

Detección y Estimación de Velocidad de Blancos Móviles Utilizando Técnicas GMTI en Imágenes SAR

Maestrando
Alejandro Iván Testa

Tesis presentada 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

Diciembre, 2019

©IG - CONAE/UNC 2019

©FaMAF - UNC 2019

DIRECTOR

Dr. Leonardo Euillades

CONICET-Instituto CEDIAC, Fac. Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo

CO-DIRECTOR

Mgster. Andrés Lighezzolo

Universidad Nacional de Córdoba-CONAE



Esta obra está bajo una licencia Creative Commons
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Resumen

El foco de este trabajo está puesto en el estudio y desarrollo de técnicas Ground Moving Target Indication (GMTI) aplicadas en imágenes SAR (Synthetic Aperture Radar), destinadas a detectar y estimar parámetros de velocidad de objetos en movimiento, como por ejemplo autos o camiones. Se propone un esquema de procesamiento de bajo costo computacional basada simplemente en transformadas de Fourier y multiplicaciones de exponenciales complejas. La validez y eficiencia del esquema propuesto es estudiado procesando imágenes COSMO-SkyMed (CSK) Single Look Complex (SLC) adquiridas en modo Spotlight sobre países distintos. Los resultados obtenidos verifican la teoría estudiada con su aplicación en datos reales, demostrando de este modo la factibilidad de implementación de técnicas GMTI sobre datos SAR.

Palabras clave: SAR, GMTI, Blancos Móviles, COSMO-SkyMed, Spotlight.

Abstract

The focus of this work is on the study and development of Ground Moving Target Indication (GMTI) techniques applied in Synthetic Aperture Radar (SAR) images, aimed at detecting and estimating velocity parameters of moving targets, such as cars or trucks. A low-cost computational processing scheme is proposed based on Fourier transforms and multiplications of complex exponentials. The validity and efficiency of the proposed scheme is studied by processing COSMO-SkyMed (CSK) Single Look Complex (SLC) images acquired in Spotlight mode over different countries. The results obtained verify the theory studied with its application in real data, thus demonstrating the feasibility of implementing GMTI techniques on SAR data.

Keywords: SAR, GMTI, moving targets, COSMO-SkyMed, Spotlight.

Agradecimientos

Quisiera agradecer en primer lugar a mis padres y hermanas por ser los principales motores de mis sueños. Saber que cuento con el respaldo, apoyo y amor de todos ustedes, en cualquier situación, es algo que me llena de orgullo, felicidad y me da las fuerzas y el empuje necesario para tomar las decisiones que considere mejor para mi crecimiento personal. Gracias por cada día confiar y creer en mí. Los quiero mucho!

Quisiera agradecer también:

A mis queridos amigos y compañeros de maestría: Diego, por la incontable cantidad de vivencias que transitamos juntos que me han hecho crecer personal y profesionalmente. A Giuli, no sólo por deslumbrarme cada día con su inteligencia, simpatía y brillo de unicornio, también por guiarme en el camino de la tolerancia y la paciencia. Además, la hermosa estética de los mapas presentados en esta tesis son obra de ella. A Yenni por las charlas, consejos, las risas, los viajes y las partidas de UNO. Los mejores recuerdos de la pasantía los tengo con ella, un vino, queso y Chango. A Sofi por su alegría y pasión contagiosa, con la cual intentó enseñarme sobre geología. A Pampa por su ternura infinita y su garra. A Fede por su templeza. A Paulita por musicalizarnos cada mañana con su risa característica. A Vicky y a Tina por el empuje. Al mejor oceanógrafo de la Argentina y a su compañero fiel por los buenos recuerdos. Al otro gerente general por la animación de estos dos maravillosos años y a su compañero fiel, Santi Bustos por siempre tirar para adelante. A Celi por su amistad, cariño y sus divertidas clases que me ayudaron mucho. A la MTS y la MIS.

A Debora Pastina, mi tutora en Italia, quien muy amablemente me ha recibido y dedicado tanto tiempo. El abordaje de esta temática no podría haberse llevado a cabo sin su conocimiento, compromiso y dedicación. Agradezco también a través de ella a todo su grupo de trabajo, quienes me han hecho sentir como en casa. Será un placer para mí compartir los próximos tres años con ustedes.

A Invap, por haberme dado la posibilidad de tomarme licencia durante este nuevo proceso de formación. A Leo B. por bancarme en mi decisión y ayudarme a empujar las cosas. A Gonza, Charly, Agus, Cris, Nico, Ale B. y Fede, brillantes seres humanos de los cuales aprendí mucho. A Gabriel Platzeck por haberme ayudado a desarrollar mi plan de trabajo, y colaborar con los trámites iniciales de la maestría.

A Leonardo, mi director, por haber aceptado trabajar conmigo en este tema. Por guiarme, ayudarme y darme la libertad necesaria. A Andrés, mi co-director por su buena predisposi-

ción.

A Almendra, mi querida tutora académica, por la paciencia, la calidez, la cantidad de tiempo que nos dedicó y el amor infinito.

A Sil por estar en todo momento. Nada de esto hubiese sido posible sin sus sahumeros, sus mantras y sin Ganesha. Es una amiga de fierro a quien quiero muchísimo. Y claro, a todos los jardineros.

A mis hermanos barilochenses: Agus, Aye, Julieta, y al resto de la familia teatral: Vero, Euge, Flor, Nico. Todos ellos me acompañaron y alentaron durante el proceso de postulación a la maestría. Además, hemos compartidos hermosos momentos que siempre recuerdo con mucho cariño. Los quiero y admiro mucho!

A Mauri, Javi y Tincho. Con quienes aprendí a estudiar.

A todos los profesores que han sido parte de mi formación a lo largo de estos dos años.

A Anabella por la paciencia y al instituto Gulich por las herramientas y posibilidades brindadas.

A la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y a la Agenzia Spaziale Italiana - Agenzia Espacial Italiana (ASI)

Y por último pero no por eso menos importante, a Emili, por acompañarme y llenar de amor todos estos años de aventura.

Índice de Contenidos

1. Introducción	1
1.1. Aplicaciones de las técnicas GMTI	3
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivos generales	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Organización de la tesis	4
2. Marco Teórico	5
2.1. Radar: Una breve reseña	5
2.2. Introducción a la teoría SAR	6
2.3. Adquisición de datos SAR	7
2.3.1. Geometría de adquisición plana	8
2.3.2. Adquisición en rango	10
2.3.2.1. El chirp	10
2.3.2.2. Resolución en rango	10
2.3.3. Adquisición en acimut	10
2.3.3.1. Apertura sintética	10
2.3.3.2. Frecuencia de repetición de pulsos	11
2.3.3.3. Frecuencia doppler y resolución en acimut	13

2.4.	Datos RAW y enfoque de la imagen	13
2.4.1.	Estructura de la matriz de datos	13
2.4.2.	Enfoque de la imagen	14
2.4.3.	Migración de celdas en rango	16
2.4.4.	Señal en banda base	18
2.4.5.	Dominio range-Doppler	18
2.4.6.	Profundidad de campo	18
2.5.	Algoritmos de enfocado	19
2.5.1.	Chirp Scaling Algorithm	19
2.5.1.1.	Tercera función de fase	21
2.6.	Teoría de objetos en movimiento	22
2.6.1.	Ecos de target estático	22
2.6.1.1.	Curvatura en rango	24
2.6.2.	Ecos de target en movimiento	25
2.6.3.	Efecto producido por blancos móviles en imágenes SAR reales . . .	27
2.7.	COSMO-SkyMed: Descripción general	29
2.7.1.	Modos de adquisición	30
2.7.1.1.	Modo de adquisición Spotlight	31
2.7.2.	Niveles de procesamiento estándar	32
3.	Metodología	34
3.1.	Imágenes seleccionadas	34
3.2.	Esquema de procesamiento	35
3.3.	Descripción del algoritmo	40
4.	Casos de Aplicación: Procesamiento y Resultados	44
4.1.	Procesamiento de imagen italiana	44
4.1.1.	Descripción de la escena	44
4.1.2.	Procesamiento de la imagen	46
4.1.3.	Reubicación de targets sobre la ruta	48
4.1.4.	Esquema de procesamiento propuesto en [5]	51

