

# **“Evaluación de las capacidades interferométricas y polarimétricas de los datos adquiridos por el Instrumento Aerotransportado SARAT (banda-L)”**

Por **Yenni Lorena Belén Roa**

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

**MAGISTER EN APLICACIONES DE INFORMACIÓN ESPACIAL**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

*Septiembre, 2020*

©IG-CONAE año  
©FaMAF-UNC año

DIRECTOR

**Dr. Pablo Andrés Euillades**

Instituto CEDIAC, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina

CO-DIRECTOR

**Dra. Carolina Tauro**

Instituto de Altos Estudios Espaciales “Mario Gulich”, Córdoba, Argentina

ASESOR METODOLÓGICO:

**Dr. Stefano Perna**

Università degli Studi di Napoli "Parthenope", Dipartimento di Ingegneria & Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell’Ambiente del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IREA), Nápoles, Italia



Esta obra está bajo una licencia

<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

A mi madre, Alicia

*“Cualquier destino, por largo y complicado que sea, consta en realidad de un solo momento: el momento en que el hombre sabe para siempre quién es.”*

*Jorge Luis Borges*

---

## Agradecimientos Institucionales

---

Este trabajo de tesis se llevó a cabo en el marco de la Maestría en Aplicaciones de Información Espacial (MAIE) del Instituto de Altos Estudios Espaciales “Mario Gulich” (IG) en conjunto con la Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación de la Universidad Nacional de Córdoba (FAMAF). El trabajo se realizó bajo la dirección del Dr. Pablo Euillades y la co-dirección de la Dra. Carolina Tauro a quienes la autora agradece por el compromiso en el proceso de elaboración de la misma.

El procesamiento de los datos aquí utilizados se efectuaron en el Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell’Ambiente del Consiglio Nazionale delle Ricerche (IREA-CNR), Nápoles Italia en conjunto con los investigadores pertenecientes al equipo de aerotransportado dirigido por el Dr. Stefano Perna y compuesto por la Dra. Carmen Espósito, el Dr. Antonio Natale y el Dr. Paolo Berardino, a quienes se les agradece por su gran aporte en conocimientos, compromiso y entusiasmo para llevar adelante este trabajo.

La autora de esta tesis y sus directores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por la beca otorgada que hizo posible la realización de esta maestría y de este trabajo de tesis y al Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale of Italy, la Agencia Espacial Italiana (ASI) y al Instituto de Altos Estudios Espaciales “Mario Gulich” (IG) para realizar una estadía de investigación en IREA-CNR Nápoles, Italia.

Agradecen además tanto por el material del SAR AeroTransportado (SARAT) como por el soporte en el pre-procesamiento de los datos a Álvaro Soldano, coordinador del Equipo de Mediciones In Situ (EMIS) de la Misión SAOCOM, a Ezequiel De Luca, miembro del EMIS de la Misión SAOCOM, y a Mario Azcueta quien pertenecía a la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) al momento de realizar esta tesis.

---

## Agradecimientos

---

A mi familia, Alicia, Keka, Fer y los tíos por el apoyo incondicional, por el amor eterno, por la confianza, por estar presentes siempre.

A mis mascotas, que me llenan el alma.

A mis amigos de la MAIE, por el tiempo, el cariño, la amistad, las risas, los viajes, los bailes, los desayunos, por todo.

A los profesores de la MAIE y a los investigadores del Gulich por la dedicación y entusiasmo.

A Almen, por la tutora y la amiga, por la dedicación y el cariño.

A Sil, una persona a la que admiro profundamente, por su amistad.

A Anto por su paciencia, por su amabilidad, por confiar en mi plenamente. Por su apoyo, por enseñarme a crecer día a día.

A Fer, por los atardeceres, los consejos, por ser mi hermano Guatemalteco/Italiano.

A Sara, por ser mi familia 6 meses en Italia, mi hermana y amiga, por seguir siéndolo al regresar.

A mis amigos de La Plata, por tantos años de amistad, alegrías, por romper las barreras de la distancia.

A mi director Pablo, persona que admiro y respeto, por el apoyo, por ser mi guía y por la confianza.

A Stefano, por su grandeza y dedicación para enseñar cada detalle.

A todos ellos, gracias. Esto también en parte es de ustedes.

---

## Resumen

---

**Palabras clave: Sistema SARAT, SAR aerotransportado, Enfoque de datos SAR, Back Projection (BP), Interferometría, Polarimetría.**

En este trabajo de tesis, se presentan algunos resultados obtenidos a través del procesamiento de datos adquiridos por sistema argentino de banda L SARAT. SARAT es un sistema aerotransportado que se desarrolló como un primer paso conceptual hacia el diseño de la misión satelital argentina de banda L Satélite Argentino de Observación Con Microondas (SAOCOM)-1A. En particular, se muestran algunos estudios relevantes con el enfoque de los datos, como así también con respecto a las capacidades interferométricas y polarimétricas del sistema. El conjunto de datos aquí utilizado, el cual abarca un área ubicada en la provincia de Córdoba Argentina, fue proporcionado a través de un acuerdo con la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE).

---

## Abstract

---

**Keywords: SARAT system, Airborne SAR, SAR data focusing, Back Projection, Interferometry, Polarimetry**

In this thesis work, some results obtained through the processing of data acquired by the Argentinian L-band SARAT system are presented. SARAT is an airborne system that was developed as a first conceptual step toward the design of the Argentinian L- Band satellite mission SAOCOM-1A. In particular, some relevant studies to the data focusing, as well as with respect to the interferometric and polarimetric capabilities of the SARAT system are hereby shown. The considered dataset, relevant to an area located in the province of Cordoba, Argentina, has been provided by the National Commission of Space Activities of Argentina (in its Spanish acronym CONAE).

---

# Índice de Contenidos

---

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.0.1. Hipótesis . . . . .	3
1.0.2. Preguntas introductorias . . . . .	3
1.0.3. Objetivos . . . . .	3
1.0.3.1. Objetivo general . . . . .	3
1.0.3.2. Objetivos específicos . . . . .	3
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>4</b>
2.1. Antecedentes . . . . .	4
2.2. Fundamentos Radar de Apertura Sintética (SAR) . . . . .	4
2.2.1. Geometría de adquisición . . . . .	5
2.2.2. Formación de la matriz de datos Datos Crudos (RAW) . . . . .	6
2.2.3. Resolución geométrica . . . . .	8
2.2.3.1. Resolución en rango . . . . .	8
2.2.3.2. Resolución en acimut . . . . .	12
2.2.3.3. Variación Doppler . . . . .	15
2.2.4. Enfoque de imágenes SAR . . . . .	16
2.3. SAR aerotransportado . . . . .	19
2.4. Algoritmos de enfoque . . . . .	21

2.4.1.	Dominio de la frecuencia . . . . .	21
2.4.1.1.	Compensación de movimiento . . . . .	22
2.4.2.	Dominio del tiempo . . . . .	26
2.4.2.1.	Algoritmo Back Projection (BP) . . . . .	27
2.5.	Satélite vs aerotransportado . . . . .	28
2.6.	Interferometría SAR . . . . .	29
2.7.	Polarimetría SAR . . . . .	33
2.7.1.	Calibración de imágenes SAR . . . . .	34
2.7.1.1.	Algoritmo de Quegan . . . . .	35
2.7.2.	Descomposición de Pauli . . . . .	36
2.7.3.	Descomposición H-alpha . . . . .	38
<b>3.</b>	<b>Metodología</b>	<b>41</b>
3.1.	El proyecto SARAT . . . . .	41
3.1.1.	SET de Datos . . . . .	42
3.2.	Enfoque de imágenes SARAT . . . . .	44
3.3.	Inteferometría utilizando imágenes SARAT . . . . .	49
3.4.	Polarimetría . . . . .	52
3.4.1.	Calibración de imágenes SARAT . . . . .	52
3.4.2.	Implementación del algoritmo de Quegan . . . . .	53
<b>4.</b>	<b>Resultados</b>	<b>55</b>
4.1.	Focalización de los datos SARAT . . . . .	55
4.1.1.	Problemas relacionados con los datos SARAT . . . . .	58
4.2.	Interferometría . . . . .	64
4.3.	Polarimetría . . . . .	66
4.3.1.	Calibración de imágenes SARAT . . . . .	66
4.3.2.	Decomposición de Pauli y H-alpha . . . . .	71
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y Trabajos a Futuro</b>	<b>73</b>

---

## Índice de figuras

---

2.1. Modelo simplificado de la geometría de adquisición SAR. . . . .	6
2.2. Esquema de transmisión y recepción de un SAR. . . . .	7
2.3. Esquema de la matriz de datos RAW. . . . .	8
2.4. Figura relevante a la resolución en rango. . . . .	9
2.5. Diagrama en el cual se puede ver que pulsos angostos permiten distinguir ecos de obstáculos cercanos (naranja), mientras que pulsos anchos no permiten distinguirlos debido a la superposición de los mismos (violeta). . . . .	9
2.6. Forma de onda o chirp dado por la ecuación (2.2) en unidades arbitrarias, para $\alpha > 0$ . . . . .	10
2.7. Geometría sensor-blanco en el plano $(r, \vartheta)$ . . . . .	10
2.8. Superposición de las <i>función de dispersión de puntos</i> para dos blancos localizados en $r = r_1$ y $r = r_2$ . . . . .	12
2.9. Relevante a la resolución en acimut. . . . .	13
2.10. Concepto de apertura sintética. . . . .	14
2.11. Esquemización del efecto Doppler [1]. . . . .	16
2.12. Resumen de los pasos de procesamiento de SAR donde los datos comprimidos de rango resultan de una convolución de los datos sin procesar con la función de referencia de rango. En un segundo paso, la compresión en acimut se realiza a través de una convolución con la función de referencia en acimut, que cambia entre el rango cercano y el lejano. . . . .	17
2.13. Migración en celdas en rango. . . . .	18

2.14. Migración en celdas en rango. . . . .	18
2.15. Enfoque de datos RAW con corrección por RCM. . . . .	19
2.16. Geometría para SAR aerotransportado en presencia de desviaciones de la trayectoria . . . . .	20
2.17. Efectos debido al error rotacional. . . . .	23
2.18. Geometría SAR en presencia de errores de movimiento. . . . .	23
2.19. Proyección de la Line of Sight (LOS) del desplazamiento de la plataforma en y y z . . . . .	24
2.20. Diagrama de bloque del esquema de procesamiento en el dominio de las frecuencias para el caso satelital (izquierda) y para el caso aerotransportado (derecha). . . . .	26
2.21. Diagrama de bloque del esquema de procesamiento en el dominio de las frecuencias (derecha) y en el dominio del tiempo (izquierda) ambos para el caso aerotransportado. . . . .	27
2.22. Esquema de la variación ángulo de incidencia caso satelital versus aerotransportado. . . . .	28
2.23. Geometría en el plano ortogonal a la dirección de vuelo. . . . .	30
2.24. Procesamiento InSAR comenzando por enfocar el dato RAW utilizando técnicas estándares de enfoque. . . . .	31
2.25. Caso configuración biestática (izquierda) y configuración monoestática (derecha) ambas en un sistema de coordenadas según la convención BSA. . . . .	34
2.26. Interpretación física de las componentes de Pauli. a) $ S_{hh} + S_{vv} ^2$ (dispersión de superficie), b) $ S_{hh} - S_{vv} ^2$ (dispersión de doble rebote), c) $ S_{hv} ^2$ (dispersión de volumen) . . . . .	37
2.27. Representación esquemática de la interpretación del ángulo $\alpha$ . . . . .	39
2.28. Plano H-alpha plane y sus divisiones de acuerdo al mecanismo de dispersión. a) Z7-Z4-Z1: Entropía {baja, media, alta} dispersión de doble rebote, b) Z8-Z5-Z2: Entropía {baja, media, alta} dispersión de volumen, c) Z9-Z6-Z3: Entropía {baja, media, alta} dispersión de superficie. . . . .	40
3.1. Avión de la ARA. . . . .	42
3.2. Antena del sistema SARAT. . . . .	43
3.3. Sitio de estudio, Córdoba Argentina. El rectángulo rojo muestra un CR ubicado en el área de estudio. . . . .	44
3.4. Diagrama de bloque sintetizando el procesamiento general. . . . .	45

3.5. Dato RAW relevante al track 19, polarización hh. . . . .	46
3.6. Lectura del dato RAW a comprimir, parámetros del sensor y de procesamiento.	47
3.7. Remoción de la componente continua, cálculo de la DFT y compresión en rango. . . . .	48
3.8. DEM STRM de 30 mts de la zona de estudio en geometría SAR. . . . .	48
3.9. Procesamiento InSAR comenzando por enfocar el dato RAW utilizando técnicas en el dominio del tiempo. . . . .	49
3.10. Patrones de antena estimados para los diferentes canales del sistema SARAT.	53
3.11. Variación de los parámetros $u, v, w, z$ y $\alpha$ con el rango. . . . .	54
4.1. Dato RAW adquirido en Marzo de 2010 por el SARAT, relevante al track 19 y para cada canal de polarización. . . . .	56
4.2. Dato comprimido en rango adquirido en Marzo de 2010 por el SARAT, relevante al track 19 y para cada canal de polarización. . . . .	56
4.3. Imagen SLC-19 hv resultado del enfoque utilizando el algoritmo BP. . . . .	57
4.4. Imagen SLC-19 vh resultado del enfoque utilizando el algoritmo BP. . . . .	57
4.5. Imagen SLC-19 hh resultado del enfoque utilizando el algoritmo BP. . . . .	57
4.6. Imagen SLC-19 vv resultado del enfoque utilizando el algoritmo BP. . . . .	58
4.7. Panel superior: imagen SLC (polarización hh) relevante al track 19 - Panel inferior: imagen SLC (polarización hh) relevante al track 29. . . . .	59
4.8. Efecto de ensanchamiento de la <i>función de dispersión de puntos</i> relevante al track 19 polarización hh. . . . .	60
4.9. Independencia de la polarización en el efecto de ensanchamiento de la <i>función de dispersión de puntos</i> . . . . .	60
4.10. Imagen SLC-19 hh resultado del enfoque utilizando el algoritmo BP. . . . .	61
4.11. Imagen SLC-29 hh resultado del enfoque utilizando el algoritmo BP. . . . .	62
4.12. Imagen SLC-33 hh resultado del enfoque utilizando el algoritmo BP. . . . .	62
4.13. Imagen SLC-50 hh resultado del enfoque utilizando el algoritmo BP. . . . .	62
4.14. Imagen SLC-53 hh resultado del enfoque utilizando el algoritmo BP. . . . .	63
4.15. Imagen SLC-43 hh resultado del enfoque utilizando el algoritmo BP. . . . .	63
4.16. Imagen SLC de amplitud, imagen de coherencia y el interferograma resultante entre el par 19-33. . . . .	64

4.17. Imágenes SLC de amplitud (polarización hh) relevante al track 19 (panel central), track 22 (panel de la izquierda) antes y después (panel de la derecha) de aplicar algoritmo de co-registración. . . . .	65
4.18. Imagen SLC de amplitud, imagen de coherencia (antes de la co-registración la decorrelación fue total) y el interferograma resultante entre el par 19-22. .	65
4.19. Fase del coeficiente de correlación co-pol del dato SARAT sin calibrar relevante al track 19. . . . .	66
4.20. Diferencia de fase del coeficiente de correlación entre CONAE (círculo rojo) y el CR (círculo negro) situado en el área de estudio. . . . .	67
4.21. Ratio entre $O_{hv}$ y $Ovh$ . . . . .	67
4.22. Intensidad de los 4 canales polarimétricos (no calibrados) vs. rango para una adquisición del SARAT. . . . .	68
4.23. Imágenes SLC relevantes al track 19 en los canales $hh$ , $hv$ y $vv$ antes (izquierda) y después (derecha) de ser compensadas por el patrón de antena. . . . .	69
4.24. Fase del coeficiente de correlación co-pol del dato SARAT calibrado relevante al track 19. . . . .	70
4.25. Diferencia de fase del coeficiente de correlación entre CONAE (círculo rojo) y el CR (círculo negro) situado en el área de estudio. . . . .	70
4.26. Composición de Pauli utilizando las imágenes calibradas relevantes al track 19. . . . .	71
4.27. Composición de Pauli utilizando las imágenes no calibradas relevantes al track 19. . . . .	72
4.28. Composición H-alpha utilizando las imágenes no calibradas relevantes al track 19. . . . .	72

---

## Índice de tablas

---

2.1. Evolución en desarrollos de los sistemas SAR. . . . .	5
2.2. Sensores aerotransportados. . . . .	21
3.1. Características del sistema SARAT. . . . .	42
3.2. Tracks provistos por CONAE. . . . .	43
3.3. Parámetros del sensor. . . . .	45
4.1. Configuración principal del procesamiento para las imágenes del SARAT consideradas. . . . .	55

---

## Acrónimos

---

**MAIE** Maestría en Aplicaciones de Información Espacial

**IG** Instituto de Altos Estudios Espaciales “Mario Gulich”

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

**FAMAF** Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación de la Universidad Nacional de Córdoba

**CONAE** Comisión Nacional de Actividades Espaciales

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

**ASI** Agencia Espacial Italiana

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

**CETT** Centro Espacial Teófilo Tabanera

**EMIS** Equipo de Mediciones In Situ

**SAR** Radar de Apertura Sintética

**SARAT** SAR AeroTransportado

**SLAR** Radar Aerotransportado de Visión Lateral

**SLC** Single-look Complex

**RAW** Datos Crudos

**PRF** Frecuencia de Repetición de Pulso

**PRT** Tiempo de Repetición de Pulso

**SWT** Sampling Window Time

**BP** Back Projection

**RD** Range Doppler

**CS** Chirp-Scaling

**DFT** Transformada Discreta de Fourier

**FFT** Transformada Rápida de Fourier

**INS** Sistemas de Navegación Inercial

**IMU** Unidad de Medición Inercial

**GPS** Sistemas de Posicionamiento Global

**RDM** Método de Desplazamiento de Reflectividad

**LOS** Line of Sight

**MoCo** Compensación de Movimiento

**CBA** Center-Beam Approximation

**DEM** Modelo Digital de Elevación

**InSAR** Interferometría SAR

**DInSAR** Interferometría Diferencial SAR

**PolSAR** Polarimetría SAR

**SAOCOM** Satélite Argentino de Observación Con Microondas

**FFBP** Fast-Factorized Backprojection

**RCM** Migración de Celdas en Rango

**ECS** Extended Chirp-Scaling

**ECS&M** Extended Chirp-Scaling and Mosaicking

**TDBP** Time-Domain Back-Projection

**PhU** Phase Unwrapping

**CR** Corner Reflector

**ARD** Raw Data Annotated

**BIP** Banda Intercalada por Píxel

**ARA** La Armada de la República Argentina

**IDL** Interactive Data Language

**IDFT** transformada inversa de Fourier discreta

**DC** Componente Continua

# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

---

El sistema Radar de Apertura Sintética (SAR) es un sensor de microondas activo que representa una herramienta estándar para la observación de la Tierra [2]. El modo de funcionamiento activo hace que los sensores SAR sean independientes de las fuentes de radiación externas (por ejemplo, la luz solar), lo que garantiza su capacidad de monitoreo diurno y nocturno. Además, el uso de frecuencias de trabajo pertenecientes a las bandas de microondas reduce el impacto de las nubes, la niebla y la lluvia en la propagación de las señales transmitidas y recibidas, lo que permite que los sistemas SAR puedan operar en todas las condiciones climáticas.

Los sistemas SAR pueden estar montados a bordo de diferentes plataformas móviles, como satélites [3] (SAR espacial), aviones [4], [5], helicópteros [6] y drones [7] (SAR aerotransportado), o también a bordo de vehículos y plataformas terrestres [8] (SAR terrestre).

En particular, los sistemas SAR espaciales permiten la cobertura de amplias áreas, lo que permite un monitoreo casi global de la superficie de la Tierra. Sin embargo, los sensores SAR aerotransportados garantizan una flexibilidad operativa mucho mayor con respecto a los espaciales. De hecho, los sensores SAR aerotransportados pueden acortar el tiempo de revisita, permiten un monitoreo rápido del área de interés y, a diferencia de los sistemas espaciales, pueden volar prácticamente en cualquier dirección. Debido a estas características, los sistemas SAR aerotransportados representan una solución de monitoreo muy atractiva para eventos de crisis (terremotos, deslizamientos de tierra, etc.). Sin embargo, las adquisiciones desde los mismos generalmente se ven afectadas por errores de movimiento, es decir, variaciones de actitud y desviaciones de trayectoria, inducidas en la plataforma por turbulencias atmosféricas.

Generalmente, para obtener imágenes Single-look Complex (SLC) de buena calidad, utilizando datos adquiridos con SAR aerotransportado, se requiere la implementación de algoritmos de enfoque integrados con procedimientos de Compensación de Movimiento (MoCo). Dichos procedimientos tienen como objetivo compensar las aberraciones que se producen en las señales de radar inducidas por las desviaciones de la trayectoria y las variaciones en la actitud debido al movimiento de la aeronave. La aplicación de algoritmos con compensación de movimiento requieren estrictamente el conocimiento tanto de información de vuelo como

del perfil topográfico del área iluminada. El perfil topográfico generalmente es proporcionado por un Modelo Digital de Elevación (DEM) externo de la escena iluminada, mientras que los parámetros de vuelo son generalmente medidos a bordo utilizando Sistemas de Navegación Inercial (INS) y Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) [9].

La aplicación de algoritmos de enfoque SAR, con compensación de movimiento, pueden llevarse a cabo en el dominio de las frecuencias [10], [11]. Esto permite preservar la alta eficiencia computacional de los algoritmos de enfoque estándares [12] pero, al mismo tiempo, requiere el uso de algunas aproximaciones [13] cuya aplicabilidad, de todos modos, se limita a errores de movimiento suaves.

Para obtener resultados de enfoque precisos, incluso cuando se obtienen datos de radar provenientes de trayectorias altamente no lineales, los procedimientos de enfoque SAR pueden ser implementados en el dominio del tiempo [14], [15]. Estos procedimientos no se basan en aproximaciones, preservando así la calidad de las imágenes SLC, lo cual es de interés clave para la mayoría de las aplicaciones SAR.

En este sentido, en las últimas décadas, varias técnicas basadas en datos SAR enfocados se han desarrollado y utilizado en muchas aplicaciones para fines de observación y vigilancia de la Tierra. En particular, la Interferometría SAR (InSAR) y la Interferometría Diferencial SAR (DInSAR) representan técnicas bien establecidas en geodesia y teledetección. Estos métodos aprovechan la diferencia de fase entre dos o más imágenes SAR adquiridas bajo condiciones similares y obtenidas desde dos puntos de vista levemente distintos, para generar DEM o mapas de deformación de la superficie. La técnica potencialmente puede medir desplazamientos de la corteza terrestre debidos a terremotos, vulcanismo, minería, etc. con precisión sub-centimétrica [16]. Esta técnica se ha utilizado, por ejemplo, para caracterizar procesos de deformación en el Volcán Copahue [17] y el campo de deformación asociado a la erupción de 2011 del Cordón Caulle [18]. Otras aplicaciones de estas técnicas incluyen la medición de flujo de hielo en glaciares [19], terremotos como el de Sichuan (China) de 2008 [20] o el de L'Aquila (Italia) en 2009 [21], etc.

La Polarimetría SAR (PolSAR) es una técnica ampliamente utilizada que permite combinar la información presente en imágenes SLC relevante a los datos adquiridos en diferentes polarizaciones, permitiendo construir un potente espacio de información sensible a las propiedades geométricas (por ejemplo la forma) y físicas (por ejemplo la permitividad) de los blancos [22]. La explotación de los datos de PolSAR permite extraer parámetros biofísicos y geofísicos, como la humedad del suelo, la rugosidad de la superficie [23] y la biomasa [24].

Las técnicas InSAR y PolSAR pueden ser implementadas explotando datos SAR en diferentes frecuencias. En este sentido, en los últimos años, las agencias e instituciones espaciales mundiales muestran un interés creciente por los sistemas SAR que operan en las bandas inferiores (P y L) debido a que poseen ciertas ventajas como las profundidades de penetración más grandes o los tiempos de decorrelación más largos [25], con respecto a las más altas (bandas C y X). Este interés es evidente con la gran cantidad de misiones SAR en el espacio que trabajan en banda L, entre las que podemos mencionar: los sistemas operativos ALOS2 [26] de la Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) y SAOCOM 1-A [27] de la CONAE, así como el próximo SAOCOM 1-B (CONAE), TANDEM-L [28] del German Aerospace Center (DLR) y NISAR [29], proyecto conjunto entre la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y la Indian Space Research Organisation (ISRO).

Del mismo modo, en los últimos años se han desarrollado varios sistemas SAR aerotransportado en banda L, como por ejemplo UAVSAR [30], F-SAR [31] y SARAT de CONAE. En aerotransportados, el sistema SARAT se desarrolló como un banco de pruebas para dise-

ñar y validar diferentes aplicaciones polarimétricas e interferométricas en banda L, antes del lanzamiento de SAOCOM-1A [32].

### 1.0.1. Hipótesis

Como hipótesis se plantea que las técnicas aquí propuestas (interferometría y polarimetría) se aplican con éxito a datos SAR adquiridos por sistemas aerotransportados, realizando adecuadamente compensación de movimiento de la plataforma en la etapa de enfoque de los datos (y eventualmente estimando y compensando errores de movimiento residuales no despreciables)

### 1.0.2. Preguntas introductorias

- ¿Cuáles son los requerimientos necesarios para realizar un enfoque adecuado de datos SAR aerotransportado?
- ¿Poseen las imágenes SAR adquiridas por el sistema SARAT las características adecuadas que permitan obtener productos interferométricos útiles?
- ¿Es necesario calibrar las imágenes adquiridas por el SARAT con el propósito de aplicar técnicas polarimétricas?

### 1.0.3. Objetivos

#### 1.0.3.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo de tesis es adaptar un software específico, que realiza el enfoque de datos SAR aerotransportado, a un conjunto de datos adquiridos por la misión SARAT. Una vez realizado el enfoque se evaluará el potencial del set de datos para obtener productos interferométricos y polarimétricos que puedan ser de utilidad en la construcción de productos derivados de los mismos, tales como Modelos Digitales de Elevación o mapas de humedad, entre otras.

#### 1.0.3.2. Objetivos específicos

Con el propósito de cumplir el objetivo general se plantea cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Implementar y/o adaptar software existente para realizar la ingesta de las imágenes SARAT y sus metadatos.
- Enfocar las imágenes SARAT y procesarlas de manera tal que resulten útiles para aplicaciones interferométricas.
- Evaluar la necesidad de calibrar las imágenes de SARAT enfocadas para aplicar técnicas polarimétricas.

### 2.1. Antecedentes

Numerosos trabajos se han llevado a cabo utilizando datos provenientes de SAR aerotransportado. En el caso particular de los datos SARAT, Notarnicola et al. estudiaron en [33] la posibilidad de aplicar un enfoque Bayesiano para estimar valores iniciales de humedad de suelo utilizando coeficientes de retro-dispersión a partir de datos SAR. Presentaron dos casos de estudio correspondientes a campos agrícolas, en los cuales se adquirieron imágenes SAR aerotransportado. El primer caso de estudio corresponde a adquisiciones del SARAT.

Por otro lado Guccione et al. presentaron en [34] un algoritmo con compensación de movimiento para enfocar datos SAR de alta resolución provenientes de sensores aerotransportados. El algoritmo fue testeado utilizando datos simulados y datos reales provenientes de SARAT.

Rava et al. realizaron una evaluación del desempeño de dos sistemas SAR aerotransportados sobre suelos agrícolas utilizando dos modelos electromagnéticos en [35]. Para ello estimaron el coeficiente de retro-dispersión utilizando datos SAR del sistema SARAT y del sistema UAVSAR.

Pablo Perna et al. presentaron en [36] un simulador de datos crudos para SAR aerotransportado, utilizando un enfoque en el dominio del tiempo. El simulador se realizó para respaldar el monitoreo del rendimiento de SARAT y de la misión SAOCOM.

### 2.2. Fundamentos SAR

Un Radar de Apertura Sintética (SAR) opera de forma similar a un radar convencional, las ondas electromagnéticas se transmiten secuencialmente y la antena del radar recoge los ecos retrodispersados. Midiendo con precisión la diferencia de tiempo entre el pulso transmitido y la recepción de la energía reflejada, el radar puede determinar la distancia del objeto reflectante.

Un sistema SAR es un sensor activo que opera en la región de microondas del espectro electromagnético. Una de las principales ventajas de este tipo de sensores es que operan independientemente de fuentes externas (por ejemplo la luz del Sol) permitiendo un monitoreo continuo de la superficie terrestre [12].

Por otra parte, la banda de frecuencia de trabajo de los sistemas SAR permite una reducción drástica del impacto de nubes, niebla y lluvia en la señal. Es decir, estos sistemas tienen la capacidad de operar día y noche y en cualquier condición climática [12].

El descubrimiento y los desarrollos iniciales de los sistemas SAR se remonta a los años 50 y 60, los cuales estuvieron dominados por la investigación militar. En los años 70 y 80 se desarrollaron varios sistemas aerotransportados para aplicaciones civiles con el objetivo final de recuperar parámetros geobiofísicos de la superficie de la Tierra. La Tabla 2.1 fue tomada de [37] y se muestra la evolución en desarrollos de los sistemas SAR a lo largo del tiempo.

Sensor	Operativo	Frecuencia (Polarización)	Institución, País
Seasat	1978	L (HH)	NASA/JPL, USA
ERS1/2	1991-2000/ 1995-2011	C (VV)	ESA, Europa
J-ERS-1	1992-1998	L (HH)	JAXA, Japón
SIR-C/X-SAR	Abril-Octubre 1994	L & C (quad) X (VV)	NASA/JPL, USA DLR, Alemania ASI, Italia
Radarsat-1	1995-actualidad	C (HH)	CSA, Canada NASA/JPL, USA
SRTM	Febrero 2000	C (HH+VV) y X (VV)	DLR, Germany ASI, Italia
ENVISAT/ASAR	2002-2012	C (dual)	ESA, Europa
ALOS/PalSAR	2006-2011	L (quad)	JAXA, Japón
TerraSAR-X/ TanDEM-X	2007-actualidad 2010-actualidad	X (quad)	DLR/Astrium, Germany
Radarsat-2	2007-actualidad	C (quad)	CSA, Canada
COSMO-SkyMED-1/4	2007...2010-actualidad	X (dual)	ASI/MiD, Italia
RISAT-1	2012-actualidad	C (quad)	ISRO, India
HJ-1C	2012-actualidad	S (VV)	CRESDA/CAST NRSCC, China
Kompsat-5	2013-actualidad	X (dual)	KARI, Corea
PAZ	2018-actualidad	X (quad)	CDTI, España
ALOS-2	2014-actualidad	L (quad)	JAXA, Japón
Sentinel-1a/1b	2014-actualidad 2016-actualidad	C (dual)	ESA, Europa
Constelación radarsat-1/2/3	2019-actualidad	C (quad)	CSA, Canada
SAOCOM-1A/B	2018-actualidad /lanzamiento previsto para marzo-abril de 2020	L (quad)	CONAE, Argentina

**Tabla 2.1:** Evolución en desarrollos de los sistemas SAR.

### 2.2.1. Geometría de adquisición

En un sistema SAR las ondas son enviadas en forma perpendicular a la dirección de vuelo del satélite y con un ángulo de visión distinto de cero a partir del nadir (intersección entre la superficie terrestre y la normal a ella que pasa por el satélite). Es decir, un sistema SAR tiene una geometría de vista lateral con respecto a la trayectoria de vuelo evitando así las ambigüedades provocadas por el arribo simultáneo de dos ecos correspondientes a distintos blancos.

