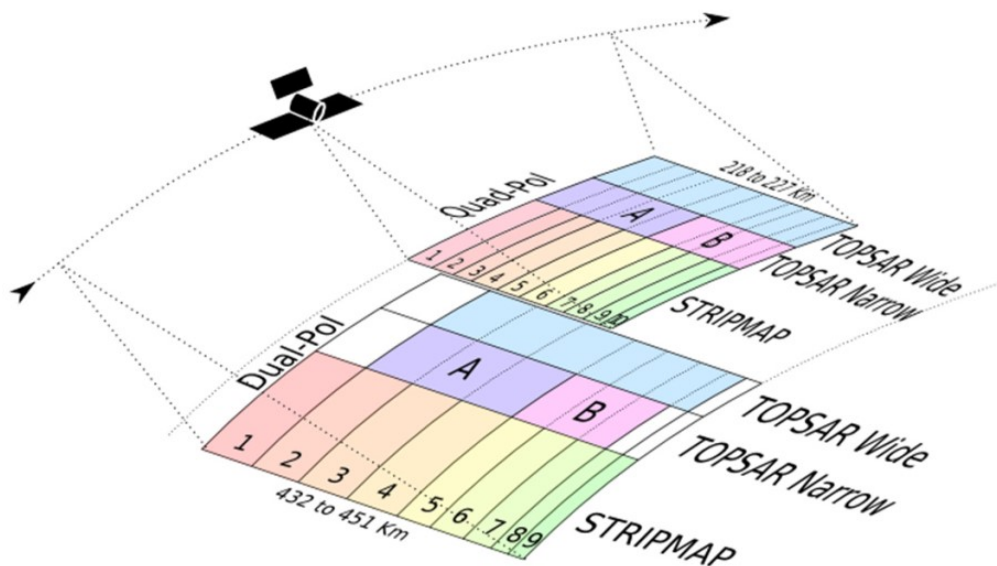
A diferencia de ScanSAR, en el modo TOPSAR, el radar va cambiando su apuntamiento tanto en la dirección de rango como en la dirección de acimut. Es decir, la antena rota durante la adquisición hacia atrás y hacia adelante respecto a la dirección de vuelo durante la adquisición de cada *burst*, evitando así el efecto de *scalloping* y permitiendo obtener una imagen de calidad homogénea en toda la extensión del swath (Figura 2.15) (27; 28). La principal diferencia entre los modos TOPSAR Narrow y TOPSAR Wide de SAOCOM es que en este último el radar abarca una mayor cantidad de franjas de adquisición que en el primero (47).



**Figura 2.15:** Geometría de adquisición TOPSAR. La figura representa algunas de las posiciones repetidas a lo largo de la órbita del sensor y sus patrones de radiación correspondientes. Tomado de (2).

Además, dentro de cada modo de adquisición, hay diferentes polarizaciones disponibles: polarización simple (HH o VV), polarización doble (HH y HV o VV y VH), polarización cuádruple (HH, HV, VH y VV) y polarización compacta (circular hacia la derecha y hacia la izquierda). Esta última sólo está disponible para el modo TW.

Como se puede observar en la Figura 2.16, en función de la polarización, los modos TOPSAR están compuestos por diferente cantidad de sub-swaths que coinciden con los swaths de Stripmap. Para simple y doble polarización, las adquisiciones TNA y TNB están compuestos



**Figura 2.16:** Representación gráfica de los modos de adquisición de SAOCOM-1. Aquellos etiquetados como *Dual-Pol* (polarización doble) incluyen también a los modos *Single-Pol* (polarización simple). Tomado de (10).

por tres sub-swaths, mientras que las TW se componen de 7 sub-swaths. En polarización cuádruple, TNA y TNB presentan cinco sub-swaths, en tanto que TW está compuesto por diez sub-swaths.

### 2.6.1.2. Niveles de procesamiento estándar

Los productos SAOCOM están disponibles en cuatro niveles de procesamiento diferentes: L1A, L1B, L1C y L1D, desarrollados para cada modo de adquisición y polarización (10):

- L1A: también conocido como producto *Single Look Complex* (SLC). Se trata de los RAW enfocados en proyección de rango oblicuo, calibrados radiométricamente y no presentan correcciones geométricas.
- L1B: también llamado producto *Detected Image* (DI). Los datos están proyectados en rango terrestre, calibrados radiométricamente y poseen georreferencia.
- L1C: conocido como producto *Ground Ellipsoid Corrected* (GEC). Los datos se encuentran calibrados radiométricamente, geocodificados y georreferenciados con respecto a un elipsoide de referencia.
- L1D: se llama también producto *Geocoded Terrain Corrected* (GTC). Consiste en datos calibrados radiométricamente y ortorrectificados a partir del uso de un modelo digital de elevación (DEM).

Estos productos se encuentran en un catálogo de libre acceso. Sin embargo, es necesario tener permisos especiales para descargar datos o programar nuevas adquisiciones.

Cada uno de estos modos puede ser solicitado con diferentes efemérides orbitales:

- *On Line Very Fast* (OLVF): es inmediata y es procesada con los datos del GPS a bordo, con una precisión de 90 metros en tierra.

- *Off Line Fast* (OLF): se procesa dos días después de la fecha de adquisición. Su precisión en tierra es de 70 metros.
- *Off Line* (OL): se trata del mejor producto disponible. Presenta una precisión en tierra de 25 metros y está disponible 18 días después de la adquisición del dato.

La Tabla 2.2 resume las principales características de los productos de nivel 1.

**Tabla 2.2:** Principales características de los productos SAOCOM de nivel 1 para cada modo de adquisición y combinación de polarizaciones (polarización simple (SP), dual (DP) y cuádruple (QP)) (10)

Modo	Posición del Beam	Polarización	Mínimo Ángulo de Incidencia en Rango		Resolución Espacial Nominal		Ancho Mínimo del Swath (en ground range) [km]
			Rango cercano [grados]	Rango lejano [grados]	Productos L1A	Productos L1B, L1C y L1D	
					Ground Range x Azimuth [m x m]	Ground Range x Azimuth [m x m]	
StripMap	S1	SP & DP	20.7-48.8	25.0-50.2	10 x 5	10 x 10	49.7
	S2						52.3
	S3						61.4
	S4						65.7
	S5						49.1
	S6						55.6
	S7						48.0
	S8						31.9
	S9						31.1
StripMap	S1	QP	17.6-34.6	19.6-35.5	10 x 6	10 x 10	21.9
	S2						22.0
	S3						21.0
	S4						25.4
	S5						23.4
	S6						29.4
	S7						20.9
	S8						25.1
	S9						22.1
	S10						14.2
TOPSAR Narrow	TNA	SP & DP	24.9	38.3	10 x 30	30 x 30	176.3
	TNB						150.2
TOPSAR Narrow	TNA	QP	17.6	27.3	10 x 50	50 x 50	109.9
	TNB						108.8
TOPSAR Wide	TW	SP & DP	24.9	48.7	10 x 50	50 x 50	353.7
TOPSAR Wide	TW	QP	17.6	35.5	10 x 100	100 x 100	218.1

## 2.7. Interferometría SAR: Principios Básicos

La interferometría SAR (InSAR, por sus siglas en inglés) es una técnica que permite medir con gran precisión ciertos parámetros geofísicos importantes como la topografía de una superficie, deformación y hundimientos del terreno, así como también desplazamiento de glaciares, entre otros. Utilizando esta técnica es posible construir, por ejemplo, estructuras numéricas de datos que representan la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno, mejor conocidas como Modelos Digitales de Elevación (DEM) (37). La idea clave detrás de esta técnica es comparar, para una zona de interés determinada, la fase de dos o más imágenes complejas de radar que han sido adquiridas desde posiciones ligeramente diferentes o en distintos instantes de tiempo. Dado que la fase de cada píxel de la imagen SAR contiene información de rango adquirida con una precisión de una fracción de la longitud de onda del sistema, es posible detectar y medir diferencias en los recorridos de las señales con

exactitud centimétrica o incluso milimétrica. Esta precisión es independiente de la distancia entre el sensor y la escena, lo cual hace que la interferometría SAR sea de gran interés tanto para la teledetección aérea como satelital. Sin embargo, una desventaja y un gran desafío de InSAR es que la diferencia de rango medido es ambigua con la longitud de onda. Esta ambigüedad puede resolverse utilizando alguna información externa complementada con ciertas hipótesis de regularidad de la escena adquirida (6).

Las imágenes de radar utilizadas en interferometría son normalmente adquiridas ya sea desde diferentes trayectorias de vuelo o bien desde la misma trayectoria pero en diferentes momentos. La primera se conoce con el nombre de *accross-track interferometry* y permite, entre otras cosas, medir de forma precisa la topografía del terreno. La segunda recibe el nombre de *along-track interferometry* o interferometría diferencial. En este caso, utilizando adquisiciones separadas en el tiempo (característica conocida como **línea de base temporal**), es posible medir con exactitud desplazamientos del terreno ocurridos en el lapso de tiempo comprendido entre dichas adquisiciones. Algunas aplicaciones importantes en este sentido son: la detección del movimiento de objetos tales como autos o embarcaciones, la observación de las corrientes superficiales del océano, la medición del desplazamiento de glaciares, el estudio de deformaciones sísmicas y actividades volcánicas, así como también el monitoreo del subsidencia y sollevamiento del suelo (6).

### 2.7.1. *Across-track interferometry*

Como se dijo en la Sección 2.5, la construcción de una imagen SAR implica la proyección de un objeto tridimensional en el espacio bidimensional de la imagen de radar, donde las coordenadas de la imagen son rango y acimut. Esto significa que cada píxel que compone la imagen contiene los ecos de radar enfocados provenientes de todos los elementos dispersores presentes en una celda de resolución. Sin embargo, una imagen SAR no aporta información acerca del ángulo de elevación y, por lo tanto, de la altura de los elementos que componen la escena.

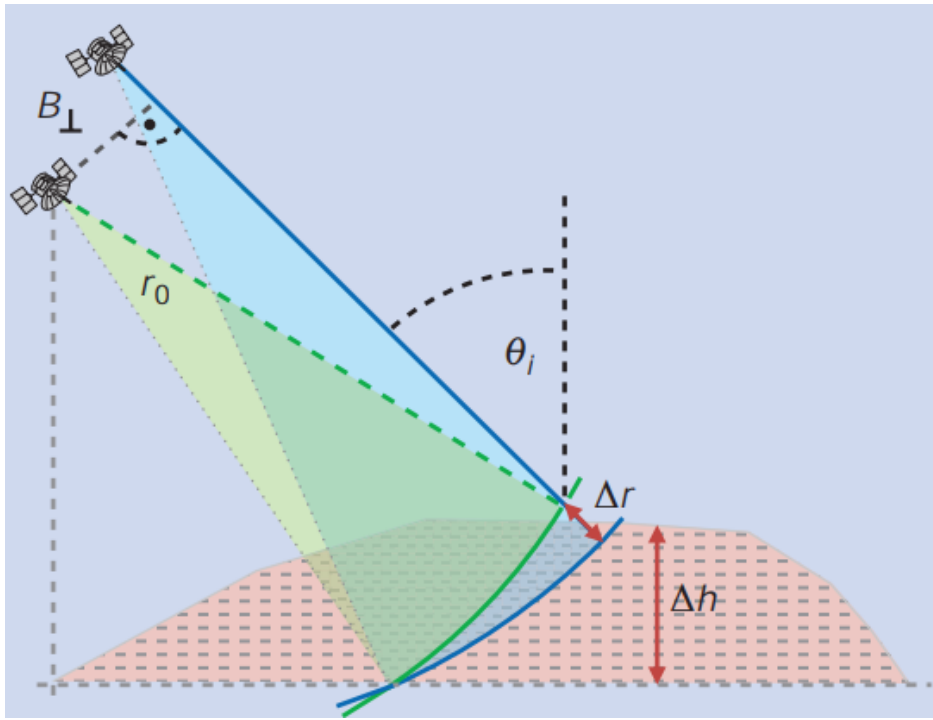
El objetivo de la *across-track interferometry* es superar esta limitación y determinar este ángulo de elevación con gran precisión. Para ello, la escena es mapeada con una segunda antena que se mueve a lo largo de una trayectoria de vuelo que se encuentra lateralmente desplazada respecto a la primera antena. A la imagen adquirida por la primer antena se la suele denominar *imagen de referencia*, mientras que la obtenida a partir de la segunda antena se conoce como *imagen secundaria*. Como se puede observar en la Figura 2.17, esta diferencia de trayectorias introduce una diferencia de rango característica para cada elemento dispersor de la escena adquirida, la cual puede evaluarse para estimar la altura de la superficie (6).

La distancia entre las dos antenas (u órbitas) en el plano perpendicular a su órbita es llamada **línea de base interferométrica** (*interferometer baseline*) y su proyección perpendicular al rango inclinado es la **línea de base perpendicular** (*perpendicular baseline*) (12).

De la Figura 2.17 se puede deducir que para grandes distancias  $r_0$  y cortas líneas de base  $B_{\perp}$ , la diferencia de rango  $\Delta r$  será proporcional a la diferencia de altura  $\Delta h$ :

$$\Delta r \cong \frac{B_{\perp}}{r_0 \sin \theta_i} \cdot \Delta h \quad (2.14)$$

donde  $r_0$  representa la distancia en rango oblicuo de la plataforma de referencia,  $\theta_i$  es el ángulo de incidencia local, y  $B_{\perp}$  es la línea de base perpendicular a la línea de vista. En



**Figura 2.17:** La *across-track interferometry* utiliza antenas que se mueven siguiendo trayectorias de vuelo paralelas pero mutuamente desplazadas. El rango oblicuo  $r_0$ , el ángulo de incidencia  $\theta_i$  y la línea de base perpendicular  $B_{\perp}$ , están definidos en un plano perpendicular a las trayectorias de vuelo. Un cambio  $\Delta h$  en la altura de la superficie genera un cambio  $\Delta r$  en la diferencia en rango. Tomado de (6).

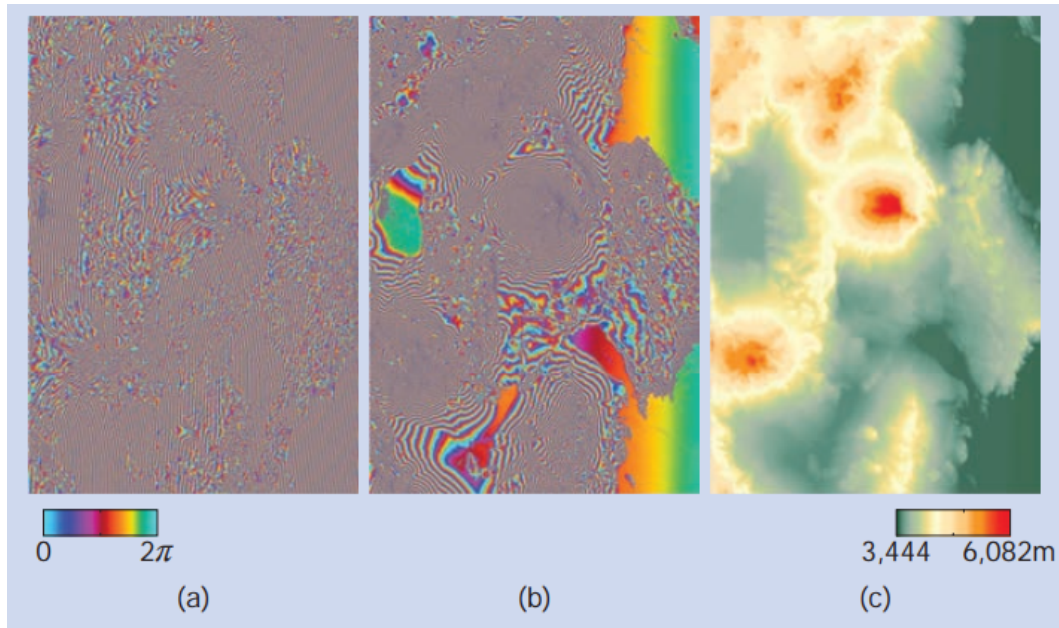
radares coherentes, esta diferencia  $\Delta r$  se corresponde a la diferencia de fase  $\Delta\phi$  medida:

$$\Delta\phi = m \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r \quad (2.15)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda del sistema. El factor  $m$  tiene en cuenta ya sea que la diferencia en rango se deba solo al camino recorrido por la señal hacia el radar o bien que se deba considerar el recorrido de ida y vuelta. Por lo tanto,  $m$  vale uno para un sistema SAR *single-pass* donde existe una única antena transmisora y dos receptoras, y valdrá dos en una configuración *repeat-pass* donde cada imagen de radar es adquirida por una sola antena.