4.2. Procesamiento de imagen argentina	53
4.2.1. Dataset	53
4.2.2. Procesamiento de imagen argentina con record number 124464 . .	54
4.2.2.1. Reubicación de targets sobre la ruta	59
5. Conclusiones y Trabajos Futuros	64
5.1. Conclusiones	64
5.2. Trabajos Futuros	65

Índice de figuras

2.1. Principio de operación del radar. Tomado y modificado de [12].	5
2.2. Comparación entre adquisición óptica y adquisición SAR	7
2.3. Geometría plana para sistema SAR. Tomado y modificado de [2].	9
2.4. Principio de apertura sintética. Tomado y modificado de [17].	11
2.5. Tren de pulsos de un sistema SAR.	12
2.6. Transmisión y recepción de pulsos en sistema SAR. Tomado y modificado de [15].	12
2.7. Organización de la matriz de datos RAW	14
2.8. Escenario planteado. Ejemplo. Tomado y modificado de [12].	15
2.9. Enfoque de adquisición. Ejemplo. Tomado y modificado de [12].	16
2.10. Migración de celdas en rango. Tomado y modificado de [4].	17
2.11. Corrección de migración de celdas en rango. Tomado y modificado de [23].	17
2.12. Concepto de DOF	19
2.13. Diagrama en bloques del CSA. Tomado y modificado de [27].	21
2.14. Modelo de señales para targets en movimiento	23
2.15. Efecto de targets en movimiento en imágenes SAR si se realiza el enfoque para escenas estacionarias. Tomado y modificado de [4].	27
2.16. Efectos de targets móviles en imágenes SAR. Tomado y modificado de [5].	28
2.17. Efectos de targets móviles en imágenes SAR ampliada. Tomado y modificado de [5].	28
2.18. SIASGE. Tomado y modificado de [31].	29
2.19. Modos de adquisición de CSK. Tomado y modificado de [30].	30
2.20. Adquisición en modo spotlight.	31

2.21. Características de imágenes spotlight. Tomado de [32].	32
2.22. Los cinco productos estándares de CSK. Tomado de [32].	33
3.1. FFT sobre imagen SLC	35
3.2. Esquema de Procesamiento General	36
3.3. Concepto de DOF para compensar desfase producidos por targets en movimiento	37
3.4. Esquema de Procesamiento Detallado	38
3.5. Análisis de Stack de Imágenes	39
3.6. Diagrama en bloques del algoritmo - Parte 1	40
3.7. Diagrama en bloques del algoritmo - Parte 2	41
3.8. Diagrama en bloques del algoritmo - Parte 3	42
3.9. Curvas de análisis para targets fijos	43
4.1. Escena completa de imagen italiana. Tomado de [5].	45
4.2. Imagen óptica correspondiente a zona analizada en [5].	45
4.3. Análisis de Target 1 y Target 2	46
4.4. Análisis de Target 3 y Target 4	46
4.5. Análisis de Target 5 y Target 6	47
4.6. Análisis de Target 7	47
4.7. Análisis de Target 8	47
4.8. Proyecciones de velocidades sobre imagen italiana. Tomado y modificado de [33].	49
4.9. Reubicación de target. Tomado y modificado de [33]	49
4.10. Reubicación realizada sobre imagen italiana. Tomado y modificado de [33].	51
4.11. Primer paso del esquema de procesamiento propuesto en [5]. Tomado y modificado de [5].	52
4.12. Segundo paso del esquema de procesamiento propuesto en [5]. Tomado y modificado de [5].	52
4.13. Imagen de intensidad de adquisición con record number 54198	54
4.14. Imagen Óptica del Área de Estudio	54
4.15. Imagen Quick Look del área de estudio	55
4.16. Imagen Óptica ampliada del Área de Estudio	55
4.17. Zona de análisis	56
4.18. Zona de análisis - Zoom - Target 1	56
4.19. Target 1 - Velocidades estimadas Vs Intensidad de pixel	57

4.20. Target 1 enfocado	57
4.21. Zona de análisis - Zoom - Target 2	58
4.22. Target 2 - Velocidades estimadas Vs Intensidad de pixel	58
4.23. Target 2 enfocado	59
4.24. Pendiente de ruta	59
4.25. Cálculo de componentes de velocidad para target 1.	60
4.26. Proyección de vector de velocidad del target 1 sobre la ruta	61
4.27. Medición de desplazamiento del target 1 en la imagen SAR	62
4.28. Cálculo de componentes de velocidad para target 2.	62
4.29. Medición de desplazamiento del target 2 en la imagen SAR	63

Índice de tablas

2.1. Bandas comúnmente utilizadas en sistemas SAR. Tomado y modificado de [2].	8
4.1. Velocidades estimadas en [5] Vs velocidades obtenidas con esquema propio	48
4.2. Parámetros estimados en [5] Vs parámetros estimados con esquema propio	50
4.3. Conjunto de imágenes disponibles para procesar	53

Acrónimos

ASI Agenzia Spaziale Italiana - Agencia Espacial Italiana

CEOS Committee on Earth Observation Satellites

CONAE Comisión Nacional de Actividades Espaciales

CSA Chirp Scaling Algorithm

COSMO-SkyMed COnstellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation

CSK COSMO-SkyMed

DEM Digital Elevation Model

DOF Depth of Field

ECSA Extended Chirp Scaling Algorithm

FFT Fast Fourier Transform

FSA Frequency Scaling Algorithm

GCP Ground Control Points

GEC Geocoded Ellipsoid Corrected

GMTI Ground Moving Target Indication

GPS Global Positioning System

GPU Graphics Processing Unit

GTC Geocoded Terrain Corrected

IFFT Inverse Fast Fourier Transform

IG Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich

IFFT Inverse Fast Fourier Transform

MAEARTE Maestría en Actividades Espaciales para Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias

MAIE Maestría en Aplicaciones de Información Espacial

PRF Pulse Repetition Frequency

PRT Pulse Repetition Time

Radar Radio Detection and Ranging

RAR Real Aperture Radar

RCM Range Cell Migration

RCMC Range Cell Migration Correction

RDA Range Doppler Algorithm

RRSN Radar Remote Sensing & Navigation Group

SAOCOM Satélite Argentino de Observación Con Microondas

SAR Synthetic Aperture Radar

SIASGE Sistema Ítalo Argentino de Satélites para la Gestión de Emergencias

SLAR Side Looking Airbone Radar

SLC Single Look Complex

SWT Sampling Window Time

CAPÍTULO 1

Introducción

El término "Sensado Remoto", es comúnmente utilizado para describir la ciencia de identificar, observar y medir características de un objeto sin tener contacto directo con él. Este proceso incluye la detección y medición de radiación a diferentes longitudes de onda reflejadas o emitidas desde distintos objetos o materiales. Varios instrumentos han sido desarrollados para alcanzar este objetivo, los cuales pueden clasificarse generalmente como pasivos y activos [1].

Los instrumentos pasivos detectan la energía natural que es reflejada o emitida desde la escena observada. La luz del sol es la fuente externa más utilizada como fuente de radiación sensada por estos instrumentos.

Por otro lado, los instrumentos activos proveen su propia energía (radiación electromagnética) para iluminar el objeto o la escena de observación. Estos envían un pulso de energía desde el sensor hacia el objeto y luego recibe la radiación que es reflejada por el mismo. Los científicos utilizan varios tipos diferentes de sensores remotos. El sensor mas popular y atractivo que tuvo una gran difusión en las últimas décadas es Radio Detection and Ranging (Radar). El radar es capaz de detectar, rastrear, generar imágenes de targets con buena resolución y a largas distancias, ya sea de día o de noche, y en casi todas las condiciones climáticas. Principalmente por esta razón, los radares han sido utilizados ampliamente para fines militares y civiles, tales como vigilancia de áreas protegidas (fronteras por ejemplo), defensa aérea y control de armas, detección remota del medio ambiente, observación del clima y la tierra, control del tráfico aéreo y de cruceros, vigilancia de tráfico en puertos y ríos, entre otros.

El creciente interés en el campo de la seguridad nacional y el monitoreo de posibles desastres relacionados con peligros tanto inducidos por los seres humanos como los naturales, ha impulsado al desarrollo de técnicas avanzadas de radares para generar imágenes de alta resolución. En este contexto, el Synthetic Aperture Radar (SAR) adquiere relevancia.