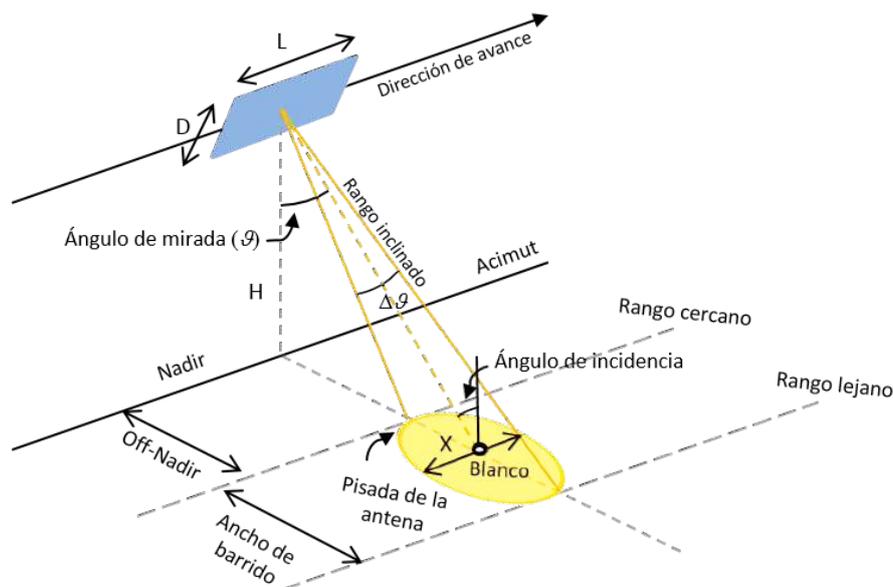
La Figura 2.1 muestra un modelo simplificado de la geometría de adquisición SAR, donde el *blanco* es un punto hipotético sobre la superficie terrestre donde el sistema SAR está iluminando. La dirección de avance del satélite es también llamada dirección de *acimut* y para el caso de satélites se la puede considerar rectilínea.

La dirección de observación se denomina *rango inclinado*, en general por simplicidad *rango* y determina la distancia existente entre el sensor y el blanco. La distancia más cercana y más lejana, respecto del sensor, a la que se encuentran los blancos iluminados se denominan *rango cercano* y *rango lejano* respectivamente. La distancia entre estos últimos se denomina *ancho de barrido* y es la porción de suelo que barre el *footprint* a lo largo de la trayectoria de vuelo. El footprint o *pisada de la antena* representa la porción de suelo que es “iluminada” cada vez que el radar emite un pulso (el límite del footprint queda definido cuando la potencia del haz emitido decae 3 dB) [1].

Por otra parte, la proyección del rango inclinado sobre la superficie se denomina *rango en tierra*.

El *ángulo de incidencia* ( $\vartheta$ ) se define como el ángulo entre la normal a la superficie que pasa por el blanco y el rango inclinado, y es igual al *ángulo de visión*, siempre y cuando la superficie sea perfectamente plana. Notar que este ángulo se incrementa desde el rango cercano hacia el lejano [12].

Los rangos de frecuencia más usados por los sistemas SAR son: banda X (8-12 MHz), banda C (4-8 MHz) y banda L (1-2 MHz).



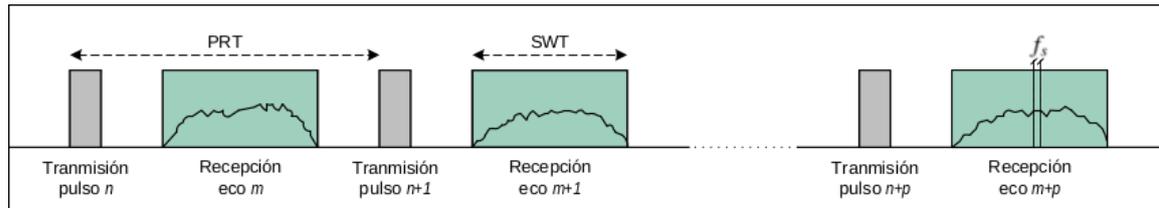
**Figura 2.1:** Modelo simplificado de la geometría de adquisición SAR.

### 2.2.2. Formación de la matriz de datos RAW

La matriz de Datos Crudos (RAW), la cual corresponde al dato sin ningún procesamiento previo, está conformada por la suma coherente de una inmensa cantidad de ecos correspondientes a distintos blancos retrodispersores distribuidos en la escena. El radar emite pulsos de microondas a la Tierra y registra los ecos recibidos de cada pulso. Mediante un dispositivo denominado *duplexer* se controla el sentido en el que viajan las ondas electromagnéticas, es decir si es entrante o saliente. Una vez que se emite una onda electromagnética, el duplexer se pone en modo escucha durante un período conocido como *ventana de recepción* (conoci-

da comúnmente, por sus siglas en inglés, como Sampling Window Time (SWT)), y durante el cual el eco del pulso recibido es digitalizado mediante un conversor A/D para luego ser guardado en memoria [1]. Esta ventana debe abrirse antes de la recepción del eco del rango cercano y cerrarse luego de la recepción del eco del rango lejano (ver Figura 2.2).

Una vez terminado el período de recepción se vuelve a transmitir un nuevo pulso. Este proceso se repite periódicamente a una frecuencia denominada Frecuencia de Repetición de Pulso (PRF) a lo largo de la trayectoria de vuelo. Se debe tener en cuenta que debido a la posición relativa antena-blanco diferentes objetos a lo largo de la pisada reflejan el pulso recibido a medida que el mismo los alcanza, con lo cual el eco recibido es una combinación de múltiples ecos provenientes de estos objetos [1].



**Figura 2.2:** Esquema de transmisión y recepción de un SAR [38].

Las muestras digitalizadas de cada eco recibido durante la apertura de la ventana SWT son guardados como una fila de la matriz de datos RAW. La separación entre líneas está dada por el Tiempo de Repetición de Pulso (PRT), el cual se determina mediante la inversa de la PRF.

Por otro lado cada columna de la matriz de datos RAW corresponde a cada eco, es decir el eco que resulta de cada pulso enviado y donde la separación entre las celdas de cada fila (es decir, separación inter-columna) está dada por la frecuencia de muestreo ( $f_s$ ) y el tiempo correspondiente resulta ser  $t_c = 1/f_s$ .

Es decir que la señal en rango llega de forma continua al radar y es digitalizada, pero en acimut llega de forma discreta debido a que transcurren PRT segundos entre que se abren dos ventanas de recepción contigua [39]. La Figura 2.3 muestra la organización de los datos en la matriz RAW de acuerdo a lo explicado anteriormente [40]. Donde  $v$  representa la velocidad de la plataforma y el rango puede ser computado comenzando por el *tiempo rápido* y el acimut comenzando por el *tiempo lento*. Estos términos hacen referencia a la diferencia en los órdenes de magnitud de los tiempos entre  $t_c (\approx \mu s)$  y  $PRT (\approx ms)$ .

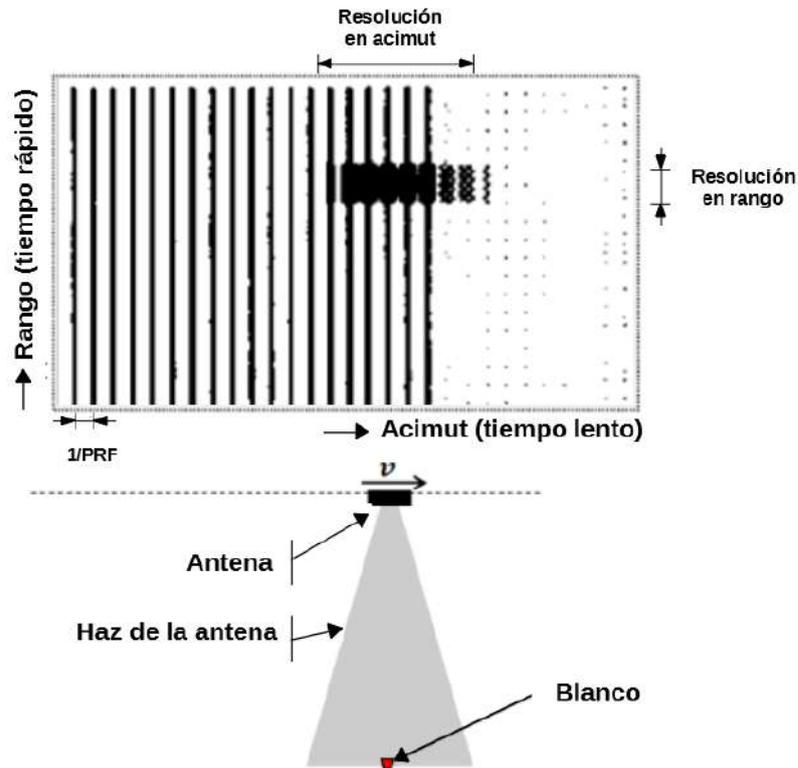


Figura 2.3: Esquema de la matriz de datos RAW (tomado de [40] y modificado).

### 2.2.3. Resolución geométrica

Se entiende por resolución a la capacidad de un sistema de localizar dos objetos cercanos. En otras palabras, resolución se refiere a la distancia mínima de separación a la que se deben encontrar dos objetos para ser resueltos como entidades separadas [12].

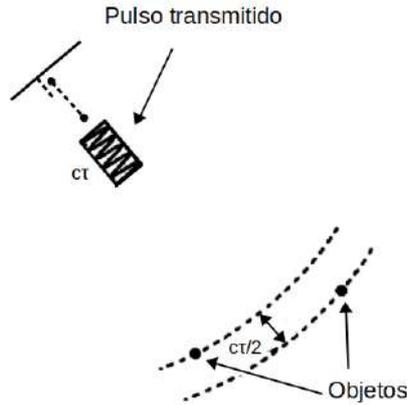
Los sistemas SAR se caracterizan por la resolución geométrica alcanzable y en particular, los datos SAR son bidimensionales (2D), por lo que la resolución geométrica se puede definir con respecto a dos direcciones: acimut y rango. Tanto la resolución en acimut como la resolución en rango de los Datos Crudos (RAW) se pueden mejorar mediante operaciones intensivas de procesamiento de datos, conocidas también como *enfoque* o *compresión del pulso* [9]. A continuación se explica en detalle el concepto de resolución en rango y en acimut y cómo se lleva a cabo la mejora de las mismas siguiendo lo desarrollado en el capítulo 1 de [12].

#### 2.2.3.1. Resolución en rango

La dirección en rango tiene en cuenta la distancia entre el blanco y el sensor, y la resolución depende del ancho de banda del pulso transmitido. Consideremos un sistema transmitiendo (en microondas) pulsos electromagnéticos con una duración  $\tau$ . La resolución en rango del dato RAW, la cual se denomina  $\Delta r_{raw}$  está dada por la ecuación (2.1).

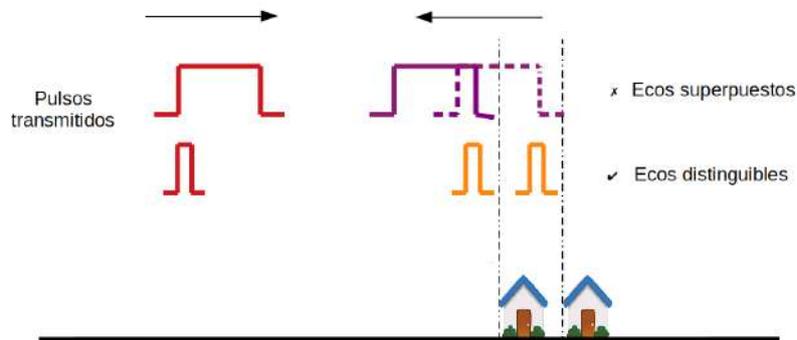
$$\Delta r_{raw} = \frac{c\tau}{2}, \quad (2.1)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz (ver Figura 2.6).



**Figura 2.4:** Figura relevante a la resolución en rango (tomado de [12] y modificado).

De la ecuación (2.6) podemos ver que para obtener una resolución en rango del orden de algunos metros se necesitan pulsos de muy corta duración ( $\tau \approx 10^{-8} - 10^{-7}$ s). Es decir, la capacidad de distinguir diferentes objetos en el suelo depende del ancho temporal del pulso enviado. Si el pulso es demasiado ancho, entonces los ecos de dos objetos próximos serán indistinguibles (ver Figura 2.5) [1]. Por lo tanto para mejorar la resolución es necesario una reducción del ancho del pulso  $\tau$  y un pico de alta potencia, lo cual no resulta sencillo desde el punto de vista de la electrónica necesaria a bordo del satélite.

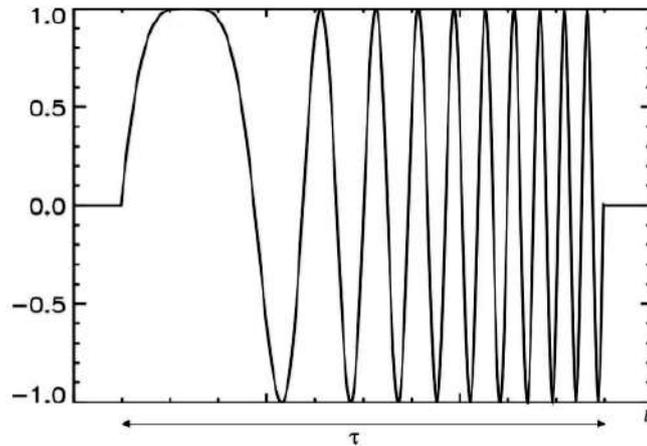


**Figura 2.5:** Diagrama en el cual se puede ver que pulsos angostos permiten distinguir ecos de obstáculos cercanos (naranja), mientras que pulsos anchos no permiten distinguirlos debido a la superposición de los mismos (violeta)(tomado de [1] y modificado).

Una forma de superar esta limitación es sustituir los pulsos cortos por pulsos de mayor duración modulados en frecuencia, seguido de un procesamiento conocido usualmente como *compresión de pulso*. En este contexto, el pulso usualmente transmitido por un sistema SAR es un *chirp* cuya expresión está dada por la ecuación (2.2) y en su forma compleja (2.3).

$$f_1(t) = \cos \left( \omega t + \frac{\alpha t^2}{2} \right) \text{rect} \left[ \frac{t}{\tau} \right], \quad (2.2)$$

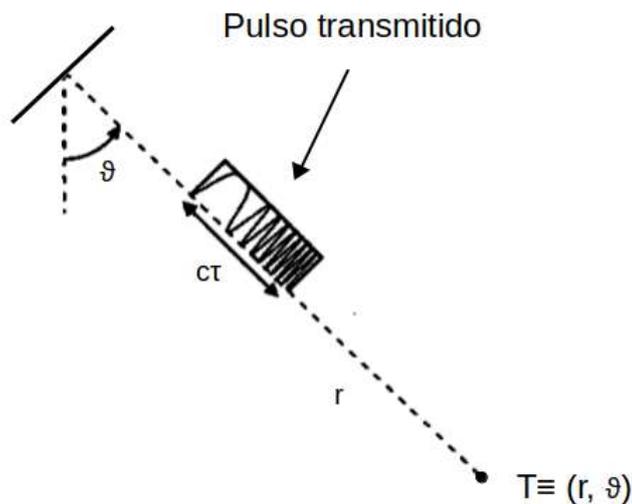
$$f_1(t) = \exp \left[ j \left( \omega t + \frac{\alpha t^2}{2} \right) \right] \text{rect} \left[ \frac{t}{\tau} \right]. \quad (2.3)$$



**Figura 2.6:** Forma de onda o chirp dado por la ecuación (2.2) en unidades arbitrarias, para  $\alpha > 0$  (Extraído de [12]).

Donde en la ecuación anterior  $\text{rect}[t/\tau]$  es un pulso rectangular de duración  $\tau$ ,  $\omega = 2\pi f$  es la frecuencia angular con  $f$  la frecuencia portadora y donde  $\alpha$  es la tasa de variación del chirp relacionada con el ancho de banda del pulso enviado por la expresión:  $\alpha\tau \approx 2\pi\Delta f$ , es decir que el ancho de banda del *chirp transmitido* ( $\Delta f$ ) es directamente proporcional a la duración del chirp ( $\tau$ ).

Para analizar cómo es posible mejorar la resolución del dato RAW vamos a considerar un blanco cuyas coordenadas, en un sistema de coordenadas cilíndrico, está dado por  $T \equiv (0, r, \vartheta)$  y que la plataforma se mueve a lo largo del eje  $x$  y se encuentra localizada en  $x = 0$ , definiendo un plano ortogonal a la dirección de vuelo. La distancia entre el blanco considerado y la plataforma es  $r$  (ver Figura 2.7) y la señal retrodispersada por el blanco y recibida a bordo, está dada por la ecuación (2.4).



**Figura 2.7:** Geometría sensor-blanco en el plano  $(r, \vartheta)$ . (tomado [12] y modificado).

$$f(t) = \exp \left[ -j\omega \frac{2r}{c} + j \frac{\alpha}{2} \left( t - \frac{2r}{c} \right)^2 \right] \text{rect} \left[ \frac{t - 2r/c}{\tau} \right]. \quad (2.4)$$

Resulta conveniente expresar la señal recibida en coordenadas espaciales, ya que se desea analizar la resolución espacial, para ello podemos escribir  $r' = ct/2$  y utilizando las cantidades adimensionales dadas por la ecuación 2.5

$$r = \frac{r}{c\tau/2} \quad r' = \frac{ct/2}{c\tau/2}, \quad (2.5)$$

la ecuación (2.4) puede ser escrita como se muestra en la ecuación (2.6). La convolución de la ecuación (2.6) con la función de referencia dada por la ecuación (2.7) es lo que se conoce como *compresión del pulso*. Generalmente esto se lleva a cabo en el dominio de Fourier utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

$$f(r') = \exp \left[ -j\omega\tau r + j \frac{\alpha\tau^2}{2} (r' - r)^2 \right] \text{rect}[r' - r], \quad (2.6)$$

$$g(r') = \exp \left[ -j \frac{\alpha\tau^2}{2} r'^2 \right] \text{rect}[r']. \quad (2.7)$$

Luego de ciertas operaciones, las cuales no se desarrollaran aquí y pueden encontrarse en [12], y asumiendo que  $|r' - r| \ll 1$  se obtiene la ecuación (2.8) conocida como *función de dispersión de puntos*. Esta ecuación en conjunto con la ecuación (2.9) muestran que un blanco puntual localizado en  $r$  se encuentra en la imagen como un objeto distribuido descrito por la función de dispersión de puntos. Además, se puede definir a  $\Delta r$  como la *dimensión efectiva en rango* del blanco en la imagen y corresponde a la distancia a la que la función de dispersión de puntos decae a  $-3$  (dB).

$$\hat{f}(r') = \exp(-j\omega\tau r) \text{sinc} \left[ \frac{\pi}{\Delta r} (r' - r) \right], \quad (2.8)$$

$$\Delta r = \frac{1}{\tau\Delta f}. \quad (2.9)$$

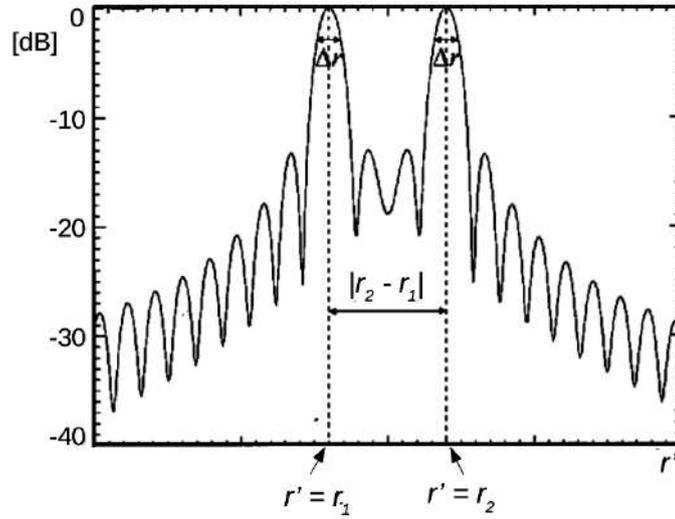
De acuerdo a esto, dos blancos localizados en  $r = r_1$  y  $r = r_2$ , con igual amplitud, proporcionarían una imagen dada por la siguiente expresión:

$$\hat{f}(r') = \exp \left( -j \frac{4\pi}{\lambda} r_1 \right) \text{sinc} \left[ \frac{\pi}{\Delta r} (r' - r_1) \right] + \exp \left( -j \frac{4\pi}{\lambda} r_2 \right) \text{sinc} \left[ \frac{\pi}{\Delta r} (r' - r_2) \right]. \quad (2.10)$$

Para lo cual se reescribió la ecuación (2.7) en unidades normalizadas y por lo tanto la ecuación (2.9) tiene la expresión:

$$\Delta r = \frac{c}{2\Delta f} = \frac{\lambda/2}{\Delta f/f}. \quad (2.11)$$

De acuerdo a esto, si  $|r_2 - r_1| \geq \Delta r$  los dos blancos pueden ser resueltos como entidades separadas, siendo  $\Delta r$  la *resolución en rango nominal* (ver Figura 2.8).



**Figura 2.8:** Superposición de las *función de dispersión de puntos* para dos targets localizados en  $r = r_1$  y  $r = r_2$  [12].

Finalmente, en una situación real tendremos una distribución continua de blancos que pueden ser descriptos por el *patrón de reflectividad*  $\gamma(r)$  (la cual es proporcional al radio entre el campo retrodispersado y el incidente) y está dado por la ecuación (2.12), con  $\hat{\gamma}(\cdot)$  el patrón de reflectividad estimado.

$$\hat{\gamma}(r') = \int dr \gamma(r) \hat{f}(r' - r) = \int dr \gamma(r) \exp(-j\omega\tau r) \text{sinc} \left[ \frac{\pi}{\Delta r} (r' - r) \right]. \quad (2.12)$$

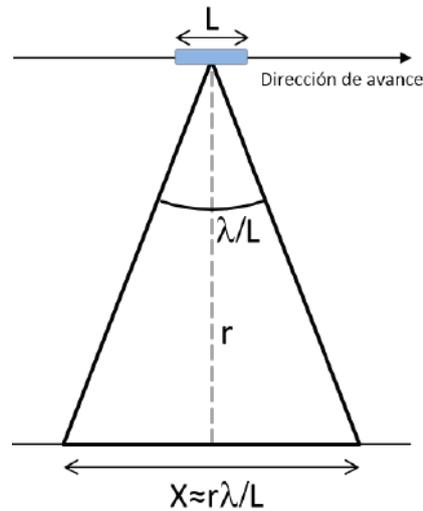
### 2.2.3.2. Resolución en acimut

La dirección en acimut coincide con la dirección de vuelo del sensor y la resolución considerada depende del haz angular de la antena de radar montada a bordo de la plataforma. Dos objetivos en un rango dado pueden ser resueltos como entidades separadas si y solo si ambos no se encuentran dentro del haz del radar al mismo tiempo. En consecuencia, la resolución en acimut ( $\Delta x_{raw}$ ) del dato RAW coincide con el footprint en acimut de la antena (X) (ver Figura 2.1) relacionada, a su vez, con el ancho del haz de la antena  $\lambda/L$  por medio de la relación [9]:

$$\Delta x_{raw} = X \approx r \frac{\lambda}{L}, \quad (2.13)$$

donde L es la dimensión física de la antena a lo largo de la dirección azimutal (ver Figura 2.9) y r es el rango inclinado. Esta ecuación representa el límite de resolución de un radar de apertura real convencional con mirada lateral, comúnmente conocido como Radar Aero-transportado de Visión Lateral (SLAR).

Para tener una idea de las resoluciones de acimut alcanzables, si aplicamos la ecuación (2.13) al sensor ERS, donde  $r \approx 800$  km,  $\lambda = 5.66$  cm y  $L = 10$  m, la resolución de acimut es del orden de kilómetros y esto no es aceptable para la mayoría de las aplicaciones. Para el caso de aerotransportado, si consideramos  $r \approx 1 \sim 10$  km, y  $L \approx 1$  m, la resolución en acimut alcanzable es del orden de cientos de metros, lo cual tampoco resulta aceptable para la mayoría de las aplicaciones [9].

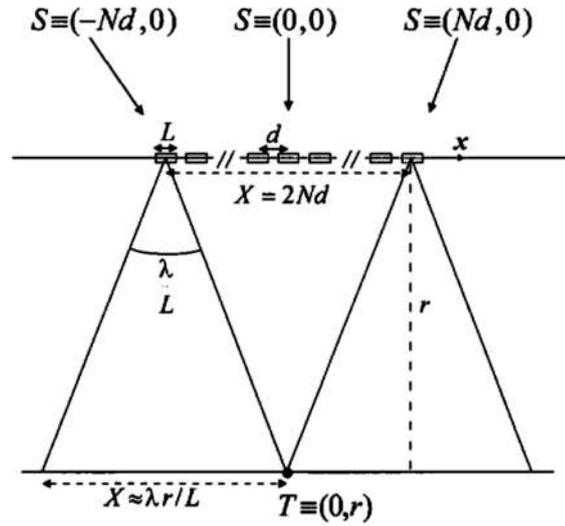


**Figura 2.9:** Relevante a la resolución en acimut (tomado de [12] y modificado).

Para mejorar entonces la resolución en acimut deberíamos reducir la longitud de onda de la frecuencia portadora y/o aumentar la dimensión de la antena. Incrementar la dimensión de la antena no resulta una tarea sencilla, a menos que se introduzca el concepto de apertura sintética, el cual se refiere a sintetizar una larga antena moviendo la antena real, de dimensiones limitadas, a lo largo de un camino de referencia. La síntesis se lleva a cabo combinando de manera coherente los ecos retrodispersados recibidos y grabado a lo largo de la trayectoria de vuelo.

Dicho de otra manera una alta resolución en acimut se logra a partir de una operación intensiva de procesamiento de datos coherentes destinada a sintetizar una antena ficticia, cuya dimensión es varias veces mayor que la de la antena real montada a bordo de la plataforma [41].

Consideremos la Figura 2.10 donde la antena real se encuentra en  $(2N + 1)$  posiciones igualmente espaciadas y un blanco puntual se encuentra situado en  $T \equiv (0, r, \vartheta)$ , por ejemplo en el centro de la escena e iluminado por la antena en las posiciones  $S \equiv (x' = n'd, r = 0)$ , con  $n' = -N, \dots, N$ . Además, se asume que la antena irradia isotrópicamente dentro del ancho del haz.



**Figura 2.10:** Concepto de apertura sintética[12].

La señal retrodispersada por el blanco y recibida por la antena está dada por:

$$f(n'd) = \exp\left(-j\omega\frac{2R}{c}\right) \approx \exp\left[-j\omega\frac{2r}{c} - j\frac{2\pi}{\lambda r}(n'd)^2\right], \quad (2.14)$$

donde

$$R = \sqrt{r^2 + (n'd)^2} \approx r + \frac{(n'd)^2}{2r}. \quad (2.15)$$

Para el análisis posterior, el factor constante  $\exp(-j\omega 2r/c)$  no se tiene en cuenta, y la ecuación (2.14) puede ser escrita de la siguiente manera (en unidades normalizadas):

$$f(n'd) = \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda r}(n'd)^2\right], \quad (2.16)$$

$$n' = -N, \dots, N.$$

donde  $n'd$  es la abscisa (discreta) de sistema SAR a lo largo del camino  $x$ .

La señal dada por la ecuación (2.16) es grabada y luego procesada, donde el procesamiento consiste en sintetizar una antena (más precisamente un arreglo) de longitud  $2Nd = X$ . Al igual que para el caso en rango, el procesamiento usualmente se lleva a cabo en el dominio de las frecuencias multiplicando la Transformada Discreta de Fourier (DFT) de la ecuación (2.16) por la de una función de referencia dada por:

$$g(n'd) \approx \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda r}(n'd)^2\right], \quad (2.17)$$

$$n' = -N, \dots, N.$$

Luego, en la vecindad de un blanco localizado en  $x = 0$  se tiene que:

$$\hat{f}(x') \approx \text{sinc} \left( \frac{2\pi X}{L} x' \right) = \text{sinc} \left( \frac{\pi}{\Delta x} x' \right), \quad (2.18)$$

$$\Delta x = \frac{L}{2X}. \quad (2.19)$$

Donde la ecuación (2.19) en unidades normalizadas toma la forma de la ecuación (2.20) y representa la *resolución en acimut*.

$$\Delta x = \frac{L}{2}. \quad (2.20)$$

Este resultado nos muestra que una mejor resolución se obtiene cuanto más pequeña sea la antena, lo cual se puede notar de la ecuación (2.13) donde cuando mas chica sea  $L$  implica un incremento en  $X$  un por lo tanto un mayor número de elementos del arreglo sintético.

La expresión del patrón de reflectividad  $\gamma(\cdot)$  para una distribución de blancos está dada por la siguiente superposición:

$$\hat{\gamma}(n'd) = \int dx \gamma(x) \hat{f}(n'd - x) = \int dx \gamma(x) \text{sinc} \left[ \frac{\pi}{\Delta x} (n'd - x) \right]. \quad (2.21)$$

Se puede notar que el ancho de banda espacial del patrón de reflectividad estimado  $\hat{\gamma}(\cdot)$  está determinado por la función  $\text{sinc}(\cdot)$  y es igual a  $1/\Delta x$ . Es por ello que la señal procesada para cualquier valor (continuo) de la abscisa  $x'$  puede ser reconstruida vía interpolación obteniendo finalmente la siguiente expresión:

$$\hat{\gamma}(x') = \int dx \gamma(x) \text{sinc} \left[ \frac{\pi}{\Delta x} (x' - x) \right]. \quad (2.22)$$

### 2.2.3.3. Variación Doppler

Una interpretación popular del concepto de antena sintética se basa en la variación de la *frecuencia Doppler*. Consideremos que la velocidad de la plataforma está dada por  $v$  y  $X$  por la ecuación (2.13) es la pisada de la antena definida anteriormente, a partir de la ecuación (2.16) tenemos:

$$f(x' = vt') = \exp \left[ -j \frac{2\pi}{\lambda r} (vt')^2 \right] \text{rect} \left[ \frac{vt'}{X} \right]. \quad (2.23)$$

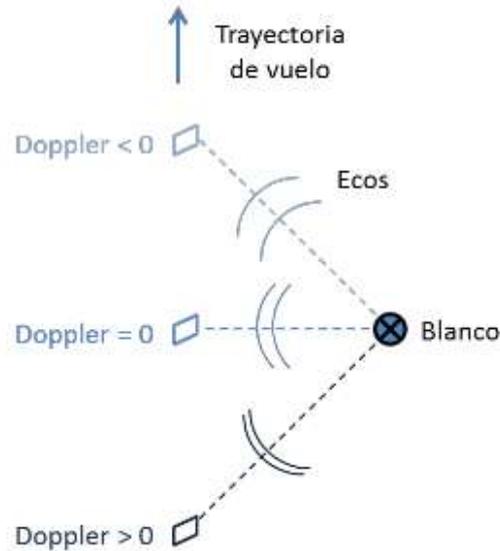
La frecuencia Doppler de la señal dada por la ecuación (2.23) es la frecuencia instantánea dada por:

$$f_D(t') = \frac{d}{dt'} \left( -\frac{v^2}{\lambda r} t'^2 \right) = -2 \frac{v^2}{\lambda r} t', \quad (2.24)$$

$$-\frac{\lambda r}{2Lv} \leq t' \leq \frac{\lambda r}{2Lv}.$$

Una característica importante de la frecuencia Doppler es que su variación es aproximadamente lineal con respecto al tiempo y por lo tanto puede ser pensada como un chirp en acimut, Es decir, a medida que el radar se aproxima al blanco, los ecos son recibidos afectados

por una frecuencia Doppler positiva. Cuando el radar pasa al lado del blanco, la frecuencia Doppler es nula (es decir en  $t' = 0$ ), referido como la *zero Doppler* y cuando el blanco quedó detrás es negativa; por lo tanto, a medida que avanzó el radar fue recibiendo ecos del blanco afectados por efecto Doppler (ver Figura 2.11). Los primeros ecos serán recibidos con un corrimiento positivo en frecuencia y los últimos con un corrimiento negativo.