A modo de ejemplo, la Figura 2.18 muestra la diferencia de fase obtenida a partir de un par de imágenes SAR adquiridas por el sistema TanDEM-X. Para obtener la fase, las dos imágenes SAR complejas son alineadas de manera tal que los píxeles de la imagen mapeen los mismos elementos de la escena capturada. Este alineamiento es conocido como co-registración (6).

De este modo, cada píxel de ambas imágenes debería contener las señales de los mismos dispersores elementales. Luego de la co-registración, la imagen de referencia es multiplicada por el complejo conjugado de la imagen secundaria para formar el interferograma complejo del cual se puede extraer la fase. Esta fase es la que se muestra en la Figura 2.18a mediante una escala de colores cíclica. En la misma, se puede observar que la fase interferométrica es dominada por un patrón de franjas en la dirección de rango (de izquierda a derecha). Este patrón, que se ve levemente distorsionado por la topografía de la escena, es causado principalmente por la disminución sistemática de la fase interferométrica a medida que se incrementa el rango y el ángulo de vista, situación que ocurre incluso para superficies planas. Esta contribución, conocida con el nombre de fase de **Tierra Plana**  $\phi_{flat}$ , es removida restándole al interferograma la fase esperada de una superficie de referencia que la representa. El interferograma resultante se muestra en la Figura 2.18b. Nótese que las franjas de fase restantes muestran una similitud con las líneas de contorno de un mapa topográfico.



**Figura 2.18:** Interferogramas SAR y modelo digital de elevación (DEM) del desierto de Atacama (Chile). Los datos fueron adquiridos por el sistema interferométrico *single-pass* TanDEM-X. (a) Antes de remover la fase correspondiente a la Tierra plana. (b) Luego de remover la Tierra plana. (c) Fase desenrollada convertida en valores de altura. La escala de colores en (a) indica la fase interferométrica enrollada que varía cíclicamente entre 0 y  $2\pi$ . Tomado de (6).

La exactitud de la fase medida está limitada por la magnitud de la coherencia del interferograma, la cual describe el grado de correlación o similitud entre las dos imágenes de radar. En la práctica, existen varios factores que contribuyen a reducir esta coherencia. Uno de los más importantes es el ruido del receptor. Asumiendo que ambos receptores tienen idéntica potencia de ruido, la pérdida de coherencia está dada por:

$$\gamma_{SNR} = \frac{1}{1 + SNR^{-1}} \quad (2.16)$$

donde  $SNR$  es la relación señal-ruido asociada a cada receptor.

Otro factor importante es la decorrelación temporal  $\gamma_{Temp}$ , que describe cambios en las propiedades geométricas y dieléctricas de los objetos presentes en la escena, ocurridos entre los instantes de tiempo correspondientes a la adquisición de las imágenes. La decorrelación temporal puede ser causada por pequeños desplazamientos entre elementos dispersores, como podría suceder en caso de crecimiento y cambios en la humedad de la vegetación de la zona analizada, por ejemplo. La decorrelación por línea de base o geométrica  $\gamma_{Geo}$ , causada por la diferencia de ángulos de incidencia entre ambas adquisiciones, y la decorrelación volumétrica  $\gamma_{Vol}$ , provocada por la penetración de la onda del radar en el medio dispersor, son otros factores de decorrelación (6).

También está presente la decorrelación por centroide Doppler  $\gamma_{DC}$ . Ésta es provocada por la diferencia entre los centroides Doppler  $\Delta f_{DC}$  de las adquisiciones consideradas:

$$|\gamma_{DC}| = \begin{cases} 1 - \Delta f_{DC}/B_{az} & |\Delta f_{DC}| \leq B_{az} \\ 0 & |\Delta f_{DC}| > B_{az} \end{cases} \quad (2.17)$$

El factor de coherencia decrece linealmente con el incremento de la diferencia de frecuencia Doppler (48). Esta diferencia proviene de la falta de superposición espectral entre las imágenes consideradas, lo cual puede deberse a diferencias en el ángulo de *squint* (ángulo de

apuntamiento en el sentido de vuelo), como se verá en la Sección 2.7.4 en lo referente a la sincronización de bursts, o convergencia de las órbitas.

La pérdida de coherencia global está dada por el producto de cada una de estas pérdidas individuales:

$$\gamma = \gamma_{SNR} \cdot \gamma_{Temp} \cdot \gamma_{Geo} \cdot \gamma_{Vol} \cdot \gamma_{DC} \quad (2.18)$$

Cabe destacar que estas fuentes de decorrelación no son las únicas, existen otras que no han sido abarcadas en esta descripción.

Esta pérdida de coherencia puede causar errores de fase significativamente grandes en el interferograma. Para mitigar el ruido de fase, normalmente se promedia localmente el interferograma complejo antes de extraer los valores de fase. Este promedio, conocido con el nombre de *multi-looking*, trae aparejado una mejora en las estimaciones de fase, pero provoca una pérdida de la resolución espacial.

A fin de seguir explorando las particularidades de la interferometría SAR, insertando la Ec. 2.14 en 2.15 y dividiendo el resultado por  $\Delta h$ , se puede obtener:

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta h} = \frac{2m\pi B_{\perp}}{\lambda r_0 \sin \theta_i} \quad (2.19)$$

Esta ecuación describe la sensibilidad del sistema interferométrico a pequeñas diferencias de altura  $\Delta h$ . Claramente, se podría incrementar la sensibilidad aumentando la línea de base perpendicular  $B_{\perp}$ . Sin embargo, el máximo valor útil de longitud de línea de base está limitado por dos factores.

La primera limitación es la decorrelación de línea de base. Como se describió en secciones precedentes, la señal SAR recibida puede entenderse como una señal compuesta por los ecos provenientes de una gran cantidad de elementos dispersores puntuales ubicados muy cerca entre sí, con una amplitud y fase aleatoria. Cada uno de estos dispersores contribuye a la señal del radar con un desplazamiento de fase adicional, que es proporcional a la distancia que separa el elemento dispersor de la antena receptora. Si se considera ahora un conjunto de dispersores fijos en el suelo y se varía el ángulo de vista del radar, es claro que cambia la fase relativa entre los ecos provenientes de cada uno de estos dispersores individuales. La diferencia debe ser pequeña para líneas de base  $B_{\perp}$  pequeñas, pero a medida que se incrementa su tamaño, las contribuciones de fase de los dispersores elementales dentro de cada celda de resolución se vuelve cada vez más diferente entre las dos imágenes SAR. Como resultado, la correlación entre las dos imágenes SAR va disminuyendo sistemáticamente con el incremento de la longitud de la línea de base hasta que se desvanece completamente. El valor de línea de base a partir del cual las dos imágenes quedan completamente decorrelacionadas es conocido como **línea de base crítica**  $B_{\perp,crit}$ . Para superficies planas, puede expresarse como (6):

$$B_{\perp,crit} = \frac{\lambda r_0 \tan \theta_i}{m\rho_r} \quad (2.20)$$

Para líneas de base que son menores a  $B_{\perp,crit}$ , la decorrelación espacial de la superficie puede ser removida mediante un proceso conocido como filtrado de rango (*range filtering*) a costa de degradar la resolución en rango. Nótese que la longitud de la línea de base crítica se incrementa a medida que disminuye la resolución en rango  $\rho_r$  (6).

La segunda limitación para la longitud de la línea de base proviene de ambigüedades en el proceso de conversión de la fase en altura. Tomando la Ec. 2.19 y remarcando que las mediciones interferométricas proveen sólo valores de fase que son ambiguos en múltiplos

enteros de  $2\pi$ , las mediciones de altura también resultan ambiguas en múltiplos de un factor conocido como **altura de ambigüedad**:

$$h_{amb} = \frac{\lambda r_0 \sin \theta_i}{mB_{\perp}} \quad (2.21)$$

Estas ambigüedades son resueltas durante el proceso de desenrollado de fase, el cual utiliza la correlación espacial entre valores de altura que surgen de la topografía natural. La exactitud de este proceso de reconstrucción de fase (o altura) depende de varios factores tales como la relación señal-ruido, la decorrelación de la superficie y de volumen, la resolución en suelo, y, el más importante, el propio terreno. Este último podría limitar fuertemente el valor útil de línea de base en caso de terrenos escarpados como valles profundos, picos aislados, bosques altos, o montañas con pendientes pronunciadas. Sin embargo, valores grandes de línea de base son deseables para alcanzar un sistema interferométrico de buena sensibilidad.

### 2.7.2. Interferometría Diferencial SAR

En la interferometría diferencial SAR (DInSAR, por sus siglas en inglés) se aprovechan los mismos principios ya vistos para detectar desplazamientos de la superficie de la Tierra a una escala de longitud de onda.

Considérense dos imágenes SAR adquiridas con cierta separación temporal que son utilizadas para generar un interferograma. Idealmente, una configuración con línea de base nula permitiría obtener un interferograma cuya información de fase estaría relacionada únicamente con los desplazamientos presentes en la escena a lo largo de la línea de vista. En la práctica, siempre existe un determinado valor de línea de base, lo cual hace que el interferograma sea también sensible a la topografía de la escena. Utilizando un DEM externo, la información topográfica puede ser sustraída del interferograma, dando lugar a una medición interferométrica diferencial donde cambios sutiles de la distancia en rango entre las dos adquisiciones (debidas por ejemplo a un hundimiento del terreno) pueden detectarse. Luego de remover la fase topográfica, la fase del interferograma queda expresada por:

$$\phi_{disp} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_{disp} \quad (2.22)$$

donde  $\Delta r_{disp}$  es el desplazamiento observado sobre la línea de vista (6). La Ec. 2.22 muestra que la técnica DInSAR permite medir estos desplazamientos con una exactitud del orden de una fracción de la longitud de onda, por lo que constituye una herramienta poderosa para monitorear deformación en áreas amplias. Al igual que en InSAR, la fase diferencial necesita ser desenrollada y calibrada para obtener valores de desplazamiento absoluto. Sin embargo, existen ciertos aspectos que perjudican el rendimiento de este sistema. Primero, la exactitud del DEM externo y del co-registro necesita ser del mismo orden de magnitud o mejor que la sensibilidad de fase. Segundo, y más importante, es necesario considerar el ruido de fase introducido por la decorrelación temporal y variaciones en el medio de propagación como consecuencia de retardos atmosféricos.

De esta manera, la fase interferométrica podría ser representada por diferentes contribuciones:

$$\phi = \phi_{flat} + \phi_{topo} + \phi_{disp} + \phi_{atm} + \phi_n \quad (2.23)$$

donde:

- $\phi_{flat}$ : se trata la fase de tierra plana explicada por la curvatura de la Tierra.



- $\phi_{topo}$ : es la fase vinculada a la topografía del terreno.
- $\phi_{disp}$ : corresponde a la fase vinculada a la deformación del terreno.
- $\phi_{atm}$ : es la componente atmosférica.
- $\phi_n$ : se trata de la componente correspondiente al ruido de fase.

Partiendo del conocimiento de la geometría de adquisición, el término  $\phi_{flat}$  puede ser modelado y extraído de la fase interferométrica, como ya se ha dicho. Este proceso recibe el nombre de **aplanamiento del interferograma** (*interferogram flattening*) (12) y permite obtener un interferograma cuya fase solo queda referida a la topografía y a la deformación del terreno, además de a las componentes extras indeseadas como lo son la atmósfera y el ruido de fase.

Adicionalmente, se puede determinar la elevación del terreno a través de un DEM, por ejemplo, y modelar y sustraer la componente topográfica  $\phi_{topo}$ . De este modo, más allá de las componentes indeseadas, se obtiene un interferograma cuya fase está referida únicamente a los desplazamientos del terreno.

### 2.7.3. Cadena de procesamiento interferométrico

La cadena de procesamiento interferométrico podría resumirse en los siguientes pasos fundamentales:

**1) Selección de imágenes** La selección de las imágenes adecuadas para ser utilizadas en aplicaciones interferométricas es el primer paso que debe llevarse a cabo. Es un paso clave, ya que tiene un fuerte impacto en la calidad del resultado final. El criterio adoptado depende de la aplicación específica para la que se requieren las imágenes SAR. Los parámetros que deben tenerse en cuenta son (12):

- Ángulo de vista (pasadas ascendente y descendente)
- Línea de base geométrica
- Línea de base temporal
- Tiempo de adquisición
- Coherencia
- Condiciones meteorológicas

Las características de los diferentes sensores y plataformas disponibles definen distintos aspectos que son importantes en el procesamiento interferométrico: el ancho de banda determina la resolución espacial en rango y la línea de base crítica; la longitud de onda y la relación señal-ruido condicionan la sensibilidad del sistema para modelar topografía o fenómenos de deformación del terreno; la inclinación orbital y el ciclo de repetición influyen en la cobertura global del sistema y el tiempo de revisita (49).

Otro elemento fundamental es la disponibilidad de datos. Determinar si el área de interés es iluminada con distintas geometrías, con pasadas ascendentes y/o descendentes, o con el

ángulo de vista requerido para analizar un fenómeno de interés, es conveniente (49). Dependiendo de la aplicación en particular puede ser necesario contar con el mayor volumen de imágenes posible, lo cual no siempre es factible dependiendo de la función principal de la misión utilizada y su plan de adquisición.

Evaluar la distribución de líneas de base temporales y espaciales es importante. Para interferometría diferencial, mientras más pequeña sea la línea de base perpendicular, menor será el ruido debido a la propagación por errores de topografía. Normalmente, se suele establecer que el valor de la línea de base no debe superar  $1/3$  de la línea de base crítica (48). Utilizar líneas de base temporales pequeñas permite evitar la decorrelación pero todo dependerá de la dinámica del fenómeno que se desea analizar, es decir, si se desarrolla de forma continua en el tiempo (subsistencia en zonas montañosas) o si se produce en un instante determinado (terremoto) (49).

Otras características que pueden provocar decorrelación y que es necesario tener en cuenta, son la presencia de vegetación, nieve, las actividades humanas, etc. Estos aspectos pueden ser compensados seleccionando adecuadamente la separación temporal entre imágenes y considerando la longitud de onda del sistema. La incidencia atmosférica también es importante, pero modelar el ruido atmosférico y sustraerlo de la fase suele ser un proceso complicado, aunque existen sistemas como el *Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR* (GACOS), por ejemplo, que permiten modelar estas contribuciones (50). Por ello es conveniente evitar seleccionar imágenes adquiridas en fechas donde las condiciones meteorológicas (como puede ser la presencia de lluvias) magnifican estos fenómenos (49).

**2) Enfoque de datos RAW** Las entradas necesarias para generar un interferograma son dos imágenes *Single Look Complex* (SLC) enfocadas que conserven la fase (12). Si se parte de datos crudos (RAW), será necesario enfocar los mismos para generar estos productos SLC. Existen distintos algoritmos de enfoque que se diferencian entre sí en función de la precisión y eficiencia en su implementación. Hay algoritmos que operan en el dominio del tiempo, que son más precisos pero computacionalmente más costosos, y otros que operan en el dominio de la frecuencia que resultan más eficientes y suelen ser los más utilizados (véase la Sección 2.4.5).

**3) Co-registración** Este paso resulta fundamental para la generación posterior del interferograma, ya que asegura que cada elemento en tierra contribuya a exactamente el mismo píxel (rango y acimut) en ambas imágenes, referencia y secundaria. En otras palabras, la co-registración tiene por objetivo expresar ambas imágenes en la misma geometría.

En un caso ideal de órbitas paralelas y adquisiciones perfectamente alineadas, el proceso de co-registro sólo necesitaría compensar las diferencias de geometría provocadas por distintos ángulos de vista (efecto de paralaje). En la práctica, existen otros elementos que deben ser compensados (12):

- Cruces o desplazamientos orbitales
- Diferencias en el apuntamiento del sensor
- Diferentes tasas de muestreo de las imágenes
- Corrimientos en dirección perpendicular y a lo largo de la trayectoria de vuelo

Normalmente, la co-registración se divide en dos subprocesos: un paso de co-registro grueso en donde se aproximan los desplazamientos definiendo puntos en común entre ambas imágenes (visualmente o a través de órbitas del satélite), y un paso de co-registro fino en el cual se aplican diferentes técnicas para obtener un alineamiento con una precisión por debajo de un píxel (49). Para ello, se suelen aplicar distintos algoritmos como el algoritmo de correlación cruzada y el de maximización espectral (48). El objetivo es encontrar las funciones que describen la transformación (*warp functions*) que mapean una imagen en la otra y que son utilizadas para remuestrear esta imagen secundaria en la grilla de la imagen de referencia.