Un SAR es un sensor de microondas activos, usualmente montado en satélites o aviones. El SAR, que se mueve a lo largo de una trayectoria, transmite y recibe pulsos de tal manera que se puede obtener una mejora en la resolución a lo largo de la dirección de vuelo explotando el principio de síntesis de antena, es decir, sintetizando una antena cuyo tamaño a lo largo

de la dirección de movimiento (acimut) es mucho mayor que la antena real a bordo. De esta manera, es posible generar imágenes por medio de microondas con una resolución espacial del orden de los metros (o menos) independientemente de la distancia al objetivo.

Los pulsos recibidos por el radar son digitalizados y almacenados en una matriz que recibe el nombre de “datos crudos” (RAW). El proceso por el cual se transforman los datos crudos en una imagen, se llama *enfocado o compresión* [2].

El enfocado SAR clásico se basa en la suposición de que el área iluminada es estática durante la formación de la apertura sintética. La suposición de que los objetos en el área iluminada no se mueven durante la adquisición de datos debe mantenerse para proporcionar imágenes SAR enfocadas con precisión. Sin embargo, en algunos escenarios, pueden estar presentes en la escena objetos en movimiento (también llamados targets). En estos casos, los parámetros que caracterizan al target y a la escena estática son distintos. Por lo tanto, si se enfoca la imagen utilizando un enfocado clásico, se induce en primer lugar un cambio de acimut, proporcionando así una ubicación incorrecta del target en la imagen SAR, y en segundo lugar genera un desenfoque [3]. Este es el caso de vehículos en la superficie terrestre, barcos y cualquier otro target en movimiento.

Conociendo y estudiando en profundidad los efectos descritos en el párrafo anterior, se pueden aplicar distintas técnicas de procesamiento sobre las imágenes SAR para obtener información de los targets. Estas técnicas, junto con cualquier otra cuyo objetivo sea extraer parámetros de objetos en movimiento sobre la superficie terrestre, se llaman Ground Moving Target Indication (GMTI) [4].

Debido a sus cualidades de detección, reubicación y estimación de velocidad de targets sobre la superficie terrestre, la disponibilidad de capacidades GMTI para los sistemas de radar espaciales, como es el caso del SAR COSMO-SkyMed (CSK), son de gran interés para vigilancia en aplicaciones de protección civil y militar [5] [6].

Las capacidades GMTI generalmente son proporcionadas por sistemas más complejos, como por ejemplo aquellos que tienen múltiples canales de recepción. Si hacemos referencia a sistemas SAR multicanales satelitales, en la literatura se puede encontrar un número considerable de trabajos relacionadas con técnicas GMTI realizando, por ejemplo, el procesamiento de datos adquiridos por TerraSAR-x [7] [8], y por Radarsat-2 [9] [10].

Sin embargo, tal como se indica en [4] y [5], los sistemas de un único canal pueden proporcionar teóricamente capacidades GMTI razonables siempre y cuando se utilicen técnicas de procesamiento de señales adecuadas. Al utilizar sistemas de un solo canal, el rendimiento esperado es más bajo comparado con aquellos que poseen varios canales, ya que estos últimos permiten una cancelación significativa del eco de los objetos estáticos, lo que significa que pueden extraer targets que se encuentran enmascarados en el eco general de la escena iluminada y lograr así una detección precisa de la dirección del target, lo que permite también la reubicación.

A pesar de lo mencionado anteriormente, es de gran interés investigar la viabilidad de desarrollar capacidades GMTI en sistemas de radares espaciales de un canal disponibles en la actualidad, como lo es CSK [5].

1.1. Aplicaciones de las técnicas GMTI

La disponibilidad del modo GMTI es de gran interés para aplicaciones como las que se describen a continuación [5]:

- A) **Monitoreo para protección civil:** Las organizaciones de protección civil podrían estar particularmente interesadas en detectar y eventualmente reubicar vehículos en movimiento dentro de áreas críticas que estén en condiciones de desastres naturales, lo cual serviría para buscar y rescatar sobrevivientes, como así también para guiar y controlar los vehículos del equipo de rescate.
- B) **Monitoreo para seguridad:** Las organizaciones de seguridad podrían estar interesadas en el monitoreo de áreas con el propósito de detectar targets en movimiento inesperados o targets con comportamiento anormal que requieran verificación como así también la identificación de pequeños objetos en movimiento, de otra forma indetectables. Esto podría ser útil, por ejemplo, en zonas de fronteras.
- C) **Monitoreo de tráfico en rutas/autopistas:** el análisis del flujo del tráfico se puede llevar adelante realizando una reubicación adecuada de los vehículos en las carreteras. La explotación de secuencias de imágenes multitemporales y la alta tasa de repetición disponible con CSK permiten el monitoreo periódico de las condiciones del tráfico vial durante temporadas y años.

Es importante mencionar que las aplicaciones destinadas a la gestión de recursos durante emergencias, así como aquellas destinadas al control de seguridad, son de interés para Argentina ya que están incluidas en el Plan Nacional Espacial [11].

Por razones de disponibilidad de datos y con el fin de comprobar el correcto funcionamiento de la técnica propuesta, en este trabajo se selecciona una imagen adquirida sobre rutas de la ciudad de Córdoba (Argentina) y una imagen adquirida sobre rutas de la ciudad de Roma (Italia), pretendiendo determinar parámetros de velocidad de autos en circulación. Esto enmarca el trabajo dentro del punto C). Sin embargo, la técnica se puede utilizar sin ningún tipo de modificación sobre imágenes de fronteras para realizar monitoreo de seguridad, o sobre imágenes adquiridas en desastre naturales para protección civil, lo que explotaría las aplicaciones mencionadas en los puntos A) y B) respectivamente.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos generales

El objetivo de este trabajo es estudiar técnicas adecuadas destinadas a proporcionar capacidades GMTI en imágenes CSK (sistemas SAR espacial de un solo canal) y aplicar dichas técnicas en datos reales para detectar objetos en movimiento en rutas o autopistas ubicadas en Argentina, estimando sus parámetros de velocidad.

1.2.2. Objetivos específicos

Para alcanzar los objetivos generales, los siguientes pasos deben ser llevados a cabo:

- El estudio del modelado de la señal para objetos en movimiento.
- La selección de un esquema de detección y estimación de velocidades para objetos en movimiento.
- Implementación computacional del esquema seleccionado.
- El procesamiento de imágenes CSK para detectar y estimar velocidades de objetos en movimiento.

1.3. Organización de la tesis

En esta sección se describe la estructura de los capítulos que conforman este documento.

Capítulo 1: Se presenta una introducción al trabajo, explicando los hitos ocurridos a lo largo de los años que dieron lugar al desarrollo de técnicas GMTI en imágenes SAR, mencionando además las aplicaciones que brindan tales técnicas. Se cierra este capítulo explicando los objetivos generales y específicos de la investigación.

Capítulo 2: Primero se realiza una introducción teórica al SAR, presentando definiciones y la geometría de adquisición. Se exponen también los parámetros físicos de las imágenes SAR, y se hace énfasis en el tipo de información que se puede obtener de ellas. Luego se desarrolla y explica el modelado de la señal para blancos móviles y cual es el efecto que los mismos provocan en las imágenes SAR. El modelo de señales puede explicar tanto las características como los problemas de procesamiento de los objetos móviles en datos reales, motivo por el cual es necesario estudiarlo.

Capítulo 3: Se presenta el esquema de procesamiento propuesto para detectar blancos móviles y estimar sus parámetros de velocidad. Se explica cada paso y se justifica con la teoría estudiada en el capítulo anterior. Se genera un algoritmo en el entorno de desarrollo Matlab para implementar tal esquema y se representa el mismo por medio de un diagrama de bloques.

Capítulo 4: Se utiliza el algoritmo del capítulo anterior para procesar dos imágenes SAR CSK adquiridas en modo Spotlight. Una imagen de Argentina y otra de Italia. Los resultados obtenidos se presentan y analizan en este capítulo.

Capítulo 5: Exposición de las conclusiones y proposición de trabajos a futuro relacionados con la investigación realizada.