**Figura 2.11:** Esquematización del efecto Doppler [1].

Finalmente, el ancho de banda de la frecuencia Doppler está dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta f_D = \frac{2v}{L}. \quad (2.25)$$

#### 2.2.4. Enfoque de imágenes SAR

A diferencia de los sensores ópticos, la visualización de datos SAR crudos (RAW) no proporciona ninguna información útil sobre la escena. Únicamente después del procesamiento de la señal, conocido como *enfoque*, se obtiene una imagen. La expresión de una imagen SAR enfocada para una escena extendida se puede escribir combinando la ecuación (2.12) y la (2.22) como:

$$\hat{\gamma}(x', r') = \iint dx dr \bar{\gamma}(x, r) \text{sinc} \left[ \frac{\pi}{\Delta r} (r' - r) \right] \text{sinc} \left[ \frac{\pi}{\Delta x} (x' - x) \right], \quad (2.26)$$

donde:

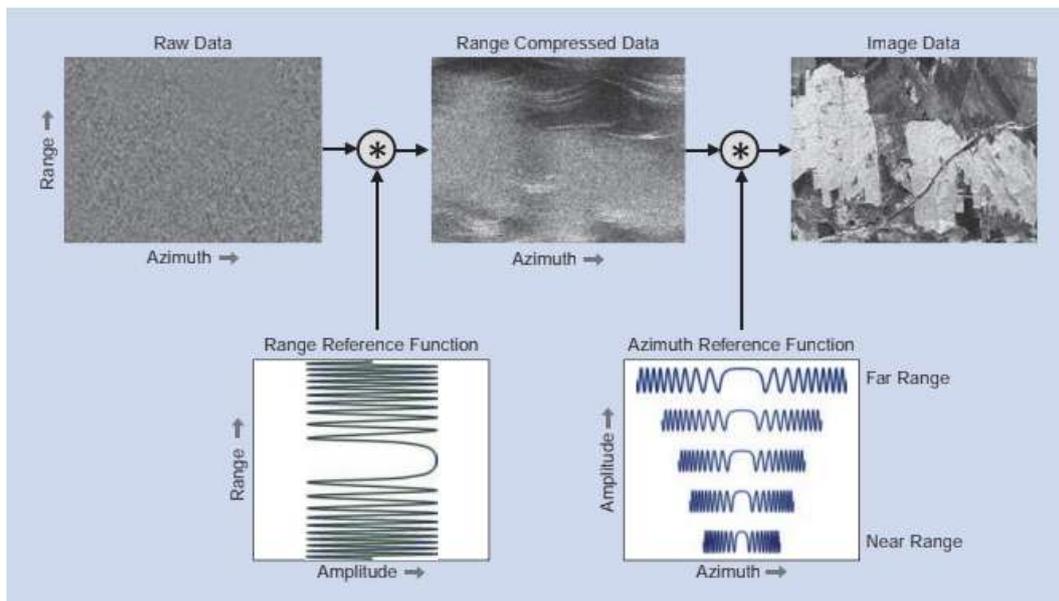
$$\bar{\gamma}(x, r) = \gamma(x, r) \exp \left( -j \frac{4\pi}{\lambda} \right). \quad (2.27)$$

Si bien no se realizará un desarrollo matemático existe una relación por medio de la operación convolución entre la señal RAW, el *patrón de reflectividad* ( $\gamma(\cdot)$ ) y la *respuesta impulsiva del sistema*, donde esta última depende de parámetros físicos del sistema SAR. La

mejora en la resolución del dato SAR consiste en aplicar operaciones de filtrado apropiadas las cuales permiten recuperar una estimación de alta resolución del patrón de reflectividad partiendo del dato recibido, es decir el dato RAW [12].

Entonces, para recuperar la contribución del blanco se debe aplicar un paso de deconvolución al dato RAW lo que permite compensar por la convolución del factor correspondiente a la respuesta impulsiva [9].

De una manera muy simplificada, el procesamiento completo puede entenderse como dos operaciones separadas de *matched filter* a lo largo de las dimensiones en rango y en acimut. El concepto de *matched filter* consiste en la convolución de una función de referencia con la señal recibida (dato RAW), utilizando el *chirp transmitido* como función de referencia en rango y un *chirp Doppler* como función de referencia en acimut (ver Figura 2.12).



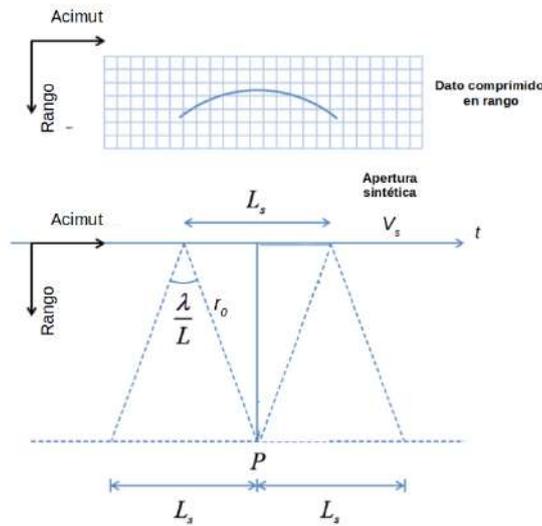
**Figura 2.12:** Resumen de los pasos de procesamiento de SAR donde los datos comprimidos de rango resultan de una convolución de los datos sin procesar con la función de referencia de rango. En un segundo paso, la compresión en acimut se realiza a través de una convolución con la función de referencia en acimut, que cambia entre el rango cercano y el lejano [37]

En general en lugar de realizar una convolución en el dominio del tiempo, se adopta una multiplicación en el dominio de la frecuencia debido a la carga computacional mucho más baja. Entonces, la operación realizada consiste en multiplicar en el dominio de las frecuencias cada línea de rango por el complejo conjugado del espectro del chirp transmitido. El resultado será una señal comprimida en rango que revela únicamente información de la distancia relativa entre el sensor y cualquier punto en el terreno [37]. La compresión en acimut sigue el mismo razonamiento básico.

Una de las correcciones aplicadas a los datos obtenidos luego del enfoque en rango es la conocida como Migración de Celdas en Rango (RCM). Esta corrección debe aplicarse debido a que la distancia entre el radar y cualquier punto fijo en la tierra está cambiando dentro del tiempo de la apertura sintética [37]. Esta distancia puede ser representada por el teorema de Pitágoras como:

$$R(t) = \sqrt{r_0^2 + (V_s t)^2} - r_0 \approx \frac{(V_s t)^2}{2r_0}. \quad (2.28)$$

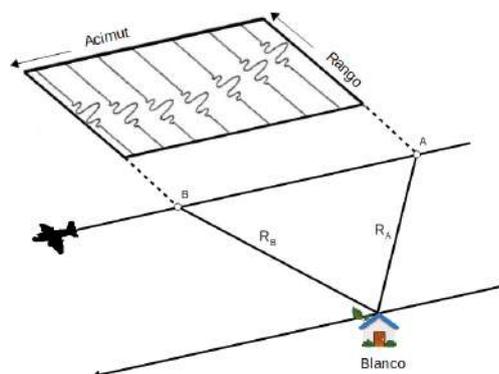
Este efecto se puede observar en la curvatura de la señal comprimida en rango tanto en el esquema de la Figura 2.13 como en el panel central de la Figura 2.12.



**Figura 2.13:** Migración en celdas en rango (tomado de [42] y modificado)

El efecto también puede observarse en la Figura 2.14 donde los ecos tienen retardos diferentes y por lo tanto los datos en la matriz no están alineados, sino que se encuentran en una curva parabólica dependiente de la variación de  $R$  [38]. Esta curva debe ser linealizada cuando se aplica la transformada de Fourier, es decir, este paso de corrección es necesaria en algunos algoritmos de enfoque, el algoritmo utilizado en este trabajo no requiere esta corrección como se verá más adelante.

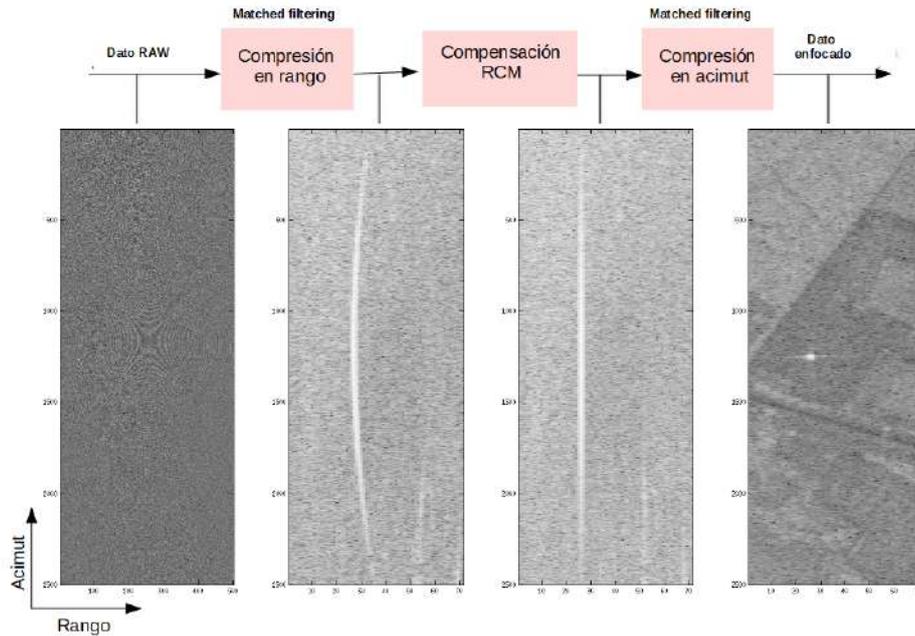
Este efecto daría como resultado un desenfoque en acimut, si no se corrige, cuando  $R_{max} = R(t = T_{ill}/2) > \Delta r/2$  (donde  $T_{ill}$  se refiere al tiempo de iluminación el cual está dado aproximadamente por  $T_{ill} \approx \lambda r_0 / V_s L$ ), debido a que en este caso la energía de un blanco puntual se encontrará distribuida en varias celdas de rango. Es por ello que esta curva debe ser corregida para que toda la trayectoria del blanco a lo largo del tiempo de integración pertenezca a una sola columna de la imagen antes de realizar la compresión en dirección de acimut.



**Figura 2.14:** Migración en celdas en rango.

Finalmente, la Figura 2.15 muestra los pasos necesarios para enfocar datos RAW teniendo

en cuenta la corrección por el efecto de RCM.



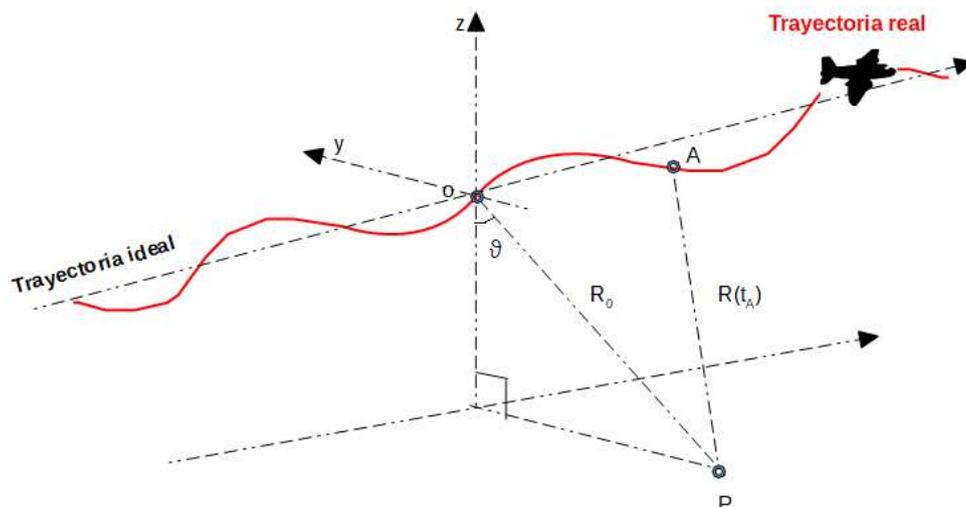
**Figura 2.15:** Enfoque de datos RAW con corrección por RCM. Recorte de imagen del SARAT tomada de [43].

A lo largo de los años se han desarrollado numerosos algoritmos de enfoque, entre los cuales podemos nombrar el Range Doppler (RD) [44], [45], *Omega-K* ( $\omega KA$ ) [46], [47] y Chirp-Scaling (CS) [48], [49]. Si bien estos no se desarrollarán en esta tesis, pudiendo encontrarse información en la bibliografía correspondiente, es importante decir que todos ellos son implementados en el dominio de las frecuencias.

## 2.3. SAR aerotransportado

Usualmente, la suposición de una línea recta para la trayectoria de vuelo resulta ser una buena aproximación para una pequeña porción de la órbita elíptica de las plataformas satelitales. Debido a estas órbitas rectilíneas y muy estables (localmente), el arreglo sintético en este caso resulta ser rectilíneo y uniformemente espaciado. Esto permite calcular el historial de la señal en rango de cada blanco de la escena observada sin ninguna información externa sobre la topografía del terreno [12].

En lo que respecta a sistemas SAR aerotransportados existen desviaciones significativas de la trayectoria rectilínea ideal, como así también variaciones en la actitud y en la velocidad de avance de la plataforma debido a la presencia de turbulencia atmosférica, vibraciones, maniobras del piloto, entre otros. La Figura 2.16 muestra la geometría para SAR aerotransportado en presencia de desviaciones de la trayectoria.



**Figura 2.16:** Geometría para SAR aerotransportado en presencia de desviaciones de la trayectoria

El resultado en este caso es un arreglo sintético no rectilíneo y no igualmente espaciado y el historial de la señal en rango de cada blanco observado depende tanto de la topografía del terreno como de la desviación de la trayectoria de vuelo de la plataforma [50]. Es decir, si estas variaciones no se tienen en cuenta adecuadamente en la etapa de enfoque del dato se puede ver perjudicada la calidad de la imagen SAR. Para realizar esta compensación debe contar con información disponible de la trayectoria de vuelo en la etapa de procesamiento del dato RAW. Generalmente estos son provistos por el INS y el GPS [41]. Sin embargo, existen algunas alternativas que permiten estimar los errores de movimiento a partir del dato RAW mediante por ejemplo el Método de Desplazamiento de Reflectividad (RDM) [51], autofocus [52], y técnicas de recuperación de la fase [53].

En las últimas décadas se han utilizado varios algoritmos precisos y computacionalmente eficientes para enfocar datos SAR satelitales que operan en el dominio de las frecuencias. Para ampliar el rango de aplicabilidad de estos algoritmos también a los datos SAR aerotransportado, es necesaria la implementación adicional de los llamados procedimientos de Compensación de Movimiento (MoCo).

Los procedimientos MoCo realizan ciertas aproximaciones necesarias para preservar la alta eficiencia computacional típica de los algoritmos de enfoque que operan en el dominio de las frecuencias. Dicha aproximación se denomina Center-Beam Approximation (CBA) y asume que los errores de movimientos relevantes a todos los blancos que se encuentran dentro del haz de la antena coincide con el del blanco que se encuentra en el centro del haz de la antena [13].

Sin embargo, cuando estamos en presencia de grandes desviaciones de la trayectoria estas aproximaciones se vuelven inadecuadas perjudicando la precisión de los procedimientos de enfoque. Para sobrepasar estas limitaciones es posible trabajar con algoritmos en el dominio del tiempo conocidos como Back Projection (BP) los cuales no realizan ninguna aproximación, a diferencia de los que operan en el dominio de las frecuencias, incluso cuando se está tratando con arreglos fuertemente no rectilíneos [50], a expensas por supuesto de eficiencia computacional, las cuales igualmente pueden ser superadas utilizando técnicas de programación en paralelo por ejemplo.

En la siguiente tabla (Tabla 2.2) se listan algunos de los sensores aerotransportados existentes, la misma fue tomada de [54] y modificada.

Sensor	Avión	Frecuencia	Full-Polarimétrico	Institución, País
AIRSAR	DC-8	P, L, C	P, L, C	NASA/JPL, USA
UAVSAR	Gulfstream	L	L	
CV-580	Convair 580	C, X	C, X	CCRS, Canada
EMISAR	Gulfstream	L, C	L, C	TUD, Dinamarca
E-SAR	Dornier 228	X, C, L, P	L, P	DLR, Alemania
F-SAR		X, C, S, L, P	X, C, S, L, P	
OrbiSAR	Embraer 810C, Turbo Commander	X, P	P	OrbiSat, Brasil
Carabas-II	Sabreliner	VHF	VHF	FOI, Suecia
SmartSAR	Transall	X	-	Cadissian, Alemania
GeoSAR	Gulfstream	X, P	X, P	Fugro, USA
IFSAR	Learjet	X	-	Intermap, USA
AeS-1/2	Turbo Comander	X, P	P	
PISAR	Gulfstream	X, L	X, L	JAXA, Japon
PISAR-2		X	X	
PAMIR	Transall	X	X	FHR, Alemania
RAMSES	Transall	W, Ka, Ku, X, C, S, L, P	Ku, X, C, S, L, P	ONERA, Francia
SETHI	Falcon 20	X, L, P	X, L, P	
SARAT	Beechcraft Super King Air B-200	L	L	CONAE, Argentina

**Tabla 2.2:** Sensores aerotransportados.

## 2.4. Algoritmos de enfoque

Existen diferentes algoritmos de enfoque de datos SAR los cuales se diferencian entre sí en términos de precisión y eficiencia en su implementación. En principio, se pueden distinguir los algoritmos en el dominio del tiempo, que resultan más precisos pero computacionalmente costosos, y los algoritmos en el dominio de la frecuencia, que resultan más eficientes y generalmente preferidos para el procesamiento de datos operativos [54].

### 2.4.1. Dominio de la frecuencia

Debido a su eficiencia, los algoritmos de enfoque más utilizados funcionan en el dominio de la frecuencia. Existen diferentes algoritmos y todos ellos se basan en la suposición de una trayectoria de vuelo rectilínea.

Entre los primeros algoritmos que se utilizaron para el procesamiento de datos SAR aerotransportado, se encuentra el algoritmo Range Doppler (RD), el cual esencialmente desacopla el procesamiento en rango y acimut a costo de precisión en el enfocado del datos SAR. La corrección por migración de celdas en rango se lleva a cabo realizando interpolaciones.

La mayoría de los algoritmos denominados *wavenumber-domain* se basan en un paso de interpolación en el dominio  $\omega-k$ , también conocido como mapeo Stolt. Este algoritmo es capaz de enfocar datos con una resolución muy alta, independiente del ancho de banda en rango y en acimut. En la práctica resultan más aplicables a los datos SAR provenientes de satélites debido a que estos algoritmos no cuentan con la posibilidad de incluir una compensación de

movimiento (MoCo) de alta precisión. Sin embargo, se han propuesto adaptaciones para el caso aerotransportado, involucrando un mapeo Stolt modificado e incluyendo las compensación de movimiento necesarias para trabajar con aerotransportado [55].

Un ejemplo de algoritmo de enfoque que evita el uso de interpolaciones extensas permitiendo un procesamiento SAR de alta precisión es el denominado Chirp-Scaling (CS). El procesamiento se realiza a partir de con multiplicaciones de fase y operaciones utilizando al FFT, que lo hacen extremadamente eficiente. Este ha sido adaptado como Extended Chirp-Scaling (ECS) para el procesamiento de datos aerotransportado afectados por fuertes errores de movimiento y con centroide Doppler variable en rango y/o acimut, el cual incluye dos pasos de corrección de errores de movimiento [56], [11].

#### 2.4.1.1. Compensación de movimiento

Los principales efectos introducido por errores de movimiento son degradaciones de las resoluciones radiométricas y geométricas, ambigüedades en acimut, y distorsiones geométricas y de fase.

Como se dijo anteriormente las perturbaciones inducidas por el movimiento de la aeronave pueden ser calculados utilizando sistemas como el INS o la Unidad de Medición Inercial (IMU). El procesamiento apropiado del dato adquirido por acelerómetros y giróscopos de la IMU (o del INS) permiten la reconstrucción de las tres componentes de traslación, *along track*, *across track* y *vertical*, del movimiento del avión como así también de las tres componentes angulares, *roll*, *pitch* y *yaw* de la localización de la IMU. La rotación de tres ejes de la plataforma del sensor contribuye a errores en el apuntamiento del haz de la antena. De los tres componentes del movimiento de rotación, el *roll* causa variaciones en el apuntamiento del haz de la antena, mientras que el *pitch* y el *yaw* contribuyen a un offset (conocido como *ángulo squint*) en el apuntamiento del haz de la antena [57]. El ángulo squint ( $\delta_{sq}$ ) entonces es función del pitch y yaw, y el mismo se relaciona además con la frecuencia Doppler a partir de la siguiente ecuación:

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \sin(\delta_{sq}). \quad (2.29)$$

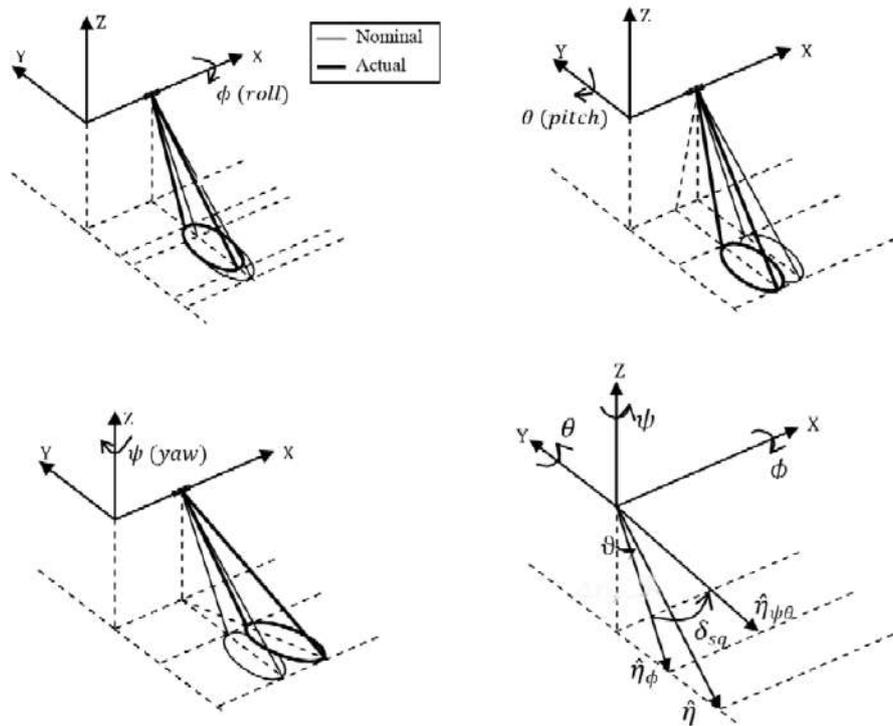
En la Figura 2.17 se muestran los efectos debido al error rotacional, el ángulo squint debido a los mismos y la nueva posición espacial ( $\eta_{\psi\theta}$ ) del vector unitario  $\eta$  (vector unitario que caracteriza a la Line of Sight (LOS), es español línea de vista, en la dirección de apuntamiento del sensor) debido al pitch ( $\theta$ ) y yaw ( $\psi$ ).

La distancia entre la IMU y la posición del centro de la antena de radar se denomina *lever arm*, esta información es relativa al sistema de referencia local (fijo en la plataforma) y se debe combinar junto con las información de la IMU ya que estamos interesados en las perturbaciones de movimiento del centro de fase de la antena de radar.

Para convertir las posiciones medidas en absolutas es necesario la integración de un sistema de navegación con estaciones de GPS. Esta información es particularmente relevante para interferometría SAR [12].

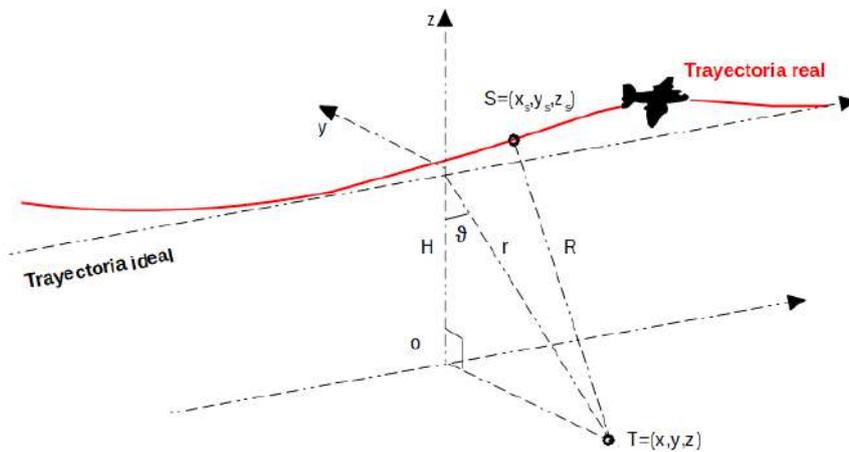
A continuación veremos como los cambios en el vector de la velocidad de avance puede ser considerado en el procesamiento del dato SAR para generar imágenes SAR totalmente enfocadas según lo desarrollado en el capítulo 3 de [12].

La Figura 2.18 esquematiza la geometría de un sistema SAR en presencia de errores de



**Figura 2.17:** Efectos debido al error rotacional (tomado de [57]) y modificado.

movimiento, como es el caso de los sistemas de aerotransportado.



**Figura 2.18:** Geometría SAR en presencia de errores de movimiento.

Considerando un sistema de referencia rectangular, donde el eje  $x$  está representado por la trayectoria ideal o nominal. Entonces, la distancia relativa entre el radar ubicado en  $S = (x_s, y_s, z_s)$ , más precisamente el centro de fase de la antena, y un blanco genérico ubicado en  $T = (x, y, z)$  en el tiempo  $t_n$  está dado por:

$$\begin{aligned}
 R &= \sqrt{(x_s - x)^2 + (y_s - y)^2 + (z_s - z)^2} \\
 &= \sqrt{(x' + \Delta x - x)^2 + (y_s - y)^2 + (z_s - z)^2},
 \end{aligned}
 \tag{2.30}$$

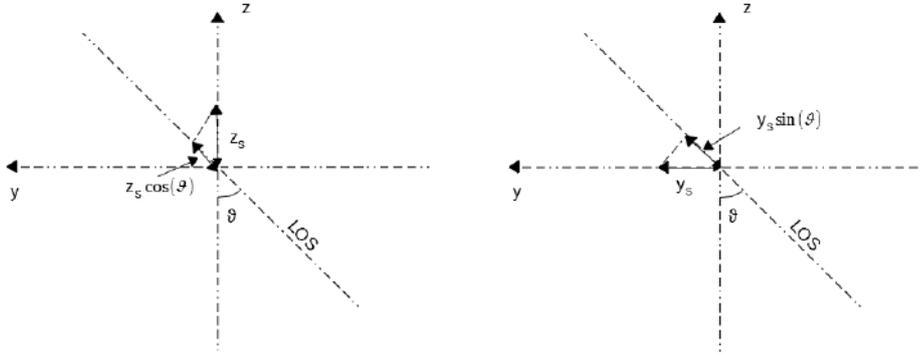
donde  $x' = vt_n$ , con  $v$  el valor medio de la velocidad de la plataforma en la dirección de  $x$  y  $\Delta x$  tiene en cuenta los cambios en la velocidad a lo largo de la trayectoria ideal o nominal. Estas variaciones en la velocidad de avance se puede compensar a partir de un remuestreo del dato RAW con el objetivo de localizar los datos sin procesar en una grilla en acimut uniformemente espaciada, y es conocida como *compensación de velocidad de avance*.

Luego  $\Delta x$  puede ser despreciado en la ecuación (2.30) y por lo tanto se la puede aproximar por:

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{(x' - x)^2 + y^2 + z^2 - 2yy_s - 2zz_s} \\ &= \sqrt{(x' - x)^2 + r^2 + 2(y_s r \sin\vartheta + z_s r \cos\vartheta)} \\ &= \sqrt{(x' - x)^2 + r^2 + y_s \sin\vartheta + z_s \cos\vartheta}. \end{aligned} \quad (2.31)$$

donde  $r = \sqrt{y^2 + z^2}$  en la aproximación más cercana del rango en ausencia de perturbaciones de movimiento y  $\vartheta$  es el ángulo de visión.

De acuerdo a la ecuación (2.31) se puede inferir que los errores de movimiento introducen dos factores adicionales los cuales tienen en cuenta el desplazamiento de la plataforma en las componentes  $y$  y  $z$  (ver Figura 2.19).



**Figura 2.19:** Proyección de la LOS del desplazamiento de la plataforma en  $y$  y  $z$  (tomado de [12] y modificado).

El desplazamiento de la Line of Sight (LOS), el cual está dado por la ecuación (2.32), requiere de dos tipos de compensaciones.

$$r_{LOS} = y_s \sin\vartheta + z_s \cos\vartheta. \quad (2.32)$$

La primer compensación se refiere a un remuestreo en rango para considerar la variación en el retardo del eco debido al  $r_{LOS}$ . La segunda compensación tiene que ver con una corrección de fase  $\phi_{LOS} = 4\pi r_{LOS}/\lambda$ . Desafortunadamente el  $r_{LOS}$  no solamente depende de las desviaciones de la plataforma, sino que depende también del ángulo de vista  $\vartheta$  el cual, en ausencia de información adicional, puede ser calculado por la ecuación (2.33).

$$\vartheta = \cos^{-1}(H/r), \quad (2.33)$$

donde  $H$  representa la altura de vuelo (en media). Entonces, la expresión de  $r_{LOS}$  es la siguiente:

$$r_{LOS} = r_{LOS}(y_s, z_s, r). \quad (2.34)$$

El valor de  $r$  no es conocido en la etapa del dato RAW pero cuando estamos en presencia de una migración en rango despreciable, la compensación por el desplazamiento en la plataforma en el  $r_{LOS}$  puede ser implementada luego de la operación de compresión en rango, ya que se puede asumir que  $r \approx r'$ . En este caso tenemos que:

$$r_{LOS} = r_{LOS}(y_s, z_s, r'). \quad (2.35)$$

Por otro lado, asumir  $r' \approx r$  luego de la compresión en rango no es correcto en caso de que la migración en rango no sea despreciable, es por esto que generalmente se implementa un desacople de la corrección de fase en dos componentes conocidas como *factores compensación de movimiento de primer y segundo orden* [58] correspondientes a dos pasos del algoritmo MoCo. El factor de compensación de movimiento de primer orden consiste en computar una corrección de fase relativa al desplazamiento de la plataforma en la LOS con respecto a un rango de referencia fijo, típicamente el rango en el centro de la imagen:

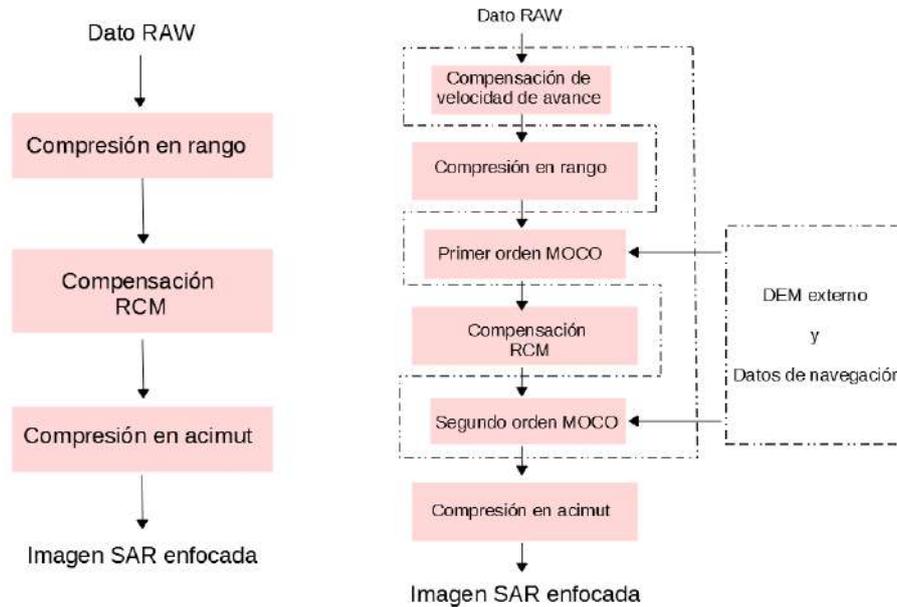
$$r_{LOS_I} = r_{LOS}(y_s, z_s, r_0). \quad (2.36)$$

Esta corrección puede aplicarse al dato antes o después de la compresión en rango. Una vez que se implementó la corrección de primer orden se debe aplicar la corrección por migración de celdas en rango. Luego, la compensación de segundo orden teniendo en cuenta la componente variante en rango de la LOS puede ser implementada como:

$$r_{LOS_{II}} = r_{LOS}(y_s, z_s, r') - r_{LOS}(y_s, z_s, r_0). \quad (2.37)$$

Finalmente, se lleva a cabo el enfoque en acimut. La Figura 2.20 muestra como se ve modificado el diagrama de bloque de un procesamiento de enfoque convencional (izquierda) con respecto al procesamiento utilizado en el caso de aerotransportado (derecha) ambos en el dominio de la frecuencia. La modificación se remarca dentro de las líneas punteadas.