Una estrategia que suele incorporar algunas ventajas respecto a las técnicas de procesamiento estándar, es conocida como **co-registro geométrico**. Ésta, utilizando un abordaje geométrico, se vale de información orbital y de un DEM externo para calcular las posiciones en acimut y rango de un objetivo en tierra en ambas imágenes. De este modo, se estiman las mencionadas funciones de transformación que mapean la imagen secundaria en la geometría de la de referencia (51).

**4) Cálculo del interferograma** Una vez co-registradas las imágenes, el interferograma se calcula multiplicando la imagen de referencia por el complejo conjugado de la imagen secundaria. Como se especificó en las secciones precedentes, esto permite obtener un interferograma complejo del cual se puede extraer posteriormente la información de fase, a partir de la siguiente fórmula:

$$\Phi = \arg\{(I_{ref} \cdot I_{sec}^*)\} \quad (2.24)$$

La generación de interferogramas requiere de aplicar filtros cuyo objetivo es eliminar los efectos producidos por los distintos factores de decorrelación. Algunas técnicas de filtrado que se utilizan son el filtro de rango espectral o el filtro de ancho de banda común en acimut (48). Otra operación, habitualmente utilizada al momento de generar el interferograma, es el *multilooking*, el cual consiste en promediar los datos del interferograma usando una ventana móvil (*kernel*). También se utilizan otro tipo de filtrados posteriores a su formación, tales como el filtro adaptativo (49).

**5) Desenrollado de fase** Consiste en extraer la fase absoluta del interferograma y se trata de uno de los pasos más complejos del procesamiento interferométrico. Como se explicó en la Sección 2.7, la fase del interferograma se encuentra modulada en ciclos de  $2\pi$  con lo cual la altitud relativa del terreno también se encuentra modulada en ciclos de  $2\pi$ . De esta manera, para que la variación de fase entre dos puntos del interferograma proporcione una medición de la variación de altura de la escena analizada, es necesario eliminar esta ambigüedad determinando el múltiplo correcto de  $2\pi$ . Este proceso recibe el nombre de **desenrollado de fase** (*phase unwrapping*). Existen múltiples técnicas que permiten llevar a cabo este proceso de desenrollado de fase aunque no existe una única solución y es necesario valerse de cierta información complementaria a fin de llegar a la solución correcta (12).

**6) Conversión de fase en altura** La conversión de fase en altura utiliza la geometría adquirida en combinación con las diferencias de rango calculadas interferométricamente para determinar, por trigonometría, la posición relativa al sensor de cada punto de la imagen. Esto requiere contar con un conocimiento preciso tanto de las líneas de base interferométricas como de las diferencias de rango para cada elemento dispersor. Ya que este último deriva de la fase interferométrica desenrollada, sólo puede conocerse hasta un nivel de desplazamiento

general que es múltiplo de la longitud de onda. La incerteza restante se resuelve utilizando, al menos, una referencia externa (6).

**7) Geocodificación** Finalmente, la geocodificación involucra el proceso de transformación de la geometría del radar a las coordenadas de un sistema de referencia geodésico seleccionado (6).

### 2.7.4. Procesamiento interferométrico de adquisiciones TOPSAR

A fin de utilizar imágenes adquiridas en modo TOPSAR en aplicaciones interferométricas, se necesita que el sistema de adquisición sea capaz de observar el mismo objetivo con la misma geometría. La forma de garantizar que esto ocurra es a través de la **sincronización de *bursts***. Esta sincronización implica que el radar debe comenzar a adquirir la información de un *burst*, para pasadas repetidas del satélite en la órbita, al mismo tiempo sobre el mismo sitio en tierra. De este modo, las adquisiciones TOPSAR tendrían una superposición espectral suficiente para producir resultados coherentes (27).

Las características de adquisición del modo TOPSAR hacen que su procesamiento interferométrico implique la ejecución de algunos pasos adicionales dentro de la cadena de procesamiento presentada, particularmente en lo que hace a las etapas de co-registro y formación del interferograma.

Tal como se describió en la Sección 2.6.1.1, la particularidad de este modo radica en el movimiento electrónico de la antena en la dirección de acimut, lo cual permite que los distintos objetivos de la escena adquirida sean iluminados utilizando el mismo patrón de antena en acimut. Este movimiento introduce una componente de frecuencia Doppler adicional a lo largo de esta dirección. En otras palabras, cuando el radar mira en dirección contraria a la de vuelo, la frecuencia de la señal del radar es menor que cuando apunta hacia la dirección de vuelo. Esta componente de frecuencia adicional impide llevar adelante operaciones de interpolación o remuestreo de los datos tal como establece Nyquist. Por lo tanto, es obligatorio removerla antes de efectuar el proceso de co-registro de las imágenes. Este proceso de remoción se conoce con el nombre de *deramping*. Adicionalmente, una vez que se ha ejecutado esta operación y la imagen ha sido co-registrada, es necesario incorporar nuevamente dicha componente (proceso conocido como *reramping*) (30).

Por otra parte, suele suceder que al computar el interferograma se observen ciertas discontinuidades o saltos de fase en las zonas de unión de los *bursts* que componen la escena. Para remover estos saltos de fase, es necesario aplicar un paso de refinamiento posterior que se lleva a cabo mediante el algoritmo de Diversidad Espectral Aumentada (*Enhanced Spectral Diversity* (ESD)). Este algoritmo permite estimar los desplazamientos residuales en las zonas de superposición de los *bursts* y, a continuación, ejecutar un nuevo remuestreo de la imagen secundaria (52; 29).

En el presente capítulo se explica el esquema de trabajo propuesto para procesar un conjunto de datos SAOCOM adquirido en modalidad TOPSAR. Dado que el modo TOPSAR de SAOCOM no cuenta con sincronización de *bursts*, no está garantizado que se puedan obtener interferogramas coherentes utilizando estas imágenes. Este capítulo pretende describir una metodología que permita utilizar este tipo de imágenes en aplicaciones interferométricas, incluso cuando no hayan sido adquiridas de forma sincronizada. La metodología propuesta sigue los lineamientos del trabajo (11), del cual ha participado el autor de la presente tesis.

### 3.1. Ingesta de Datos y Detección de Bursts Comunes

El procesamiento de los datos inicia con la extracción de la información de las imágenes. Al procesar datos TOPSAR, la mayoría de las operaciones se realizan a nivel de *burst*, por lo que es necesario extraer los datos correspondiente a cada *burst* y su información asociada.

En particular, los datos utilizados corresponden al nivel de procesamiento L1A (producto SLC). La imagen viene acompañada de los metadatos en un archivo XML en formato XEMT, que contiene toda la información de la adquisición. Su formato específico puede consultarse en (10).

Cuando se lleva a cabo la ingesta de los datos, se identifica durante el proceso la correspondencia entre *bursts*. Es decir, se individualiza para un conjunto de imágenes determinado, cuáles son los *bursts* de cada adquisición que cubren la misma zona en tierra. Esta operación resulta más sencilla cuando los *bursts* están sincronizados, tal como ocurre en Sentinel-1, donde existe un marco de referencia de tiempo absoluto que permite identificar *bursts* comunes en diferentes imágenes simplemente comparando los tiempos de adquisición de los mismos (29). Este marco de referencia común no existe para adquisiciones TOPSAR de SAOCOM ya que la sincronización de *bursts* no está implementada para este sensor. Esto hace que los *bursts* de diferentes imágenes no cubran exactamente la misma área en tierra, sino que lo hacen de modo parcial. Es decir, un *burst* de una adquisición suele coincidir parcialmente con un *burst* de otra imagen. Podría suceder que la correspondencia sea exacta y

los *bursts* coincidan completamente, pero raramente se presenta esta situación.

Esta idea de identificar los *bursts* comunes, permite no sólo establecer un área de procesamiento común para un conjunto de imágenes determinado, sino también maximizar la superposición espectral en acimut, y así alcanzar resultados coherentes. Sin embargo, vale destacar que esta operación se lleva a cabo para todas las imágenes a procesar, independientemente de si constituyen o no un par interferométrico útil. La de selección de los pares interferométricos se lleva a cabo luego de la etapa de co-registro.

Para representar las diferentes situaciones que pueden presentarse, considérese, por simplicidad, solo dos adquisiciones: una imagen de *referencia* y otra imagen *secundaria*. En este sentido, se pueden dar tres posibilidades:

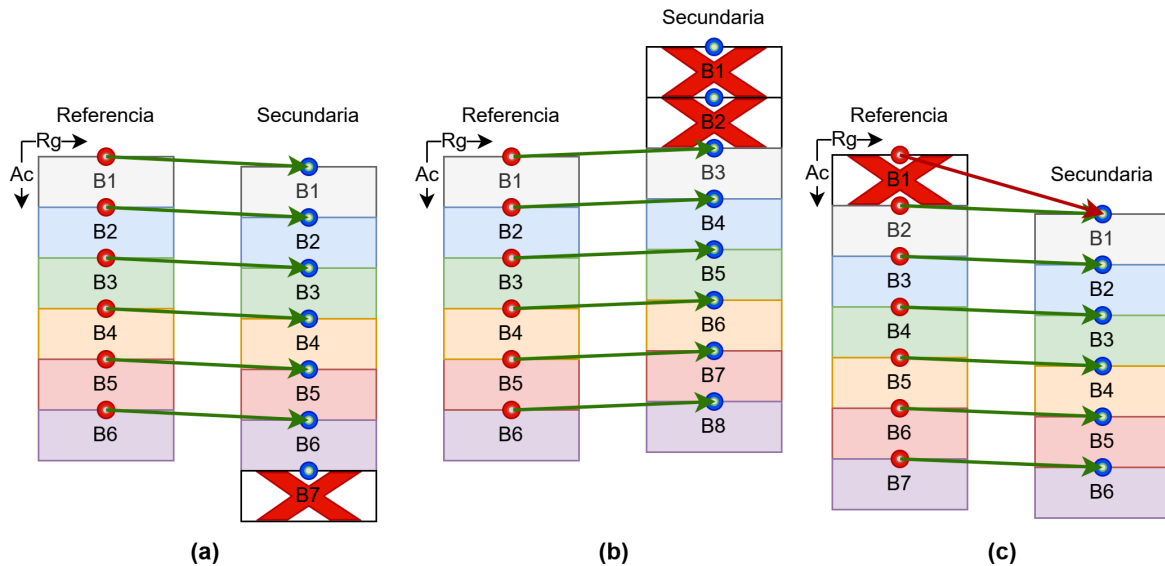
1. Los *bursts* de ambas adquisiciones están alineados. Es decir, el primer *burst* de la imagen de referencia coincide (parcial o totalmente) con el primer *burst* de la imagen secundaria, el segundo con el segundo y así sucesivamente (Fig. 3.1a).
2. La imagen secundaria es adquirida en un instante previo a la imagen de referencia. De este modo, hay uno o varios *bursts* de la imagen secundaria antes de la aparición del primer *burst* de la referencia. En el ejemplo de la Figura 3.1b, existe una diferencia de dos *bursts* por lo que el primer *burst* de la referencia coincide parcialmente con el tercero de la secundaria, el segundo de la referencia con el cuarto de la secundaria, y así sucesivamente.
3. La imagen secundaria es adquirida en un instante posterior a la imagen de referencia. De esta manera, uno o varios *bursts* de la imagen de referencia aparecen antes que el primer *burst* de la imagen secundaria. En el caso ejemplificado en la Figura 3.1c, el segundo *burst* de la referencia coincide parcialmente con el primero de la secundaria, el tercero de la referencia con el segundo de la secundaria, y así sucesivamente.

Independientemente de este *offset* a nivel de *burst*, entre *bursts* coincidentes puede existir todavía un desplazamiento en acimut. Por otra parte, es importante notar que la cantidad de *bursts* de cada adquisición es variable y pueden existir *bursts* en una imagen que no tengan correspondencia en las otras adquisiciones. Esta situación está representada en la Figura 3.1 mediante una cruz roja.

Una estrategia para detectar esta correspondencia entre *bursts* es construir un marco de referencia común. Una manera de lograrlo, podría ser identificar un píxel en la imagen de referencia y, utilizando la información orbital de las imágenes, establecer en qué *burst* de la imagen secundaria se ubica.

Esta primera aproximación, si bien permitiría determinar cuáles son los *bursts* comunes entre imágenes, presenta algunas dificultades. Dado que la coincidencia entre *bursts* suele ser parcial, normalmente sucede que un mismo *burst* de la imagen de referencia coincide parcialmente con dos *bursts* consecutivos de la imagen secundaria. Sin embargo, la mayor superposición en acimut sólo se da con uno de ellos.

Entonces, para resolver esta dificultad y encontrar la coincidencia entre *bursts* maximizando la superposición, es necesario realizar una evaluación más exhaustiva de las correspondencias. Una opción es considerar el punto central (tiempo medio en rango) de la primer línea (tiempo inicial en acimut) de cada *burst* de ambas imágenes, y transformarlos en un sistema de coordenadas Cartesianas geocéntricas (es decir:  $x$ ,  $y$ ,  $z$  en metros). De esta manera, se tendría un punto por cada *burst* de cada imagen expresado en un mismo sistema de referen-



**Figura 3.1:** Ilustración de las tres situaciones posibles de configuración de *bursts*: (a) Sin offset a nivel de *burst*. (b) La imagen secundaria está “adelantada” dos *bursts* respecto a la imagen de referencia. (c) El primer *burst* de la imagen secundaria aparece un *burst* después del inicio de la referencia. Las cruces rojas representan *bursts* que no tienen correspondencia en la otra imagen. Aquellos *bursts* coincidentes están representados con el mismo color. Las flechas verdes representan la distancia Euclidiana mínima entre *bursts*. En (c), los dos primeros *bursts* de la imagen de referencia están apuntando a un único *burst* en la imagen secundaria. En este caso, el B1 de la referencia no coincide en realidad con el B1 de la imagen secundaria (flecha roja), ya que es el B2 de la imagen de referencia el que presenta el menor valor de distancia (flecha verde). Tomado y modificado de (11).

cia. Estos puntos están ilustrados en la Figura 3.1 mediante círculos rojos y azules para las imágenes de referencia y secundaria, respectivamente.

Luego, se calcula la distancia Euclidiana entre todos los puntos de la imagen de referencia respecto a todos los puntos de la imagen secundaria, y se busca la de menor valor. Esta mínima distancia indica cuáles son los *bursts* entre adquisiciones más próximos entre sí y, por lo tanto, establece la correspondencia entre *bursts* maximizando la superposición en acimut.

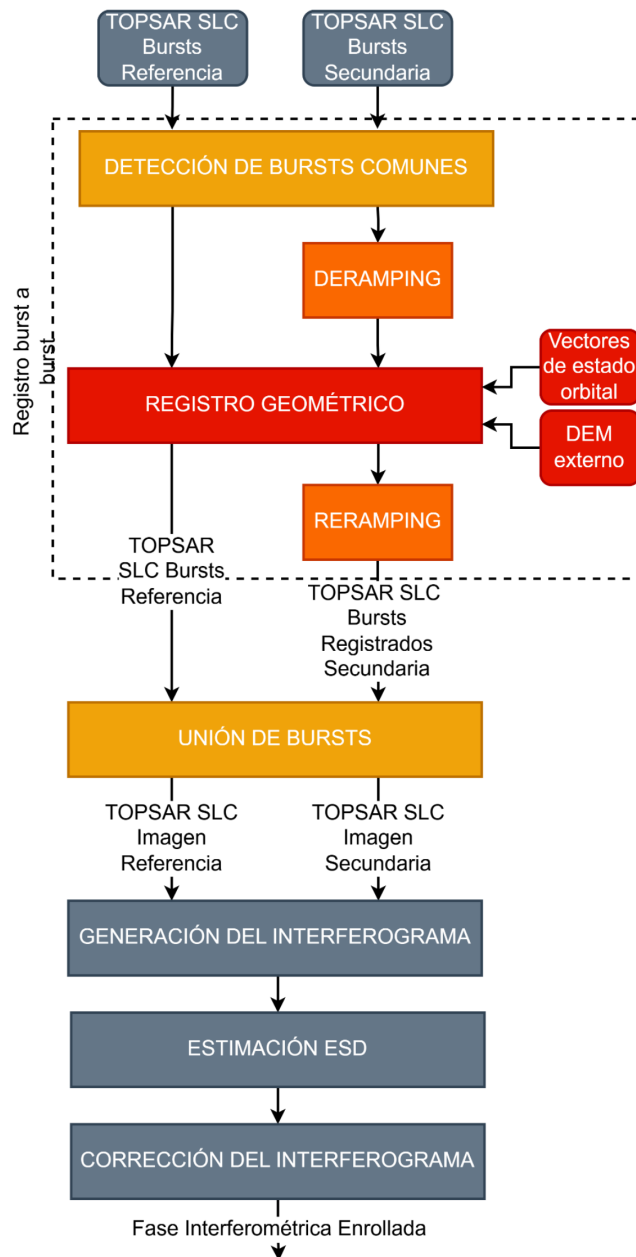
Vale destacar que la comparación debe ser realizada entre todos los puntos de ambas adquisiciones ya que puede presentarse una situación como la ilustrada en la Figura 3.1c. En este caso, si se compara sólo la distancia Euclidiana correspondiente entre el primer punto de evaluación de la imagen de referencia (punto correspondiente al B1) con todos los puntos de la imagen secundaria, se llegaría a la conclusión errónea de que los primeros *bursts* en ambas adquisiciones son coincidentes, ya que, en un principio, esa es la distancia mínima (representada por una flecha roja en la Fig. 3.1c). Sin embargo, al comparar la distancia entre el punto de evaluación del segundo *burst* de la referencia (punto correspondiente al B2) y todos los puntos de la adquisición secundaria, se observa que, en realidad, la mínima distancia corresponde al B2 de la referencia con respecto al B1 de la secundaria (representado por la flecha verde en la Fig. 3.1c). Esto demuestra que si no se efectúan todas las comparaciones posibles, se puede llegar a una estimación incorrecta de la correspondencia entre *bursts* porque, a priori, se desconoce el offset existente a nivel de *burst* entre imágenes.