2.1. Radar: Una breve reseña

Un radar es un dispositivo electrónico que transmite y recibe pulsos de ondas electromagnéticas a través de una antena. Al emitir un pulso, la energía viaja a través del espacio o el aire hasta encontrar un objeto en su camino. Cuando esto ocurre, existe una interacción del pulso con el objeto lo que produce una dispersión de energía: una parte puede ser absorbida por el objeto, otra puede pasar a través de él y otra puede ser reflejada, lo que recibe el nombre de eco. Las diferentes interacciones dependen principalmente de la longitud de onda de la onda electromagnética y del tamaño, forma y composición del objeto. La energía reflejada generalmente toma cualquier dirección, por lo tanto la energía del eco que llega al radar es muy baja en relación con la emitida [12]. Este concepto se ilustra en Fig. 2.1.

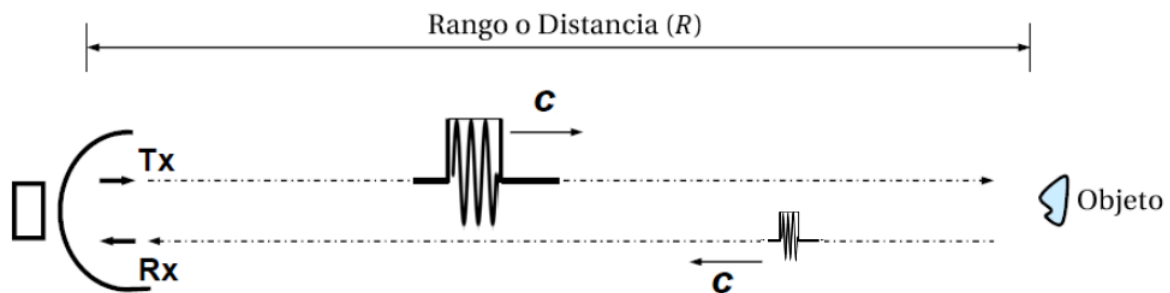


Figura 2.1: Principio de operación del radar. Tomado y modificado de [12].

Cuando el eco llega a la antena, se mide el tiempo de propagación del pulso electromagnético (t). Con esta información se puede calcular el rango o distancia del siguiente modo:

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

donde c representa la velocidad de la luz. El factor $\frac{1}{2}$ se debe a que en realidad la señal viajó dos veces la distancia al objeto, una de ida y otra de retorno.

En un principio, los radares se utilizaban para medir distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos estáticos o móviles como aeronaves, barcos, vehículos motorizados, entre otros. Con el tiempo, comenzaron a utilizarse para escanear zonas amplias. Para ello, en un principio, los radares rotaban sobre un eje, pero rápidamente, en los años 50, los ingenieros se dieron cuenta que otra opción era mantener el radar fijo, pero montado en una plataforma móvil (aviones, satélites). Esto permite mejorar la resolución de las imágenes generadas por medio de técnicas de procesamiento digital. En este marco se desarrollaron los primeros radares de vista lateral (Side Looking Airbone Radar (SLAR)) [2].

En general, la mayoría de los radares aerotransportados que producen imágenes son de vista lateral, dentro de éstos se encuentran dos tipos: Real Aperture Radar (RAR) y Synthetic Aperture Radar (SAR) [13].

Un RAR es un sistema radar donde el ancho de iluminación de la antena está determinado por la longitud física de la misma. Como ventajas se puede mencionar la simplicidad del diseño y del procesamiento de la señal. Sin embargo, el mayor problema de los RAR radica en su baja resolución espacial como consecuencia del escaso diámetro de la antena, donde el tamaño mínimo del objeto identificable en la imagen está en relación directa con la longitud de onda y la altura de observación y en relación inversa con el diámetro de la apertura. En una plataforma espacial sería imposible lograr una buena resolución con este sistema, dado que sería preciso contar con antenas de enormes proporciones [13].

Con el objetivo de mejorar los problemas de los sensores RAR, en la década del 50 el matemático Carl A. Wiley [14] desarrolló una técnica avanzada que permite simular una antena mas grande mediante la sucesión de señales recibidas por una antena real situada a bordo de una aeronave. Esta antena se denomina apertura sintética, y su principio de funcionamiento se basa en el efecto Doppler que afecta a la observación cuando hay un movimiento relativo entre el objeto y el sensor [13].

Básicamente, se requieren dos procesos para producir una imagen SAR: el sensor debe desplazarse iluminando la zona de interés y registrando la sucesión de señales (ecos) provenientes de cada objeto. Posteriormente, los ecos deben ser procesados para formar una imagen. Una ventaja de estos sistemas, es que por tratarse de un haz emitido artificialmente, pueden controlarse las condiciones de adquisición: ángulo, distancia, orientación, polarización [13].

2.2. Introducción a la teoría SAR

Han pasado muchos años desde que Carl A. Wiley observara que un radar de visión lateral podía mejorar la resolución espacial aprovechando la dispersión Doppler que genera el radar al estar en movimiento. Esta observación dio lugar al nacimiento del SAR [2].

Antes del desarrollo de la generación de imágenes de radar, los sensores mas utilizados eran sistemas de cámaras con detectores sensibles a la radiación solar reflejada o a la radiación térmica emitida por la superficie terrestre. El SAR, en cambio, representa una técnica totalmente diferente para la observación de la Tierra. Debido a que el radar es un sistema activo que transmite pulsos de radiación electromagnética en la región de microondas del espectro electromagnético, este instrumento expande las posibilidades de observación de la tierra [2].

Como un sensor activo, el SAR provee su propia iluminación y por lo tanto no es dependiente

de la luz del sol, pudiendo operar de este manera tanto de día como de noche. Además, ni las nubes, ni la niebla, ni las lluvias tienen un efecto significativo en las microondas lo que permite obtener imágenes SAR independientemente de las condiciones climáticas [2]. Este concepto se ilustra en la Fig. 2.2: a la izquierda un sensor óptico detectando solo lo que se emite desde la escena o lo que se refleja desde una fuente externa. A la derecha, un SAR activo que genera su propia señal y mide el eco de la misma.

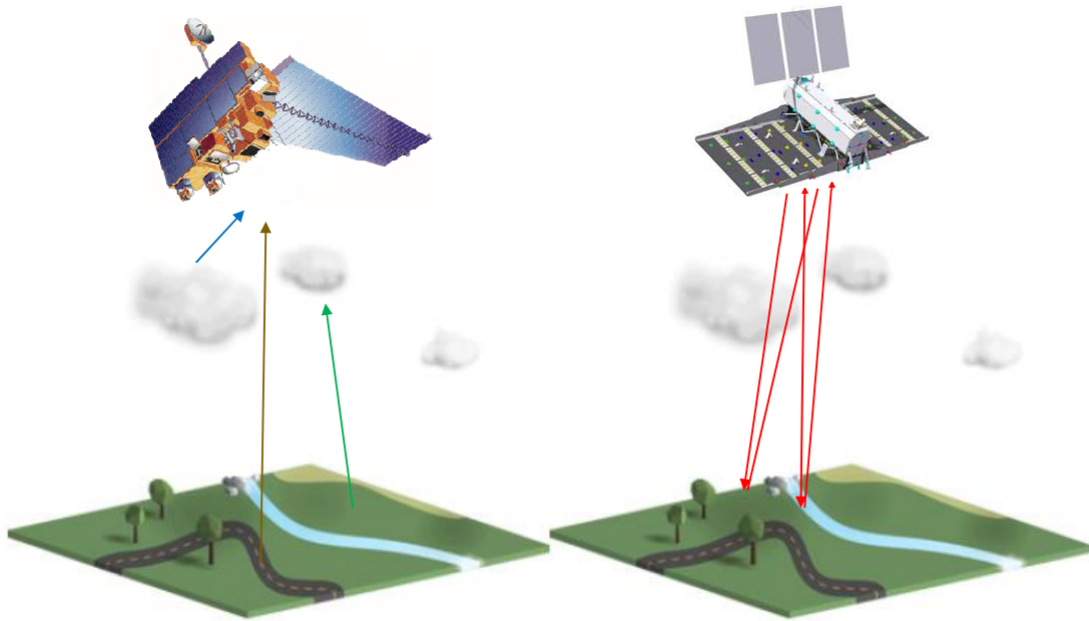


Figura 2.2: Comparación entre adquisición óptica y adquisición SAR

Generalmente, los sistemas SAR operan a una sola longitud de onda dentro del rango de las microondas, que va desde 1 m a 10 mm (de 0,3 GHz a 300 GHz). Sin embargo, la mayoría de los satélites opera en longitudes de onda que van de los 0,5 cm hasta los 75 cm. Las bandas más utilizadas son la banda X (3 cm), C (6 cm) y la L (24 cm). Cada una de estas bandas permite extraer información diferente, ya que la longitud de onda determina diferentes métodos de interacción entre la señal enviada y la escena. De este modo, la elección de la longitud de onda debe ser del orden de magnitud del tamaño de la característica de la superficie terrestre que se desea estudiar. Las características pequeñas se reconocen mejor con imágenes de banda X, es decir, longitudes de onda cortas, mientras que las características grandes, como por ejemplo mapeo de tipos de cultivo o estructura de bosques, están mejor marcadas en imágenes de banda L.