Cabe destacar que por lo general, las técnicas MoCo se utilizan para enfocar algoritmos que trabajan en el dominio de la frecuencia y se basan en aproximaciones, que a su vez dependen de la magnitud de los errores de movimiento. Los algoritmos en el dominio del tiempo, en cambio, suelen explotar los datos de navegación y la información DEM para tener en cuenta las desviaciones de la trayectoria y las variaciones de actitud para hacer frente a la compensación de los errores de movimiento sin involucrar aproximaciones, es decir, independientemente de las desviaciones de las trayectorias y los ángulos de actitud.



**Figura 2.20:** Diagrama de bloque del esquema de procesamiento en el dominio de las frecuencias para el caso satelital (izquierda) y para el caso aerotransportado (derecha).

### 2.4.2. Dominio del tiempo

La posibilidad de correlacionar datos SAR en el dominio del tiempo ha sido tema de discusión a lo largo del tiempo. Por ejemplo se puede nombrar a Barber en [59], a Curlander en [60], Soumekh en [14], a Frey en [61], entre otros.

Los algoritmos en el dominio del tiempo generalmente se denominan Time-Domain Back-Projection (TDBP). Los mismos son más precisos y pueden ser adaptados fácilmente a geometrías de vuelo no rectilíneas o a adquisiciones con aerotransportado en presencia de importantes errores de movimiento. Se ha demostrado por ejemplo en [61] por medio de los datos experimentales que involucran trayectorias de sensores altamente no lineales, que utilizando un algoritmo TDBP se obtiene una calidad de imagen superior en que utilizando una combinación de enfoques Extended Chirp-Scaling and Mosaicking (ECS&M).

Sin embargo, debido a su complejidad computacional del orden de  $N^3$ , donde  $N$  es el número de muestras en acimut y rango, asumidas iguales, su uso está restringido al procesamiento de áreas pequeñas [54].

Entre otros trabajos existentes cuyo objetivo es abordar el problema de procesamientos de datos SAR provenientes de trayectorias no rectilíneas y que operan en el dominio del tiempo podemos nombrar a Soumekh [62], donde el problema del procesamiento de datos SAR proveniente de trayectorias de vuelo no rectilínea se trata en detalle y se proponen dos soluciones: la primer solución consiste en el procesamiento de los datos utilizando TDBP, la segunda solución propuesta es un algoritmo de procesamiento de subapertura basado en  $\omega - k$ .

Por otro lado, en [63] se implementó eficientemente un algoritmo llamado Fast-Factorized Backprojection (FFBP), el cual implementa una integración coherente en varios pasos a diferentes escalas de resolución, la mayoría de ellos en sistemas de referencia polar logrando así reducir la complejidad computacional en  $N^2 \log N$ .

A continuación se da una breve descripción del razonamiento lógico del algoritmo Back Projection (BP).

### 2.4.2.1. Algoritmo Back Projection (BP)

Considerando un sistema SAR que se mueve a lo largo de una trayectoria arbitraria, el enfoque de un blanco genérico  $P$ , el cual se encuentra en la escena observada, se obtiene llevando a cabo la suma coherente dada por la ecuación (2.38).

$$i(P) = \sum_{n=1}^N s_n h_n e^{j\frac{4\pi}{\lambda} |\vec{P}_A(t_n) - \vec{P}|}. \quad (2.38)$$

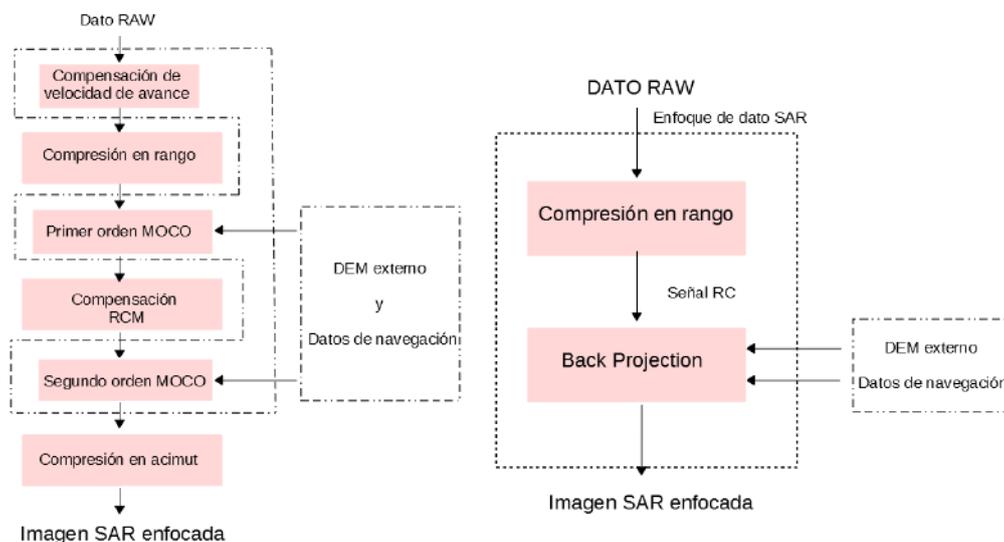
En esta ecuación la posición del blanco genérico  $P$  se describe mediante el vector  $\vec{P}$ . Por otro lado el vector  $\vec{P}_A(t_n)$  describe la posición del centro de fase de la antena de radar durante la adquisición, donde  $t_n$  es el tiempo de transmisión del  $n$ -ésimo pulso.

Aquí se ha supuesto que el blanco  $P$  es visto dentro del lóbulo principal de la antena de radar en los tiempos  $t_1, \dots, t_n, \dots, t_N$ , por lo tanto la posición de las antenas de este arreglo sintético, el cual es no necesariamente lineal ni periódico, se encuentran localizadas en  $\vec{P}_A(t_1), \dots, \vec{P}_A(t_n), \dots, \vec{P}_A(t_N)$ .

En la ecuación (2.38),  $\lambda$  es la longitud de onda y  $s_n$  representa el eco del radar relevante a un blanco considerado y recibido por la  $n$ -ésima antena del arreglo sintético (corresponde a la señal ya comprimida en rango) y  $h_n$  es una función de pesos que tiene en cuenta el patrón de antena y la atenuación de la señal en el viaje ida y vuelta.

Es necesario recordar que en el caso de arreglos sintéticos no rectilíneos la ecuación (2.38) requiere la explotación de un DEM externo y datos de la trayectoria de vuelo grabado por el sistema de navegación.

la Figura 2.21 muestra como se ve modificado el bloque de procesamiento, para SAR aerotransportado, del dominio de la frecuencia (derecha) al dominio del tiempo (izquierda).



**Figura 2.21:** Diagrama de bloque del esquema de procesamiento en el dominio de las frecuencias (derecha) y en el dominio del tiempo (izquierda) ambos para el caso aerotransportado.

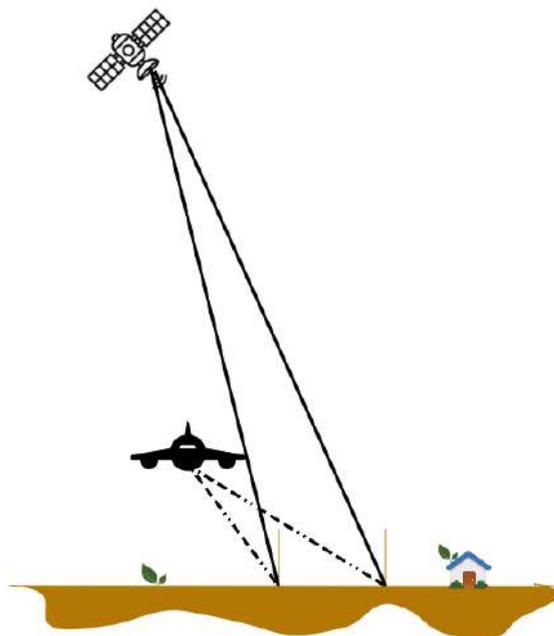
## 2.5. Satélite vs aerotransportado

Aunque la resolución espacial de los sistemas SAR es independiente de la altitud, la geometría de visualización y la pisada de la antena pueden verse muy afectadas por variaciones de la misma.

En los sistemas SAR aerotransportado, se debe de tomar imágenes en un amplio rango de ángulos de incidencia, tal vez hasta 60 o 70 grados, para lograr áreas iluminadas relativamente amplias (entre 50 a 70km) debido a las altitudes de operación de los mismos.

El ángulo de incidencia tiene un efecto significativo en la señal retrodispersada relacionada con las características de la superficie y en su apariencia en la imagen. De hecho, la variación en la proyección de la superficie de referencia (elipsoide) en la dirección del rango causa distorsiones geométricas debido al ángulo de incidencia variable [64]. Estas distorsiones geométricas, especialmente en áreas de montaña o de relieve pronunciado, se conocen como acortamiento (foreshortening), inversión (layover) y sombra (shadow).

En el caso de los sistemas SAR montados en satélites se pueden evitar algunos de estos problemas de geometría ya que operan en altitudes de hasta cien veces más que los SAR aerotransportados. En altitudes de varios cientos de kilómetros, se pueden obtener imágenes con pisada comparables (entre 50 a 70km), pero en un rango mucho más estrecho de ángulos de incidencia, que generalmente varían de 5 a 15 grados.



**Figura 2.22:** Esquema de la variación ángulo de incidencia caso satelital versus aerotransportado.

Aunque los sistemas SAR aerotransportados pueden ser más susceptibles a los problemas de geometría nombrados anteriormente, resultan tener una flexibilidad en su capacidad para recopilar datos desde diferentes ángulos y direcciones. De hecho, los sensores SAR aerotransportados pueden acortar el tiempo de revisita y permiten un monitoreo rápido del área de interés, además a diferencia de los sistemas espaciales, pueden volar prácticamente en cualquier dirección.

Si bien un sistema SAR satelital permite la cobertura de áreas muy amplias, lo que da

lugar a un monitoreo casi global de la superficie de la Tierra, su geometría de visualización y el programa de adquisición de datos están controlados por el patrón de su órbita, incluso las nuevas generaciones de SAR montados en plataformas satelitales no permiten un monitoreo diario u horario [9]. En ese contexto, los sistemas SAR aerotransportados representan una solución de monitoreo muy atractiva para momentos de crisis producidos por ejemplo por terremotos, deslizamientos de tierra, etc., debido a su flexibilidad de operación.

Sin embargo, como se ha discutido anteriormente los sistemas SAR aerotransportado son susceptibles a variaciones en la velocidad y otros movimientos del avión producto de las condiciones ambientales. Por este motivo el sistema debe contar con un sofisticado equipo de navegación/posicionamiento y un procesamiento avanzado de imágenes para compensar estas variaciones. A diferencia de los SAR aerotransportados, los sistemas montados en satélites poseen una trayectoria de vuelo que no se ve afectada por movimientos de este tipo contando con una trayectoria muy estable. Sin embargo, en el caso satelital se deben tener en cuenta otros factores como por ejemplo la rotación y la curvatura de la Tierra. La presencia de la atmósfera también puede deteriorar significativamente las imágenes SAR o partes de ellas debido a efectos como retrasos en la señal, atenuación, ruido, depolarización causados por gases atmosféricos, precipitación, nubes, niebla o electrones libres en la ionosfera [65].

## 2.6. Interferometría SAR

La Interferometría SAR (InSAR) es una técnica de detección remota que permite generar Modelos Digitales de Elevación o mapas de deformación de la superficie terrestre. Esto se realiza mediante la comparación, para una escena determinada, de la fase de dos o más imágenes de radar complejas que han sido adquiridas desde posiciones ligeramente diferentes o en momentos diferentes. Dado que la fase de cada píxel de la imagen SAR contiene información del rango, la cual es precisa a una pequeña fracción de la longitud de onda del radar, es posible detectar y medir pequeños diferencias de longitud de trayectoria con precisión centimétrica o incluso milimétrica. Esta extraordinaria precisión es independiente de la distancia entre el sensor y la escena que hace a InSAR de gran relevancia para la teledetección aérea y espacial [37].

Generalmente la Interferometría SAR (InSAR) explota la diferencia de fase entre dos imágenes SLC, tomadas desde dos posiciones distintas, con el fin de medir el término  $\delta r$  en la siguiente ecuación:

$$\delta r + r = \sqrt{(r^2 + l^2 - 2lr \sin(\vartheta - \sigma))}. \quad (2.39)$$

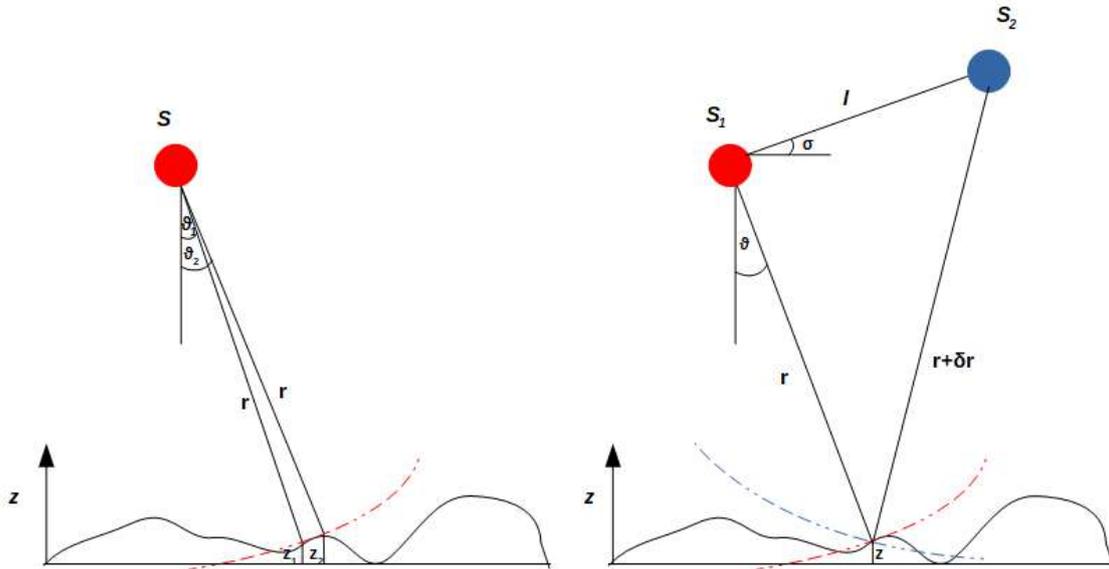
Donde,  $l$  es la línea de base,  $\sigma$  es el ángulo de inclinación y  $\delta r$  es la diferencia en rango inclinado entre las dos trayectorias de vuelo y corresponde a la proyección de la línea de base en la dirección de la línea de vista. Conociendo  $l$  y  $\sigma$  es posible conocer la diferencia de camino,  $\delta r$ , para el blanco considerado lo cual permite calcular la tercera dimensión, es decir el ángulo  $\vartheta$  (ver Figura 2.23 panel de la derecha) [9].

Luego, conociendo  $\vartheta$  es posible calcular la altura del blanco  $H$  sobre el plano de referencia utilizando la ecuación (2.40):

$$z = H - r \cos(\vartheta). \quad (2.40)$$

El motivo de tomar dos imágenes desde posiciones ligeramente distintas tiene que ver con que si observamos el panel izquierdo de la Figura 2.23 podemos ver que no podríamos

identificar unívocamente la ubicación y por lo tanto la altura a la que se encuentra un blanco específico, sobre el plano de referencia, con respecto a todos aquellos que tienen el mismo valor de rango inclinado. Sin embargo, utilizando adquisiciones desde posiciones distintas, la ambigüedad existente en la ubicación del blanco está completamente resuelta. De hecho, solo existe un punto que se encuentra a una distancia  $r$  del primer sistema y  $r + \delta r$  del segundo.



**Figura 2.23:** Geometría en el plano ortogonal a la dirección de vuelo.

La cadena de procesamiento InSAR, partiendo de datos RAW, usualmente llevada a cabo puede ser resumida en los siguientes pasos:

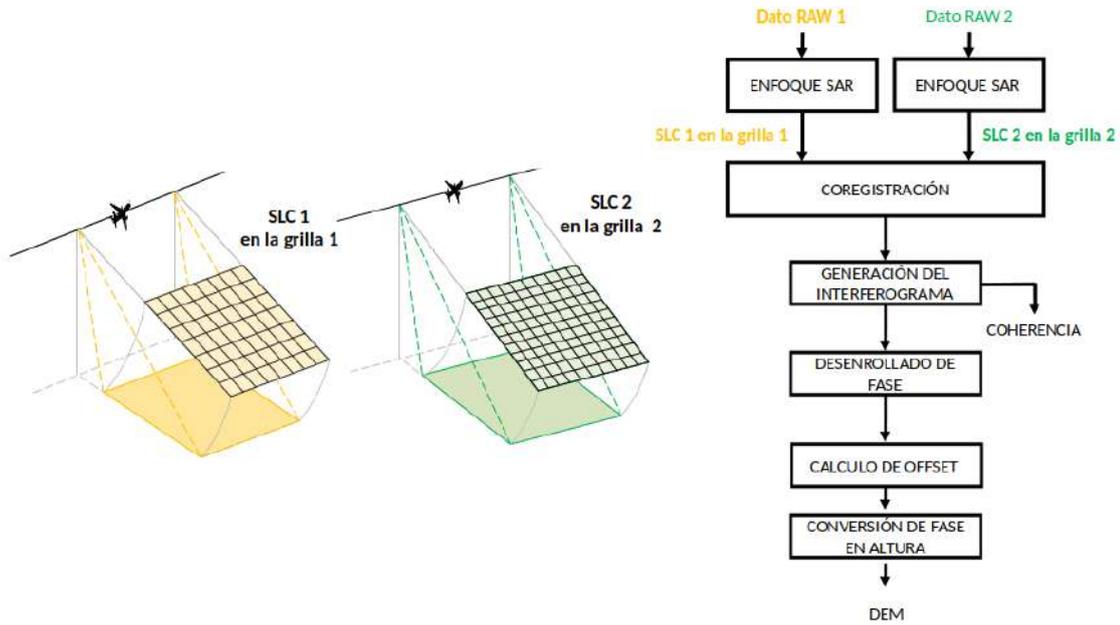
1. Formación de las los imágenes SLC a partir del enfoque de par de datos RAW;
2. Co-registración de las dos imágenes SLC;
3. Formación del interferograma y extracción de la diferencia de fase;
4. Desenrollado de fase del interferograma;
5. Estimación del valor del offset en la fase;
6. Evaluación del mapa del terreno a partir de la fase absoluta.

El primer paso consiste en obtener las imágenes SLC aplicando técnicas de enfoque, esto fue explicado anteriormente y puede encontrarse en la sección 2.2.4.

En el caso de utilizar técnicas estándares de enfoque (es decir, en el dominio de las frecuencias), cada imagen SLC obtenida se encuentra en su propia grilla de radar (es decir su propia grilla rango-acimut). En este caso el paso siguiente al enfoque de los datos consistiría en aplicar algoritmos de co-registración <sup>1</sup>, como se se puede ver en el paso 2 de la cadena

<sup>1</sup>esto se ve ligeramente modificado al trabajar en el dominio del tiempo y se puede encontrar en la Sección 3.3

de procesamiento convencional para InSAR. La cadena completa de procesamiento se esquematiza en la Figura 2.24 en particular se hace notar que cada imagen se encuentra en su propia grilla por lo que es necesario aplicar la co-registración de las imágenes.



**Figura 2.24:** Procesamiento InSAR comenzando por enfocar el dato RAW utilizando técnicas estándares de enfoque.

Para comprender mejor supongamos que  $\gamma_1$  representa la imagen usualmente llamada *maestra* y  $\gamma_2$  la imagen usualmente llamada *esclava*.

La imagen maestra y esclava pueden escribirse según la expresión 2.26 vista en la sección 2.2.4 como:

$$\hat{\gamma}_1(x', r') = \iint dx dr \gamma(x, r) \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} r\right) \text{sinc}\left[\frac{\Omega_r}{2}(r' - r)\right] \text{sinc}\left[\frac{\Omega_x}{2}(x' - x)\right], \quad (2.41)$$

$$\hat{\gamma}_2(x', r') = \iint dx dr \gamma(x, r) \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda}(r + \delta r)\right) \text{sinc}\left[\frac{\Omega_r}{2}(r' - r - \delta r)\right] \text{sinc}\left[\frac{\Omega_x}{2}(x' - x)\right], \quad (2.42)$$

donde:

$$\Omega_r = 2\pi \left(\frac{2\Delta f}{c}\right),$$

$$\Omega_x = 2\pi \left(\frac{2}{L}\right).$$

son el ancho de banda espacial en rango ( $\Omega_r$ ) y acimut ( $\Omega_x$ ) en [rad/m]. Notar que las coordenadas no primadas se refieren a los puntos en el sitio de la escena, mientras que las coordenadas primadas se refieren a los puntos de la imagen (es decir, muestreados).

Por simplicidad se asume que los anchos de bandas  $\Omega r$  y  $\Omega x$  son infinitos, es decir la resolución espacial es igual a cero. En ese caso, las funciones  $\text{sinc}(\cdot)$  en rango y en acimut se aproximan a una función *Delta de Dirac*, y las ecuaciones 2.41 y 2.42 se convierten en:

$$\hat{\gamma}_1(x', r') \approx \gamma(x', r') \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} r'), \quad (2.43)$$

$$\hat{\gamma}_2(x', r') \approx \gamma(x', r' - \delta r') \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} r'). \quad (2.44)$$

Existe un desplazamiento en rango entre la posición en que un punto del suelo es representado en ambas imágenes consecuencia de la diferencia de camino entre las dos señales de radar. Es necesario remover este desplazamiento, es decir llevar a cabo una apropiada co-registración.

$$\hat{\gamma}_2(x', r') \longrightarrow \hat{\gamma}_2(x', r' + \delta r) \approx \gamma(x', r') \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} r' + \delta r). \quad (2.45)$$

Luego de realizar la co-registración, el próximo paso consiste en la extracción de la fase interferométrica. Esta se lleva a cabo a partir del producto entre la imagen máster y el complejo conjugado de la imagen esclava. Entonces, calcular la diferencia de fase consiste en:

$$\phi(x', r') = \text{Ph}[\hat{\gamma}_1(x', r') \hat{\gamma}_2^*(x', r' + \delta r)] = \frac{4\pi}{\lambda} \delta r'. \quad (2.46)$$

Para la mayoría de las aplicaciones prácticas se requiere trabajar con valores de fase continua, conocida como *fase desenrollada*, sin embargo las mediciones de fase en InSAR se encuentran entre  $-\pi$  and  $+\pi$  [66] debido a que estamos trabajando con datos complejos, es decir se cuenta con una *fase enrollada*.

Utilizando técnicas de desenrollado de fase, generalmente conocidas como Phase Unwrapping (PhU) en la literatura (por ejemplo [67], [68]), es posible obtener la fase continua, [69], partiendo del conocimiento de la *fase enrollada*.

Más precisamente, la fase obtenida luego de aplicar las técnicas de desenrollado es una fase relativa, ya que presenta un offset el cual debe ser estimado. Dicho offset generalmente se resuelve utilizando Corner Reflector (CR) localizados dentro de la escena iluminada en conjunto con mediciones de GPS diferencial de sus posiciones. Sin embargo esto no siempre es posible y existen otras soluciones como la propuesta en [70] donde se explota un DEM externo de baja exactitud para el cálculo del mismo.

## 2.7. Polarimetría SAR

Las cantidades fundamentales medidas por un sistema SAR polarimétrico son los elementos de la matriz de dispersión, conocida en inglés como scattering matrix, (es decir  $S_{hh}, S_{hv}, S_{vh}$  y  $S_{vv}$ ) los cuales describen, a diferentes polarizaciones, la transformación del campo eléctrico de la onda transmitida  $\bar{E}_t$  (por ejemplo incidente) en el campo eléctrico de la onda recibida  $\bar{E}_r$  (por ejemplo dispersado) al interactuar con un dispersor [37]. Esta transformación está representada por la siguiente ecuación:

$$\bar{E}^r = \frac{\exp(-ikr)}{r} [S] \bar{E}^t. \quad (2.47)$$

$$\begin{bmatrix} E_h^r \\ E_v^r \end{bmatrix} = \frac{\exp(-ikr)}{r} \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_h^t \\ E_v^t \end{bmatrix}. \quad (2.48)$$

Los elementos de  $[S]$ ,  $S_{IJ} = |S_{IJ}| \exp(i\phi_{IJ})$ , son los cuatro elementos de la matriz de *dispersión*, donde los subíndices  $IJ$  representan la polarización horizontal ( $h$ ) o vertical ( $v$ ). En polarimetría SAR generalmente solo son consideradas las fases relativas  $\exp(i(\phi_{IJ} - \phi_{MN}))$  entre los elementos de la matriz, mientras que las fases absolutas generalmente no se tienen en cuenta.

Los elementos de la diagonal de la matriz de dispersión reciben el nombre de términos *co-pol*, y relacionan la misma polarización para el campo incidente y el dispersado. Los elementos que se encuentran fuera de la diagonal se conocen como *cross-pol* y relacionan los estados de polarización ortogonal. Por otro lado, el factor común ( $\frac{\exp(-ikr)}{r}$ ) tiene en cuenta los efectos de propagación en amplitud y en fase.

Es importante tener en cuenta que la ecuación (2.48) es solamente válida para la zona del campo lejano, donde la suposición de onda plana es considerada para el campo incidente y dispersado [71].

Un radar polarimétrico es capaz de crear ondas polarizadas utilizando una antena diseñada para transmitir y recibir ondas electromagnéticas en una polarización específica. Para crear una onda con polarización arbitraria se necesitan señales con dos componentes ortogonales o dos bases polariméricas. Las dos bases polariméricas más comunes son la horizontal lineal o  $h$  y vertical lineal o  $v$ .

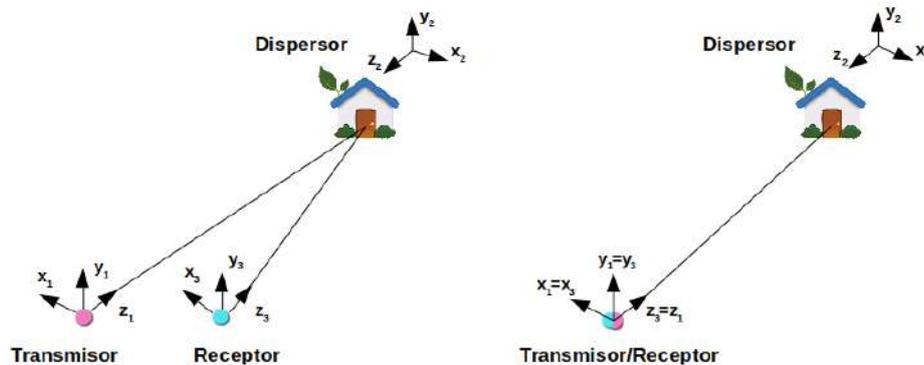
La mayoría de los sistemas full polarimétricos funcionan en la base lineal  $h-v$ , es decir al transmitir una onda polarizada  $h$  se recibe de manera simultánea una onda polarizada  $h$  y una onda polarizada  $v$  permitiendo medir los elementos  $S_{hh}$  y  $S_{hv}$ . Los dos elementos restantes  $S_{vv}$  y  $S_{vh}$  se miden en un segundo paso transmitiendo una onda polarizada  $v$  y recibiendo en  $h$  y en  $v$  simultáneamente. Sin embargo podría utilizarse otra base de polarizaciones ortogonales como por ejemplo la circular, en la cual sus componentes básicos se denotan con  $R$  para *circular de mano derecha* y  $L$  para *circular de mano izquierda*, o una combinación entre lineal y circular [72]. Sin embargo, es importante destacar que independientemente de la base polarimétrica ortogonal utilizada, una vez que se mide la matriz de dispersión completa, cualquier amplitud de dispersión compleja arbitraria se puede reconstruir como una combinación lineal de los elementos de ella.

Un sistema de radar que usa polarizaciones lineales  $h$  y  $v$  puede tener los siguientes canales:

- $hh$ : para transmisión horizontal y recepción horizontal;
- $vv$ : para transmisión vertical y recepción vertical;
- $hv$ : para transmisión horizontal y recepción vertical;
- $vh$ : para transmisión vertical y recepción horizontal.

Por otro lado, existen dos tipos de configuraciones dependiendo de si la antena receptora y transmisora se encuentran en el mismo lugar o no, la *monoestática* y la *biestática*. En el primer caso la antena receptora y transmisora se encuentran localizadas en el mismo lugar y en este caso la matriz de dispersión  $[S]$  se vuelve simétrica, es decir  $S_{hv} = S_{vh}$ . En este caso, e ignorando la fase absoluta, el número de parámetros independientes en  $[S]$  se reduce a cinco: tres amplitudes y dos fases relativas. En el caso biestático, donde la antena receptora y transmisora están separadas espacialmente,  $S_{hv} \neq S_{vh}$  y  $[S]$  contiene siete parámetros independientes: cuatro amplitudes y tres fases relativas [37].

La Figura 2.25 esquematiza las configuraciones monoestática y biestática en un sistema de coordenadas cartesiano  $(x, y, z)$  según la convención *Backward Scattering Alignment (BSA)*, en la cual el eje  $z$  positivo apunta hacia el dispersor tanto para la onda incidente como para la dispersada. Para el caso del radar monoestático, los sistemas de coordenadas son los mismos para la onda incidente y dispersa en la convención BSA, por lo que es comúnmente la más utilizada [73].



**Figura 2.25:** Caso configuración biestática (izquierda) y configuración monoestática (derecha) ambas en un sistema de coordenadas según la convención BSA.

### 2.7.1. Calibración de imágenes SAR

Uno de los requerimientos críticos de los sistemas de radar polarimétricos es la necesidad de calibración, la cual resulta importante para asegurar una precisa extracción de los parámetros geofísicos de interés, por ejemplo humedad de suelo, rugosidad de suelo y biomasa, los cuales se pueden recuperar a partir de un análisis de las firmas polarimétricas de los dispersores.

Como se dijo anteriormente, los sistemas polarimétricos pueden transmitir señales en sus polarizaciones horizontal y vertical y luego recibir la señal, polarizada horizontal o vertical, retro-dispersada por el blanco. En esta operación las características de las señales

recibidas/transmitidas no resultan ser siempre puras debido a que el radar no es un dispositivo ideal. Esto quiere decir que la señal polarizada horizontalmente se puede mezclar con la polarizada verticalmente, o viceversa, tanto en el estado de transmisión como de recepción, este efecto se denomina *cross-talk*. El error por *cross-talk* puede aumentar significativamente la magnitud de las señales *cross-pol*, dando como resultado una mayor probabilidad que un objetivo muestre propiedades de dispersión de volumen [74].

En términos generales, la tecnología PolSAR discrimina los objetos terrestres por la coherencia y la diferencia de los cuatro canales de polarización por lo que para garantizar que esta coherencia o diferencia solo deriven de la firma de los objetos, un sistema SAR polarimétrico debe transmitir o recibir las señales polarimétricas con la misma ganancia de antena. La diferencia en amplitud y fase entre los canales de polarización vertical y horizontal en ambos estados, de transmisión y recepción, se denomina *channel imbalance*. El *channel imbalance* puede dividirse en dos, el primero llamado *co-imba* causa distorsiones entre los canales *co-pol*, es decir *hh* y *vv*. El segundo, llamado *cross-imba* principalmente induce distorsiones entre las polarizaciones *hv* y *vh* [74].

Los algoritmos de calibración propuestos por Van Zyl [75] y el enfoque más general de Quegan [76] son los algoritmos estándares para calibración de fase y por *cross-talk* de datos polarimétricos. Es esta tesis nos basamos en la calibración propuesta por Quegan.