Este mecanismo puede ser aplicado a un conjunto de datos compuesto por más de dos imágenes, determinándose así el área común cubierta por todas las imágenes procesadas.

### 3.2. Procesamiento Interferométrico Burst a Burst

Tal como se especificó en el Capítulo 2, el procesamiento interferométrico de datos TOPSAR incluye una serie de operaciones adicionales debido a las características propias de la adquisición, respecto a la cadena de procesamiento clásica.

La Figura 3.2 presenta la cadena de procesamiento interferométrico adaptada para datos TOPSAR.



**Figura 3.2:** Cadena de procesamiento interferométrico adaptada para datos TOPSAR.

El proceso de co-registro de las adquisiciones se lleva a cabo a nivel de *burst*, es decir, cada *burst* de la adquisición secundaria se co-registra con cada *burst* de la adquisición de referencia. En esta etapa es necesario realizar una operación de *deramping*, seguida del co-registro geométrico de los *bursts*, y su posterior *reramping*. Ambas operaciones se llevan a



cabo solo sobre los *bursts* de la adquisición secundaria.

El procesamiento continúa con la combinación de los *bursts* de cada adquisición para conformar las imágenes TOPSAR SLC completas que luego son utilizadas para generar el interferograma. Dicho interferograma presenta ciertas particularidades de fase que son corregidas mediante el algoritmo Diversidad Espectral Aumentada (ESD).

En las siguientes secciones, se explica cada una de las operaciones involucradas y la manera en que deben ser ejecutadas.

### 3.2.1. Función de *Deramping*

Como se dijo en la Sección 2.7.4, el modo TOPSAR se caracteriza por el movimiento electrónico de la antena en acimut, lo cual introduce en los datos una componente de frecuencia Doppler adicional que debe ser extraída previo a realizar cualquier operación de remuestreo o interpolación. Este proceso recibe el nombre de *deramping* (30).

La siguiente ecuación permite estimar la función de *deramping* y aplicarla junto con un paso de demodulación a fin de obtener el espectro centrado en 0 Hz (30):

$$\Phi(\eta, \tau) = \exp[-j \cdot \pi \cdot k_t(\tau) \cdot (\eta - \eta_{ref}(\tau))^2 - j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{\eta c}(\tau) \cdot (\eta - \eta_{ref}(\tau))] \quad (3.1)$$

donde  $\tau$  y  $\eta$  representan los tiempos de rango y acimut respectivamente,  $f_{\eta c}$  es la frecuencia del centroide Doppler [Hz] y  $k_t$  es la tasa de variación del centroide Doppler [Hz/s] en la imagen SLC TOPSAR enfocada.  $k_t$  puede calcularse como:

$$k_t(\tau) = \frac{k_a(\tau) \cdot k_s}{k_a(\tau) - k_s} = \frac{k_s}{\alpha} \quad (3.2)$$

$\alpha$  corresponde al factor de conversión entre tasa de variación de centroide Doppler del dato enfocado ( $k_t$ ) y del dato crudo ( $k_s$ ), y puede ser calculada como:

$$\alpha = 1 - \frac{k_s}{k_a(\tau)} \quad (3.3)$$

$k_a$  es la tasa de variación FM en acimut tradicional que puede calcularse utilizando la ecuación tomada del manual de especificaciones de productos de nivel L1A de SAOCOM (10):

$$\begin{aligned} k_a = & k_a^{pol(N=1)} + k_a^{pol(N=2)} \cdot (\tau - \tau_{ref}) \\ & + k_a^{pol(N=3)} \cdot (\eta - \eta_{ref}) \\ & + k_a^{pol(N=4)} \cdot (\tau - \tau_{ref}) \cdot (\eta - \eta_{ref}) \\ & + k_a^{pol(N=5)} \cdot (\tau - \tau_{ref})^2 \\ & + k_a^{pol(N=6)} \cdot (\tau - \tau_{ref})^3 \\ & + k_a^{pol(N=7)} \cdot (\tau - \tau_{ref})^4 \end{aligned} \quad (3.4)$$

donde  $k_a^{pol(N=...)}$  son los coeficientes polinomiales de la función de variación de Doppler definida en los metadatos,  $\tau$  y  $\eta$  son los tiempos de rango y acimut en segundos,  $\tau_{ref}$  y  $\eta_{ref}$  son los tiempos de referencia de rango y acimut, también medidos en segundos.

**Tabla 3.1:** Variables necesarias para calcular la función de *deramping* con su correspondiente ubicación en los metadatos.

Variable	Descripción	Ubicación
$k_\psi$	Tasa de Orientación de la Antena [rad/s]	SAOCOM_XMLProduct/Channel/SwathInfo/AzimuthSteeringRatePol
$f_{\eta_c}$	Frecuencia de Centroide Doppler [Hz]	SAOCOM_XMLProduct/Channel/DopplerCentroid
$k_a$	Tasa Doppler FM [Hz/s]	SAOCOM_XMLProduct/Channel/DopplerRate
$f_c$	Frecuencia del Radar [Hz]	SAOCOM_XMLProduct/Channel/DataSetInfo/fc_hz
$V$	Velocidad de la aeronave calculada en el tiempo medio del <i>burst</i> mediante la interpolación del vector de estado [m/s]	SAOCOM_XMLProduct/Channel/StateVectorData/vSV_mOs
$N _{burst}$	Número de líneas en acimut que componen un <i>burst</i>	SAOCOM_XMLProduct/Channel/BurstInfo/LinesPerBurst
$\Delta_s$	Intervalo de tiempo en acimut entre dos líneas SLC [s]	SAOCOM_XMLProduct/Channel/RasterInfo/LinesStep
$Ns_{swath}$	Número de muestras en rango del swath	SAOCOM_XMLProduct/Channel/RasterInfo/Samples
$\Delta\tau_s$	Intervalo de tiempo entre dos muestras [s]	SAOCOM_XMLProduct/Channel/RasterInfo/SamplesStep
$\tau(0)$	Tiempo en rango [s]	SAOCOM_XMLProduct/Channel/DopplerCentroid/trg0_s

Por otra parte,  $k_s$  representa la tasa de variación Doppler introducida por el direccionamiento de la antena y está dada por:

$$k_s \approx \frac{2V}{\lambda} \cdot k_\psi = \frac{2V}{c} \cdot f_c \cdot k_\psi \quad (3.5)$$

donde  $k_\psi$  es la velocidad angular del movimiento de la antena en la dirección acimutal establecida en los metadatos y  $V$  es la velocidad del satélite calculada a partir de los vectores de estado orbital.

Una vez estimada la función de *deramping* (Ec. 3.1), la misma debe ser sustraída de la fase de los datos que serán remuestreados en el paso de co-registro, según la siguiente fórmula:

$$b_N^{deramped} = b_N \cdot \exp(j \cdot \Phi) \quad (3.6)$$

donde  $b_N$  representa al *burst*  $N$  de la imagen a remuestrear y  $\Phi$  es la fase de *deramping* calculada según la Ec. 3.1.

Tal como está representado en el flujo de procesamiento ilustrado en la Figura 3.2, esta función de *deramping* es sustraída de la fase de los datos, previo al paso de co-registro, sólo de los *bursts* correspondientes a la adquisición secundaria. Esto es así ya que la adquisición secundaria es la que será remuestreada en el paso de co-registro para ser llevada a la geometría de la adquisición de referencia.

Una vez co-registrados los *bursts* de ambas adquisiciones, la misma función de *deramping* debe ser reincorporada al *burst* remuestreado en un proceso que recibe el nombre de *reramping*.

La Tabla 3.1 resume las variables necesarias y dónde pueden encontrarse en los metadatos de una adquisición SAOCOM TOPSAR.

### 3.2.2. Co-registro

Se ha visto que la superposición entre los *bursts* de diferentes adquisiciones es variable y que normalmente se superponen de manera parcial. Además, si bien la correspondencia entre *bursts* ya ha sido establecida, queda por determinar el offset remanente entre *bursts* coincidentes.

En este sentido, el paso de co-registración se lleva a cabo en dos etapas. La primera consiste en calcular un corrimiento grueso rígido entre las escenas involucradas utilizando la información orbital. La segunda involucra la ejecución de un paso de co-registro geométrico *burst* a *burst* (51).

Vale la pena hacer hincapié en que la precisión de la información orbital de los datos utilizados influye directamente sobre la precisión de las funciones que permiten expresar una imagen en la geometría de la otra (*warp functions*). Por este motivo, es recomendable solicitar productos SAOCOM con efemérides orbitales lo más precisas posibles ya que el Servicio de Segmento de Usuarios de CONAE (CUSS) no proporciona un servicio de actualización de datos orbitales.

#### 3.2.3. Unión de Bursts

Una vez que los *bursts* individuales que han sido co-registrados, el procesamiento continúa con una operación de unión o combinación de los *bursts* que componen una imagen para formar cada escena completa.

Para una imagen TOPSAR de SAOCOM, los *bursts* que la componen cuentan con una superposición de alrededor de 30 líneas en acimut. Esto representa aproximadamente el 4% del total de líneas en acimut que componen un *burst*. El desafío es determinar en qué parte de la superposición es conveniente unir dos *bursts* consecutivos. En este sentido, se podrían adoptar distintas estrategias:

- Unir dos *bursts* consecutivos en una línea en acimut determinada, como la línea media del área de superposición, por ejemplo.
- Unirlos en los extremos del área de superposición, ya sea en la primera o la última línea en acimut.

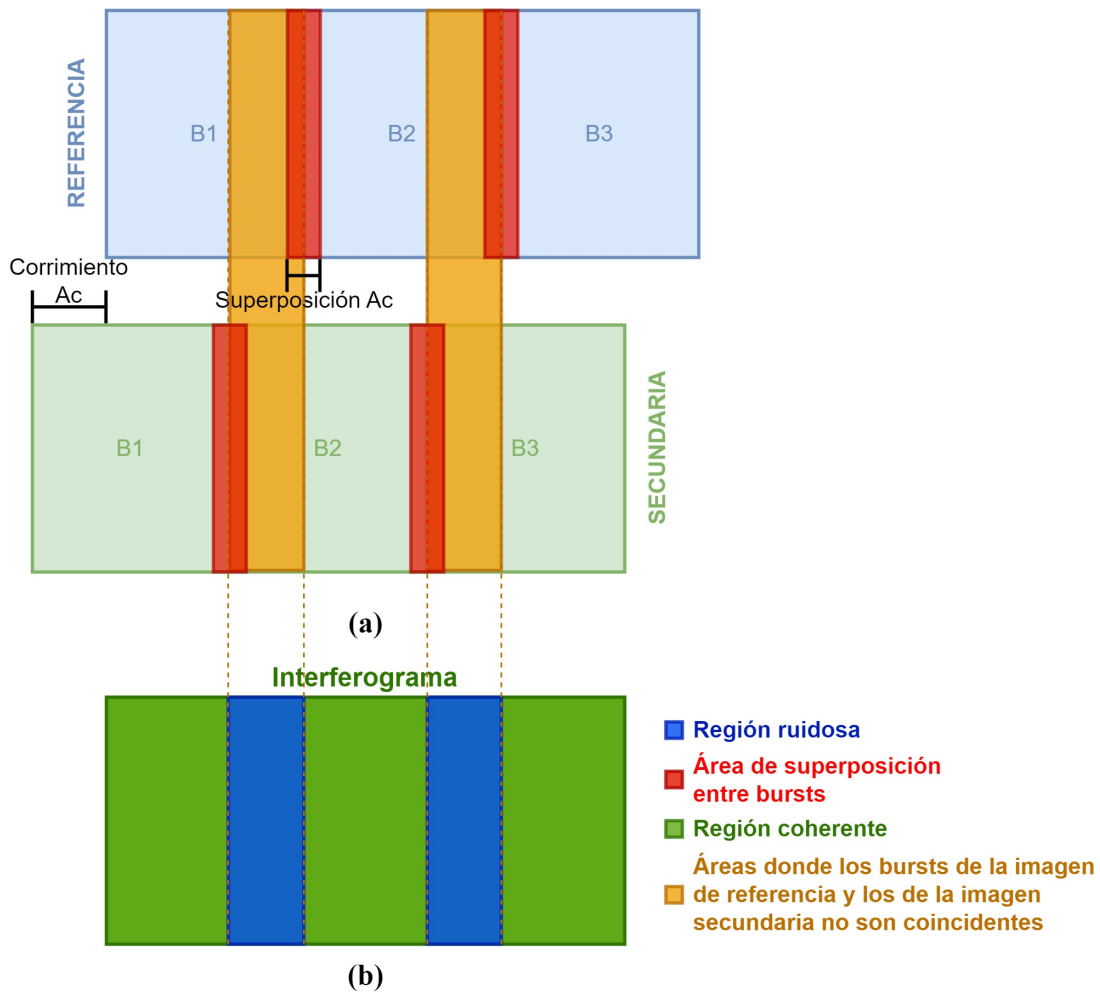
La estrategia a adoptar debe ser aquella que evite que interfieran entre sí *bursts* no coincidentes, ya que esto daría lugar a un interferograma incoherente. Sin embargo, no siempre es posible ajustar la unión de *bursts* y evitar la presencia zonas ruidosas en el interferograma.

Considérese la situación ejemplificada en la Figura 3.3. Los *bursts* que componen las imágenes de referencia y secundaria han sido unidos en la mitad del área de superposición para conformar la escena completa. Es frecuente encontrar que el corrimiento en acimut entre los *bursts* coincidentes en ambas adquisiciones es mayor que el área de superposición entre *bursts* consecutivos. En consecuencia, al calcular el interferograma, el resultado se compone de una serie de áreas coherentes intercaladas con áreas ruidosas coincidentes con las inmediaciones de las zonas de superposición entre *bursts*. Esto se debe a las diferencias entre las frecuencias Doppler de los *bursts* que están interfiriendo entre sí.

Durante la formación del interferograma, los píxeles que se ubican en el final de los *bursts* de la imagen de referencia (donde las frecuencias Doppler son altas) interfieren con los píxeles ubicados al inicio de los *bursts* de la imagen secundaria (donde las frecuencias Doppler son bajas). De este modo, las diferencias de frecuencia Doppler entre estas zonas resultan ser mayores que el ancho de banda Doppler del sistema, lo cual da como resultado las áreas ruidosas que se ilustran en color azul en la Figura 3.3b.

### 3.3. Requisitos Espectrales en Acimut

En la Sección 2.7.4 se estableció que en un sistema interferométrico TOPSAR se necesita contar con la capacidad de observar el mismo objetivo con el mismo ángulo de *squint* y que



**Figura 3.3:** Ilustración de la unión de *bursts* de adquisiciones TOPSAR de SAOCOM. En (a), las áreas de superposición entre *bursts* consecutivos están representadas en color rojo. En color anaranjado está representada la zona donde la diferencia de frecuencia Doppler es mayor que el ancho de banda en acimut del sistema. En (b), el interferograma formado se compone de áreas coherentes (representadas en color verde) intercaladas con áreas ruidosas (representadas en color azul). Tomado y modificado de (11).

la manera de garantizar que esto ocurra es a través de la sincronización de *bursts* (29). La falta de sincronización introduciría un desplazamiento en el espectro en acimut, conduciendo a una falta de superposición espectral en esta dimensión, lo cual causaría decorrelación y pérdida de resolución en el interferograma (27).

Dado que la ausencia de sincronización de *bursts* en el modo TOPSAR de SAOCOM no permite garantizar que un grupo de imágenes adquiridas en este modo sirvan para propósitos interferométricos, es necesario determinar cuál es la superposición espectral entre imágenes a fin de establecer si un par de imágenes dado puede constituir un par interferométrico. Para ello, se debe comparar la diferencia de frecuencia de centroide Doppler de los datos considerados con el ancho de banda en acimut del sistema.