En la Tabla 2.1, se muestran las frecuencias y las longitudes de ondas más utilizadas en los sistemas SAR [2].

2.3. Adquisición de datos SAR

Un SAR es un sistema de radar que genera mapas de retrodispersión de la superficie terrestre utilizando una mirada lateral, tal como se ilustra en Fig. 2.3 [2]. Mientras el sensor se mueve a una velocidad V_a a lo largo de su órbita, transmite lateralmente y en dirección perpendicular a la línea de movimiento, ondas electromagnéticas en el rango de las microondas con una

Banda	Frecuencia	Longitud de Onda	Características y Ejemplos
Banda X	12,5 - 8 GHz	2,4 - 3,75 cm	Comúnmente utilizado para reconocimiento militar y vigilancia. (TerraSAR-X, TanDEM-X, COSMO-SkyMed)
Banda C	8 - 4 GHz	3,75 - 7,5 cm	Penetración limitada en la vegetación y otros sólidos. Útil para el estudio de bosques, océanos y glaciares. (RADARSAT, ERS-1)
Banda S	4 - 2 GHz	7,5 - 15 cm	Utilizado generalmente en aplicaciones meteorológicas. (Medición de precipitaciones, Vigilancia en aeropuertos)
Banda L	2 - 1 GHz	15 - 30 cm	Debido a su poder de penetración, se utiliza para analizar suelos, aún con cobertura vegetal. (SAOCOM, ALOS PALSAR)
Banda P	1 - 0,3 GHz	30 - 100 cm	Actualmente utilizado para investigación y experimentación. Tiene un gran poder de penetración.

Tabla 2.1: Bandas comúnmente utilizadas en sistemas SAR. Tomado y modificado de [2].

frecuencia llamada Pulse Repetition Frequency (PRF) [15] y recibe los ecos de esos pulsos en la misma antena, los digitaliza y los almacena.

La dirección en la que avanza el radar se llama acimut, mientras que la dirección en la que se envían los pulsos se llama rango. Por otro lado, el sector en la tierra iluminado por un pulso se denomina pisada o footprint de la antena, mientras que el ancho de barrido se llama swath.

2.3.1. Geometría de adquisición plana

La teoría básica de la geometría de los radares SAR, es la misma que para todos los radares de vista lateral SLAR. La Fig. 2.3 [2] representa la geometría de observación, el escenario, el movimiento de la plataforma-radar, los parámetros y conceptos complementarios [16].

Se asume ahora que la tierra es plana y que el sensor se mueve a velocidad constante en una trayectoria rectilínea. Los parámetros involucrados son:

- **Blanco o target:** punto que se quiere detectar. Por simplicidad se usa el punto del blanco para los cálculos, pero en realidad se captura información de todo el entorno [2] [16].
- **Acimut o cross-range:** es una de las dimensiones principales de los sistemas SAR, la cual corresponde a la dirección alineada con el vector velocidad de la plataforma [2] [16].

- **Nadir:** punto de la superficie de la tierra situada directamente debajo del sensor SAR. El recorrido de este punto encima de la tierra con el movimiento del sensor o plataforma define la trayectoria del radar [2] [16].
- **Distancia o rango:** cuando se habla de este concepto existe una pequeña ambigüedad, por lo que se ha dividido en dos definiciones [2] [16]:
 - **Rango inclinado o Slant Range:** distancia directa entre el sensor y el blanco.
 - **Rango en tierra o Ground Range:** proyección de la distancia en rango inclinado al suelo.
- **Ancho de barrido o swath:** corresponde a la franja que es capaz de ver el SAR en la dirección perpendicular de vuelo. Es el ancho de la imagen en la dirección de las distancias en tierra, que comprende desde el rango cercano al rango lejano, normalmente determinadas por las especificaciones del sistema [2] [16].
- **Pisada de la antena:** es la proyección del diagrama de la antena sobre la tierra para un pulso electromagnético concreto. La posición y la forma vienen determinados por el haz de la antena y la geometría de la tierra [2] [16].
- **Ángulo de incidencia:** ángulo entre la normal a la superficie que pasa por el blanco y el rango inclinado R del mismo.
- **Ángulo de mirada:** es aquel localizado entre el Slant Range y el nadir [2] [16].

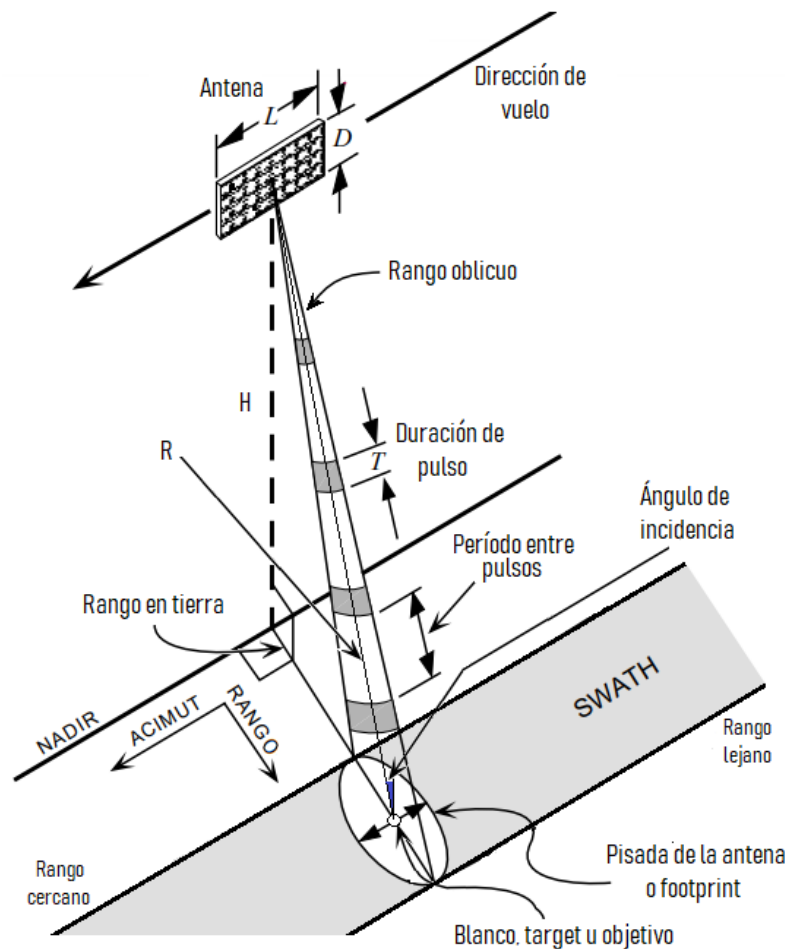


Figura 2.3: Geometría plana para sistema SAR. Tomado y modificado de [2].

2.3.2. Adquisición en rango

2.3.2.1. El chirp

Los SAR envían pulsos cortos modulados linealmente en frecuencia llamados “chirps”. Cada chirp es enviado en dirección aproximadamente perpendicular al vector de velocidad de la plataforma y está determinado por una duración τ_p , una frecuencia central f_0 y una tasa de variación de la frecuencia η . La forma compleja de la señal es descrita por la siguiente ecuación [17]:

$$S(t) = \exp \left\{ j2\pi \left(f_0 t + \frac{\eta t^2}{2} \right) \right\} \quad |t| \leq \frac{\tau_p}{2} \quad (2.2)$$

dónde t es la variable de tiempo. El ancho de banda B de la señal está determinado por el rango de frecuencias que abarca el chirp, y al estar linealmente modulado en frecuencia, este valor es directamente proporcional al tiempo de duración τ_p [17].

2.3.2.2. Resolución en rango

La resolución en rango de un radar se define como la separación en rango mínima de dos puntos para que puedan ser distinguidos como separados por el sistema [2].