### 2.7.1.1. Algoritmo de Quegan

La matriz de dispersión observada puede ser descrita a partir de un modelo de distorsión no-recíproco<sup>2</sup> presentada en [76] como:

$$O = RST + N = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{hh} & n_{hv} \\ n_{vh} & n_{vv} \end{bmatrix}, \quad (2.49)$$

donde  $O$  es la matriz de dispersión observada (medida),  $S$  es la matriz de dispersión,  $R$  y  $T$  son las matrices de distorsión de recepción y transmisión, mientras que  $N$  es la matriz de ruido. En el caso de  $R$ , la cantidad  $r_{ij}$  es la respuesta en el canal  $i$  a un estímulo en el canal  $j$ , mientras que para  $T$ , la cantidad  $t_{ij}$  es la transmisión en el canal  $i$  cuando el canal  $j$  es excitado.

De la ecuación (2.49) se tiene que en ausencia de *cross-talk* y de *imbalance*  $O \propto S$ , es decir  $R \propto I$  and  $T \propto I$ . En otro caso  $O \neq S$  y resulta necesario aplicar un procedimiento de calibración.

El método de Quegan asume reciprocidad de la matriz de dispersión ( $S_{hv} = S_{vh}$ ) y términos fuera de la diagonal pequeños (en comparación con los términos de la diagonal) para las matrices  $R$  y  $T$  [77]. La versión libre de ruido del modelo dado por la ecuación (2.50) se puede escribir de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} O_{hh} \\ O_{vh} \\ O_{hv} \\ O_{vv} \end{pmatrix} = Y \begin{pmatrix} \alpha & v + \alpha w & vw \\ \alpha u & \alpha & v \\ \alpha z & 1 & w \\ \alpha uz & u + \alpha z & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k^2 S_{hh} \\ k S_{hv} \\ S_{vv} \end{pmatrix}. \quad (2.50)$$

donde,  $u = r_{21}/r_{11}$ ,  $v = t_{21}/t_{22}$ ,  $w = r_{12}/r_{22}$ ,  $z = t_{12}/t_{11}$  son las proporciones de *cross-talk*,  $Y = r_{22}t_{22}$  es la ganancia general del sistema en el canal *vv*,  $k = r_{11}/r_{22}$  es el chanel

<sup>2</sup>En un sistema de radar recíproco las matrices  $T$  y  $R$  son iguales, esto se asume en el enfoque de Van Zyl [75], Quegan lo amplía para casos no-recíprocos.

imbalace de recepción,  $\alpha = (r_{22}t_{11})/(r_{11}t_{22})$  es la proporción de channel imbalance entre la recepción y la transmisión.

El método de Quegan se basa en la suposición de la no-correlación<sup>3</sup> entre los retornos co-pol y cross-pol [78], permitiendo estimar los parámetros  $\alpha, u, v, w$  y  $z$  directamente de la matriz de covarianza observada ( $C = \langle OO^\dagger \rangle$ , donde  $\langle \rangle$  denota el valor esperado), mientras que  $k$  e  $Y$  pueden ser estimadas comparando el dato SAR observado con la respuesta teórica de CRs<sup>4</sup> ubicados en la escena.

La solución obtenida por mínimos cuadrados para el vector  $\bar{S} = Y(k^2 S_{hh}, k S_{hv}, S_{vv})^t$  está dada por:

$$\bar{S} = (A^\dagger A)^{-1} A^\dagger O. \quad (2.51)$$

donde  $A$  es la matriz  $4 \times 3$  en la ecuación (2.50) y  $A^\dagger$  es la matriz conjugada transpuesta de  $A$ . Luego,  $\bar{S}$  tiene la siguiente expresión:

$$\bar{S} = \begin{pmatrix} 1/\alpha & P_{12} & P_{13} & 0 \\ -(\alpha^* u + z)/D & \alpha^*/D & 1/D & -(\alpha^* v + w)/D \\ 0 & P_{32} & P_{33} & 1 \end{pmatrix} O. \quad (2.52)$$

donde:

$$D = 1 + |\alpha|^2, P_{12} = \alpha^*(u^* - \alpha^* z^* - \alpha^*[v + \alpha w]), P_{13} = \alpha^*(-[v + \alpha w] - \alpha[u^* - \alpha^* z^*]), \\ P_{32} = |\alpha|^2(v^* - \alpha^* w^* - \alpha^*[u + \alpha z]) \text{ y } P_{33} = |\alpha|^2(-[u + \alpha z] - \alpha[v^* - \alpha^* w^*]).$$

Una vez que las imágenes SLC son calibradas por el efecto de cross-talk, se debe calcular el channel imbalance utilizando CRs ubicados en el área. La magnitud y fase del channel imbalance esta dado según Van Zyl [75] por:

$$|f| = \left[ \frac{S_{vv}^{xt*} S_{vv}^{xt}}{S_{hh}^{xt*} S_{hh}^{xt}} \right]_{cr}^{1/4}, \\ arg(f) = \frac{1}{2} arg(S_{hh}^{xt*} S_{vv}^{xt})_{cr}.$$

donde,  $S^{xt}$  es una matriz de dispersión intermedia, donde solo se debe realizar calibración radiométrica y por channel imbalance, es decir que ya fue corregida por efecto de cross-talk. La correspondencia entre  $k$  (dado por Quegan) y  $f$  (dado por Van Zyl) es:  $|k| = \frac{1}{|f|}$  y  $arg(k) = -arg(f)$

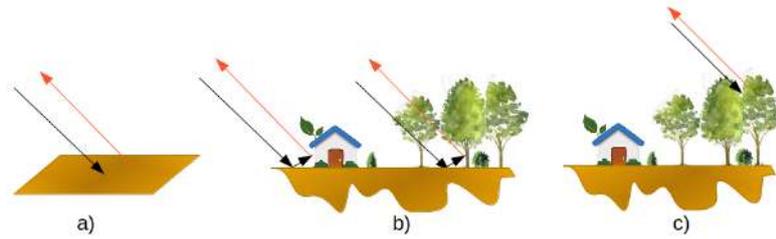
### 2.7.2. Descomposición de Pauli

La composición de Pauli es utilizada para representar la información polarimétrica de una imagen SAR, esta representación se logra formando una imagen RGB a partir de las intensi-

<sup>3</sup>Si bien el método de Quegan asume que la escena está dominada por una distribución de blancos para los cuales los términos de co-pol y cross-pol no se correlacionan (es decir,  $\langle S_{ii} S_{ij}^* \rangle \approx 0$  if  $j \neq i$ ), el método permite también calibrar regiones donde esto no se cumple, utilizando parámetros calculados usando estadísticas globales (ver apéndice B in [76])

<sup>4</sup>En este caso los CRs ubicados en la escena son triedros. Los CRs se utilizan para la calibración del sistema. La construcción básica utiliza tres paneles triangulares planos idénticos, típicamente construidos con un marco de aluminio y cubiertos con una malla de aluminio para reducir el peso [79].

dades  $|\alpha|^2$ ,  $|\beta|^2$ ,  $|\gamma|^2$ . La Figura 2.26 muestra la interpretación física de las componentes de Pauli.



**Figura 2.26:** Interpretación física de las componentes de Pauli.

a)  $|S_{hh} + S_{vv}|^2$  (dispersión de superficie), b)  $|S_{hh} - S_{vv}|^2$  (dispersión de doble rebote), c)  $|S_{hv}|^2$  (dispersión de volumen)

La descomposición de Pauli básicamente expresa la matriz de dispersión medida  $[S]$  en la denominada base de Pauli. Considerando una base convencional ortogonal lineal, es decir  $(h, v)$  en el caso general la base de Pauli está dada por las siguientes cuatro matrices de  $2 \times 2$  [80]:

$$[S]_a = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2.53)$$

$$[S]_b = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad (2.54)$$

$$[S]_c = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.55)$$

$$[S]_d = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (2.56)$$

Como se dijo anteriormente, en el caso de configuración monoestática por reciprocidad  $S_{hv} = S_{vh}$ , entonces la base de Pauli se reduce a:

$$\{[S]_a, [S]_b, [S]_c\} \quad (2.57)$$

Luego la matriz de dispersión medida  $[S]$  puede ser expresada de la siguiente manera:

$$[S] = \begin{pmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{hv} & S_{vv} \end{pmatrix} = \alpha[S]_a + \beta[S]_b + \gamma[S]_c, \quad (2.58)$$

donde

$$\alpha = \frac{S_{hh} + S_{vv}}{\sqrt{2}}, \quad (2.59)$$

$$\beta = \frac{S_{hh} - S_{vv}}{\sqrt{2}}, \quad (2.60)$$

$$\gamma = \sqrt{2}S_{hv}. \quad (2.61)$$

Y el vector de Pauli esta dado por:

$$k_p = [\alpha, \beta, \gamma]^T = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{hh} + S_{vv}, S_{hh} - S_{vv}, 2S_{hv}]^T. \quad (2.62)$$

Ademas, a la potencia total dispersada se la conoce como *SPAN* y está definida por:

$$SPAN = |S_{hh}|^2 + |S_{vv}|^2 + 2|S_{hv}|^2 = |\alpha|^2 + |\beta|^2 + |\gamma|^2. \quad (2.63)$$

En general,  $[S]_a$  se refiere a *dispersión de superficie* (conocido en inglés como odd-bounce o single-bounce scattering). Por lo tanto, el coeficiente complejo  $\alpha$  (en la ecuación (2.58)), representa la contribución de  $[S]_a$  a la matriz total de dispersión medida. En particular, la intensidad de este coeficiente, es decir,  $|\alpha|^2$ , determina la potencia dispersada por los objetivos caracterizados por un rebote simple.

La segunda matriz,  $[S]_b$  indica un mecanismo de dispersión caracterizado por doble rebote denominado *dispersión de doble rebote* (conocido en inglés como double-bounce o even-bounce scattering), ya que la polarización de la onda devuelta se refleja con respecto a la de la onda incidente, como sucede por ejemplo con una construcción. En ese caso el coeficiente complejo  $\beta$  (en la ecuación (2.58)), representa la contribución de  $[S]_b$  a la matriz total de dispersión medida y  $|\beta|^2$  representa la potencia dispersada por este tipo de blancos.

Finalmente, el mecanismo de dispersión representado por  $[S]_c$ , conocido como *dispersión de volumen* (conocido en inglés como volume scattering), se refiere a aquellos dispersores que pueden devolver la polarización ortogonal, de los cuales, uno de los mejores ejemplos es la dispersión de volumen producida por el dosel del bosque. Finalmente el coeficiente complejo  $\gamma$  (en la ecuación (2.58)), representa la contribución de  $[S]_c$  a la matriz total de dispersión medida y  $|\gamma|^2$  la potencia dispersada por este tipo de blancos.

### 2.7.3. Descomposición H-alpha

Utilizando el vector de Pauli (ec. 2.62) es posible escribir la matriz de coherencia para el campo dispersado a partir de la siguiente ecuación:

$$\langle |T| \rangle = \langle K_p K_p^T \rangle, \quad (2.64)$$

donde  $\langle \rangle$  indica el promedio multilook y el supraíndice  $T$  el complejo conjugado. La matriz de coherencia es siempre hermitiana y no-negativa, por lo que  $\langle |T| \rangle$  es diagonalizable. Es decir, sus sus autovalores y autovectores pueden ser calculados para obtener la forma diagonal de la matriz de coherencia. Luego, la matriz de coherencia puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\langle |T| \rangle = [U][\Sigma][U]^{-1} = \sum_{i=1}^3 \lambda_i u_i u_i^\dagger, \quad (2.65)$$

donde,  $[\Sigma]$  es una matriz diagonal 3x3 con elementos reales no-negativos dada por:

$$[\Sigma] = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix}, \quad (2.66)$$

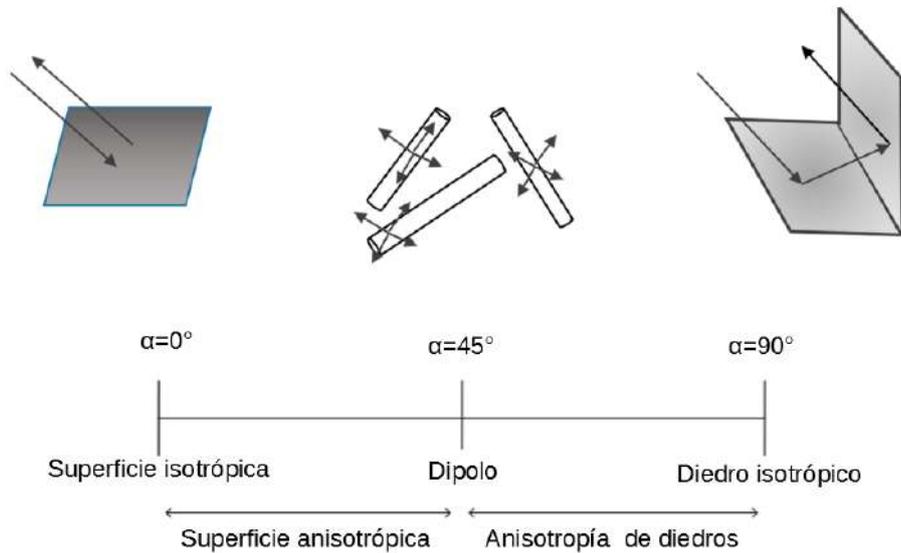
y  $[U] = [u_1, u_2, u_3]$  es una matriz unitaria que contiene los autovectores ortogonales  $u_1, u_2$  y  $u_3$ , donde  $u_i$  esta dado por:

$$u_i = (\cos\alpha_i e^{j\varphi_{1i}}, \cos\beta_i \sin\alpha_i e^{j\varphi_{2i}}, \sin\beta_i \sin\alpha_i e^{j\varphi_{3i}})^T. \quad (2.67)$$

Existen cuatro variables de interés, dos en función de los autovalores, denominados *entropía* ( $H$ ) y *anisotropía* ( $A$ ), y dos en función de los autovectores, los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$ . El parámetro  $\alpha$  es un indicador del tipo de mecanismo de dispersión y toma valores entre 0 y 90 grados, mientras que el parámetro  $\beta$  representa solamente una rotación del blanco a lo largo de la LOS, tomando valores entre 0 y 180 grados. Cada mecanismo de dispersión se puede describir a partir de la variación de  $\alpha$  (la interpretación de la variación de  $\alpha$  puede verse en la Figura 2.27) y  $\beta$  independientemente de  $\varphi_1, \varphi_2$  y  $\varphi_3$  que tienen en cuenta únicamente la relación de fase entre las componentes de  $K_p$  [81].

Asumiendo  $\beta = 0$ , tenemos que [71]:

- $\alpha = 0^\circ$ ,  $u_i = (1, 0, 0)$  representa el vector de dispersión de una superficie isotrópica (es decir, hh = vv);
- $\alpha = 45^\circ$ ,  $u_i = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 1, 0)$  representa el vector de dispersión de un dipolo, es decir dispersión de volumen;
- $\alpha = 90^\circ$ ,  $u_i = (0, 1, 0)$  y así es el vector de dispersión representativo de un diedro (es decir, hh = -vv).



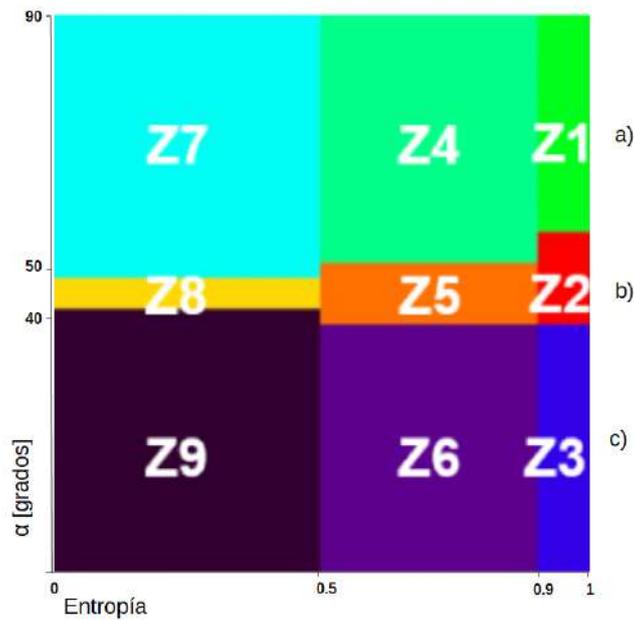
**Figura 2.27:** Representación esquemática de la interpretación del ángulo  $\alpha$  (tomado y modificado de [71]).

La entropía ( $H$ ), representa la aleatoriedad del mecanismo de dispersión, es decir el grado de desorden estadístico que caracteriza la dispersión del escenario observado. En este contexto,  $H = 0$  indica un mecanismo de dispersión simple (*isotropic scattering*) mientras que  $H = 1$  indica una mezcla aleatoria de mecanismos de dispersión que ocurren con la misma probabilidad. Por otro lado, la anisotropía ( $A$ ) corresponde a un parámetro complementario a la entropía. Este parámetro mide la importancia del segundo y tercer autovalor, indicando un

alto valor de anisotropía dos mecanismos de dispersión dominantes con igual probabilidad y un tercer mecanismo menos significativo, mientras que un valor de anisotropía bajo correspondería a un primer mecanismo de dispersión dominante y dos mecanismos secundarios no despreciables con igual importancia [82].

Luego, a partir del denominado plano H-alfa es posible identificar de forma macroscópica el tipo de mecanismos de dispersión dominante caracterizando la escena observada 2.28.

Utilizando el plano  $H/\alpha$ , el cual encuentra dividido en nueve zonas características, es posible clasificar el mecanismo de dispersión dominante. En la Figura 2.28 se muestran estas zonas, la 1,4 y 7 corresponden a dispersión múltiple, las 2, 5 y 8 a volumen, las 6 y 9 a superficie, la zona 3 es no factible.



**Figura 2.28:** Plano H-alpha plane y sus divisiones de acuerdo al mecanismo de dispersión.  
a) Z7-Z4-Z1: Entropía {baja, media, alta} dispersión de doble rebote, b) Z8-Z5-Z2: Entropía {baja, media, alta} dispersión de volumen, c) Z9-Z6-Z3: Entropía {baja, media, alta} dispersión de superficie.

### 3.1. El proyecto SARAT

EL proyecto SARAT fue desarrollado por la CONAE como un primer paso hacia el diseño del primer satélite argentino en banda L SAOCOM-1A. El proyecto SARAT incluyó un sensor SAR aerotransportado polarimétrico completo en banda L y campañas en tierra para obtener mediciones in situ, útil para evaluar la efectividad de los datos SAR para la recuperación de parámetros del suelo.

El sistema estuvo instalado en un Beechcraft Super King Air B-200 de la La Armada de la República Argentina (ARA), el cual se muestra en la Figura 3.1 y la antena puede verse en la Figura 3.2. El rango nominal de altitudes de vuelo fue de entre 4000 y 6000 metros sobre la superficie de la Tierra [83].

La misión SARAT estuvo operativa entre los años 2006 a 2014, y principalmente voló sobre sitios agrícolas como CONAE, INTA Manfredi-Córdoba, Bellville-Coórdoba, Bahía Blanca-Buenos Aires, entre otros.

Básicamente la construcción del SARAT tuvo las siguientes finalidades:

- validaciones tecnológicas;
- desarrollo de aplicaciones;
- banco de prueba de nuevos desarrollos;
- testeo de concepto de antena;
- evaluación de archivo de datos y métodos de procesamiento.

Asimismo, se tuvo en cuenta los siguientes requerimientos principales:

- misma banda de frecuencias que el SAOCOM;

### 3.1 EL PROYECTO SARAT

- mismo ancho de banda;
- potencia equivalente disponible;
- rango dinámico de señal extendida;
- antena SAOCOM a escala (mismo diseño).

Las principales características del sistema SARAT se encuentran resumidas en la Tabla 3.1.

Frecuencia central	1.3 GHz
Ancho de banda del chirp	38 MHz
Duración del pulso	10 $\mu$ s
PRF	250 Hz
Frecuencia de muestreo ( $f_s$ )	50 MHz
Angulo de apuntamiento de la antena	45°
Medidas de la antena	1.8 x 0.30 m
Velocidad de vuelo	100 m/s
Polarización	Quad-Pol
Angulo de mirada	20°-70°
Pisada	12 Km
Resolución en acimut	0.9 m
Resolución en rango	3.9 m
Rango nominal de altura de vuelo	4-6 Km

**Tabla 3.1:** Características del sistema SARAT.



**Figura 3.1:** Avión de la ARA [84].

#### 3.1.1. SET de Datos

CONAE tiene un catálogo para uso interno <sup>1</sup> donde, entre otros, se almacenan datos de SARAT. En particular, dentro del conjunto de datos SARAT disponible se seleccionaron

<sup>1</sup>Para obtener el acceso a los datos el grupo de trabajo firmó la documentación correspondiente a las Políticas de uso de los datos SARAT



**Figura 3.2:** Antena del sistema SARAT [84].

ocho tracks adquiridos por el sistema, sobre el mismo escenario, para evaluar la posibilidad de aplicar técnicas interferométricas y realizar análisis polarimétricos.

En el catálogo figuran las líneas de vuelo, metadatos, y quicklooks de las imágenes correspondientes. Se utilizó esa información para construir conjuntos de imágenes que potencialmente constituyan pares interferométricos. Los criterios a tener en cuenta fueron: área observada, ángulo de vista y línea de base. Luego, los ocho tracks seleccionados en este trabajo de tesis se listan en la Tabla 3.2 y por simplicidad en adelante serán indicados por su ID.

Tracks	Track ID	Fecha
W552T22379619	19	23-3-2010
W552T22320222	22	23-3-2010
W552T22207329	29	23-3-2010
W552T22149833	33	23-3-2010
W552T21976643	43	23-3-2010
W552T21855350	50	23-3-2010
W552T21808753	53	23-3-2010
W552T14758669	69	22-3-2010

**Tabla 3.2:** Tracks provistos por CONAE.

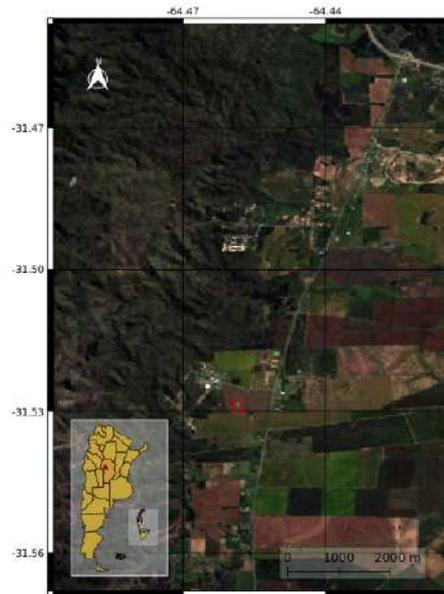
El set de datos seleccionado cubre un área que contiene el Centro Espacial Teófilo Tabanera (CETT) localizado en la Provincia de Córdoba, Argentina (Figura 3.3) y posee dos CRs, el CR\_CET\_030 con coordenadas:  $(-31,51791385, -64,45020281)$  y el CR\_CET\_031 con coordenadas:  $(-31,52866137, -64,45831553)$ . Uno de los CR presente en el área se utilizó (se marca con un rectángulo rojo en la Figura 3.3) para entender un efecto encontrado en las imágenes resultantes y en el proceso de calibración para fines polarimétricos, ambos aspectos se explican en la Sección 4.

Los datos seleccionados, denominados Raw Data Annotated (ARD), y provistos por CONAE representan un producto de nivel 0 y fueron obtenidos a partir del stream de datos binarios (RAW Data). Estos archivos contienen las señales I/Q muestreadas por el instrumento con cuatro archivos que corresponden a una única combinación de polarizaciones de transmisión y recepción:  $hh, hv, vv$  ó  $vh$ .

La nomenclatura de los datos tiene la forma  $WxxxTyyyyyyy.tr.raw$ , donde  $WxxxTyyyyyyy$

identifica la adquisición,  $t$  se refiere a transmisión ( $h$  ó  $v$ ) y  $r$  a recepción ( $h$  ó  $v$ ). El formato del dato es de tipo byte, con dos bandas (I y Q) y el tipo de archivo corresponde a Banda Intercalada por Píxel (BIP).

Ademas, cada uno de estos datos crudos esta acompañado de un archivo en formato ASCII de fácil lectura con la información necesaria para describirlo.



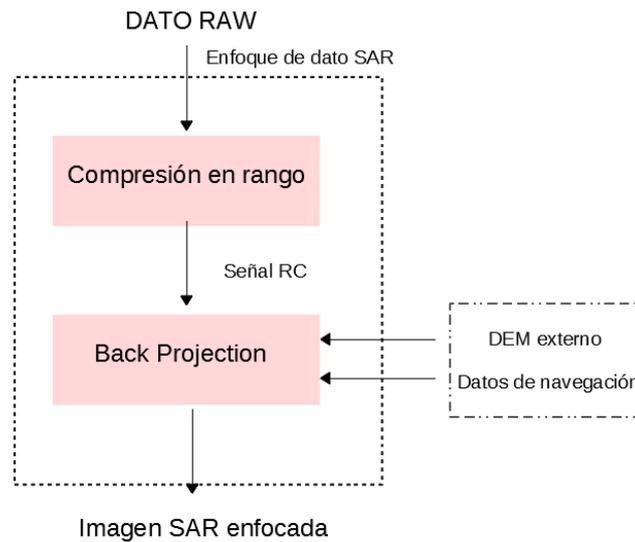
**Figura 3.3:** Sitio de estudio, Córdoba Argentina. El rectángulo rojo muestra un CR ubicado en el área de estudio.

Los datos inerciales fueron aportados por CONAE. Los datos GPS/inerciales se encuentran en archivos de formato ASCII en directorios denominado IMU. Estos archivos contienen información de la posición y de la actitud (yaw, pitch y roll) de la plataforma correspondiente a cada adquisición.

## 3.2. Enfoque de imágenes SARAT

Como se explicó en la sección 2.2.3, el primer paso para obtener una imagen con una resolución aceptable, para la mayoría de las aplicaciones utilizando imágenes SAR, consiste en aplicar técnicas de compresión de pulso o enfoque, partiendo del dato RAW y obteniendo como resultado una imagen enfocada (SLC).

El esquema de procesamiento se encuentra sintetizado en el diagrama de bloque de la Figura 3.4.



**Figura 3.4:** Diagrama de bloque sintetizando el procesamiento general.

Como primer paso entonces se llevó a cabo la compresión en rango, para lo cual se desarrolló un código utilizando Interactive Data Language (IDL). El código tiene como entradas el dato RAW y dos archivos *.txt*. Estos archivos *.txt* tienen en cuenta los parámetros del sensor y los parámetros de procesamiento.

En la Tabla 3.3 se listan los parámetros y valores que se tuvieron en cuenta como entrada en el archivo denominado *parámetros del sensor* para realizar la compresión en rango.

Parámetro	Valor
Velocidad de la luz, $c$	$2,9979246e8m/s$
Longitud de onda, $\lambda$	$0,23060958m$
PRF	$250Hz$
Pixel spacing en rango, $dr$	$2,9979246m$
Ancho de banda del chirp, $B_{chirp}$	$38MHz$
Ancho de banda en acimut	$111,111Hz$
Frecuencia de muestreo, $f_s$	$50MHz$
Rango cercano	$4460,9118m$

**Tabla 3.3:** Parámetros del sensor.

Por otro lado, el archivo denominado *parámetros de procesamiento* tiene en cuenta los parámetros de la imagen, el tamaño en rango y en acimut, la cantidad de muestras en acimut a focalizar, la polarización, el nombre del archivo de entrada y además, el usuario puede establecer el ancho de banda de procesamiento, tanto en rango como en acimut, un muestreo inferior al de los datos si lo quisiera, la estimación de la variación de frecuencia Doppler a partir de los datos o el uso de la frecuencia Doppler proporcionada por un archivo externo.

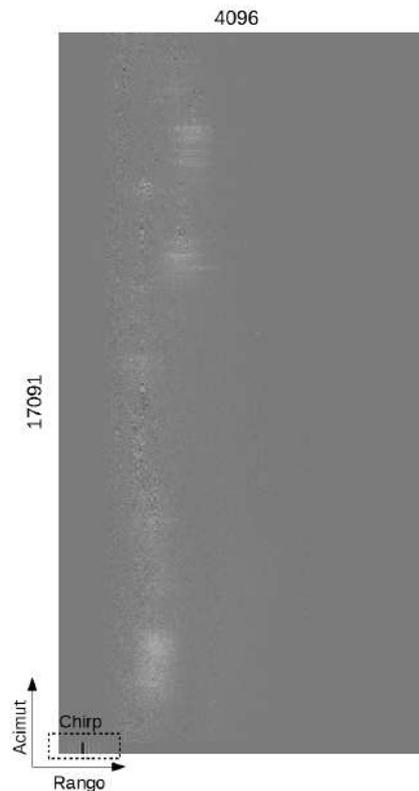
El resultado final es una imagen comprimida en rango y un informe donde se detalla el procesamiento realizado.

Por simplicidad el procesamiento mostrado en esta tesis corresponde al track 19 y para el cual se cuenta con los datos RAW en sus cuatro polarizaciones ( $hh, hv, vv$  ó  $vh$ ), con un archivo en formato ASCII con la información necesaria y los datos GPS/inerciales. Los datos

RAW cuentan con 4096 muestras en rango y 17091 muestras en acimut, de las cuales las primeras 250 muestras corresponden al chirp (ver Figura 3.5).

El código desarrollado, como se dijo anteriormente, permite reducir el ancho de banda y filtrar la señal utilizando una ventana de *Hamming*<sup>2</sup> tanto en rango como en acimut.

En este caso se decidió no aplicar el filtrado a los datos y se procesaron un total de 16384 muestras en acimut y 4096 muestras en rango.



**Figura 3.5:** Dato RAW relevante al track 19, polarización hh.

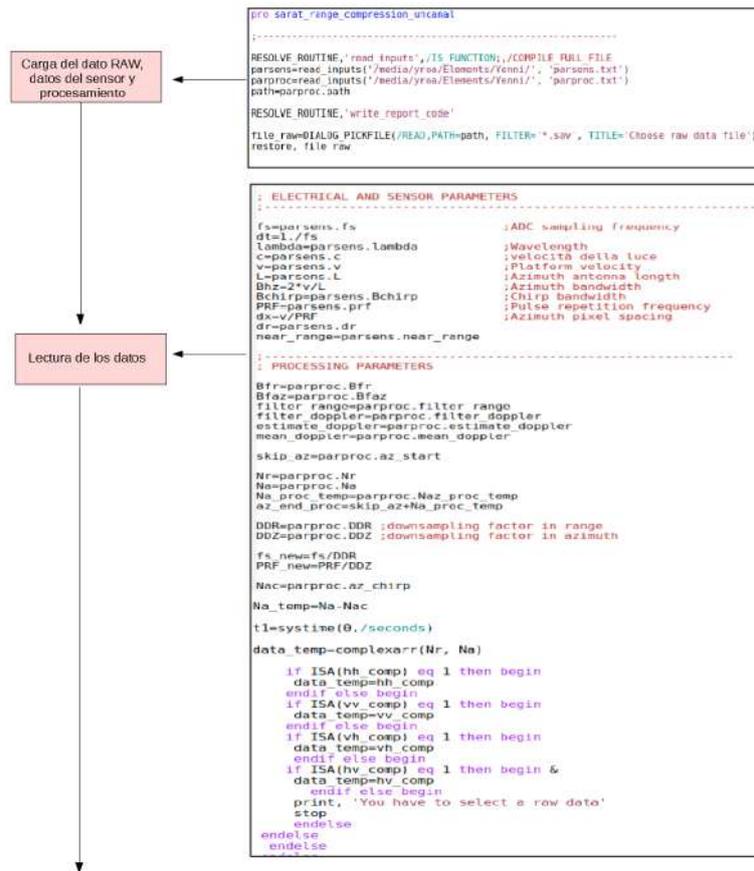
En las Figuras 3.6 y 3.7 se muestra por simplicidad una parte del código IDL para comprimir en rango. En la Figura 3.6 se realiza la lectura del dato RAW a comprimir así como los archivos que contienen los datos del sensor y procesamiento para realizar posteriormente la lectura de los mismos.