La ecuación de cálculo de la frecuencia de centroide Doppler para una adquisición deriva de la función de *deramping* (Ec. 3.1) y está representada por la siguiente fórmula:

$$f_{DC}(\eta, \tau) = f_{\eta c}(\tau) + k_t(\tau) \cdot (\eta - \eta_{ref}(\tau)) \quad (3.7)$$

donde los parámetros utilizados son los descritos en la Ec. 3.1 (30).

A través de la Ec. 3.7 es posible calcular el mapa de frecuencias de centroide Doppler de cada *burst* o incluso de la adquisición completa. Debido a que las imágenes ya están regis-

tradas entre sí, simplemente se puede definir un punto  $p$  para todo el conjunto de imágenes procesadas y utilizar el valor de frecuencia Doppler en  $p$  para realizar la comparación.

Si las diferencias de frecuencia Doppler son menores que el ancho de banda procesado en acimut durante la síntesis de la imagen SAR (*azimuth processing bandwidth during SAR image synthesis* en (10)), la superposición espectral debe ser suficiente como para formar un interferograma coherente. Entonces, para un par de imágenes dadas se debe cumplir que:

$$B_{az} > |f_{DC,p}^{ref} - f_{DC,p}^{sec}| \quad (3.8)$$

siendo  $B_{az}$  el ancho de banda procesado en acimut [Hz] (también conocido como ancho de banda Doppler),  $f_{DC,p}^{ref}$  [Hz] y  $f_{DC,p}^{sec}$  [Hz] las frecuencias Doppler en el punto  $p$  en las imágenes de referencia y secundaria respectivamente.

### 3.4. Generación del Interferograma

Una vez identificados los potenciales pares interferométricos, el procesamiento continúa como es habitual, calculando el interferograma mediante la multiplicación de la imagen de referencia por el complejo conjugado de la imagen secundaria (Ec. 2.24).

Suele suceder que, al extraer la fase del interferograma, se observen discontinuidades o saltos de fase en las zonas correspondientes a las uniones de los *bursts* debido a la presencia de ciertos corrimientos que no han sido adecuadamente compensados durante el proceso de co-registro. Estos corrimientos residuales pueden deberse a imprecisiones de los datos orbitales, errores de tiempo, o efectos físicos (29). El movimiento de la antena en acimut introduce una separación espectral en la señal correspondiente a *bursts* consecutivos en la zona donde éstos se superponen (29; 53; 54). Para compensar este salto de fase, se utiliza el algoritmo de ESD que aprovecha esta separación espectral para estimar los desplazamientos residuales. De este modo, la diferencia de fase en el área de superposición de *bursts* es calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$\phi_{ESD,j} = \arg\{(b_{ref}^i \cdot b_{sec}^{i*}) \cdot (b_{ref}^{i+1} \cdot b_{sec}^{i+1*})^*\} \quad (3.9)$$

donde  $b^i$  y  $b^{i+1}$  representan dos *bursts* consecutivos y  $j$  es el índice que identifica el área de superposición entre ambos.

El desplazamiento residual entre *bursts* es proporcional a  $\phi_{ESD,j}$  y puede ser calculado como:

$$\Delta i_{ESD,j} = \frac{\langle \phi_{ESD,j} \rangle}{\langle \Delta f_{DC,j}^{ovl} \rangle} \cdot \frac{prf}{2\pi} \quad (3.10)$$

donde  $\langle \cdot \rangle$  corresponde al valor medio,  $\Delta f_{DC,j}^{ovl}$  representa el valor de diferencia de frecuencia de centroide Doppler en la zona de superposición y  $prf$  corresponde al parámetro de Frecuencia de Repetición de Pulso. Como se puede observar, se utiliza una operación de promediado de modo de estimar un único desplazamiento residual  $\Delta i_{ESD}$  para toda la escena. Es decir, este esquema considera que el salto de frecuencia producido en todos los *bursts* es exactamente el mismo; situación que no siempre es verdadera por lo que el  $\Delta i_{ESD}$  calculado podría no ser representativo de la corrección real que se debe aplicar.

En este sentido, se plantea la posibilidad de aplicar un esquema de compensación diferente. El mismo se basa en registrar las imágenes utilizando la metodología de co-registro geométrico y luego estimar los corrimientos residuales basados en la ESD simultáneamente con

la formación del interferograma, calculando un valor de offset  $\phi_{ESD,j}$  para cada transición entre *bursts*. Estos offsets son utilizados para calcular una función de fase acumulativa que se aplica como una corrección de fase posterior a la formación del interferograma:

$$\begin{cases} \phi_b = 0, & \text{if } b = 0 \\ \phi_b = \sum_{p=0}^{b-1} \phi_{ESD,j} & \text{if } b > 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

donde  $b$  es el número de *burst* y  $j$  es el índice que identifica cada área de superposición.

Vale la pena aclarar que la aplicación de la corrección por ESD no puede aplicarse en aquellas situaciones en las que el corrimiento en acimut entre *bursts* coincidentes en ambas adquisiciones sea mayor al área de superposición entre estos *bursts* (situación ilustrada en la Figura 3.3) ya que el interferograma será incoherente en esas zonas y no se podrá calcular la estimación de fase propuesta en la Ec. 3.11.

---

### Caso de Estudio: Procesamiento y Resultados

---

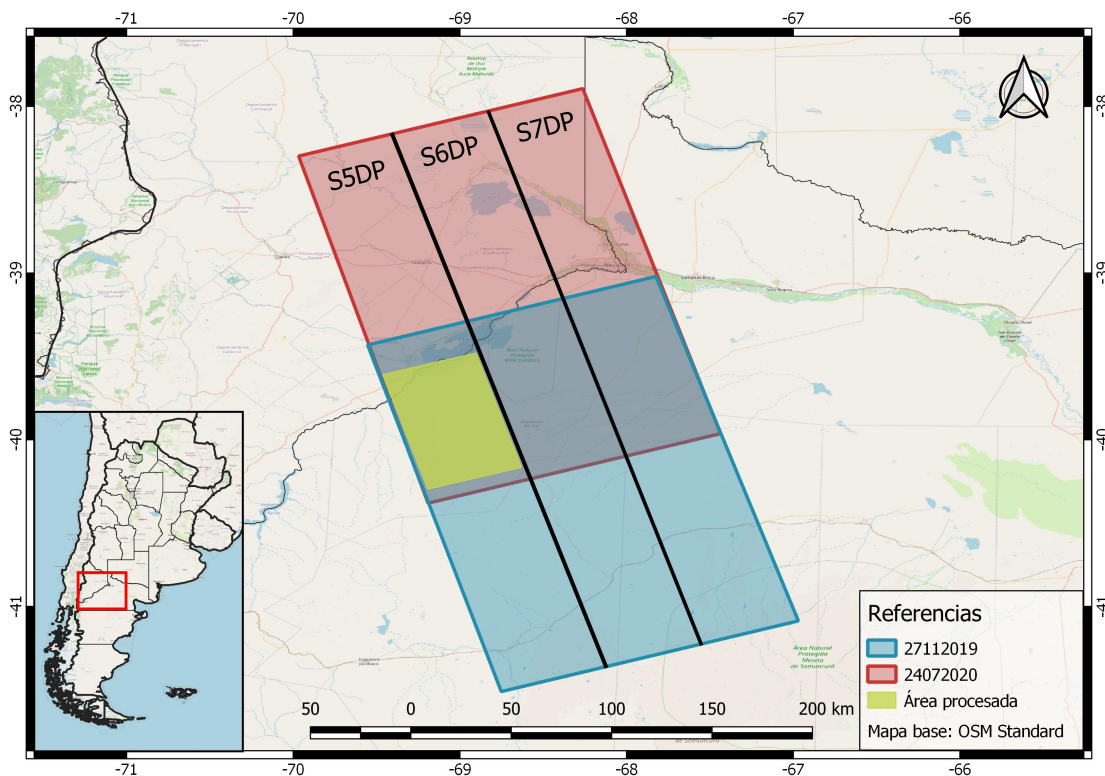
En el presente capítulo se aplica la metodología propuesta en el Capítulo 3 a un conjunto de datos SAOCOM-1 adquiridos en modalidad TOPSAR Narrow para comprobar el potencial de este modo en aplicaciones interferométricas. Al igual que la metodología, los resultados aquí expuestos corresponden a los presentados en el trabajo (11), cuya presentación está en proceso de evaluación.

#### 4.1. Área de Estudio

El área de estudio seleccionada como sitio experimental para evaluar la factibilidad de utilizar datos TOPSAR de SAOCOM en aplicaciones interferométricas está ubicada al sur de Argentina, comprende parte de las provincias de Neuquén y Río Negro (Figura 4.1). El área procesada (representada en color verde en la Figura 4.1) se encuentra mayormente comprendida en el departamento El Cuy, situado al noroeste de la provincia de Río Negro. Esta área limita al norte con el Embalse Ezequiel Ramos Mexía, el Río Limay y el cerro El Puntudo; y al sur limita con el parador Lonco Vaca, distinguido por un cerro del mismo nombre. La zona forma parte de la eco-región de Monte de Llanuras y Mesetas, caracterizada por un clima árido y fresco, paisajes de llanuras y extensas mesetas escalonadas, con suelos profundos, areno-arcillosos y muy permeables donde predominan especies arbustivas localmente conocidas como “*jarillal*”.

La razón por la cual fue seleccionada esta área está relacionada con la gran disponibilidad de datos SAOCOM-1 adquiridos en modo TOPSAR. El hecho de disponer de un conjunto de datos grande debería aumentar las probabilidades de encontrar pares de imágenes que tengan suficiente superposición espectral de modo que permitan generar interferogramas coherentes, aún cuando el modo TOPSAR de SAOCOM-1 no ha sido diseñado con este propósito.

Los datos solicitados corresponden a la modalidad TOPSAR Narrow B (TNB) en polarización dual (DP), el cual está compuesto por tres swaths diferentes: S5DP, S6DP y S7DP (10). En este trabajo, sólo se muestran los resultados relativos al swath S5DP, pero la metodología aplicada para procesar los swaths restantes debería seguir el mismo procedimiento descripto



**Figura 4.1:** Área de estudio. Los rectángulos ilustrados en colores rojo y azul representan la máxima extensión del área cubierta por el conjunto de datos TOPSAR utilizado. Cada adquisición se compone de tres swaths en polarización doble (S5DP, S6DP y S7DP). El área común correspondiente al S5DP se encuentra ilustrada en color verde y constituye el área procesada.

anteriormente.

El conjunto de datos utilizado se compone de 18 imágenes ascendentes adquiridas entre el 27-DIC-2019 y el 04-FEB-2022, con un ángulo de mirada lateral ( $\vartheta$ ) de alrededor de  $35,5^\circ$ . Cada imagen presenta un número de *bursts* que varía entre 12 y 14. En la Figura 4.1 están representados mediante rectángulos de color rojo y azul las áreas cubiertas por las dos adquisiciones del conjunto que presentan la mayor separación espacial entre sí, lo cual da como resultado un área procesada compuesta por 5 *bursts*, correspondiente al área de superposición del conjunto de imágenes utilizado (rectángulo verde).

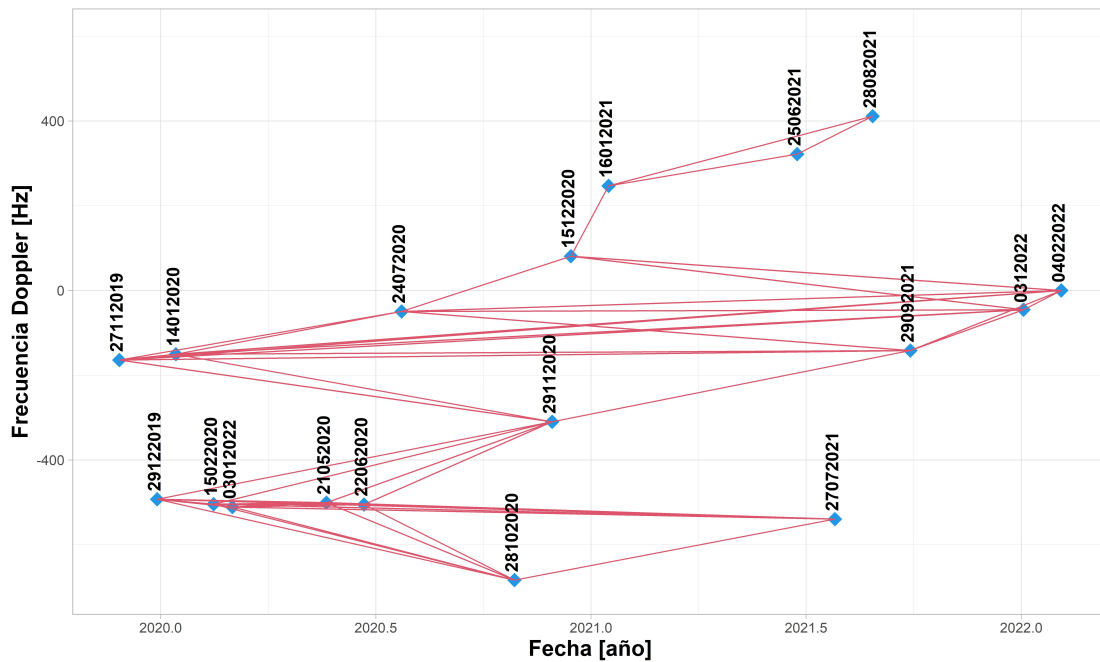
## 4.2. Procesamiento

En primera instancia, se calculan todas las posibles combinaciones de imágenes en base, principalmente, al requerimiento de superposición espectral en acimut. Luego, se procesan sólo aquellos pares que cumplen con el siguiente criterio de selección:

- Máxima Línea de Base Perpendicular de 2000 m: este valor equivale aproximadamente a un tercio de la línea de base crítica correspondiente a adquisiciones S5DP, la cual ronda los 6700 m.
- Máxima Diferencia de Centroide Doppler de 200 Hz: este valor corresponde aproximadamente al ancho de banda en acimut para adquisiciones S5DP, el cual es de 202 Hz (10). Si bien puede resultar una condición poco restrictiva, el objetivo es encontrar



la mayor cantidad de pares interferométricos posibles para luego verificar cómo son los resultados obtenidos en función de la cercanía a este límite.

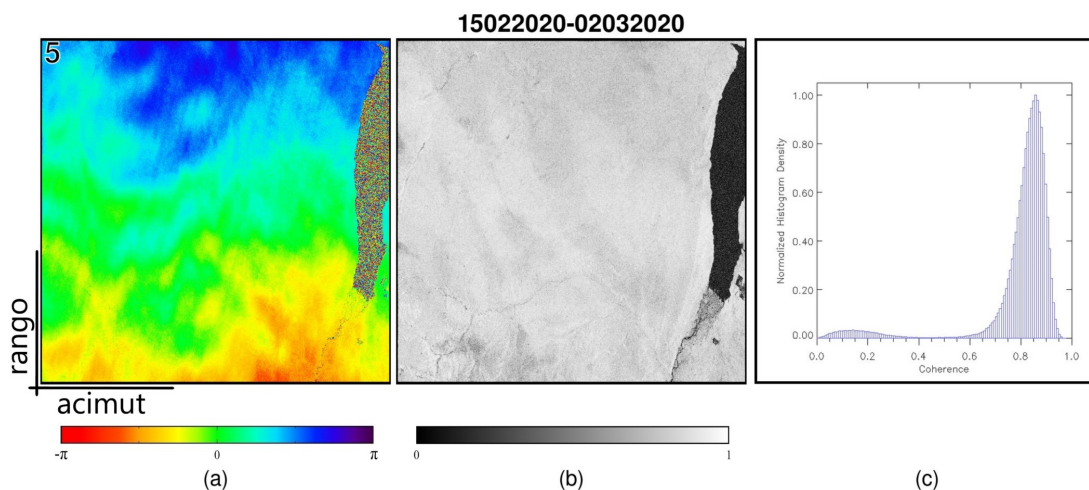


**Figura 4.2:** Gráfico de Frecuencia Doppler [Hz] vs Fecha [año] de adquisición. Cada punto representa una imagen y los pares de fechas vinculados por una línea roja corresponden a un interferograma calculado.

Vale destacar que no se estableció una restricción en lo que respecta a la línea de base temporal con el objetivo de determinar la mayor cantidad de combinaciones posibles. En este sentido, la distribución de las 18 imágenes en un espacio de representación Frecuencia Doppler [Hz] vs Tiempo [año] se muestra en la Figura 4.2. Aquí, las líneas rojas vinculan los pares de imágenes que cumplen con el criterio de selección establecido y que, a priori, deberían arrojar resultados con mayor o menor coherencia dependiendo de cuán cerca esté la diferencia de frecuencia Doppler con respecto al ancho de banda del sistema.