La resolución en rango ρ_r está determinada por la siguiente ecuación [4]:

$$\rho_r = \frac{c}{2B} \quad (2.3)$$

donde c es la velocidad de la luz y B el ancho de banda del pulso enviado.

Para el caso de los sistemas SAR el pulso (chirp) está modulado linealmente en frecuencia y por lo tanto logra un mayor ancho de banda B mediante el envío de pulsos más largos en tiempo [17].

2.3.3. Adquisición en acimut

2.3.3.1. Apertura sintética

A medida que la plataforma avanza, un blanco es iluminado por una gran cantidad de pulsos. Al ser los ecos de la señal guardados en manera coherente es posible realizar el seguimiento de la historia de fase de un retrodispersor a lo largo de todo el tiempo durante el que fue iluminado. La explotación de la fase de la señal por el subsiguiente proceso de formación de la imagen puede ser pensado como la síntesis de una antena con una gran extensión en acimut [15] [17].

La Fig. 2.4 esquematiza lo mencionado en el párrafo anterior. Un blanco es iluminado desde el momento t_1 repetidas veces hasta el momento t_2 que es cuando queda fuera de la pisada de la antena. El estudio de los cambios de fase en la señal permite obtener una resolución tan fina como si el blanco hubiera sido adquirido con una antena cuyo tamaño de apertura real fuera el de la distancia entre los puntos correspondientes a los tiempos t_1 y t_2 . Esta distancia

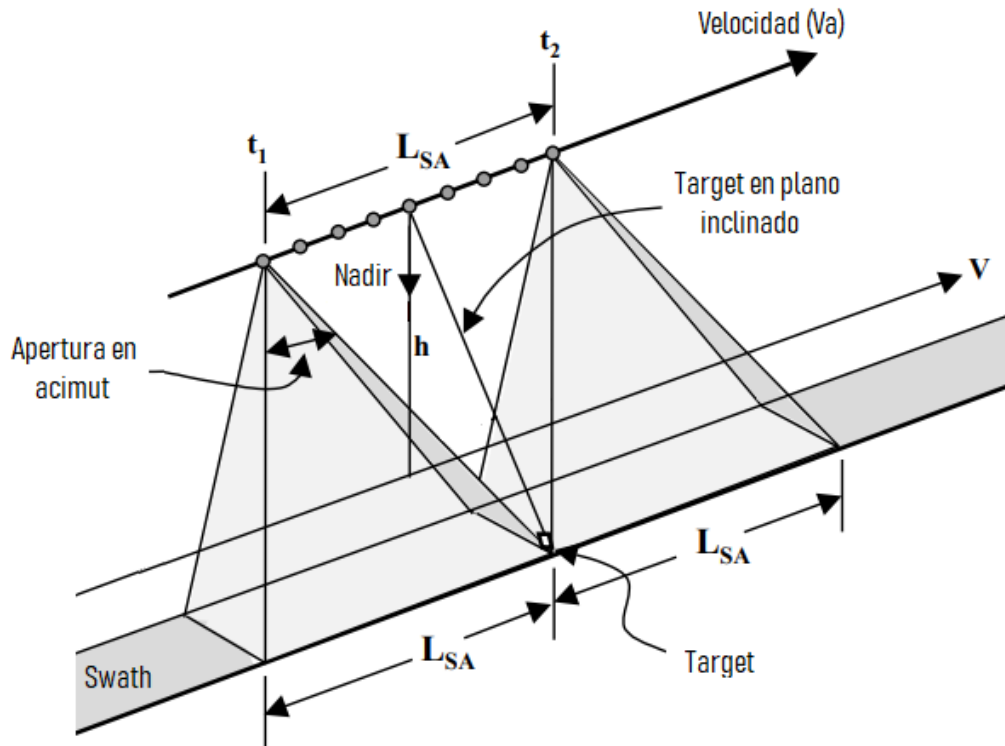


Figura 2.4: Principio de apertura sintética. Tomado y modificado de [17].

se denomina apertura sintética de la antena [2] [17] y en la figura se indica como L_{SA} . El tamaño de la apertura sintética se calcula por medio de la siguiente ecuación [18]:

$$L_{SA} = \frac{\lambda R_0}{L_a} \quad (2.4)$$

donde λ es la longitud de onda, R_0 el rango de referencia y L_a el tamaño de la antena en dirección de acimut.

2.3.3.2. Frecuencia de repetición de pulsos

Los chirps son enviados de acuerdo a un tiempo llamado Pulse Repetition Time (PRT) el cual se determina mediante la inversa de la PRF. La Fig. 2.5 muestra un tren de chirps enviados regularmente de acuerdo a la PRT [17].

Cuando el radar no está transmitiendo puede recibir los ecos reflejados por los blancos de la superficie. Es importante que este tiempo inter-pulso sea suficiente para poder recibir los ecos correspondientes a todo el ancho de barrido. Para ello se abre una ventana de muestreo de los ecos, comúnmente denominada Sampling Window Time (SWT) [17]. La PRF resulta entonces un parámetro de diseño importante ya que los ecos de la escena deben caer todos dentro de la SWT.

La Fig. 2.6 presenta el ciclo de transmisión y recepción de pulsos. Los ecos muestreados durante la apertura de la ventana SWT son demodulados y guardados como una fila de la matriz de datos y la frecuencia de muestreo f_s determina cada celda de tal matriz [17].

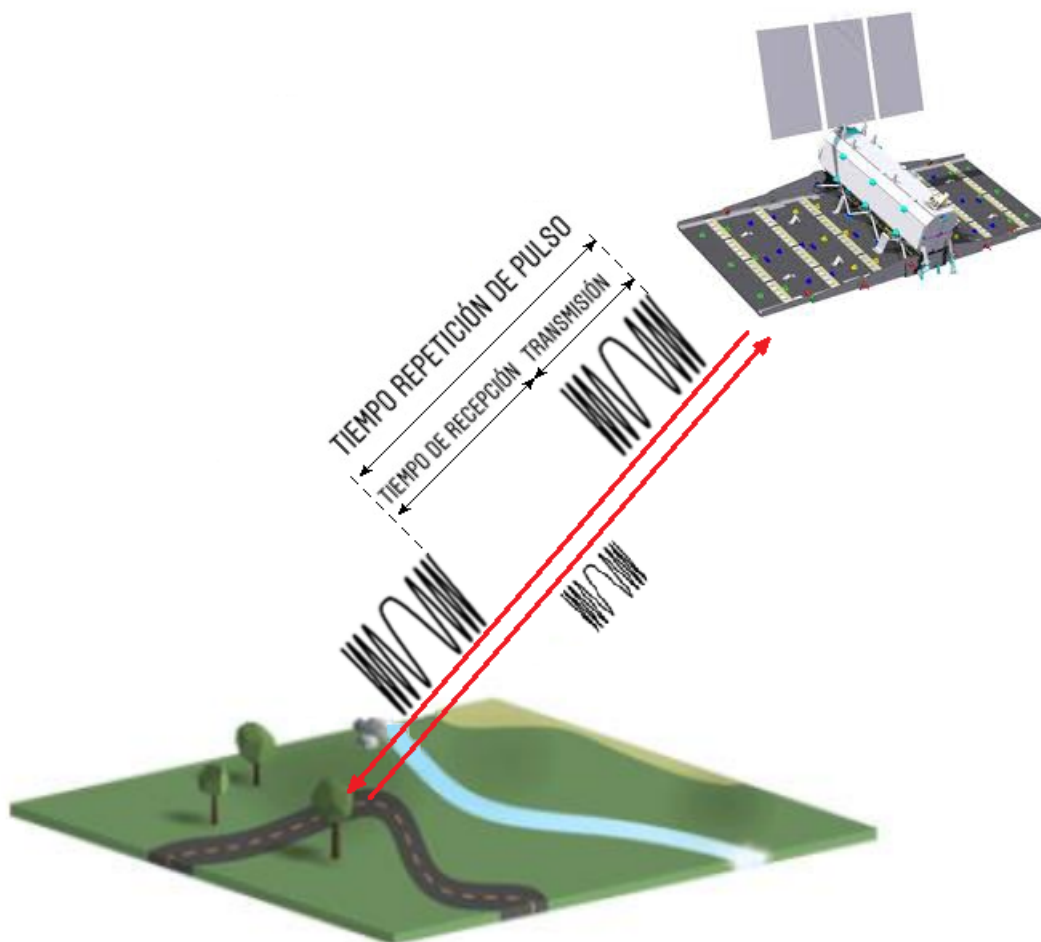


Figura 2.5: Tren de pulsos de un sistema SAR.