Luego en la Figura 3.7 se realiza la extracción el chirp que emitió el radar y que se encuentra presente en el dato RAW y se remueve la Componente Continua (DC) presente tanto en el chirp como en el dato RAW, luego se calcula la DFT de ambas señales.

Una vez en el dominio de la frecuencia, se realiza la multiplicación de cada línea de rango de la señal RAW por el conjugado del chirp, finalmente realizando la transformada inversa de Fourier discreta (IDFT) para regresar al dominio del tiempo. La salida, será entonces el dato comprimido en rango (señal RC).

Una vez realizada la compresión en rango, el siguiente paso consistió en aplicar el algoritmo BP para realizar la compresión en acimut y obtener así el dato totalmente enfocado, es

<sup>2</sup>Cuando se realiza un filtrado en vez de truncar en forma abrupta una señal con una ventana rectangular o función cajón, podemos multiplicarla por otras ventanas más suaves que se atenúen más gradualmente en los bordes, un ejemplo es la ventana de Hamming cuya expresión está dada por la ecuación  $Hamm = 0,54 + 0,46 * \cos(2 * \pi * f / B)$ , donde  $f$  es el vector de frecuencias y  $B$  el ancho de banda.



**Figura 3.6:** Lectura del dato RAW a comprimir, parámetros del sensor y de procesamiento.

decir la imagen SLC, como se muestra en el diagrama de bloque de la Figura 3.4.

Para realizar la compresión en acimut es necesario contar con un DEM externo e información de la posición de la antena y el *vector de apuntamiento*. El vector de apuntamiento se refiere a la dirección en la cual el blanco es visto por la antena con su máxima ganancia y el mismo puede ser calculado utilizando los ángulos de actitud aportados por la IMU (roll, pitch y yaw) o estimando la variación del centroide Doppler. A su vez, el centroide Doppler se puede obtener a partir el ángulo squint (ver ecuación 2.29) o puede ser estimado a partir de los datos SAR. En este caso se realizó un ajuste utilizando una función polinomial a los datos SAR para estimar la variación del centroide Doppler y obtener la dirección del vector de apuntamiento.

Es decir, el algoritmo BP requiere como input coordenadas de puntos en el espacio (3D, xyz) y restituye el dato enfocado en correspondencia de esos puntos. La grilla de salida de una imagen SAR es bidimensional, por lo que para el caso de aerotransportado necesitamos un modelo tridimensional de la escena observada. En este caso, la tercera dimensión es la altura, necesaria para saber dónde se encuentran los blancos y poder evaluar sus distancias desde el radar, a lo largo de la trayectoria. Para ello, se ha utilizado un DEM STRM de 30 mts, es decir para obtener las coordenadas 3D de los puntos de la escena bajo observación. A partir de estas coordenadas y del ángulo squint local (disponible en los ángulos de actitud proporcionados por la IMU), se puede evaluar para cada punto las coordenadas de acimut y rango de cada blanco. Estos dos valores permiten colocar el blanco en la grilla de radar (es decir, acimut/rango).

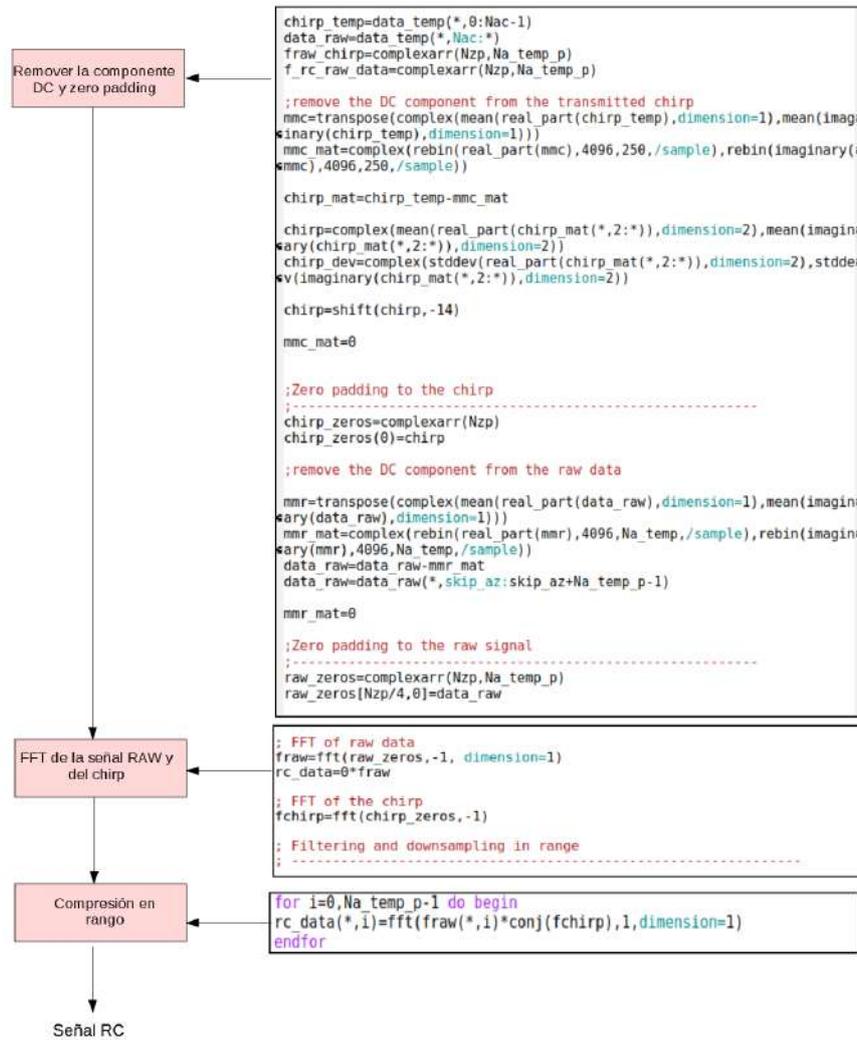


Figura 3.7: Remoción de la componente continua, cálculo de la DFT y compresión en rango.

Otro aspecto a tener en cuenta es que tanto los datos del GPS como del DEM deben estar sincronizados con el dato SAR. Por ejemplo, el DEM utilizado se encuentra en coordenadas Norte-Sur y se debe proyectar para llevarlo a rango-acimut. En la Figura 3.8 se puede ver el DEM utilizado, el cual corresponde como se dijo anteriormente al DEM STRM de 30 mts y que fue sincronizado con el dato SAR.

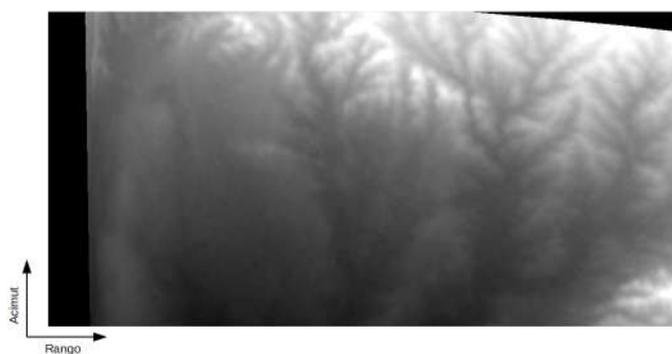
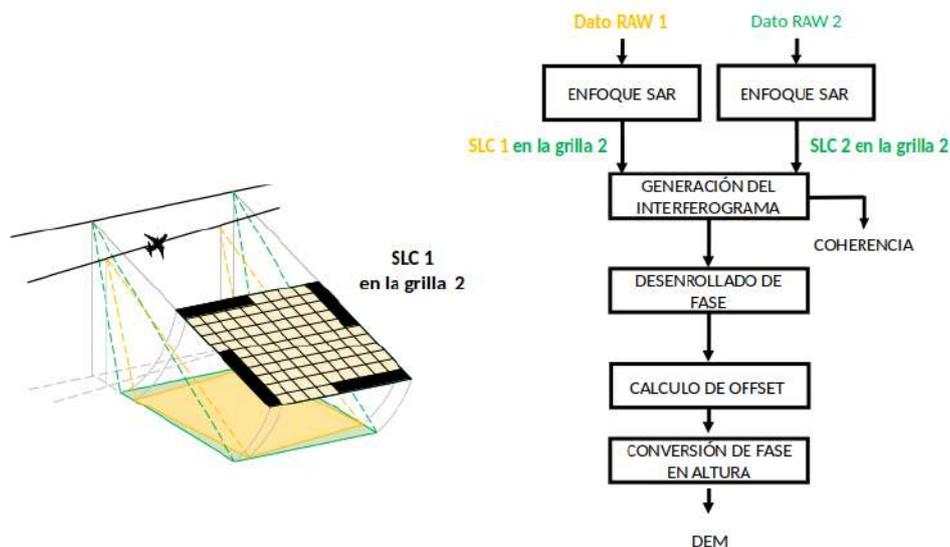


Figura 3.8: DEM STRM de 30 mts de la zona de estudio en geometría SAR.

### 3.3. Inteferometría utilizando imágenes SARAT

Para la selección de los pares con potencial interferométrico se tuvo en cuenta como criterios el área observada, el ángulo de vista, y línea de base. Los tracks presentados en la Tabla 3.2 resultaban en una primer instancia ser potencialmente útiles, de acuerdo a este criterio, para la construcción de pares interferométricos.

Resulta importante enfatizar que que este trabajo se utilizó el algoritmo en el dominio del tiempo BP para enfocar los datos del SARAT. Esto nos permite generar imágenes SLC en una geometría de procesamiento (es decir, una grilla de procesamiento o salida) que puede ser, en general, diferente de la geometría de adquisición (generalmente denominada ‘geometría de radar’). De acuerdo a esto, cualquier dato crudo (dato RAW) puede ser enfocado utilizando una grilla arbitraria (por ejemplo, una grilla geográfica). En particular, durante la pasantía realizada en el Instituto IREA-CNR, se decidió enfocar los datos del SARAT utilizando una grilla común, definida por las direcciones rango-acimut de un track en particular. En otras palabras, se procesaron los datos en una grilla de salida lo más cerca posible a la grilla de radar de la adquisición relevante para un track en particular (track 19). Es importante tener en cuenta que aquí se utiliza la expresión ‘lo más cerca posible’ dado que en el caso de adquisiciones con aerotransportado la grilla de radar no se encuentra uniformemente espaciada debido a la presencia de errores de movimiento, mientras que siempre utilizamos una grilla (espacialmente) uniformemente espaciada. Por cierto, la elección de utilizar una grilla de procesamiento común para todas las imágenes nos permitiría evitar el paso de co-registro con la condición de que los errores de movimiento residuales (es decir, los errores de movimiento que no se compensan durante el paso de enfoque) resulten ser no ‘severos’ (este término se explicará a continuación). En este caso, el el flujo de procesamiento convencional InSAR mostrado en la Figura 2.24 de la Sección 2.6 se vería modificado como se muestra en el diagrama de bloque de la Figura 3.9.



**Figura 3.9:** Procesamiento InSAR comenzando por enfocar el dato RAW utilizando técnicas en el dominio del tiempo.

Con respecto a esto, se recalca que los errores de movimiento residuales en el enfoque de datos SAR aerotransportados se deben sustancialmente a la siguientes tres causas:

1. errores que se producen en el DEM externo empleado para enfocar los datos SAR

- aerotransportados (es decir, errores debido a la inexactitud del DEM externo utilizado);
2. errores que se producen en los datos de navegación (es decir, errores debido a la inexactitud del sistema de navegación utilizado);
  3. errores introducidos por las aproximaciones involucradas en las estrategias MoCo (por ejemplo, la CBA).

En este caso, únicamente los errores 1 y 2 podrían estar presentes dado que los datos fueron enfocados a través del algoritmo BP en el dominio del tiempo el cual no realiza ni ninguna aproximación.

El impacto de estos errores suele ser cada vez mayor a medida que aumenta la frecuencia de operación; además, depende de la topografía del área iluminada y de las desviaciones de la trayectoria. Un análisis cuantitativo del impacto de los errores de movimientos residuales en el enfoque de imágenes SAR puede encontrarse en [85] donde los autores muestran que errores lineales no compensados causan un shift en la posición del blanco con respecto a la posición real en la imagen SAR enfocada, mientras que los errores cuadráticos resultan en un desenfoque del blanco. Por otro lado, además de estos efectos no deseados relacionados con la amplitud de la SLC final, los errores de movimiento no compensados (tanto lineales como cuadráticos) producen también errores de fase en la imagen SLC final. Los errores de fase residual (que se vuelven no despreciables cuando son comparables a la longitud de onda utilizada) son más críticos que los de amplitud (que en cambio se vuelven no despreciables cuando son comparables a la resolución geométrica del sistema). La entidad de todas estas aberraciones depende de diferentes parámetros, como la geometría de adquisición, la magnitud de los errores residuales y la longitud de onda operativa. En términos generales, se pueden clasificar los errores de movimiento residuales en función de su impacto en las aplicaciones interferométricas como:

1. “despreciables”: ambas aberraciones, de fase y amplitud, pueden considerarse despreciables.

En este caso, un par de imágenes SLC enfocadas sobre la misma grilla de salida parecen estar ya registradas. Por ejemplo, este es el caso relevante para los resultados presentados en [86] donde los autores utilizaron un sistema de navegación muy preciso (el Applanix POS-AV510), y mostraron resultados de interferometría diferencial obtenidos sin aplicar ningún paso de co-registración adicional al logrado solo con la información “geométrica” disponible (es decir, el DEM disponible y la navegación datos) o cualquier otro enfoque de procesamiento adicional para preservar la fase, incluso cuando se consideraron datos de frecuencia relativamente alta (banda X).

2. “moderado”: aberraciones de fase no despreciables pueden ser observadas en las imágenes SLC resultantes.

En este caso, un par de imágenes SLC enfocadas sobre la misma grilla de salida parecen estar ya co-registradas. Esto significa que los errores residuales de amplitud son despreciables, mientras que los errores residuales de fase no lo son. Este es el caso mostrado en [87] donde las imágenes SLC relevantes a adquisición desde helicóptero utilizando la banda P y procesados sobre una grilla de salida común resultaron estar ya co-registradas. En este caso, sin embargo, se requirieron de procesamientos adicionales para obtener interferogramas de mayor calidad.

3. “severos”: aberraciones tanto en amplitud como en fase se pueden observar en las imágenes SLC resultantes.

En este caso, debido a grandes errores de movimiento lineales no compensados la imagen esclava exhibe un shift local con respecto a la imagen maestra. Por lo tanto, dos imágenes SLC en un par interferométrico resultan no co-registradas incluso cuando los datos crudos fueron enfocados sobre una grilla común. En consecuencia, un paso de co-registración, basado en las propiedades de la señal (por ejemplo en su correlación, como el utilizado en este trabajo como se verá en la Sección 4.2 para el par 19-22), debió ser utilizado para co-registrar las imágenes SLC. Posteriormente, se podrían utilizar más enfoques de procesamiento de señales para mejorar aún más la calidad de los interferogramas.

Este es el caso de los resultados interferométricos obtenidos con los datos del SARAT y mostrados en este trabajo de tesis. De hecho, debido a la fuerte inexactitud de los datos de navegación, las imágenes SLC exhiben desalineaciones relativas aunque se han enfocado utilizando la misma grilla. Por lo tanto, para propósitos interferométricos un paso de procesamiento adicional con respecto a aquellos mostrados en [86] (errores residuales despreciables) o [87] (errores residuales moderados) resultan necesarios, como por ejemplo [88], [89] y [90].

## 3.4. Polarimetría

### 3.4.1. Calibración de imágenes SARAT

Como se dijo anteriormente uno de los requerimientos críticos de los sistemas de radar polarimétricos es la necesidad de calibración. Entonces, para evaluar la necesidad de calibración de las imágenes del SARAT el primer paso consistió en evaluar si se cumplían algunas propiedades de la dispersión polarimétrica de los conocidos como *canonical objects*<sup>3</sup>.

Estas propiedades pueden ser utilizadas como reglas generales para entender si los datos SLC requieren ser sometidos a procesos de calibración. En particular, se consideran las siguientes reglas para evaluar la necesidad de calibrar las imágenes del SARAT. Las mismas se listan a continuación:

1. La fase del coeficiente de correlación sobre el trihedral CR localizado en el área de estudio (ver Figura 3.3) debería ser cercano a cero [75]. Esto significa que:

$$\arg \left( \frac{\langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle}{\sqrt{\langle |S_{hh}|^2 \rangle \langle |S_{vv}|^2 \rangle}} \right)_{CR} \approx 0^\circ. \quad (3.1)$$

2. La diferencia de fase entre el CR (single-bounce scattering) localizado en el área y (ver Figura 3.3) y construcciones (double-bounce scattering) como en este caso los edificios de CONAE, debe ser aproximadamente 180° [92]. Esto significa que:

$$\left[ \arg \left( \frac{\langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle}{\sqrt{\langle |S_{hh}|^2 \rangle \langle |S_{vv}|^2 \rangle}} \right)_{CONAE} - \arg \left( \frac{\langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle}{\sqrt{\langle |S_{hh}|^2 \rangle \langle |S_{vv}|^2 \rangle}} \right)_{CR} \right] \approx 180^\circ. \quad (3.2)$$

3. El ratio entre  $S_{hv}$  y  $S_{vh}$ , en promedio, debería ser igual a 1.

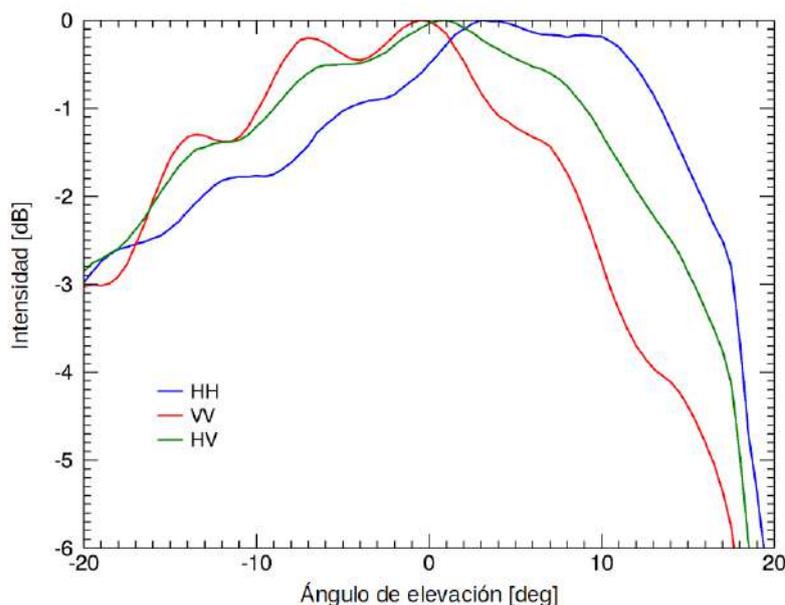
Los resultados de la evaluación de estas reglas a las imágenes SARAT pueden verse en la Sección 4.3.1.

Por otro lado, también resulta necesario el conocimiento de los patrones de antena, los cuales generalmente son medidos en cámaras anecoicas, necesarios para corregir las características de la antena visibles en la imagen.

En el caso del SARAT, los patrones de antena fueron estimados sobre una zona de bosques en la provincia de Chaco, Argentina. El hecho de elegir una zona de bosques tiene que ver con que el fenómeno de dispersión resulta ser bastante uniforme en bosques ya que corresponden a dispersión en volumen, es decir la respuesta resulta únicamente dependiente de la antena e independiente de los blancos.

En la Figura 3.10 se pueden ver los patrones de antena estimados para los diferentes canales.

<sup>3</sup>En polarimetría, el fenómeno físico de scattering puede ser descripto por los denominados *canonical objects*, los cuales pueden ser caracterizados a partir de co-pol y cross-pol scattering. Ejemplos de canonical objects ideales (es decir material conductor perfecto y sin dispersión de bordes) son: CRs triédros, reflectores de placas, CRs diédros, reflectores esféricos, etc. Todos ellos pueden ser caracterizados a partir de co-pol y cross-pol scattering [91].



**Figura 3.10:** Patrones de antena estimados para los diferentes canales del sistema SARAT.

### 3.4.2. Implementación del algoritmo de Quegan

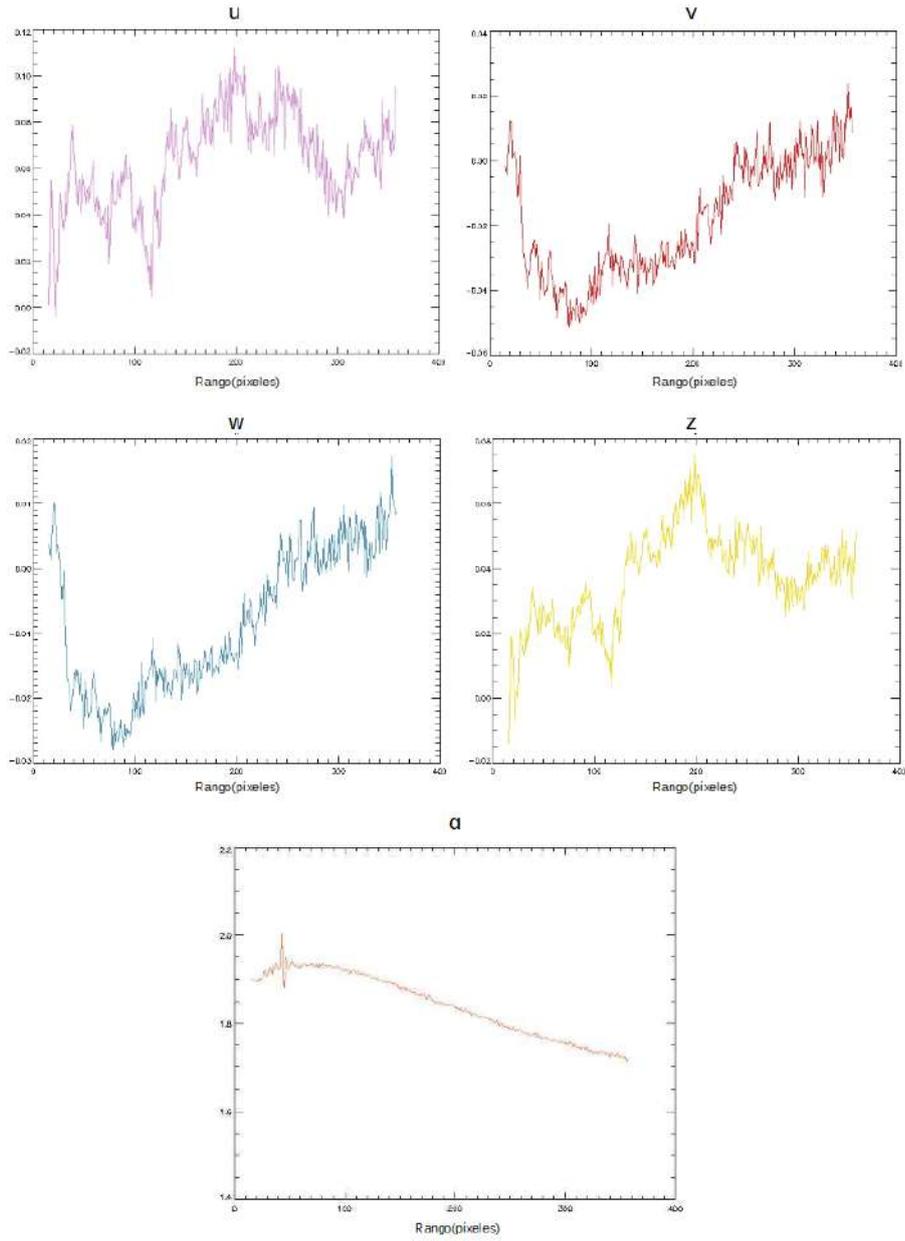
Una vez realizada la corrección por patrón de antena se desarrolló un código en IDL del algoritmo de Quegan para calibrar las imágenes SLC por efecto de cross-talk y channel imbalance.

Se parte de la matriz observada, es decir los datos SLC corregidos por patrón de antena, y se calcula la matriz de covarianza dada por  $C = \langle OO^\dagger \rangle$  para obtener los parámetros  $u, v, w, z$  y  $\alpha$  siguiendo el desarrollo de la Sección 2.7.1.1 y así obtener las imágenes SLC corregidas por efecto de cross-talk.

Dado que se tiene como valores observados a  $O_{hh}, O_{hv}, O_{vh}$  y  $O_{vv}$ , la matriz de covarianza resultante es ser una matriz de 4x4, es decir que contiene 16 elementos. Sin embargo, basta con calcular únicamente los elementos de la diagonal y los superiores a ella (un total de 10 elementos) ya que los inferiores a la diagonal no son más que los elementos superiores conjugados. La variación de los parámetros con el rango puede verse en la Figura 3.11.

Una vez realizado esto se procede a calcular el channel imbalance. Para ello se tomó un recorte de la imagen que contiene al CR ubicado en el área de estudio y se estimó la magnitud y la fase del channel imbalance utilizando ecuación 2.53 de la Sección 2.7.1.1. Finalmente se obtuvo el valor de  $k$ ,  $k = |k| * \exp(j * \arg(k))$  calibrando las imágenes por efecto de channel imbalance de la siguiente manera:

$$\hat{S}_{hh} = \frac{S_{hh}^{xt}}{(k^2)}, \quad \hat{S}_{hv} = \frac{S_{hv}^{xt}}{k}, \quad \hat{S}_{vv} = S_{vv}^{xt}. \quad (3.3)$$



**Figura 3.11:** Variación de los parámetros  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ,  $z$  y  $\alpha$  con el rango.

### 4.1. Focalización de los datos SARAT

El enfoque de los datos del SARAT se llevó a cabo siguiendo el esquema de procesamiento mostrado en la Figura 3.4 de la Sección 3.2.

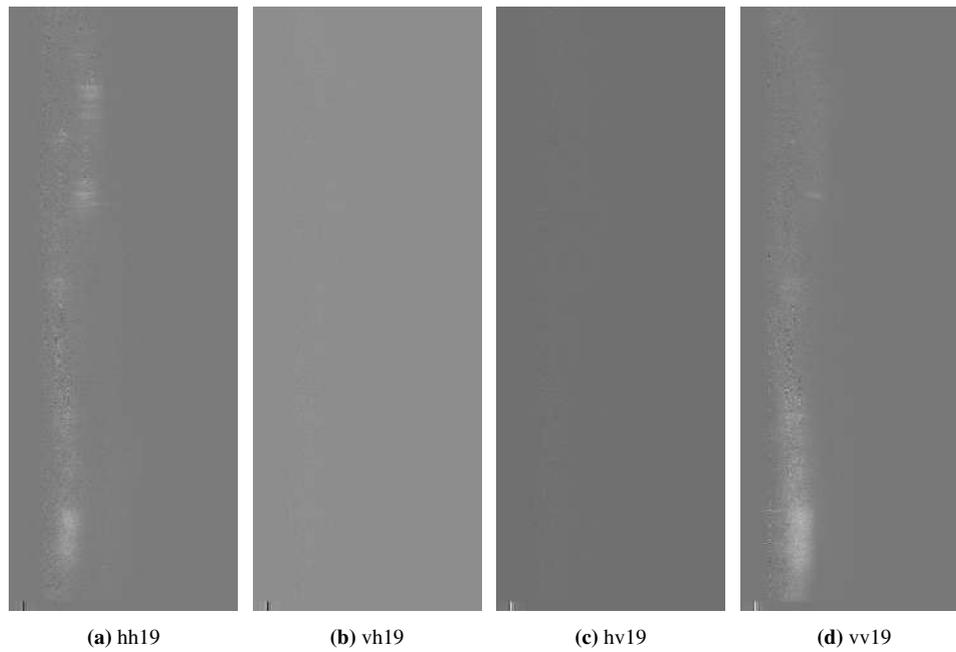
Con el objetivo de poder visualizar todo el flujo de procesamiento, en primer lugar se muestran los datos RAW, que corresponden a los datos de entrada para iniciar el enfoque en rango. En la Figura 4.1 se muestran los datos RAW correspondiente a los cuatro canales de polarización relevantes al track 19. Por supuesto es claro que si miramos estas imágenes no aportan ninguna información de la escena de interés.

Una vez realizada la compresión en rango los resultados obtenidos para los cuatro canales de polarización relevantes al track 19 se muestran en la Figura 4.2, es importante notar que estos revelan únicamente información de la distancia relativa entre el radar y cualquier punto sobre la escena.

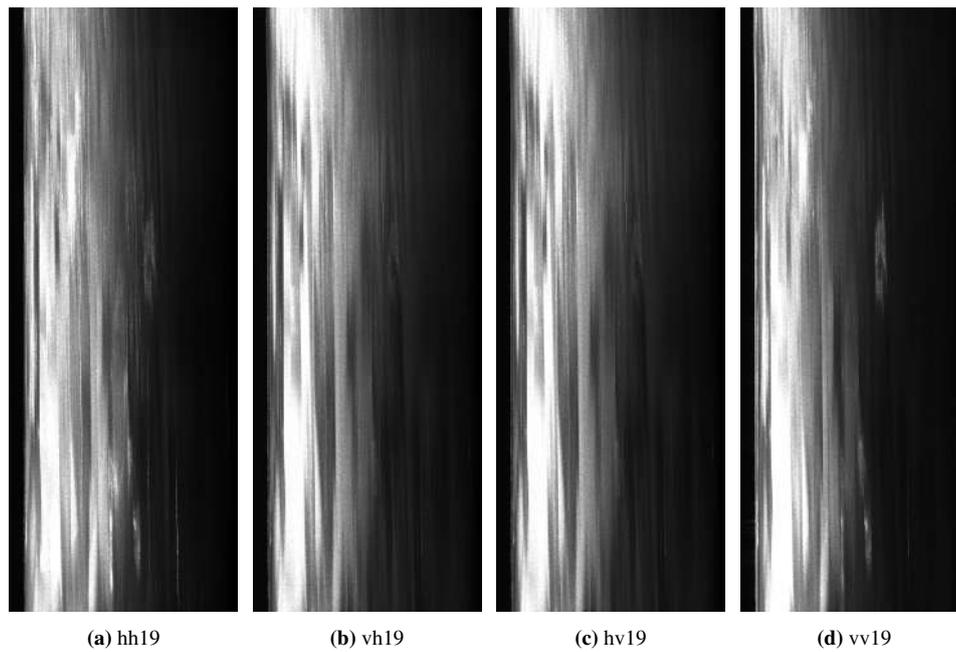
Finalmente en las Figuras 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6 se muestra las imágenes totalmente enfocadas, es decir las imágenes SLC, obtenidas luego del procesamiento completo. Al igual que para los datos RAW y los datos comprimidos en rango, aquí se muestra por simplicidad únicamente para cada polarización relevante al track 19. Por otro lado, en la Tabla 4.1 se muestra la configuración principal del procesamiento para las imágenes consideradas del SARAT.

Resolución en acimut	3 m
Resolución en rango	3.95 m
Pixel spacing en rango	3 m
Pixel spacing en acimut	0.4 m
Cobertura en rango	10 Km
Cobertura en acimut	5 Km

**Tabla 4.1:** Configuración principal del procesamiento para las imágenes del SARAT consideradas.



**Figura 4.1:** Dato RAW adquirido en Marzo de 2010 por el SARAT, relevante al track 19 y para cada canal de polarización.



**Figura 4.2:** Dato comprimido en rango adquirido en Marzo de 2010 por el SARAT, relevante al track 19 y para cada canal de polarización.



**Figura 4.3:** Imagen SLC-19 hv resultado del enfoque utilizando el algoritmo BP.



**Figura 4.4:** Imagen SLC-19 vh resultado del enfoque utilizando el algoritmo BP.



**Figura 4.5:** Imagen SLC-19 hh resultado del enfoque utilizando el algoritmo BP.



**Figura 4.6:** Imagen SLC-19 vv resultado del enfoque utilizando el algoritmo BP.

### 4.1.1. Problemas relacionados con los datos SARAT

Para realizar el enfoque de datos SAR aerotransportado es necesario conocer la actitud y la posición del sensor en cada momento. Esta información es utilizada para evaluar la distancia blanco-radar para cada blanco ubicado en la escena cuya posición es proporcionada por el DEM externo disponible.