De este modo, se calculan 48 interferogramas cuyas características están resumidas en la Tabla A.1 de los cuales un total de 17 ( 35 %) no presenta discontinuidades de fase evidentes luego de aplicar la corrección por ESD (véase Figura B.1). En particular, la Figura 4.3 muestra el par interferométrico correspondiente a las fechas 15-FEB-2020 y 02-MAR-2020 (Id. 5 en la Tabla A.1). Aquí, tal como se esperaba, se obtuvieron resultados muy coherentes ya que la separación Doppler es mucho menor que el ancho de banda Doppler (6.93 Hz contra 202 Hz). El histograma de coherencia evidencia una distribución concentrada alrededor del valor 0.85, con una media de 0.79 y una desviación estándar de  $\pm 0.16$  (véase la Tabla A.1).

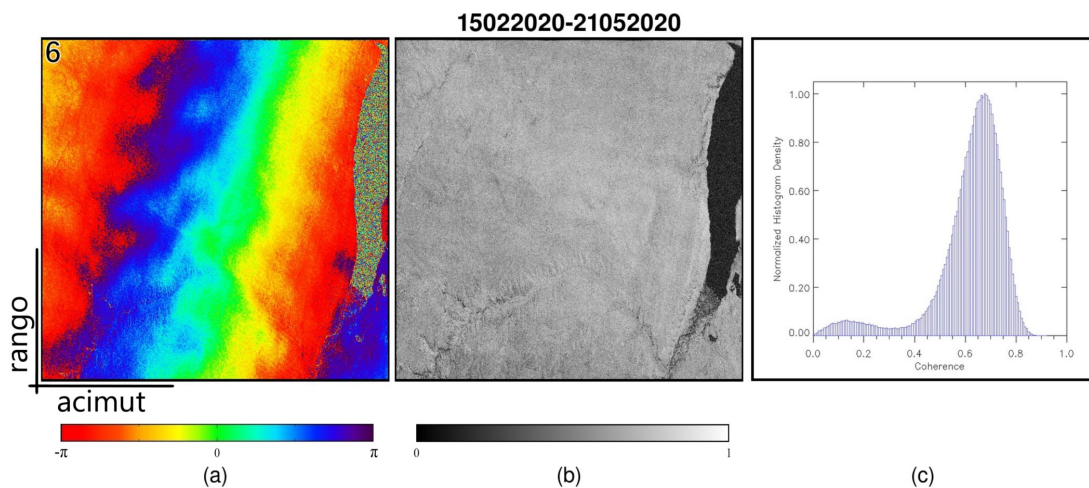
Una situación similar se observa para el par correspondiente a las fechas 15-FEB-2020 y 21-MAY-2020 (Id. 6 en la Tabla A.1) en la Figura 4.4. Si bien el interferograma se ve uniforme, es decir, sin saltos de fase ni discontinuidades, la coherencia resulta ser más baja que en el caso anterior, incluso cuando la diferencia de frecuencia Doppler es menor (-3.50 Hz para este caso). El histograma de coherencia muestra una distribución concentrada alrededor del valor 0.7, con una media de 0.62 y una desviación estándar de  $\pm 0.15$  (véase la Tabla A.1), lo cual coincide con lo observado en la Figura 4.4b. Esto probablemente se debe a que la línea de base temporal para este caso es mayor que la del caso anterior y la fecha de la adquisición secundaria es cercana a la temporada invernal para esta región, por lo que algún evento climático podría haber provocado que los resultados sean menos coherentes. Sin embargo,



**Figura 4.3:** Id. 5. (a) Interferograma correspondiente a las fechas 15-FEB-2020 y 02-MAR-2020. (b) Mapa de coherencia. (c) Histograma de coherencia.

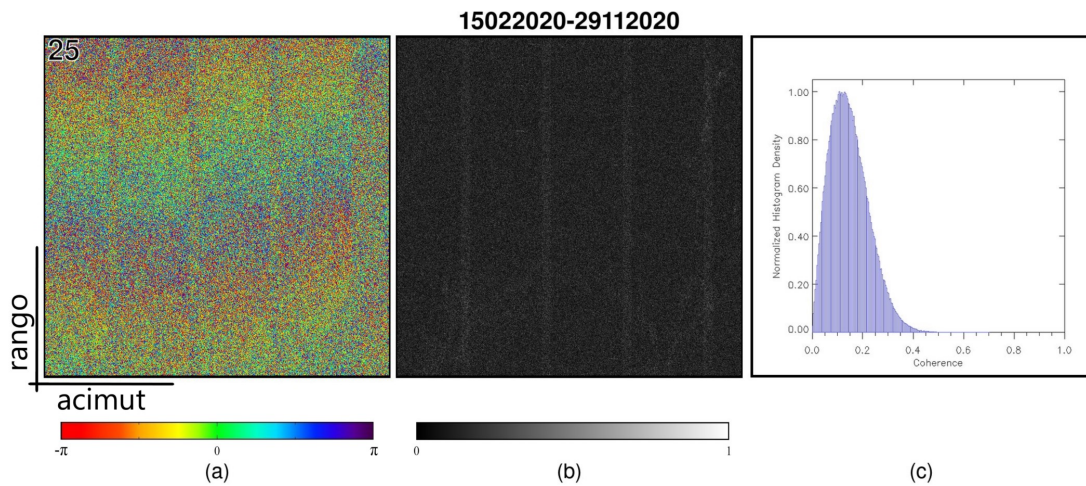
los resultados son muy buenos en ambos casos ya que el  $\Delta\text{Dopp}$  resulta estar muy por debajo del ancho de banda límite.

También se observa en el mapa de coherencia de la Figura 4.4b, un leve bandeado en la dirección de rango. Esta situación se debe al método de interpolación utilizado al realizar el co-registro de las imágenes. En este caso se utilizó el método de interpolación bicuadrático porque visualmente arrojaba mejores resultados pero habría que analizar con más detalle este efecto, que excede el alcance del presente trabajo.



**Figura 4.4:** Id. 6. (a) Interferograma correspondiente a las fechas 15-FEB-2020 y 21-MAY-2020. (b) Mapa de coherencia. (c) Histograma de coherencia.

Para los restantes 31 casos, el corrimiento en acimut entre imágenes resultó ser mayor que el área de superposición entre *bursts*, dando lugar a interferogramas cuya composición es similar a ilustrada en la Figura 3.3b. En estos casos, como se indicó en la Sección 3.4, no se pudo aplicar la corrección por ESD debido a que las áreas de superposición entre *bursts* de la imagen de referencia no coinciden con las de la imagen secundaria. Es decir, no hay superposición de las áreas comunes entre *bursts* en las imágenes involucradas en el par interferométrico por lo que el interferograma es incoherente en estas áreas y no es posible calcular la corrección propuesta.



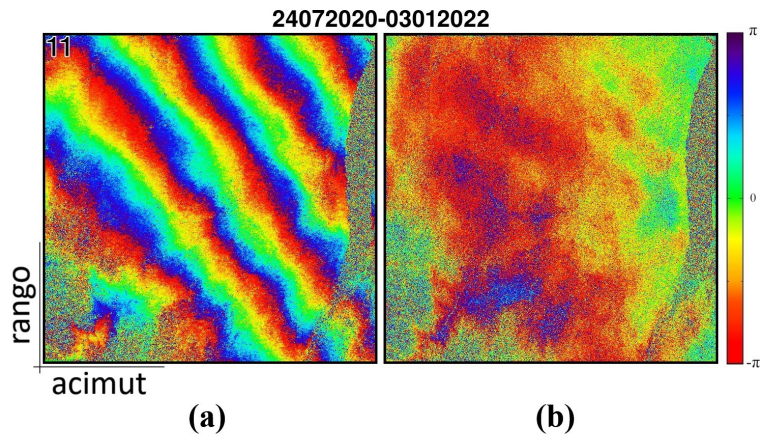
**Figura 4.5:** Id. 25. (a) Interferograma correspondiente a las fechas 15-FEB-2020 y 29-NOV-2020. (b) Mapa de coherencia. (c) Histograma de coherencia.

Un ejemplo de esta situación se presenta en la Figura 4.5, y corresponde al par interferométrico de las fechas 15-FEB-2020 y 29-NOV-2020 (Id. 25 en la Tabla A.1). En este caso, el interferograma resulta ser más ruidoso como consecuencia de la baja superposición espectral, lo cual se hace evidente al observar que el valor diferencia Doppler es más cercano al límite impuesto por el ancho de banda en acimut ( $-194.31$  Hz contra  $202$  Hz). A pesar de que el resultado es más ruidoso, aún es posible distinguir algunas regiones coherentes intercaladas con zonas ruidosas, tal como ilustra la representación esquemática de la Figura 3.3b. Además, estas franjas ruidosas permiten individualizar claramente los 5 *bursts* procesados que conforman el área común de todo el conjunto de datos. A su vez, en el mapa de coherencia de la Figura 4.5b, se observa que las franjas ruidosas parecieran presentar una mayor coherencia que el resto del interferograma. Esto se debe a que el estimador de coherencia utilizado tiende a sobreestimar la magnitud de la coherencia en estas áreas, especialmente si se encuentran entre zonas de distinta y baja coherencia (55).

Por otra parte, en los interferogramas de las Figuras 4.3 y 4.4, se observa la presencia de ciertos artefactos de fase que también se evidencian en el resto de los interferogramas de la Figura B.1. En (31) se reportó para un conjunto de datos adquiridos en modo Stripmap que la aparición de estas componentes residuales de fase está vinculada a que la precisión de los datos orbitales de SAOCOM-1 no es muy buena. Aquí, los autores mostraron que la incorrecta estimación de las líneas de base perpendiculares debido a la inexactitud de las efemérides orbitales, puede producir este tipo de rampas de fase. Sin embargo, la metodología propuesta en (56) permite lidiar con estos inconvenientes a través del cálculo de una corrección orbital que es aplicada previo a la generación del interferograma.

Un ejemplo se puede observar en la Figura 4.6 correspondiente a las fechas 24-JUL-2020 y 03-ENE-2022 (Id. 11 en la Tabla A.1). Aquí, se puede ver con claridad la presencia de una rampa de fase con componentes en ambas direcciones, rango y acimut (Figura 4.6a), la cual deja de ser visible una vez aplicada la corrección orbital (Figura 4.6b). Las correcciones aplicadas a cada uno de los interferogramas de la Figura B.1 están resumidas en la Tabla 4.1.

Todos los interferogramas generados están disponibles en el Anexo B. La Figura B.1 muestra los 17 interferogramas con la corrección por ESD aplicada y en la Figura B.3 se incorpora también la corrección orbital. Los restantes 31 interferogramas se muestran en la Figura B.2, a los cuales no se pudo aplicar ninguna de estas correcciones.



**Figura 4.6:** Id. 11. Interferograma correspondiente a las fechas 24-JUL-2020 y 03-ENE-2022. (a) Original (b) Con corrección orbital aplicada.

**Tabla 4.1:** Valores de corrección de la variación en acimut de la línea de base paralela y la línea de base perpendicular, aplicada a los interferogramas corregidos por ESD.

<b>Id</b>	<b>Referencia</b>	<b>Secundaria</b>	<b>Corrección de Línea de Base Perpendicular [m]</b>	<b>Corrección de Variación en Acimut de la Línea de Base Paralela [cm/m]</b>
1	02032020	21052020	-0.425	0.012
2	02032020	22062020	0.060	0.003
3	02032020	27072021	0.304	0.012
4	14012020	29092021	-0.707	0.027
5	15022020	02032020	12.890	0.001
6	15022020	21052020	0.898	0.011
7	15022020	22062020	13.886	0.003
8	15022020	27072021	14.946	0.012
9	21052020	22062020	0.645	-0.010
10	22062020	27072021	-0.030	0.011
11	24072020	03012022	-63.960	0.035
12	27112019	14012020	0.905	-0.026
13	27112019	29092021	0.000	0.002
14	29122019	02032020	11.856	0.001
15	29122019	15022020	-0.212	0.001
16	29122019	21052020	0.676	0.012
17	29122019	22062020	11.544	0.005

---

# Conclusiones, Discusión y Trabajos Futuros

---

## 5.1. Conclusiones

Se ha presentado y aplicado una metodología adaptada para generar productos interferométricos a partir del procesamiento de datos adquiridos bajo la modalidad TOPSAR de SAOCOM-1 y se han mostrado los primeros resultados obtenidos. En este sentido, el presente trabajo es relevante ya que aporta un avance en las líneas estratégicas del SIASGE, vinculadas al uso de productos interferométricos con el objetivo de monitorear eventos tales como deslizamientos, actividades volcánicas, etc.

Si bien para generar productos interferométricos a partir de las adquisiciones de SAOCOM-1 se utilizan imágenes obtenidas en modo Stripmap, suele ser un desafío encontrar un conjunto de adquisiciones de este tipo que sean apropiadas para aplicaciones interferométricas en ciertas regiones, como la Región Pampeana Argentina. Esto se debe a que el objetivo principal de la misión SAOCOM es la generación de mapas operativos de humedad del suelo y para ello se utilizan imágenes adquiridas bajo la modalidad TOPSAR, siendo éste su modo de adquisición principal. Esto limita las áreas que pueden ser procesadas con fines interferométricos ya que es difícil encontrar un conjunto de datos en Stripmap en aquellas regiones donde se suelen adquirir productos TOPSAR.

Frente a esta situación, una alternativa es aprovechar la gran disponibilidad de imágenes TOPSAR. Sin embargo, el modo TOPSAR en SAOCOM-1 no ha sido diseñado para ser utilizado con propósitos interferométricos ya que carece de sincronización de *bursts*, lo cual es una característica fundamental para garantizar que las adquisiciones TOPSAR cumplen con los requisitos necesarios para generar productos interferométricos coherentes.

Con el objetivo de evaluar el potencial del modo TOPSAR de SAOCOM-1 en aplicaciones interferométricas y comprobar la criticidad de la condición de sincronización de *bursts*, se ha utilizado un conjunto de datos compuesto por 18 imágenes adquiridas en polarización doble sobre la región Sur-Oeste de Argentina. El procesamiento de un único *swath* (S5DP) ha permitido generar un total de 48 interferogramas que han demostrado satisfactoriamente que la ausencia de sincronismo no es tan crítica como se suponía en un principio. Incluso se ha

podido observar que la calidad de los interferogramas está más vinculada a la diferencia de frecuencia Doppler entre las imágenes utilizadas que a las características del área iluminada o a su cambio temporal. Esto resulta evidente tanto cualitativamente, al hacer una inspección visual de los resultados mostrados en las Figuras B.1 y B.2, como cuantitativamente, al comparar las métricas de coherencia presentadas en la Tabla A.1 y los histogramas de coherencia de la Figura B.4.

A pesar de ello, una gran desventaja cuando se procesan datos adquiridos bajo esta modalidad es la baja superposición entre los *bursts* consecutivos que componen una imagen. Ésta suele representar un pequeño porcentaje ( $\sim 4\%$ ) del total de líneas en acimut de cada *burst* y, junto con la falta de sincronización, es la razón por la cual no se pudo aplicar en muchas situaciones el algoritmo de ESD propuesto. La aplicación de la corrección por ESD se limita a aquellos pares de imágenes donde existe, al menos, una coincidencia parcial entre las áreas de superposición de *bursts* consecutivos de la adquisición de referencia y de la adquisición secundaria. Considerando el gran corrimiento en dirección acimutal que suele existir entre *bursts* coincidentes y el hecho de que la superposición entre *bursts* consecutivos es pequeña, es común que esta coincidencia entre áreas de superposición no exista y que aparezcan franjas incoherentes en los interferogramas (véase la Figura B.2).

Otra característica que se pudo observar en los resultados obtenidos es la aparición de una componente de fase provocada por la inexactitud de la información orbital. En este sentido, se ha presentado un conjunto de interferogramas que están afectados por distintas funciones de fase tanto en la dirección de rango como en la dirección de acimut (Figura B.1). Luego de estimar los errores de variación en acimut de la línea de base paralela y la línea de base perpendicular utilizando la metodología propuesta en (56), estas componentes de fase indeseadas han sido compensadas (Figura B.3). Los interferogramas que presentaban discontinuidades en las zonas de transición entre *bursts* no fueron corregidos, pero podría considerarse un mecanismo similar utilizando únicamente las zonas coherentes del interferograma para estimar las correcciones.