Es importante notar que los ecos muestreados luego de la transmisión de un pulso no corresponden a éste mismo.

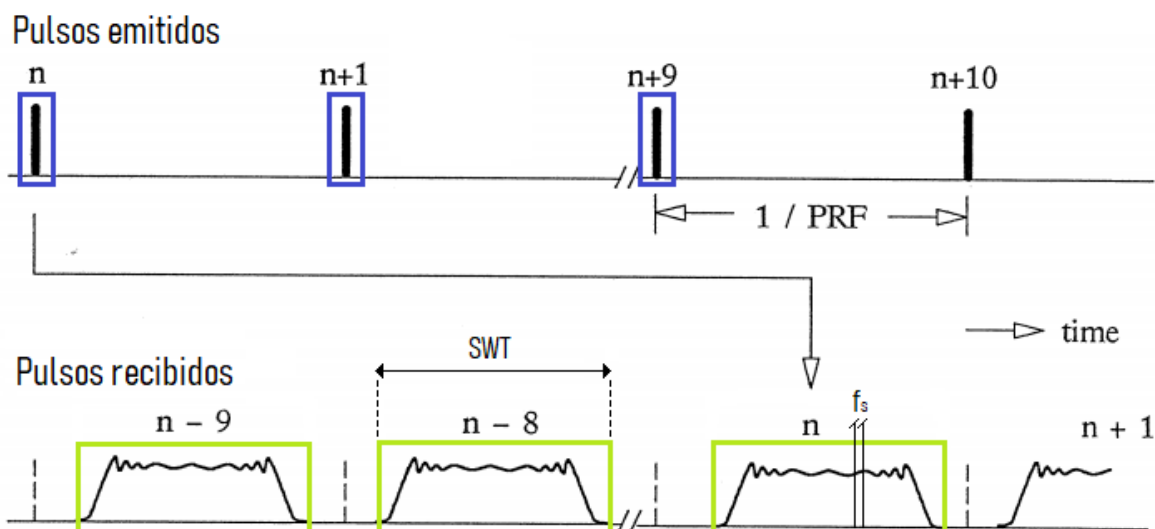


Figura 2.6: Transmisión y recepción de pulsos en sistema SAR. Tomado y modificado de [15].

2.3.3.3. Frecuencia doppler y resolución en acimut

El tiempo durante el cual un blanco es iluminado por la antena, y que de acuerdo a la Fig. 2.4 transcurre entre los tiempos t_1 y t_2 , es denominado tiempo de integración y se denota con T_i . Durante este tiempo la señal reflejada retorna hacia la antena con un cambio de frecuencia debido al efecto Doppler. Esta frecuencia es denominada frecuencia Doppler. Cuando el radar se aproxima al blanco la frecuencia Doppler es positiva, y cuando se aleja es negativa [17].

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 [2] [17]. Al igual que para el caso del chirp en rango, este chirp Doppler está determinado por un tiempo de duración, en este caso T_i , una frecuencia central conocida como Doppler Centroide F_{DC} y una tasa de cambio de la frecuencia llamada Tasa Doppler f_R [2] [17]. Estos dos últimos parámetros deben ser calculados a partir de datos tales como la velocidad relativa entre el sensor y el blanco, la distancia entre ambos y la longitud de onda.

En este punto es importante destacar lo que se acaba de mencionar: **“los parámetros que caracterizan al chirp en acimut depende de la velocidad relativa entre el sensor y el blanco”**. Esto quiere decir que cuando haya objetos moviéndose a una velocidad determinada, el chirp en acimut que experimenta el target, será distinto al chirp en acimut que experimenta toda la escena estacionaria, ya que la velocidad relativa en el primer caso sería $[V_{plataforma} \pm V_{target}]$ mientras que en el segundo sería únicamente $[V_{plataforma} - 0]$, pues el resto de los puntos de la escena están fijos en la tierra, es decir están a una velocidad igual a cero. Como se verá en secciones posteriores, estas diferencias producen efectos característicos cuando se generan imágenes SAR.

El chirp Doppler tiene un ancho de banda B_D que se incrementa a medida que el tiempo de integración es mayor y, al igual que en el caso del rango, la resolución en acimut mejora cuando mayor es el ancho de banda de la señal. Así la resolución ρ_a en acimut es [17] [19]:

$$\rho_a = \frac{0,886V_{st}}{B_D} \quad (2.5)$$

donde V_{st} es la velocidad relativa entre el radar y el blanco. El ancho de banda Doppler se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$B_D = 0,886 \frac{2V_{st}}{L_a} \quad (2.6)$$

donde L_a es la longitud de la antena en dirección de acimut.

2.4. Datos RAW y enfoque de la imagen

2.4.1. Estructura de la matriz de datos

Según lo desarrollado en la sección 2.3.3.2 *Frecuencia de repetición de pulso*, los ecos son muestreados durante el tiempo que la ventana SWT permanece abierta. Cada vez que és-

ta se abre se obtienen los ecos correspondientes a un pulso enviado y, por lo tanto, a una iluminación en rango. Estos datos son acomodados en una fila de la matriz de datos crudos denominada matriz RAW. La separación entre las celdas de cada fila está dada por la frecuencia de muestreo f_s y el tiempo correspondiente a tal distancia es $t_c = 1/f_s$ [17].

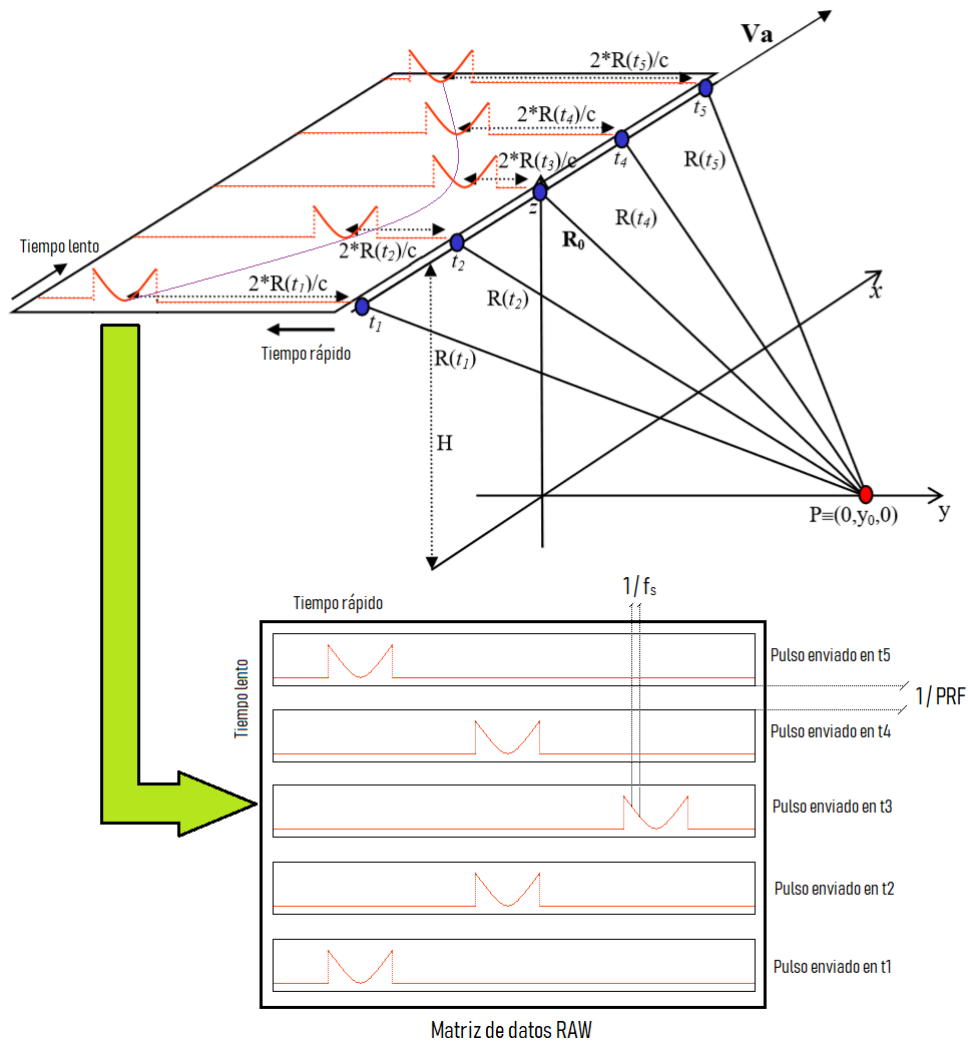


Figura 2.7: Organización de la matriz de datos RAW

Como cada fila de la matriz RAW corresponde al muestreo de los ecos de un pulso, la separación entre líneas está dada por el tiempo inter-pulso $PRT = 1/PRF$. Dada la diferencia de órdenes de magnitud de los tiempos entre t_c ($\sim \mu s$) y PRT ($\sim ms$) el primero es llamado tiempo rápido y el último tiempo lento [2]. Estos términos suelen utilizarse como sinónimos de rango y acimut, respectivamente [17]. El concepto se grafica en la Fig. 2.7.