A su vez, esto requiere la disponibilidad de datos de navegación precisos, conocimiento preciso del *lever arm*<sup>1</sup> de la antena y el conocimiento preciso del ángulo de orientación de la IMU.

La actitud de la antena nos permite calcular la variación Doppler durante la adquisición de los datos. Uno de los objetivos de este trabajo consiste en evaluar la posibilidad de obtener productos interferométricos con el conjunto de datos seleccionado (ver objetivos en la Sección 1). Para hacer esto, la geometría de adquisición de las imágenes que forman el par interferométrico considerado debe ser lo más similar posible. Por ejemplo, la variación entre las frecuencias de los centroides Doppler en las dos imágenes SAR es el resultado de una diferencia en los ángulos squint, que a su vez depende de las diferentes variaciones de actitud que afectan al avión durante la adquisición, y es responsable de ruido en la fase interferométrica debido a la denominada decorrelación Doppler [9].

Si bien observando las Figuras 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6 las imágenes SLC de amplitud obtenidas aparentan estar bien enfocadas, si comparamos desde un punto de vista cualitativo, dos imágenes SLC adquiridas en la misma fecha y sobre la misma escena, resulta evidente que nos encontramos en presencia de problemas de desenfoco (ver en los círculos rosa de la Figura 4.7).

---

<sup>1</sup>Lever arm se refiere a la distancia entre los dos sistemas, SAR y GPS. Para más información consultar la Sección 2.4.1.1



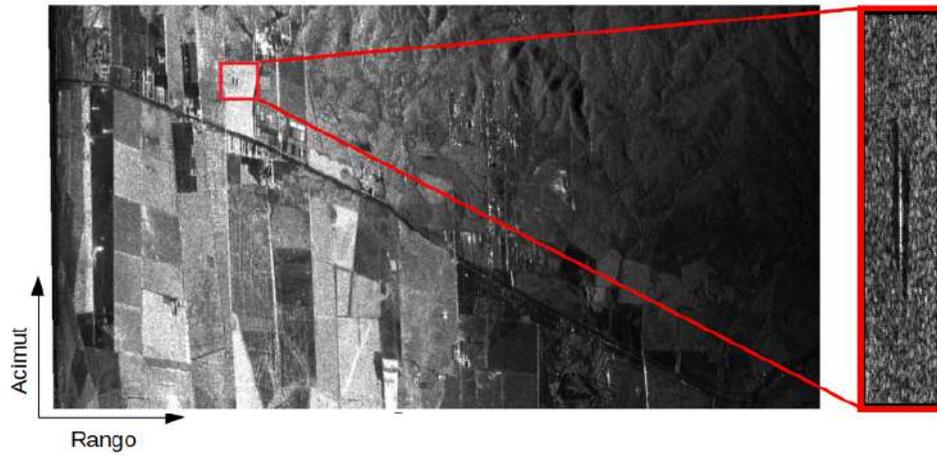
**Figura 4.7:** Panel superior: imagen SLC (polarización hh) relevante al track 19 - Panel inferior: imagen SLC (polarización hh) relevante al track 29.

Desde un punto de vista cuantitativo analizando las imágenes SLC en correspondencia con el CR ubicado en el área de estudio (como se señaló en la Sección 3.1.1, Figura 3.3), se observó un ensanchamiento de la *función de dispersión de puntos*. Este efecto resultó ser independiente de la polarización de las señales transmitidas y recibidas.

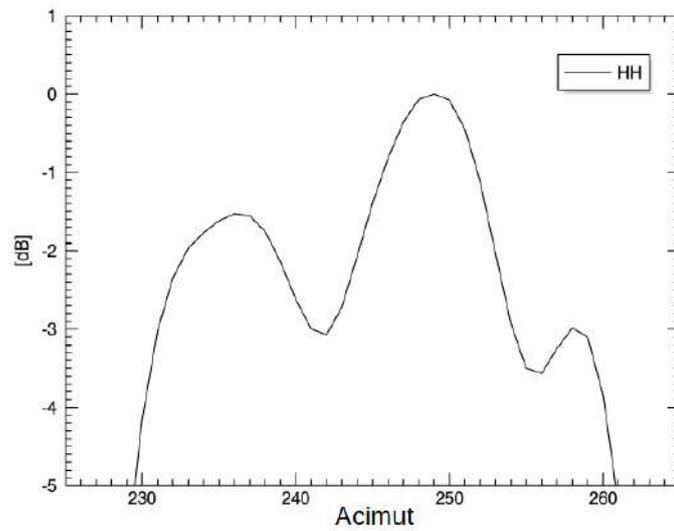
Un ejemplo de este efecto se muestra en la Figura 4.8, donde se representa la imagen SLC (polarización hh) relevante al track 19 (Figura 4.8a), junto con su corte en acimut en correspondencia con el CR (Figura 4.8b).

En la Figura 4.9 se observa la independencia con la polarización mencionado anteriormente en el efecto de ensanchamiento de la respuesta sobre el CR. Además, se pudo observar un desplazamiento entre las dos polarizaciones consideradas, el cual surge del cambio de tiempo entre la transmisión (y la recepción) de las señales polarizadas h y v.

## 4.1 FOCALIZACIÓN DE LOS DATOS SARAT

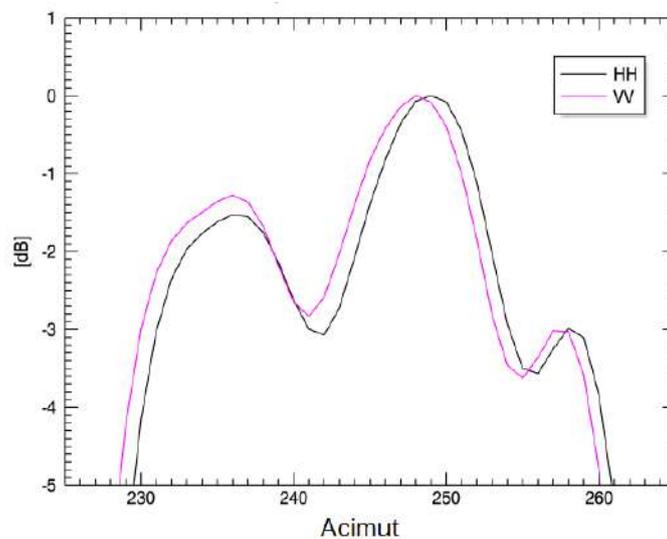


(a) SLC-19 hh.



(b) Respuesta sobre el CR.

**Figura 4.8:** Efecto de ensanchamiento de la *función de dispersión de puntos* relevante al track 19 polarización hh.



**Figura 4.9:** Independencia de la polarización en el efecto de ensanchamiento de la *función de dispersión de puntos*.

Por otro lado, en las Figuras 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 y 4.15 se muestran las imágenes SLC de amplitud para todos los tracks disponibles (por simplicidad solo para la polarización hh). Si bien no resulta evidente a simple vista en todos los casos, estas imágenes se encuentran afectadas por la presencia de distorsiones geométricas. Estas distorsiones son introducidas por errores de movimientos no compensados que afectan al avión durante las diferentes adquisiciones. En la Sección 4.2 se analiza en más detalle el impacto de este efecto y las consecuencias que causa al aplicar técnicas interferométricas al set de datos considerado.

En conclusión se encontraron dos problemas relacionados con los datos del SARAT y ambos atribuibles a la inexactitud de los datos de navegación:

- **Desenfoque:** se encontraron problemas de desenfoque. Desde un punto de vista cualitativo, analizando dos tracks distintos (19 y 29) adquiridos sobre la misma área y en la misma fecha de adquisición, y desde un punto de vista cuantitativo analizando la respuesta del CR ubicado en el área de estudio.
- **Distorsiones geométricas:** a partir del análisis de diferentes tracks adquiridos sobre la misma escena y en la misma fecha se encontraron distorsiones geométricas relativas de las imágenes.

Por lo tanto para obtener buenos resultados en el enfoque en acimut es necesario contar con la disponibilidad de datos de navegación precisos (información acerca de la precisión de los datos de navegación y sus efectos en las imágenes SAR pueden obtenerse en [93]), el conocimiento con exactitud del *lever-arm* (la distancia entre la antena SAR y el sistema GPS) e información topográfica de la escena observada (por ejemplo, DEM).



**Figura 4.10:** Imagen SLC-19 hh resultado del enfoque utilizando el algoritmo BP.



**Figura 4.11:** Imagen SLC-29 hh resultado del enfoque utilizando el algoritmo BP.



**Figura 4.12:** Imagen SLC-33 hh resultado del enfoque utilizando el algoritmo BP.



**Figura 4.13:** Imagen SLC-50 hh resultado del enfoque utilizando el algoritmo BP.



**Figura 4.14:** Imagen SLC-53 hh resultado del enfoque utilizando el algoritmo BP.

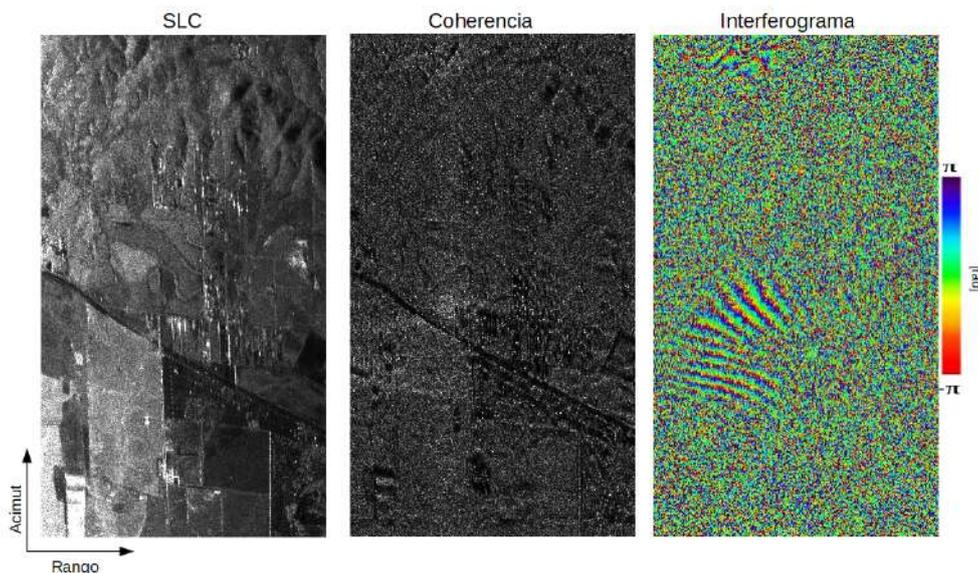


**Figura 4.15:** Imagen SLC-43 hh resultado del enfoque utilizando el algoritmo BP.

## 4.2. Interferometría

Al utilizar el algoritmo BP que opera en dominio del tiempo nos permitió realizar el enfoque en acimut utilizando una grilla en común (relevante al track 19) para todos los datos. En consecuencia se esperaba una perfecta superposición de las imágenes SLC resultantes. Esto último no sucedió debido a la presencia de errores de movimiento residuales no compensados [94], que surgen razonablemente de algunas imprecisiones de los datos de navegación. Las distorsiones geométricas citadas anteriormente afectan la generación de productos *repeat-pass*<sup>2</sup> InSAR alcanzables a través del sistema SARAT.

Esto se puede ver en el panel derecho de la Figura 4.16, donde se muestran el interferograma relevante para las imágenes SLC relevantes al track 19 y 33. A partir del interferograma, podemos observar la presencia de franjas interferométricas solo en las áreas donde existe superposición entre las imágenes consideradas.



**Figura 4.16:** Imagen SLC de amplitud, imagen de coherencia y el interferograma resultante entre el par 19-33.

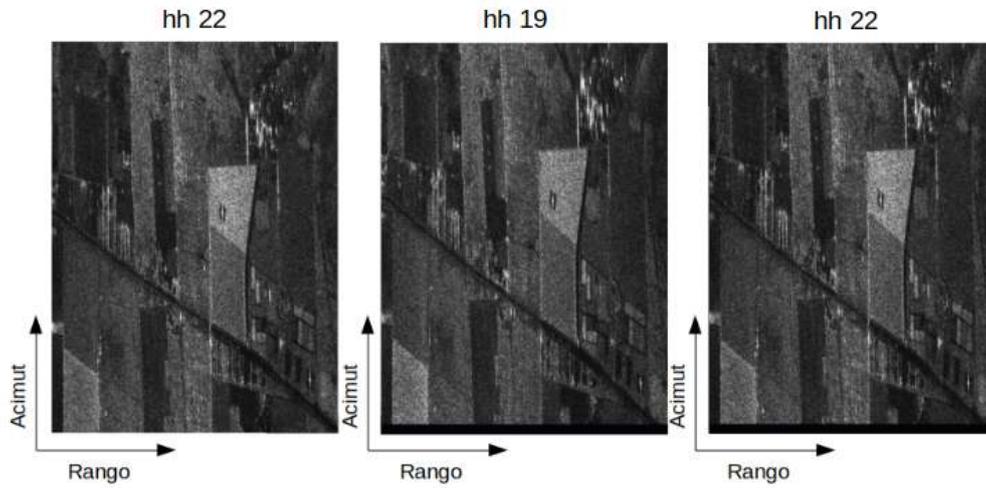
La capacidad de obtener productos interferométricos útiles utilizando imágenes SARAT pudo mejorarse aplicando un algoritmo de co-registración basado en la cross-correlación de los datos SLC.

Si bien esto no se observa a simple vista en la Figura 4.17 donde se muestran las imágenes SLC relevantes al track 22 (panel izquierdo), track 19 (panel central) y la imagen SLC relevante al track 22 luego de aplicar el algoritmo de co-registración (panel derecho), se observó que antes del co-registro la decorrelación fue total. Se destaca una vez más que con la estrategia de enfoque utilizada, se espera que las imágenes en el panel izquierdo y en el panel central ya se superpongan entre sí, sin embargo no lo hicieron.

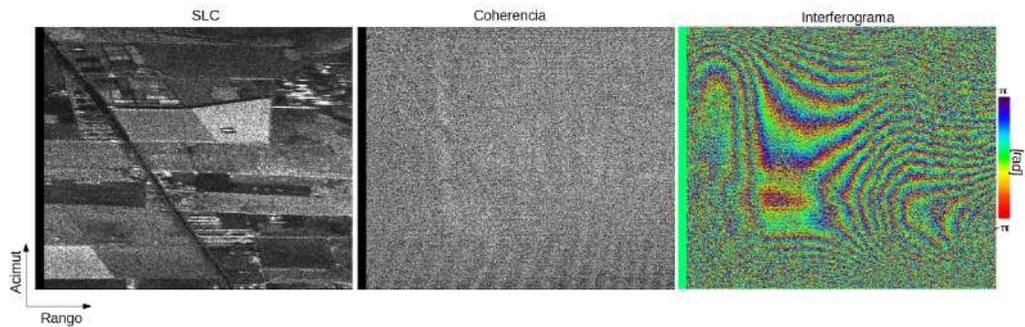
En la Figura 4.18 se muestra el interferograma obtenido después (panel derecho) de aplicar el algoritmo de co-registro y la imagen de coherencia (panel central). Esto refuerza lo

<sup>2</sup>Modo *repeat-pass*: En este modo, dos observaciones de radar espacialmente cercanas de la misma escena se realizan separadas en el tiempo, es decir dos pasadas separadas utilizando una única misión SAR [95].

analizado en la Sección 4.1.1 donde se hizo hincapié que debido a las distorsiones geométricas las imágenes no se superponían entre sí, dando como resultado un producto interferométrico, como se muestra en la Figura 4.18, con franjas interferométricas únicamente luego de aplicar un algoritmo de co-registro.



**Figura 4.17:** Imágenes SLC de amplitud (polarización hh) relevante al track 19 (panel central), track 22 (panel de la izquierda) antes y después (panel de la derecha) de aplicar algoritmo de co-registración.



**Figura 4.18:** Imagen SLC de amplitud, imagen de coherencia (antes de la co-registración la decorrelación fue total) y el interferograma resultante entre el par 19-22.

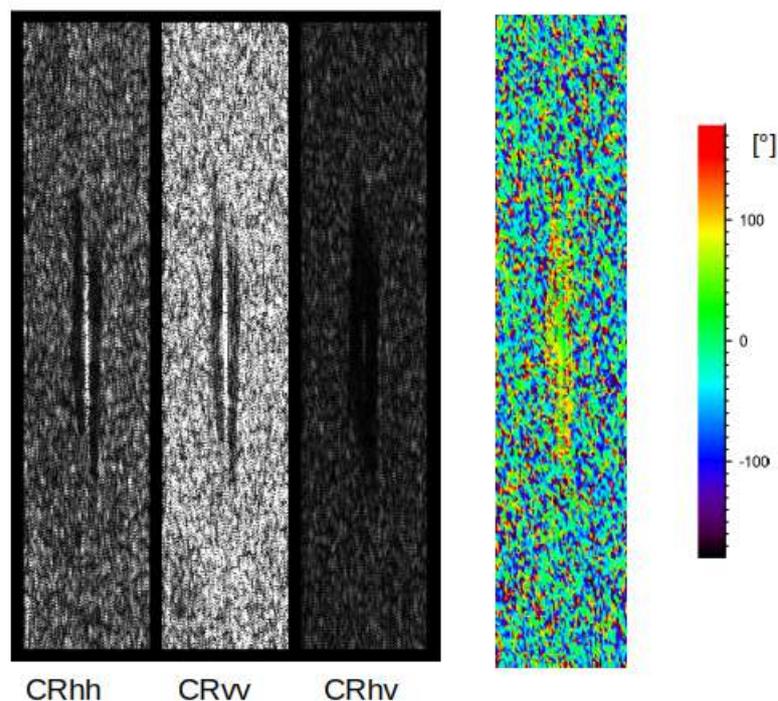
## 4.3. Polarimetría

### 4.3.1. Calibración de imágenes SARAT

Con respecto a las capacidades polarimétricas del sistema SARAT, en primer lugar se evaluó la necesidad de calibrar los datos disponibles. Según lo visto en la Sección 2.7.1.1 en ausencia de efectos de cross-talk y de imbalance se cumple que  $O \propto S$ , en otro caso  $O \neq S$  y resulta necesario aplicar un procedimiento de calibración a los datos.

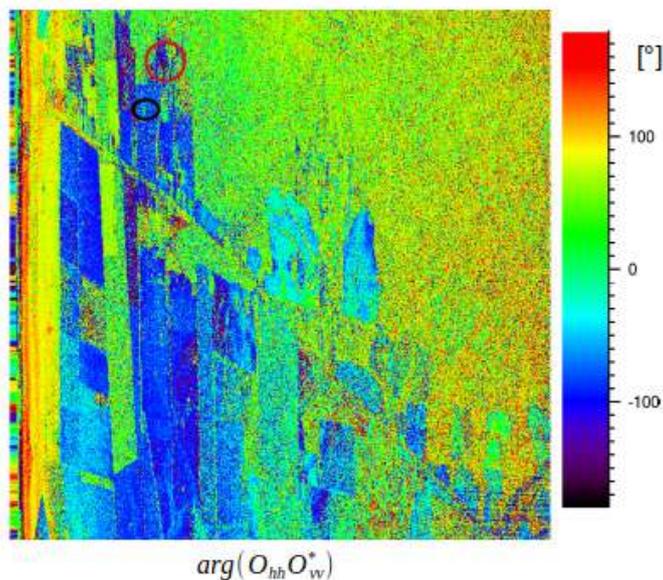
Con este objetivo, se verificó si se respetaban a partir de los datos medidos, algunas propiedades de dispersión polarimétrica de los canonical objects (ver Sección 3.4). Se consideró, entre otras, algunas propiedades relevantes para la fase del coeficiente de correlación co-polar (es decir, hh/vv) .

La Figura 4.19 muestra la fase del coeficiente de correlación co-pol sobre el CR ubicado en el área de estudio, relevante al track 19. Como se explicó en la Sección 3.4.2 en caso de que las imágenes estuvieran calibradas el valor debería ser cercano a cero. Sin embargo el valor encontrado para la fase del coeficiente de correlación fue de aproximadamente  $15^\circ$ .



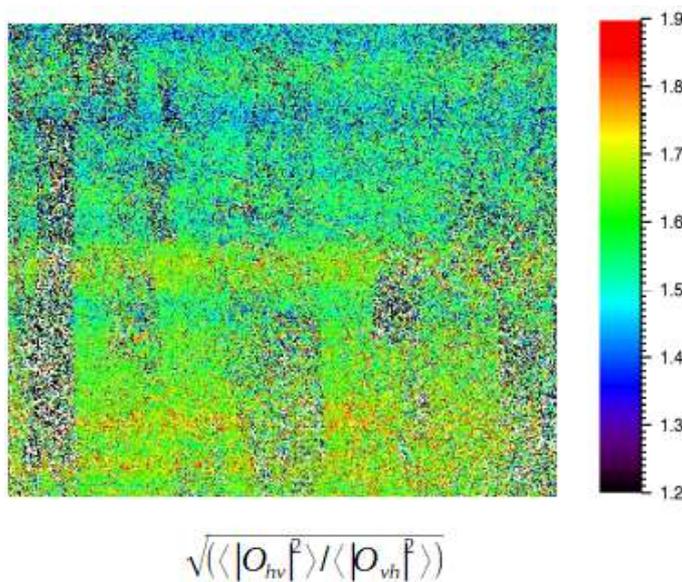
**Figura 4.19:** Fase del coeficiente de correlación co-pol del dato SARAT sin calibrar relevante al track 19.

La Figura 4.20 muestra la diferencia de fase del coeficiente de correlación entre los edificios de CONAE, la cual se encuentra dentro del círculo color rojo, y el CR situado en el área de estudio, el cual se encuentra dentro del círculo negro. En el caso de que las imágenes se encontraran calibradas, la diferencia de fase debería ser aproximadamente  $180^\circ$ , como se explicó en la Sección 3.4.2. Sin embargo, en este caso el valor encontrado para la diferencia de fase del coeficiente de correlación fue de aproximadamente  $120^\circ$ .



**Figura 4.20:** Diferencia de fase del coeficiente de correlación entre CONAE (círculo rojo) y el CR (círculo negro) situado en el área de estudio.

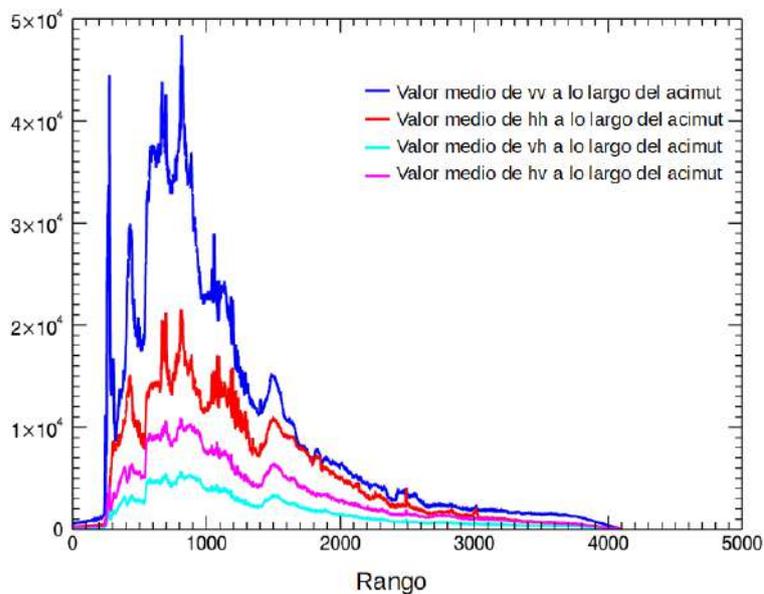
Por otro lado, la Figura 4.21 muestra el ratio entre  $O_{hv}$  y  $O_{vh}$ , para el cual el valor medio encontrado fue de 1,9. Como se dijo en la Sección 3.4.2 en caso de que los datos estuvieran calibrados este valor debería haber sido igual a 1.



**Figura 4.21:** Ratio entre  $O_{hv}$  y  $O_{vh}$ .

A partir de este análisis resultó claro que  $O \neq S$  y por lo tanto las imágenes del SARAT, en este caso relevante al track 19, debían ser calibradas desde el punto de vista polarimétrico, esto también puede observarse en la Figura 4.22 donde se muestra la intensidad de los cuatro canales polarimétricos (no calibrados) en función del rango y donde puede verse que  $hv \neq vh$ .

La calibración de las imágenes del SARAT se realizó utilizando el algoritmo de Quegan (ver Sección 3.4.2) compensando previamente las imágenes por patrón de antena.

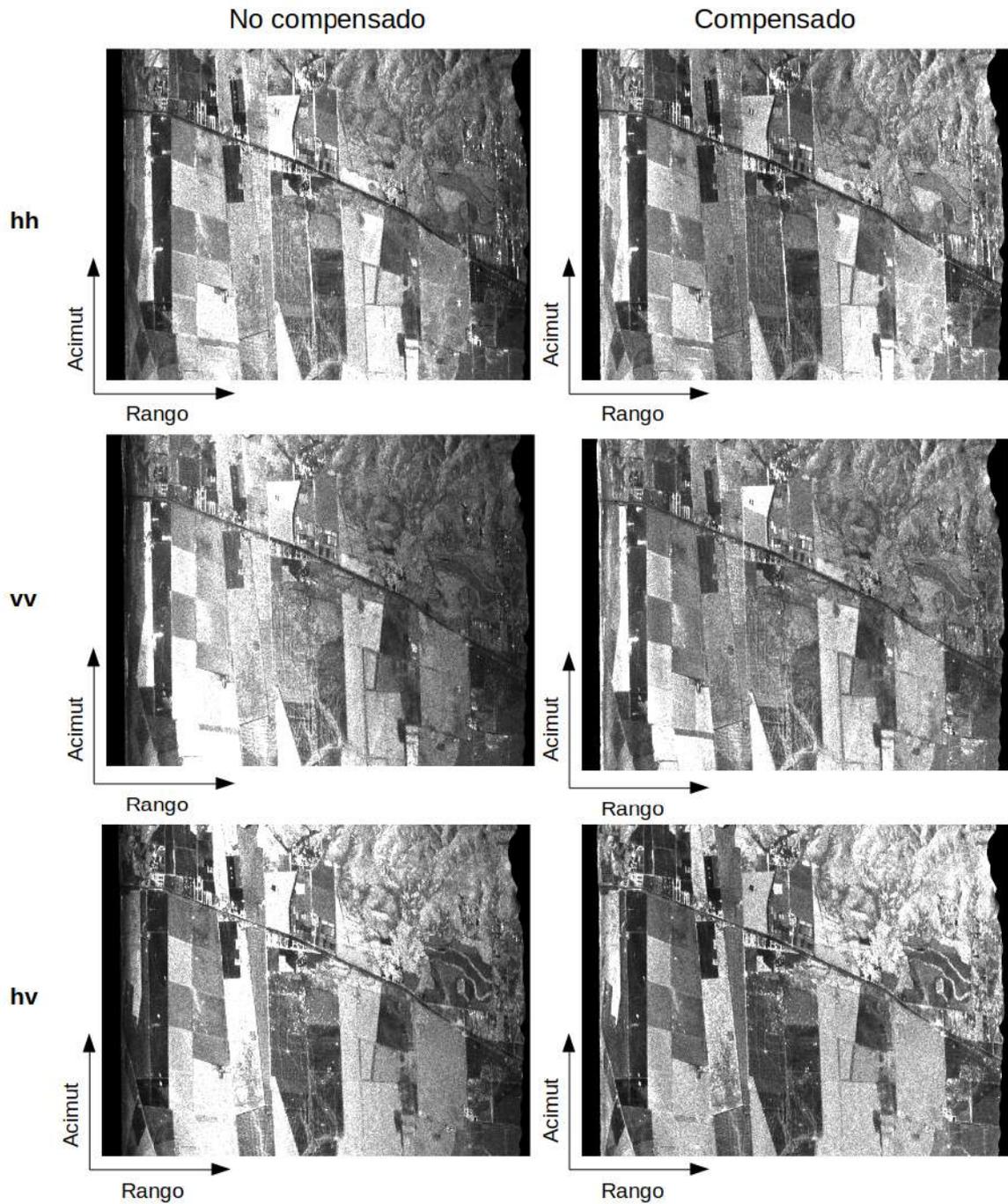


**Figura 4.22:** Intensidad de los 4 canales polarimétricos (no calibrados) vs. rango para una adquisición del SARAT.

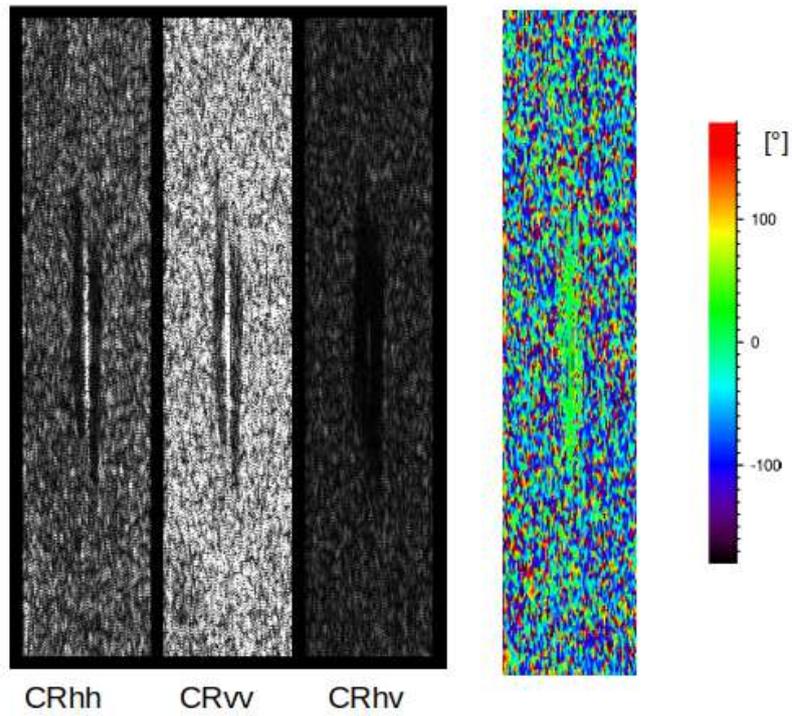
La Figura 4.23 muestra el resultado de las imágenes SLC del SARAT relevante al track 19 para los canales  $hh$ ,  $hv$  y  $vv$  antes de la compensación por patrón de antena en el panel de la izquierda y luego de la compensación en el panel de la derecha. Se puede observar que antes de la compensación las imágenes presentan un mayor brillo en el centro de la escena causado por el patrón de antena que se extiende sobre el rango.

Una vez aplicado el algoritmo de Quegan, se realizó el mismo procedimiento para verificar que efectivamente las imágenes se encuentran calibradas, es decir una vez más se evaluaron las reglas anteriormente descritas para las imágenes que resultaron estar no calibradas.

En la Figura 4.24 se muestra nuevamente la fase del coeficiente de correlación sobre el CR ubicado en el área de estudio, relevante al track 19 para la imagen calibrada. El valor encontrado en este caso fue de aproximadamente  $2^\circ$ .



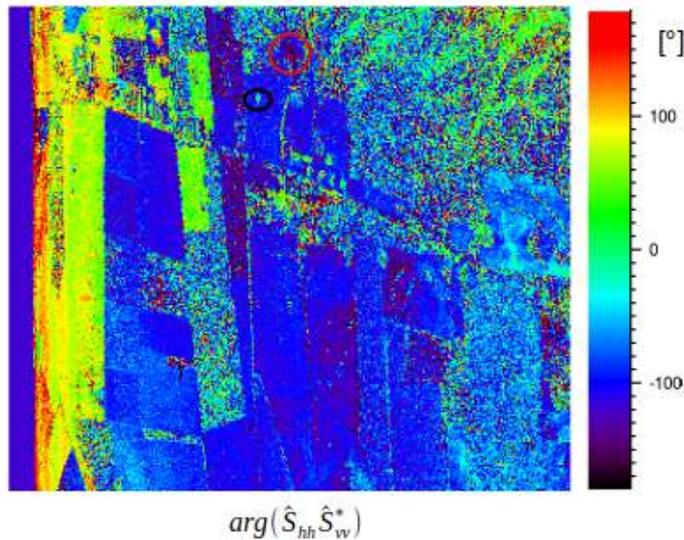
**Figura 4.23:** Imágenes SLC relevantes al track 19 en los canales  $hh$ ,  $hv$  y  $vv$  antes (izquierda) y después (derecha) de ser compensadas por el patrón de antena.