Un aspecto que cabe destacar respecto a la metodología de corrección por ESD utilizada, es que la misma permite corregir los saltos de fase que se presentan en las transiciones entre *bursts* utilizando una función de fase (Ec. 3.11) que es fácilmente calculable y que evita la estimación de parámetros derivados de datos auxiliares. A su vez, evita la necesidad de realizar pasos de remuestreo adicionales de las imágenes secundarias como se hace habitualmente en estos casos (29; 54; 53). Esto es especialmente útil cuando se desea procesar series temporales, ya que cada escena es parte de varios interferogramas y un segundo paso de remuestreo basado en la función de corrección por ESD debería ser aplicado a cada interferograma. Es decir, el algoritmo aquí utilizado evita remuestrear las escenas secundarias tantas veces como interferogramas son calculados utilizando estas imágenes. En lugar de esto, se calcula una función de corrección de fase por cada interferograma, sin ningún tipo de remuestreo adicional y que es aplicable a todos los casos.

Vale mencionar que, por una cuestión de simplicidad, sólo fue procesado un único *swath* pero el procesamiento de los restantes *swaths* disponibles debe seguir los mismos lineamientos detallados en este trabajo.

Para concluir, se ha demostrado que el modo TOPSAR implementado en los satélites SAOCOM-1 es capaz de ser utilizado con propósitos interferométricos, aún cuando no ha sido diseñado para tales fines. Además, se dispone de una metodología operativa que permite procesar este tipo de datos. Si bien la metodología implementada presenta la misma estructura general que se utiliza para procesar adquisiciones TOPSAR sincronizadas (29), incorpora ciertas modificaciones que la hacen apropiada para procesar adquisiciones TOPSAR no sincronizadas.

## 5.2. Discusión y Trabajos Futuros

En primer lugar, resulta de interés poner a prueba la metodología propuesta para procesar otras áreas de interés y evaluar así su robustez.

Si bien la extensión del presente trabajo está limitada a explorar la posibilidad de utilizar las adquisiciones TOPSAR de SAOCOM en aplicaciones interferométricas, es adecuado analizar otras zonas donde se busque estudiar deformación o deslizamientos, por ejemplo, y comparar los resultados que se obtengan con los que se puedan generar o hayan sido generados a partir de otro tipo de adquisiciones del mismo sensor (Stripmap de SAOCOM por ejemplo) o de otro tipo de sensores (como podría ser Sentinel).

Por otra parte, es de interés analizar la factibilidad de utilizar este tipo de productos para el procesamiento de series temporales. Sin embargo, esto requiere resolver ciertas problemáticas relacionadas con la presencia de saltos de fase entre zonas coherentes de los interferogramas, evidenciadas en el desarrollo del presente trabajo.

En este sentido, para resolver los problemas vinculados a la imposibilidad de aplicación de la corrección por ESD en trabajos futuros, sería interesante explorar otras alternativas que permitan compensar estos saltos de fase.

Actualmente, la utilización de interferogramas como los mostrados en la Figura B.2 está limitada a una pequeña porción que corresponde aproximadamente a la extensión de un único *burst*, que es la zona que presenta una distribución de fase uniforme. Para poder aprovechar la extensión completa de estos interferogramas sería necesario compensar estos saltos de fase, aún cuando no sea factible eliminar las franjas ruidosas.

Una alternativa sería aprovechar la disponibilidad de conjuntos de datos compuestos por una gran cantidad de imágenes y combinaciones de pares interferométricos. De este modo, el corrimiento de fase correspondiente a pares que no tienen suficiente superposición entre *bursts* podría estimarse en base a aquellos pares que sí tienen suficiente superposición. El éxito de esta alternativa dependerá de tener una cantidad importante de pares interferométricos útiles de manera tal que las imágenes involucradas sean las mismas que estén presentes en pares que deban corregirse.

Otra opción podría ser explorar el área de superposición entre *swaths* consecutivos para identificar estos corrimientos de fase (11).

---

## Referencias bibliográficas

---

- [1] R. Bamler, "Principles of synthetic aperture radar," *Surveys in Geophysics*, vol. 21, 01 2000.
- [2] A. I. Flores-Anderson, K. E. Herndon, R. B. Thapa, and E. Cherrington, "SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation," *THE SAR HANDBOOK Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*, pp. 1 – 307, 2019.
- [3] P. Z. Mirko, *Focalización de imágenes SAR utilizando el algoritmo Omega-K. Simulación y Validación*. Tesis de maestría, Instituto de Altos Estudios Espaciales "Mario Gulich", Universidad Nacional de Córdoba, 2013.
- [4] G. Franceschetti and R. Lanari, *Synthetic aperture radar processing*. CRC Press, jan 1999.
- [5] Y. L. B. Roa, *Evaluación de las capacidades interferométricas y polarimétricas de los datos adquiridos por el Instrumento Aerotransportado SARAT (banda-L)*. Tesis de maestría, Instituto de Altos Estudios Espaciales "Mario Gulich", Universidad Nacional de Córdoba, 2020.
- [6] A. Moreira, P. Prats-iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek, and K. P. Papathanassiou, "SAR-Tutorial-March-2013," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 6–43, 2013.
- [7] M. Sensat Nogués, *Formación de imágenes radar de apertura sintética (SAR) de precisión mediante técnicas de retroproyección*. Tesis de maestría en ingeniería de telecomunicaciones, Escuela Técnica Superior de Ingeniería en Telecomunicaciones de Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya, 2015.
- [8] "El SAOCOM 1B cumplió un año en el espacio." <https://www.argentina.gob.ar/noticias/el-saocom-1b-cumplio-un-ano-en-el-espacio-0>. (Accessed on 11/30/2022).
- [9] "SIASGE." <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/misiones-espaciales/siasge>. (Accessed on 12/05/2022).



- [10] CONAE, “Catálogo SAOCOM, SAOCOM-1 Level 1 Products Format.” [https://catalogos.conae.gov.ar/catalogo/docs/SAOCOM/SAOCOM-1\\_SAR\\_Level-1\\_Product-Format\\_13Jan2020.pdf](https://catalogos.conae.gov.ar/catalogo/docs/SAOCOM/SAOCOM-1_SAR_Level-1_Product-Format_13Jan2020.pdf), 2020.
- [11] J. Euillades, Y. Roa, L. Euillades, P. Euillades, P. Rosell, A. Solarte, and S. Perna, “Interferometric Assessment of SAOCOM-1 TOPSAR Data.” Enviado para revisión a la *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*.
- [12] A. Ferretti, A. Monti-Guarnieri, C. Prati, F. Rocca, and D. Massonnet, “InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation,” tech. rep., 2007.
- [13] R. Burgmann, P. A. Rosen, and E. J. Fielding, “Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth’s surface topography and its deformation,” *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 28, pp. 169–209, may 2000.
- [14] D. Massonnet and K. L. Feigl, “Radar interferometry and its application to changes in the Earth’s surface,” *Reviews of Geophysics*, vol. 36, pp. 441–500, nov 1998.
- [15] H. A. Zebker and R. M. Goldstein, “Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 91, no. B5, p. 4993, 1986.
- [16] A. K. Gabriel, R. M. Goldstein, and H. A. Zebker, “Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, pp. 9183–9191, jul 1989.
- [17] N. B. Bechor and H. A. Zebker, “Measuring two-dimensional movements using a single InSAR pair,” *Geophysical Research Letters*, vol. 33, aug 2006.
- [18] M. Simons and P. A. Rosen, “Interferometric Synthetic Aperture Radar Geodesy,” in *Treatise on Geophysics*, vol. 3, pp. 391–446, Elsevier, jan 2007.
- [19] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, “A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, pp. 2375–2383, nov 2002.
- [20] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, “Permanent scatterers in SAR interferometry,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, pp. 8–20, jan 2001.
- [21] A. Pepe and F. Calò, “A Review of Interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth’s Surface Displacements,” *Applied Sciences*, vol. 7, p. 1264, dec 2017.
- [22] M. Métois, M. Benjelloun, C. Lasserre, R. I. Grandin, L. Barrier, E. Dushi, and R. Koçi, “Subsidence associated with oil extraction, measured from time series analysis of Sentinel-1 data: Case study of the Patos-Marinza oil field, Albania,” *Solid Earth*, vol. 11, pp. 363–378, mar 2020.
- [23] M. Battaglia, J. Alpala, R. Alpala, M. Angarita, D. Arcos, L. Euillades, P. Euillades, C. Muller, and L. Narváez, “Monitoring Volcanic Deformation,” in *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier, jan 2019.
- [24] L. D. Euillades, P. A. Euillades, N. C. Riveros, M. H. Masiokas, L. Ruiz, P. Pitte, S. Elefante, F. Casu, and S. Balbarani, “Detection of glaciers displacement time-series using SAR,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 184, pp. 188–198, oct 2016.

- [25] INVAP, “La misión SAOCOM.” <http://saocom.invap.com.ar/wp-content/uploads/2020/08/Dossier-SAOCOM-1B-1.pdf>, 2020.
- [26] “SAOCOM 1 Acquisition Plans.” <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/planes-de-adquisiciones-saocom-1-descargas-0>, 2022.
- [27] F. De Zan and A. Monti Guarnieri, “TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, pp. 2352–2360, sep 2006.
- [28] A. Meta, J. Mittermayer, P. Prats, R. Scheiber, and U. Steinbrecher, “TOPS imaging with TerraSAR-X: Mode design and performance analysis,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, pp. 759–769, feb 2010.
- [29] N. Yague-Martinez, P. Prats-Iraola, F. R. Gonzalez, R. Brcic, R. Shau, D. Geudtner, M. Eineder, and R. Bamler, “Interferometric Processing of Sentinel-1 TOPS Data,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 54, pp. 2220–2234, apr 2016.
- [30] N. Miranda, “Definition of the TOPS SLC deramping function for products generated by the S-1 IPF,” tech. rep., European Space Agency, 2015.
- [31] Y. Roa, P. Rosell, A. Solarte, L. Euillades, F. Carballo, S. García, and P. Euillades, “First assessment of the interferometric capabilities of SAOCOM-1A: New results over the Domuyo Volcano, Neuquén Argentina,” *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 106, p. 102882, mar 2021.
- [32] S. A. Seppi, C. López-Martinez, and M. J. Joseau, “Assessment of L-Band SAOCOM InSAR Coherence and Its Comparison with C-Band : A Case Study over Managed Forests in Argentina,” 2022.
- [33] S. Teverovsky, R. Solorza, and C. Notarnicola, “Estimación del Equivalente en Agua de Nieve en base a técnicas de Interferometría Diferencial y datos de la constelación SAOCOM,” no. September, 2022.
- [34] I. G. Cumming and F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*. Artech House, 2004.
- [35] T. Alejandro Iván, *Detección y Estimación de Velocidad de Blancos Móviles Utilizando Técnicas GMTI en Imágenes SAR*. Tesis de maestría, Instituto de Altos Estudios Espaciales "Mario Gulich", Universidad Nacional de Córdoba, 2019.
- [36] D. E. M. Nievas, *Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Electrónico*. Tesis de ingeniería civil electrónica, Universidad Católica de Valparaíso, 2018.
- [37] P. A. Euillades, *Desarrollo de algoritmo de construcción y corrección de modelos digitales de elevación mediante interferometría de imágenes de radar*. Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, 2004.
- [38] J. C. Curlander and R. N. McDonough, *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*. Wiley, 1991.
- [39] C. Wu, K. Liu, and M. Y. Jin, “Modeling and a correlation algorithm for spaceborne sar signals,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-18, pp. 563–575, 1982.

- [40] C. Chang, M. Y. Jin, and J. C. Curlander, "Sar processing based on the exact two-dimensional transfer function," *IGARSS '92 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol. 1, pp. 355–359, 1992.
- [41] R. Raney, H. Runge, R. Bamler, I. Cumming, and F. Wong, "Precision sar processing using chirp scaling," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, no. 4, pp. 786–799, 1994.
- [42] A. Moreira, J. Mittermayer, and R. Scheiber, "Extended chirp scaling algorithm for air- and spaceborne sar data processing in stripmap and scansar imaging modes," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, no. 5, pp. 1123–1136, 1996.
- [43] C. Cafforio, C. Prati, and F. Rocca, "Sar data focusing using seismic migration techniques," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 194–207, 1991.
- [44] A. Reigber, A. Potsis, E. Alivizatos, N. Uzunoglu, and A. Moreira, "Wavenumber domain sar focusing with integrated motion compensation," in *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477)*, vol. 3, pp. 1465–1467, 2003.
- [45] A. Moreira, "An improved multi-look technique to produce sar imagery," in *IEEE International Conference on Radar*, pp. 57–63, 1990.
- [46] R. Solorza and M. Panozzo Zénere, "Introducción a las aplicaciones de Radar de Apertura Sintética (SAR). Material Teórico," mod. 3, Instituto de Altos Estudios Espaciales "Mario Gulich". Universidad Nacional de Córdoba, 2018.
- [47] "Características técnicas SAOCOM." <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/misiones-espaciales/saocom/caracteristicas-tecnicas>.
- [48] M. L. Vélez, *Análisis de la deformación asociada al comportamiento de sistemas volcánicos activos : volcán Copahue*. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires., 2011.
- [49] S. Seppi, *Uso de Interferometria Diferencial para monitorear deformaciones de terreno en la comuna de Corvara, Provincia de Bolzano, Italia*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Córdoba, 2016.
- [50] "Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR (GACOS)." <http://www.gacos.net/>. (Accessed on 12/12/2022).
- [51] E. Sansosti, P. Berardino, M. Manunta, F. Serafino, and G. Fornaro, "Geometrical SAR image registration," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, pp. 2861–2870, oct 2006.
- [52] R. Scheiber and A. Moreira, "Coregistration of interferometric sar images using spectral diversity," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, no. 5, pp. 2179–2191, 2000.
- [53] R. Scheiber and A. Moreira, "Coregistration of interferometric sar images using spectral diversity," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, no. 5, pp. 2179–2191, 2000.

- [54] N. Yague-Martinez, F. De Zan, and P. Prats-Iraola, “Coregistration of interferometric stacks of sentinel-1 tops data,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 14, no. 7, pp. 1002–1006, 2017.
- [55] R. Touzi, A. Lopes, J. Bruniquel, and P. Vachon, “Coherence estimation for SAR imagery,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, no. 1, pp. 135–149, 1999.
- [56] A. Pepe, P. Berardino, M. Bonano, L. Euillades, R. Lanari, and E. Sansosti, “Sbas-based satellite orbit correction for the generation of dinsar time-series: Application to radarsat-1 data,” *IEEE T. Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, pp. 5150–5165, 12 2011.

## Tablas

**Tabla A.1:** Lista de los 48 interferogramas calculados. Los ID. 1-17 corresponden a los interferogramas a los cuales se pudo aplicar la corrección por ESD. En los interferogramas ID. 18-48 no se pudo aplicar la corrección por ESD. Tomada y modificada de (11).

Id	Referencia-Secundaria [ddmmaaaa-ddmmaaaa]	$\Delta B_{\perp}$ [m]	$\Delta B_{temp}$ [días]	$\Delta Dopp$ [Hz]	Coherencia $\bar{x} \pm \sigma$
1	02032020-21052020	1792.13	80	-10.43	0.58±0.14
2	02032020-22062020	-63.79	112	-6.01	0.75±0.16
3	02032020-27072021	-393.74	512	28.42	0.54±0.15
4	14012020-29092021	-1183.27	624	-8.71	0.53±0.15
5	15022020-02032020	-312.76	16	6.93	0.79±0.16
6	15022020-21052020	1479.37	96	-3.50	0.62±0.15
7	15022020-22062020	-376.54	128	0.92	0.75±0.17
8	15022020-27072021	-706.50	528	35.35	0.50±0.14
9	21052020-22062020	-1855.91	32	4.42	0.63±0.15
10	22062020-27072021	-329.96	400	34.43	0.54±0.15
11	24072020-03012022	-58.76	528	-4.04	0.42±0.16
12	27112019-14012020	156.59	48	-13.66	0.70±0.16
13	27112019-29092021	-1026.68	672	-22.37	0.52±0.15
14	29122019-02032020	-1309.22	64	18.57	0.69±0.16
15	29122019-15022020	-996.47	48	11.64	0.71±0.16
16	29122019-21052020	482.91	144	8.14	0.67±0.16
17	29122019-22062020	-1373.01	176	12.56	0.62±0.15
18	02032020-28102020	1804.27	240	172.19	0.16±0.08
19	03012022-04022022	-401.16	32	-45.41	0.63±0.15
20	14012020-03012022	-1560.04	720	-105.06	0.28±0.11
21	14012020-04022022	-1961.19	752	-150.47	0.18±0.09
22	14012020-24072020	-1501.27	192	-101.02	0.26±0.11
23	14012020-29112020	-410.64	320	159.37	0.17±0.09
24	15022020-28102020	1491.51	256	179.12	0.16±0.08

25	15022020-29112020	826.11	288	-194.31	0.15±0.08
26	15122020-03012022	714.59	384	126.21	0.26±0.11
27	15122020-04022022	313.44	416	80.80	0.41±0.14
28	15122020-16012021	1695.29	32	-166.06	0.16±0.08
29	16012021-25062021	-1484.07	160	-74.64	0.43±0.13
30	16012021-28082021	-476.50	224	-164.33	0.17±0.08
31	21052020-28102020	12.14	160	182.62	0.15±0.08
32	21052020-29112020	-653.26	192	-190.81	0.15±0.08
33	22062020-28102020	1868.05	128	178.20	0.16±0.08
34	22062020-29112020	1202.65	160	-195.23	0.15±0.08
35	24072020-04022022	-459.92	560	-49.45	0.34±0.14
36	24072020-15122020	-773.36	144	-130.25	0.19±0.09
37	24072020-29092021	318.01	432	92.31	0.26±0.12
38	25062021-28082021	1007.57	64	-89.69	0.39±0.13
39	27112019-03012022	-1403.45	768	-118.72	0.25±0.11
40	27112019-04022022	-1804.60	800	-164.13	0.17±0.08
41	27112019-24072020	-1344.68	240	-114.68	0.22±0.10
42	27112019-29112020	-254.05	368	145.71	0.21±0.10
43	29092021-03012022	-376.77	96	-96.35	0.41±0.13
44	29092021-04022022	-777.93	128	-141.76	0.25±0.11
45	29112020-29092021	-772.62	304	-168.08	0.17±0.09
46	29122019-27072021	-1702.96	576	46.99	0.41±0.13
47	29122019-28102020	495.05	304	190.76	0.15±0.08
48	29122019-29112020	-170.36	336	-182.67	0.15±0.08

$\Delta B_{\perp}$ : diferencia en la línea de base perpendicular

$\Delta B_{temp}$ : diferencia en la línea de base temporal

$\Delta Dopp$ : diferencia de frecuencia Doppler

$\bar{x}$ : media de la coherencia

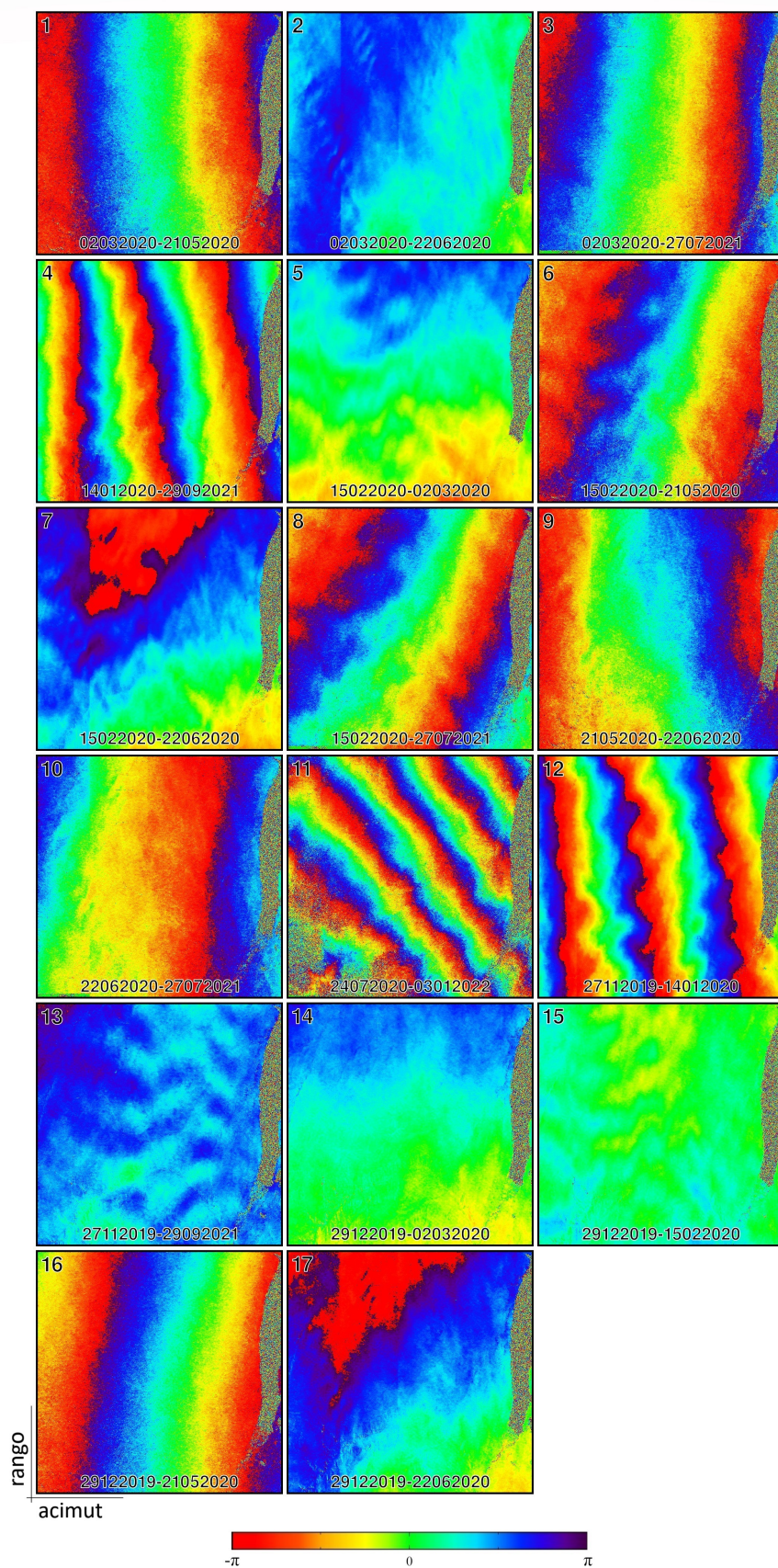
$\sigma$ : desviación estándar de la coherencia

## ANEXO B

---

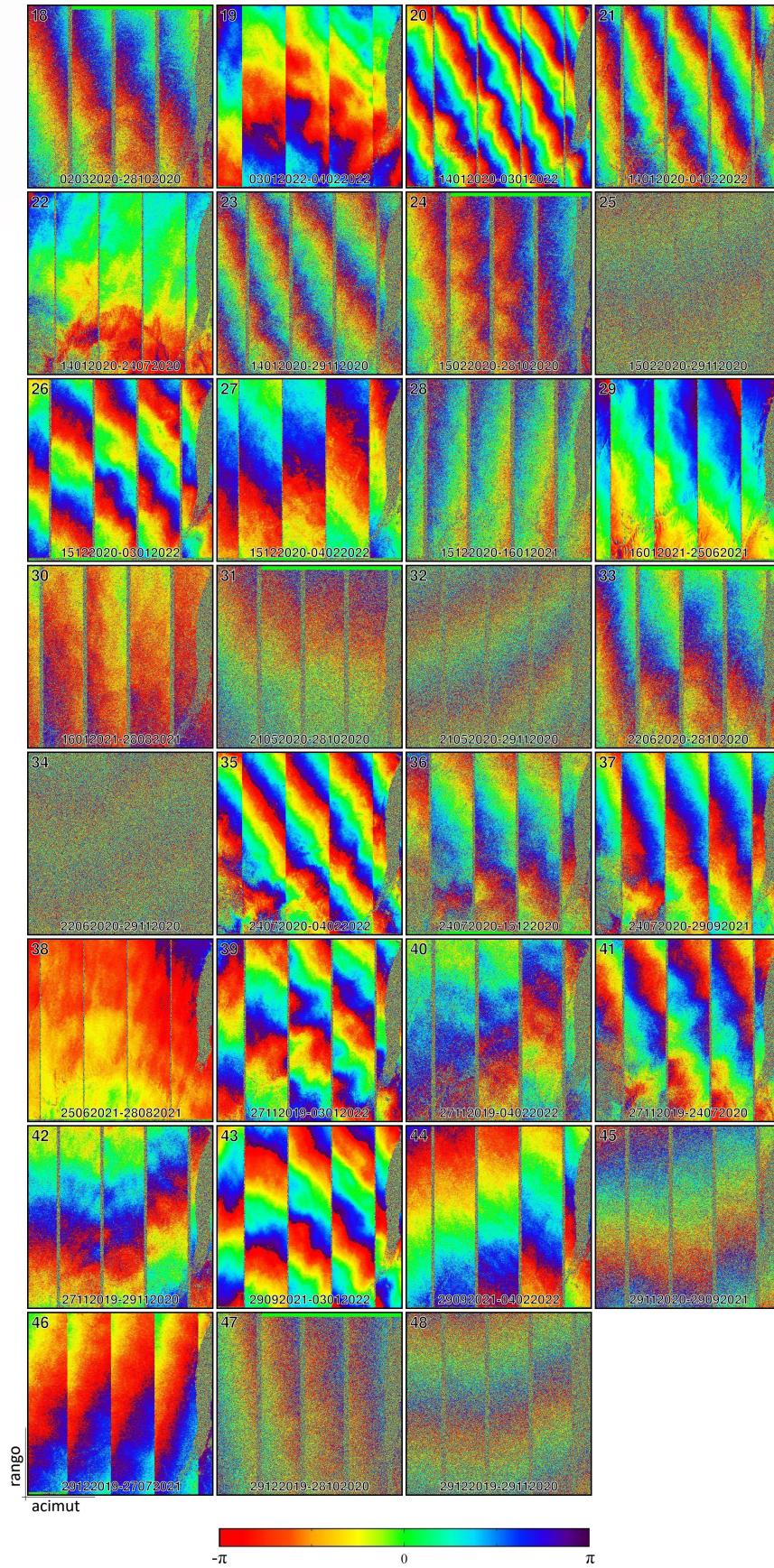
Figuras

---



**Figura B.1:** Interferogramas con corrección por ESD aplicada. Tomado y modificado de (11).





**Figura B.2:** Interferogramas a los que no se pudo aplicar la corrección por ESD. Tomado y modificado de (11).

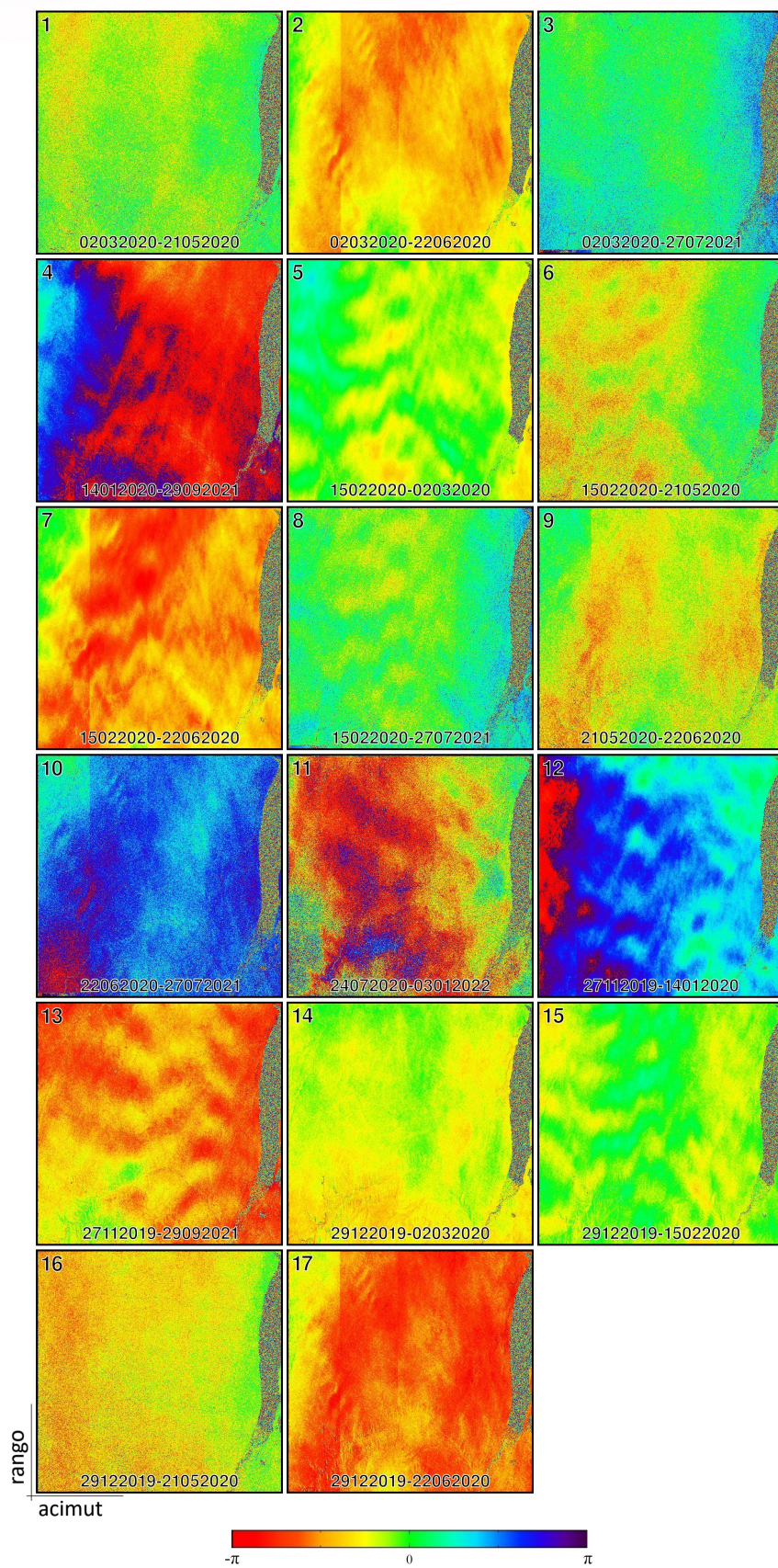


Figura B.3: Interferogramas de la Figura B.1 con la corrección orbital aplicada. Tomado y modificado de (11).

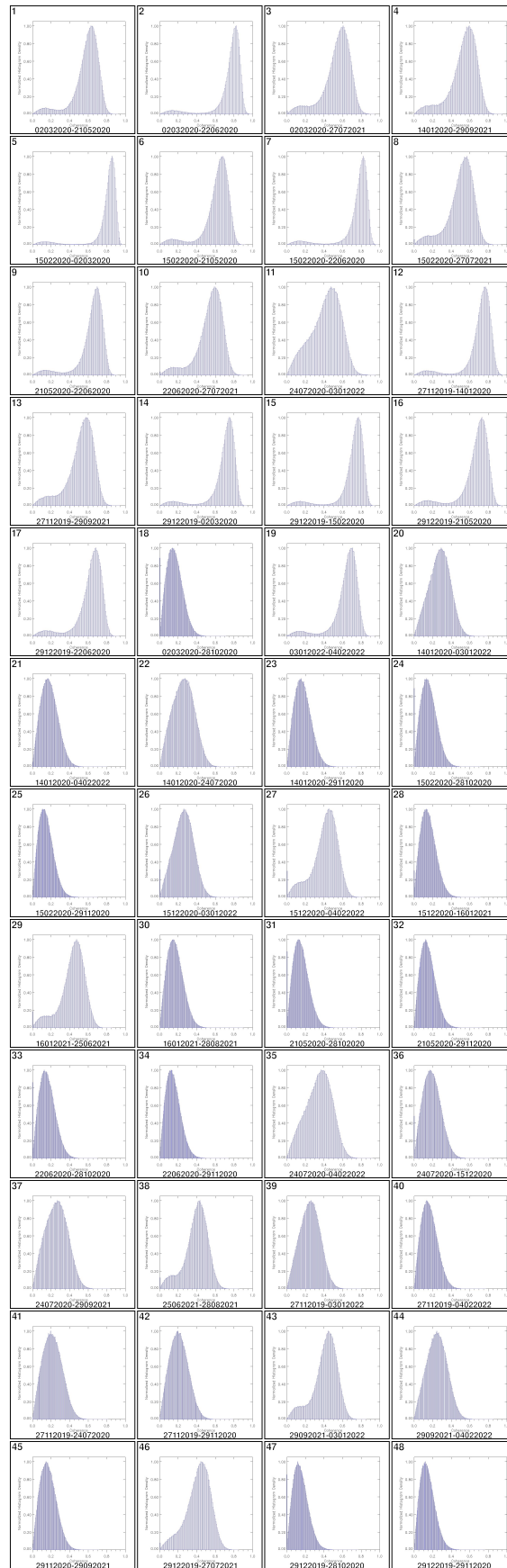


Figura B.4: Histogramas de coherencia de todos los interferogramas generados.