**Figura 4.24:** Fase del coeficiente de correlación co-pol del dato SARAT calibrado relevante al track 19.

Por otro lado en la Figura 4.25 muestra nuevamente la diferencia de fase del coeficiente de correlación entre los edificios de CONAE y el CR ubicado en el área de estudio para la imagen calibrada. El valor encontrado en este caso de aproximadamente  $174^\circ$ .

Por supuesto, luego de la calibración inmediatamente resulta que  $\hat{S}_{hv} = \hat{S}_{vh}$ .



**Figura 4.25:** Diferencia de fase del coeficiente de correlación entre CONAE (círculo rojo) y el CR (círculo negro) situado en el área de estudio.

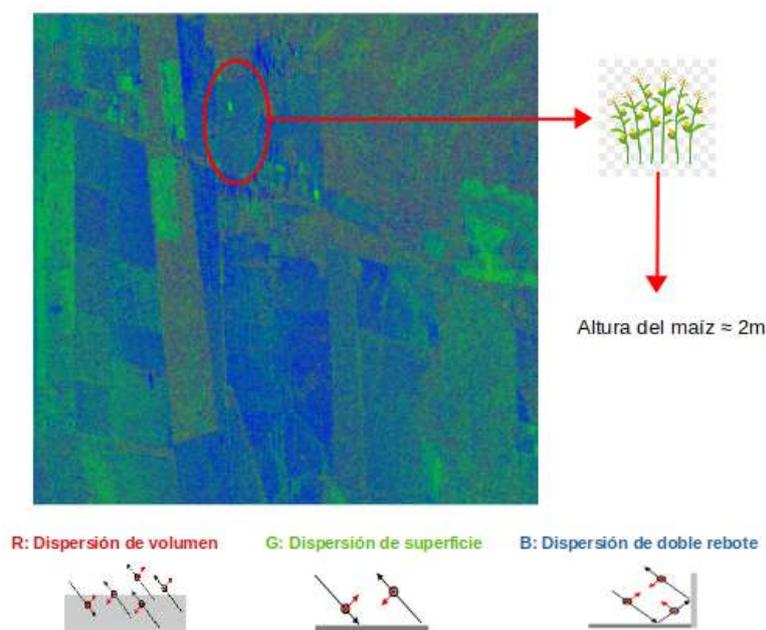
### 4.3.2. Decomposición de Pauli y H-alpha

Una vez calibradas las imágenes SARAT relevantes al track 19 se llevó a cabo la decomposición de Pauli y el resultado obtenido se muestra en la Figura 4.26. Podemos observar que en los alrededores del CR ubicado en el área de estudio el mecanismo de dispersión dominante corresponde a doble rebote (o double bounce). La representación se logra formando una imagen RGB donde rojo corresponde a dispersión de volumen, verde a dispersión de superficie y azul dispersión de doble rebote.

En este caso entonces, se encontró una correspondencia entre la verdad de campo (la región que rodea al CR corresponde a un campo de maíz y, según lo informado por CONAE, la altura de la vegetación fue de aproximadamente 2 *mts* en el momento de adquisición) y el resultado obtenido aplicando la composición de Pauli a la imagen SARAT calibrada, ya que el mecanismo de dispersión dominante como se dijo antes fue de doble rebote.

Para el caso de la imagen no calibrada también se realizó la composición de Pauli, como era de esperarse se observó una inconsistencia entre el resultado obtenido y la verdad de campo, ya que a los alrededores del CR el mecanismo de dispersión dominante resultó ser en este caso simple rebote (o single bounce) lo cual no resulta coherente con una altura de vegetación de aproximadamente 2 *mts*, esto puede observarse en la Figura 4.27.

Finalmente la Figura 4.28 corresponde a la composición H-alpha utilizando las imágenes calibradas relevantes al track 19. De esta figura se puede observar también que el mecanismo de dispersión dominante resulta ser el doble rebote, siendo consistente con la verdad de campo y con la composición de Pauli analizada anteriormente.



**Figura 4.26:** Composición de Pauli utilizando las imágenes calibradas relevantes al track 19.

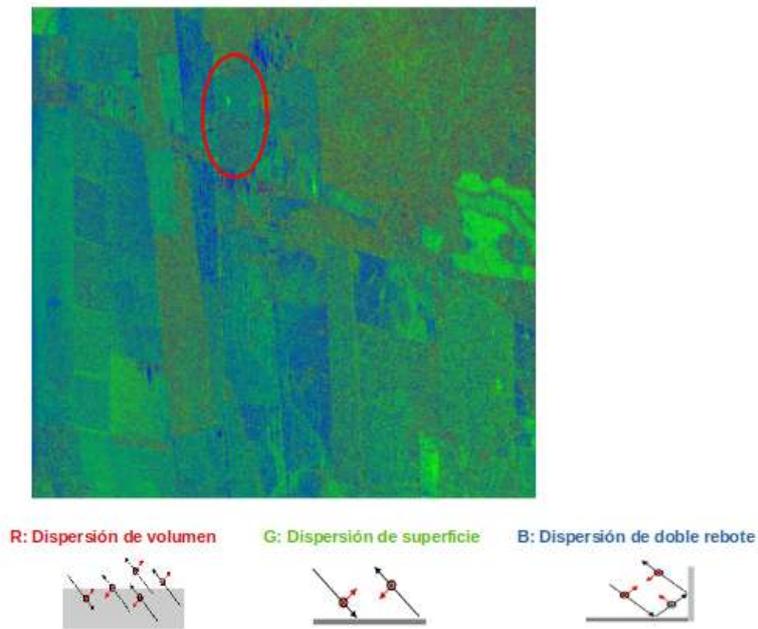


Figura 4.27: Composición de Pauli utilizando las imágenes no calibradas relevantes al track 19.

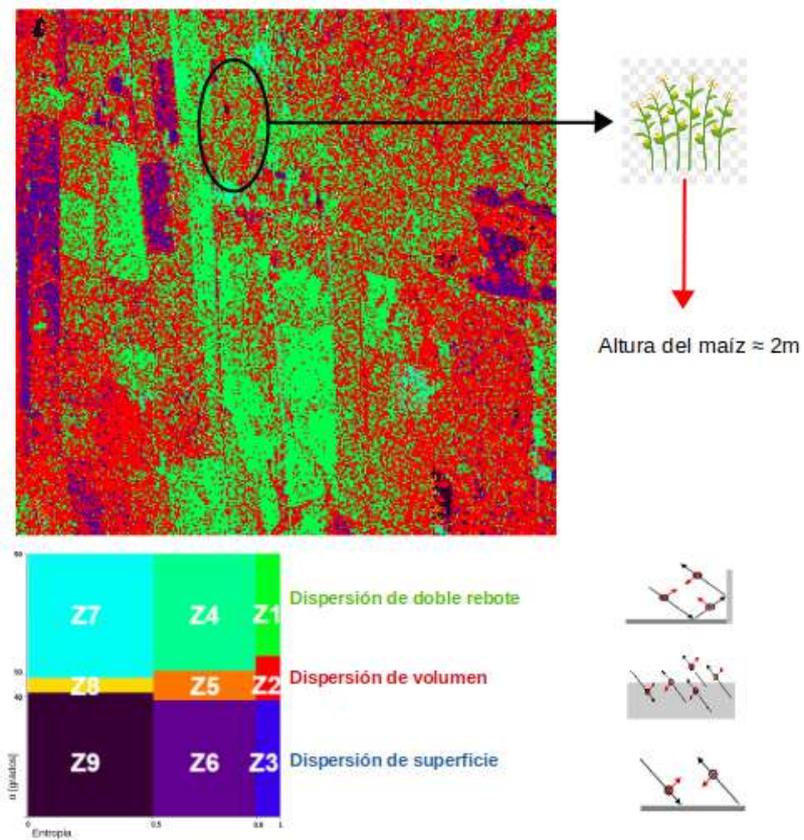


Figura 4.28: Composición H-alpha utilizando las imágenes no calibradas relevantes al track 19.

---

### Conclusiones y Trabajos a Futuro

---

Este trabajo de tesis fue desarrollado en el marco de la Maestría en Aplicaciones de Información Espacial (MAIE) perteneciente al Instituto de Altos Estudios Espaciales “Mario Gulich” (IG) y a la Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación de la Universidad Nacional de Córdoba (FAMAF) para obtener el título de Magister en Aplicación de Información Espacial.

El trabajo estuvo dirigido por el Dr. Pablo Euillades, co-dirigido por la Dra. Carolina Tauro y bajo la asesoría del Dr. Stefano Perna. El desarrollo del mismo se llevó a cabo en las instalaciones del Instituto de Capacitación Especial y Desarrollo de la Ingeniería Asistida por Computadora (CEDIAC) Mendoza-Argentina, Instituto de Altos Estudios Espaciales “Mario Gulich” (IG) Córdoba-Argentina y el Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell’ Ambiente del Consiglio Nazionale delle Ricerche (IREA-CNR) Nápoles-Italia.

En líneas generales los objetivos de esta tesis estuvieron relacionados en primer lugar con el enfoque de las imágenes de la misión SAR AeroTransportado (SARAT) de CONAE que estuvo operativo entre los años 2006 a 2014, en segundo lugar evaluar la posibilidad de obtener productos interferométricos útiles utilizando las imágenes SLC resultantes, y finalmente evaluar la necesidad de calibrar las mismas con fines polarimétricos. Cabe destacar, que resulta novedoso entender como tratar este tipo de datos (aerotransportado), ya que poseen una flexibilidad de operación que los sistemas satelitales no poseen (se desarrolla en la Sección 2.5) presentando una gran ventaja durante eventos de crisis.

En particular, en este trabajo se mostraron algunos resultados de procesamiento obtenidos mediante el uso de un conjunto de datos (Datos Crudos (RAW), datos de la Unidad de Medición Inercial (IMU) y datos del Sistemas de Posicionamiento Global (GPS)) adquiridos en un área de Córdoba, Argentina que contiene al Centro Espacial Teófilo Tabanera (CETT), por el sistema SARAT en marzo de 2010. Se trabajó con 8 tracks (19, 22, 29, 33, 43, 50, 53, 69) o adquisiciones para las cuales se cuenta con los cuatro canales de polarización, es decir  $hh$ ,  $hv$ ,  $vh$  y  $vv$ . Sin embargo la mayoría de los resultados mostrados aquí corresponden al track 19 por cuestiones de simplicidad.

En primer lugar se llevó a cabo el enfoque de los datos, para ello se desarrolló un código en Interactive Data Language (IDL) para la compresión en rango, partiendo de los datos

RAW y de dos archivos de entrada *.txt* que tienen en cuenta los parámetros de sensor y los parámetros de procesamiento. El resultado fue una señal comprimida en rango la cual, junto con un Modelo Digital de Elevación (DEM) externo, datos de la Sistemas de Navegación Inercial (INS) y de GPS aportados por CONAE se llevó a cabo la compresión en acimut. Para ello se utilizó un algoritmo que opera en el dominio del tiempo conocido comúnmente como Back Projection (BP).

Del análisis relacionado con el enfoque de los datos crudos, se encontraron dos efectos, el ensanchamiento de la función de dispersión de puntos evidenciando un desenfoque de las SLC obtenidas y distorsiones geométricas relativas de las imágenes relevantes a diferentes tracks. Estos efectos pueden ser atribuidos a la imprecisión de los datos de navegación.

El primer efecto se analizó desde dos puntos de vista. Desde el punto cualitativo comparando para diferentes tracks de manera visual se observaron regiones donde la imagen se encuentra borrosa. Desde el punto de vista cuantitativo se encontró un ensanchamiento de la respuesta (función de dispersión de puntos) sobre el Corner Reflector (CR) ubicado en el área de estudio. Esto último resultó ser independiente de la polarización.

Del análisis interferométrico se mostró que el efecto de stretching en las imágenes (distorsiones geométricas) afecta la generación de productos InSAR de repeat-pass. Sin embargo, se demuestra la buena calidad de los datos SAR y se remarca que los datos SARAT son útiles para generar productos interferométricos aplicando procedimientos de mejora de la fase y explotando procedimientos de co-registro. Se remarca que estos no serían necesarios si los errores residuales de movimientos fueran despreciables, debido a que el algoritmo de enfoque utilizado (BP) permite generar imágenes sobre una misma grilla de salida.

Con respecto a las capacidades polarimétricas de los datos SARAT se realizó un análisis completo para comprender si las imágenes deberían ser calibradas. Se utilizaron algunas reglas basadas en las propiedades de los *canonical objects* y se concluyó que se debía llevar a cabo un proceso de calibración. Este proceso se realizó utilizando el algoritmo de Quegan para el cual se desarrolló un código en IDL. Una vez calibrada las imágenes se observó una correspondencia entre la verdad de campo (informada por el equipo de Mediciones In Situ (EMIS) de la Misión SAOCOM) y el resultado obtenido al utilizar la descomposición de Pauli y H-alpha a los datos del SARAT.

Como trabajos a futuro se plantea procesar un set de datos del SARAT adquiridos en el año 2014 en el mismo área que el set de datos utilizado en este trabajo de tesis. Se plantea aplicar la misma metodología descrita comenzando desde el enfoque de los datos hasta la calibración de las mismas. Luego de calibradas las imágenes SLC se propone aplicar métodos que permitan estimar la humedad del suelo de las parcelas de CONAE para las cuales se cuenta también con medidas in-situ para la misma época de adquisición y poder así validar los resultados obtenidos.

Cabe señalar, que parte de este trabajo titulado “On the interferometric and polarimetric capabilities of the argentinian L-band SARAT system” fue aceptado en el 2020 Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS 2020), publicado en ISPRS Annals/Archives y IEEEExplore y premiado como el mejor trabajo en el LAGIRS Student Competition por el comité organizador de LAGIRS 2020.

---

## Referencias bibliográficas

---

- [1] M. Azcueta, “Procesamiento de señales de radar de apertura sintética (SAR)”, material de cursada de asignatura Señales y Sistemas, FIUBA.,” 2011.
- [2] J. C. Curlander and R. N. McDonough, *Synthetic aperture radar*, vol. 11. Wiley, New York, 1991.
- [3] H. J. Kramer, *Observation of the Earth and Its Environment. Survey of Missions and Sensors*. Springer, 2002.
- [4] S. Perna, C. Esposito, T. Amaral, P. Berardino, G. Jackson, J. Moreira, A. Pauciullo, E. Vaz Junior, C. Wimmer, and R. Lanari, “The insaes4 airborne x-band interferometric sar system: A first assessment on its imaging and topographic mapping capabilities,” *Remote Sensing*, vol. 8, p. 40, Jan 2016.
- [5] R. Horn, A. Nottensteiner, A. Reigber, J. Fischer, and R. Scheiber, “F-sar—dlr’s new multifrequency polarimetric airborne sar,” *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2009*, pp. 902–905, 2009.
- [6] S. Perna, G. Alberti, P. Berardino, L. Bruzzone, D. Califano, I. Catapano, L. Ciofaniello, E. Donini, C. Esposito, C. Facchinetti, R. Formaro, G. Gennarelli, C. Gerekos, R. Lanari, F. Longo, G. Ludeno, M. Mariotti d’Alessandro, A. Natale, C. Noviello, and S. Thakur, “The asi integrated sounder-sar system operating in the uhf-vhf bands: First results of the 2018 helicopter-borne morocco desert campaign,” *Remote Sensing*, vol. 11, p. 1845, 08 2019.
- [7] K. Ouchi, “Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics,” *Remote Sensing*, pp. 716 – 807, 5 2013.
- [8] D. Tarchi, N. Casagli, R. Fanti, D. Leva, G. Luzi, A. Pasuto, M. Pieraccini, and S. Silvano, “Landslide monitoring by using ground-based sar interferometry: An example of application to the tessina landslide in italy,” *Eng. Geol.*, vol. 68, pp. 15–30, 2003.
- [9] C. Esposito, “Advanced Airborne SAR Interferometry Techniques.” Università degli studi del sannio. Dipartimento di Ingegneria. Dottorato di ricerca in ingegneria dell’informazione, 2016.

- [10] G. Fornaro, "Trajectory deviations in airborne sar: analysis and compensation," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, pp. 997–1009, July 1999.
- [11] A. Moreira and Yonghong Huang, "Airborne sar processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, pp. 1029–1040, Sep. 1994.
- [12] G. Franceschetti and R. Lanari, *Synthetic aperture radar processing*. CRC press, New York, 1999.
- [13] G. Fornaro, G. Franceschetti, and S. Perna, "On center-beam approximation in sar motion compensation," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 3, pp. 276–280, April 2006.
- [14] M. Soumekh, *Synthetic aperture radar signal processing: With MATLAB Algorithms*, vol. 7. New York: Wiley, 1999.
- [15] O. Frey, C. Magnard, M. Ruegg, and E. Meier, "Focusing of airborne synthetic aperture radar data from highly nonlinear flight tracks," *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 47, no. 6, pp. 1844–1858, 2009.
- [16] R. Bamler and P. Hartl, "Synthetic aperture radar interferometry," *Inverse problems*, vol. 14, no. 4, p. R1, 1998.
- [17] M. Velez, P. Euillades, M. Blanco, and L. Euillades, *Ground deformation between 2002 and 2013 from InSAR observations*. Copahue volcano, 2016.
- [18] P. A. Euillades, L. D. Euillades, M. H. Blanco, M. L. Velez, P. Grosse, and G. J. Sosa, "Co-eruptive subsidence and post-eruptive uplift associated with the 2011–2012 eruption of puyehue-cordón caulle, chile, revealed by dinsar," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 344, pp. 257–269, 2017.
- [19] 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, 2016.
- [20] G. Liu, J. Li, Z. Xu, J. Wu, Q. Chen, H. Zhang, R. Zhang, H. Jia, and X. Luo, "Surface deformation associated with the 2008 ms8. 0 wenchuan earthquake from alos l-band sar interferometry," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 12, no. 6, pp. 496–505, 2010.
- [21] M. Picozzi, S. Parolai, M. Mucciarelli, C. Milkereit, D. Bindi, R. Ditommaso, M. Vonna, M. Gallipoli, and J. Zschau, "Interferometric analysis of strong ground motion for structural health monitoring: the example of the l'aquila, italy, seismic sequence of 2009," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 101, no. 2, pp. 635–651, 2011.
- [22] J. Lee and E. Pottier, *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*. CRC Press, New York, 2009.
- [23] G. Di Martino, A. Iodice, A. Natale, and D. Riccio, "Polarimetric two-scale two-component model for the retrieval of soil moisture under moderate vegetation via l-band sar data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 54, pp. 2470–2491, 04 2016.

- [24] F. Garestier, P. Dubois-Fernandez, D. Guyon, and T. Le Toan, “Forest biophysical parameter estimation using l and p band polarimetric sar data,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, pp. 3379 – 3388, 10 2009.
- [25] A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek, and K. Papathanassiou, “A tutorial on synthetic aperture radar,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 3, pp. 1–38, 2013.
- [26] JAXA, “Advanced Land Observing Satellite.” ALOS-2, 2019. <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/en/about/palsar2.htm>, 2019.
- [27] CONAE, “Misiones Satelitales.” SAOCOM, 2019. <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/misiones-espaciales/saocom>, 2019.
- [28] DLR, “Tandem-L. A Satellite Mission for Monitoring Dynamic Processes on the Earth’s Surface.” Tandem-L, 2019. [https://www.dlr.de/hr/en/desktopdefault.aspx/tabid-8113/14171\\_read-35837/](https://www.dlr.de/hr/en/desktopdefault.aspx/tabid-8113/14171_read-35837/), 2019.
- [29] NASA, “NASA-ISRO SAR Mission (NISAR).” NISAR, 2019. <https://nisar.jpl.nasa.gov/>, 2019.
- [30] NASA, “UAVSAR. Uninhabited Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar.” UAVSAR, 2019. <https://uavsar.jpl.nasa.gov/>, 2019.
- [31] DLR, “F-SAR – The New Airborne SAR System.” FSAR, 2019. [https://www.dlr.de/hr/en/desktopdefault.aspx/tabid-2326/3776\\_read-5691/](https://www.dlr.de/hr/en/desktopdefault.aspx/tabid-2326/3776_read-5691/), 2019.
- [32] R. Solorza, “Estimación de la humedad superficial del suelo mediante el uso combinado de modelos electromagnéticos y el enfoque bayesiano. Estudio exploratorio en imágenes SARAT.” Maestría en Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias (AEARTE), 2013.
- [33] C. Notarnicola and R. Solorza, *Integration of Remotely Sensed Images and Electromagnetic Models into a Bayesian Approach for Soil Moisture Content Retrieval: Methodology and Effect of Prior Information*, pp. 39–63. 04 2014.
- [34] P. Guccione and C. Cafforio, “Motion compensation processing of airborne sar data,” in *IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol. 3, pp. III – 1154–III – 1157, July 2008.
- [35] D. Rava, M. Barber, F. Grings, and H. Karszenbaum, “Evaluación del desempeño de dos sistemas sar aerotransportados sobre suelos agrícolas: Sarat (conae) y uavsar (nasa/jpl),” in *2016 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, pp. 1–6, June 2016.
- [36] P. Perna, L. Dominguez, F. Grings, H. Karszenbaum, and J. C. A. Jacobo-Berlles, “Simulation of airborne sar raw data using real-time domain approach and predictive coding algorithms,” in *7th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, pp. 1–3, VDE, 2008.
- [37] A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek, and K. P. Papathanassiou, “A tutorial on synthetic aperture radar,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 1, pp. 6–43, March 2013.

- [38] M. P. Zéner, “Focalización de imágenes sar utilizando el algoritmo omega-k. simulación y validación,” *UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA*, 2012.
- [39] A. Collado Rosell, *Desarrollo de un procesador radar de apertura sintética*. PhD thesis, Universidad Nacional de Cuyo, 2016.
- [40] R. Bamler, “Principles of synthetic aperture radar,” *Surveys in Geophysics*, vol. 21, no. 2-3, pp. 147–157, 2000.
- [41] G. Fornaro, “Trajectory deviations in airborne sar: Analysis and compensation,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, no. 3, pp. 997–1009, 1999.
- [42] M. Villano, *Staggered synthetic aperture radar*. DLR, Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, 2016.
- [43] M. Azcueta, “Curso de introducción al SAR. Curso dictado en instituto de Altos Estudios Espaciales, Mario Gulich.” 2017.
- [44] C. Wu, K. Liu, and M. Jin, “Modeling and a correlation algorithm for spaceborne sar signals,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, no. 5, pp. 563–575, 1982.
- [45] C. Chang, M. Jin, and J. Curlander, “Sar processing based on the exact two-dimensional transfer function,” in *Proc. of IGARSS’92*, pp. 355–359, 1992.
- [46] 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.
- [47] 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, IEEE, 2003.
- [48] R. K. Raney, H. Runge, R. Bamler, I. G. Cumming, and F. H. Wong, “Precision sar processing using chirp scaling,” *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 32, no. 4, pp. 786–799, 1994.
- [49] 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.
- [50] S. Perna, A. Natale, and P. Berardino, “A Back Projection algorithm to focus Synthetic Aperture Radar data acquired from strongly non-rectilinear trajectories,” 2016.
- [51] J. R. Moreira, “A new method of aircraft motion error extraction from radar raw data for real time motion compensation,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, no. 4, pp. 620–626, 1990.
- [52] D. E. Wahl, P. Eichel, D. Ghiglia, and C. Jakowatz, “Phase gradient autofocus—a robust tool for high resolution sar phase correction,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 827–835, 1994.
- [53] T. Isernia, V. Pascazio, R. Pierri, and G. Schirinzi, “Synthetic aperture radar imaging from phase-corrupted data,” *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 143, no. 4, pp. 268–274, 1996.

- [54] A. Reigber, R. Scheiber, M. Jager, P. Prats-Iraola, I. Hajnsek, T. Jagdhuber, K. P. Pathanassiou, M. Nannini, E. Aguilera, S. Baumgartner, *et al.*, “Very-high-resolution airborne synthetic aperture radar imaging: Signal processing and applications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 3, pp. 759–783, 2012.
- [55] A. Reigber, E. Alivizatos, A. Potsis, and A. Moreira, “Extended wavenumber-domain synthetic aperture radar focusing with integrated motion compensation,” *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 153, no. 3, pp. 301–310, 2006.
- [56] 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, pp. 1123–1136, Sep. 1996.
- [57] D. Kaliyari, A. Shukla, Y. Rao, and H. B. Hablani, “Motion compensation of airborne synthetic aperture radar,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, no. 1, pp. 627–634, 2014.
- [58] A. Moreira and Y. Huang, “Airborne sar processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, no. 5, pp. 1029–1040, 1994.
- [59] B. Barber, “Theory of digital imaging from orbital synthetic-aperture radar,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 6, no. 7, pp. 1009–1057, 1985.
- [60] J. C. Curlander and R. N. McDonough, *Synthetic aperture radar*, vol. 11. Wiley, New York, 1991.
- [61] O. Frey, *Synthetic aperture radar imaging in the time domain for nonlinear sensor trajectories and SAR tomography*, vol. 59. University of Zurich, 2010.
- [62] M. Soumekh, “Time domain non-linear sar processing,” tech. rep., STATE UNIV OF NEW YORK AT BUFFALO DEPT OF ELECTRICAL ENGINEERING, 2006.
- [63] L. M. H. Ulander, H. Hellsten, and G. Stenstrom, “Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 39, pp. 760–776, July 2003.
- [64] R. F. Hanssen, *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*, vol. 2. Springer Science & Business Media, 2001.
- [65] A. Danklmayer, B. J. Doring, M. Schwerdt, and M. Chandra, “Assessment of atmospheric propagation effects in sar images,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 10, pp. 3507–3518, 2009.
- [66] B. Osmanoglu, F. Sunar, S. Wdowinski, and E. Cabral-Cano, “Time series analysis of insar data: Methods and trends,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 115, pp. 90–102, 2016.
- [67] R. M. Goldstein, H. A. Zebker, and C. L. Werner, “Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping,” *Radio science*, vol. 23, no. 4, pp. 713–720, 1988.
- [68] G. Fornaro, G. Franceschetti, and R. Lanari, “Interferometric sar phase unwrapping using green’s formulation,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, no. 3, pp. 720–727, 1996.

- [69] D. C. Ghiglia and L. A. Romero, “Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods,” *JOSA A*, vol. 11, no. 1, pp. 107–117, 1994.
- [70] S. Perna, C. Esposito, P. Berardino, A. Pauciullo, C. Wimmer, and R. Lanari, “Phase offset calculation for airborne insar dem generation without corner reflectors,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 5, pp. 2713–2726, 2014.
- [71] A. Natale, “Electromagnetic models for the retrieval of surface parameters through sar images,” 2011.
- [72] N. R. Canada, “A Canada Centre for Remote Sensing Remote Sensing Tutorial.” Fundamentals of Remote Sensing <https://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-and-air-photos/satellite-imagery-and-products/educational-resources/tutorial-radar-polarimetry/9579>, 2015.
- [73] ESA, “The Polarimetric SAR data Processing and Educational Tool.” Polarimetry Tutorial [https://earth.esa.int/documents/653194/656796/Single\\_Multi\\_Polarization\\_SAR\\_data.pdf](https://earth.esa.int/documents/653194/656796/Single_Multi_Polarization_SAR_data.pdf), 2000-2020.
- [74] Y. Chang, P. Li, J. Yang, J. Zhao, L. Zhao, and L. Shi, “Polarimetric calibration and quality assessment of the gf-3 satellite images,” *Sensors*, vol. 18, p. 403, 01 2018.
- [75] J. J. Van Zyl, “Calibration of polarimetric radar images using only image parameters and trihedral corner reflector responses,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, no. 3, pp. 337–348, 1990.
- [76] S. Quegan, “A unified algorithm for phase and cross-talk calibration of polarimetric data-theory and observations,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, no. 1, pp. 89–99, 1994.
- [77] H. Kimura, T. Mizuno, K. P. Papathanassiou, and I. Hajnsek, “Improvement of polarimetric sar calibration based on the quegan algorithm,” in *IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol. 1, IEEE, 2004.
- [78] S. Nghiem, S. Yueh, R. Kwok, and F. Li, “Symmetry properties in polarimetric remote sensing,” *Radio Science*, vol. 27, no. 05, pp. 693–711, 1992.
- [79] J. J. van Zyl, *Synthetic aperture radar polarimetry*, vol. 2. John Wiley & Sons, 2011.
- [80] ESA, “The Polarimetric SAR data Processing and Educational Tool.” Polarimetry Tutorial [https://earth.esa.int/documents/653194/656796/Polarimetric\\_Decompositions.pdf](https://earth.esa.int/documents/653194/656796/Polarimetric_Decompositions.pdf), 2000-2020.
- [81] S. R. Cloude and E. Pottier, “A review of target decomposition theorems in radar polarimetry,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, pp. 498–518, March 1996.
- [82] M. Ouarzeddine, B. Souissi, and A. Belhadj-Aissa, “Target detection and characterization using h/alpha decomposition and polarimetric signatures,” in *2006 2nd International Conference on Information Communication Technologies*, vol. 1, pp. 395–400, April 2006.

- [83] R. Solorza, C. Notarnicola, and H. Karszenbaum, “Retrieval of soil moisture using electromagnetic models and a bayesian approach in view of the saocom mission: Study on sarat images in an agricultural site in argentina,” in *2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS*, pp. 739–742, July 2013.
- [84] C. Notarnicola and R. Solorza, “Integration of remotely sensed images and electromagnetic models into a bayesian approach for soil moisture content retrieval: methodology and effect of prior information,” in *Dynamic Programming and Bayesian Inference, Concepts and Applications*, IntechOpen, 2014.
- [85] G. Fornaro, G. Franceschetti, and S. Perna, “Motion compensation errors: Effects on the accuracy of airborne sar images,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 41, no. 4, pp. 1338–1352, 2005.
- [86] S. Perna, C. Wimmer, J. Moreira, and G. Fornaro, “X-band airborne differential interferometry: Results of the orbisar campaign over the perugia area,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, no. 2, pp. 489–503, 2008.
- [87] S. Perna, G. Alberti, P. Berardino, L. Bruzzone, D. Califano, I. Catapano, L. Ciofanelli, E. Donini, C. Esposito, C. Facchinetti, *et al.*, “The asi integrated sounder-sar system operating in the uhf-vhf bands: First results of the 2018 helicopter-borne morocco desert campaign,” *Remote Sensing*, vol. 11, no. 16, p. 1845, 2019.
- [88] A. Reigber and K. Papathanassiou, “Correction of residual motion errors in airborne repeat-pass interferometry,” in *IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No. 01CH37217)*, vol. 7, pp. 3077–3079, IEEE, 2001.
- [89] P. Prats, A. Reigber, and J. J. Mallorqui, “Topography-dependent motion compensation for repeat-pass interferometric sar systems,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 206–210, 2005.
- [90] P. Prats, K. A. C. de Macedo, A. Reigber, R. Scheiber, and J. J. Mallorqui, “Comparison of topography-and aperture-dependent motion compensation algorithms for airborne sar,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 4, no. 3, pp. 349–353, 2007.
- [91] T. Visentin, *Polarimetric Radar for Automotive Applications*, vol. 90. KIT Scientific Publishing, 2019.
- [92] J. J. Van Zyl, “Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 27, no. 1, pp. 36–45, 1989.
- [93] G. Fornaro, G. Franceschetti, and S. Perna, “Motion compensation errors: effects on the accuracy of airborne sar images,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 41, no. 4, pp. 1338–1352, 2005.
- [94] G. Fornaro, G. Franceschetti, and S. Perna, “Motion compensation errors: effects on the accuracy of airborne sar images,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 41, no. 4, pp. 1338–1352, 2005.
- [95] J. A. Richards *et al.*, *Remote sensing with imaging radar*, vol. 1. Springer, 2009.