2.4.2. Enfoque de la imagen

La matriz de datos RAW está conformada por la suma coherente de una inmensa cantidad de ecos correspondientes a distintos blancos retrodispersores distribuidos en la escena. Esta suma resulta en una matriz de datos que presenta características similares a un ruido gaussiano [17] [20].

Es por ello que resulta necesario un procesamiento que permita obtener una imagen a partir

de estos datos crudos. Este proceso es comúnmente denominado enfoque o compresión [15], ya que reconstruye la información de cada punto de la escena. La imagen obtenida luego del enfocado recibe el nombre de Single Look Complex (SLC), la cual es una imagen con valores complejos y de allí su nombre. El hecho de almacenar los datos en formato complejo permite guardar información de la amplitud de la señal recibida y así también su fase [17].

Para realizar el enfoque en la dirección de rango, también denominado *compresión en rango* (filas de la matriz), generalmente se utiliza una técnica denominada Matched Filtering, la cual realiza la correlación de los datos RAW con el complejo conjugado del pulso emitido por el SAR para resolver el problema inverso y obtener así la reflectividad de la superficie [17] [21].

La ecuación de correlación cruzada entre la señal retornada y el chirp transmitido que realiza el matched filtering está dada por [17] [19]:

$$S_0(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_r(u)g^*(u-t)du \quad (2.7)$$

donde $S_0(t)$ es la señal a la salida del filtro, $S_r(t)$ es la señal recibida y $g^*(t)$ es el complejo conjugado de la réplica del chirp enviado. Esta ecuación puede ser descrita de una forma más sencilla utilizando la propiedad de correlación cruzada de la Fast Fourier Transform (FFT) de la siguiente forma:

$$S_0(t) = FFT^{-1}[FFT(S_r)] * conj(FFT(g)) \quad (2.8)$$

El proceso se aplica también en dirección de acimut (*compresión en acimut*) correlacionando las columnas de los datos previamente enfocados en rango con el complejo conjugado del chirp Doppler [15]. Este proceso es conocido como compresión en acimut [17].

A modo de comprender visualmente las operaciones de enfoque explicadas en los párrafos anteriores, consideremos el ejemplo de la Fig. 2.8:

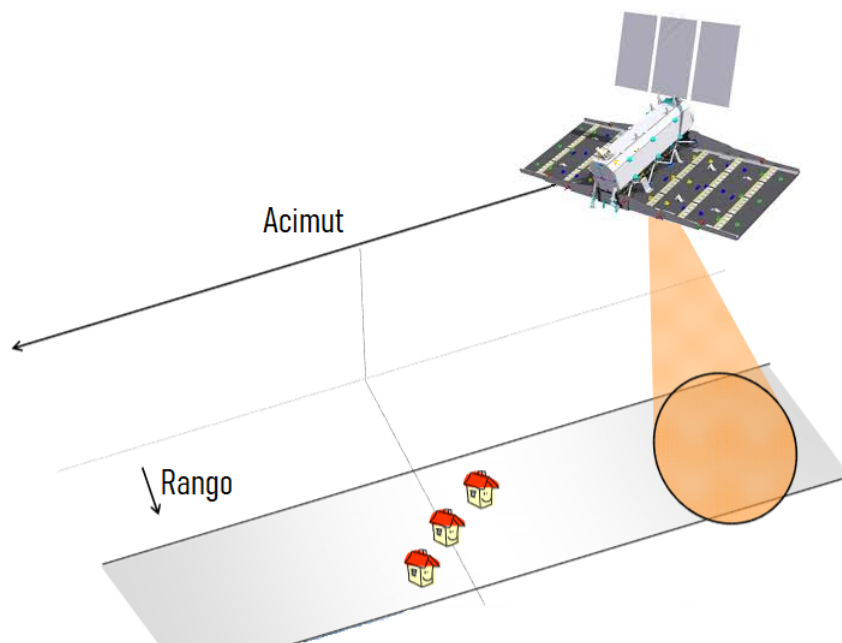


Figura 2.8: Escenario planteado. Ejemplo. Tomado y modificado de [12].

El SAR se mueve en la dirección de acimut que indica la flecha y en la superficie solo se encuentran tres casas. Los datos crudos obtenidos se ilustran en el cuadro “Datos Crudos” de la Fig. 2.9. Al aplicar sobre ellos las correlaciones con el chirp en rango y el chirp en acimut, se obtiene la imagen SAR enfocada que se encuentra en la parte inferior de la misma figura.

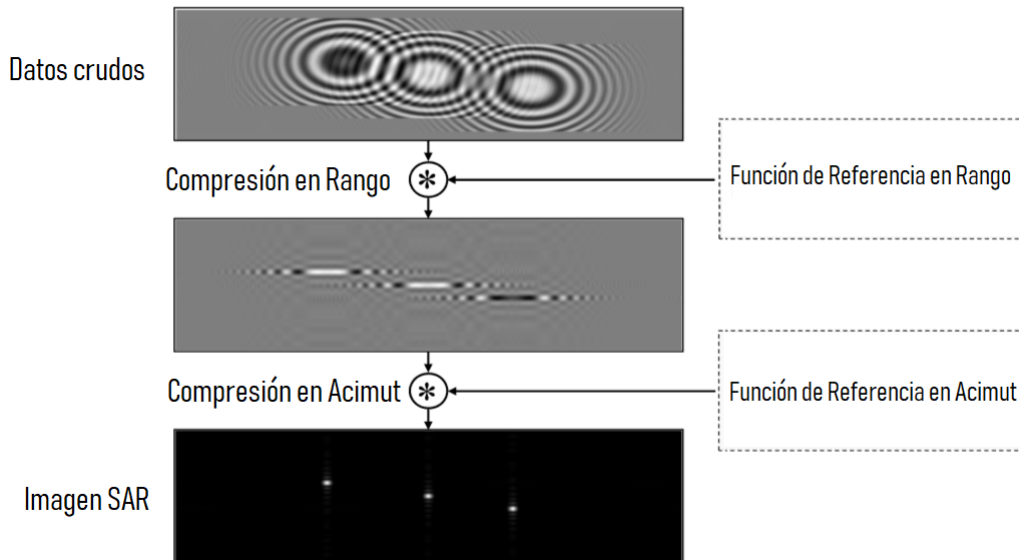


Figura 2.9: Enfoque de adquisición. Ejemplo. Tomado y modificado de [12].

2.4.3. Migración de celdas en rango

La distancia entre el sensor y el blanco varía durante el tiempo en que éste es iluminado. Esto significa que el rango inclinado R varía en función del tiempo y puede ser descrito mediante el Teorema de Pitágoras por la siguiente ecuación [17]:

$$R(t) = \sqrt{R_0^2 + (V_a t)^2} \quad (2.9)$$

donde R_0 es el rango inclinado correspondiente a la menor distancia sensor-blanco, V_a la velocidad relativa sensor-blanco y t la variable de tiempo centrada en 0 y válida entre $T_i/2$ y $-T_i/2$. Esta acotación del tiempo se realiza porque solo interesa describir el rango durante el tiempo de integración del blanco [17].

Como el rango varía con el tiempo, los ecos tendrán retardos diferentes y por lo tanto los datos en la matriz no estarán alineados, sino que se encontrarán en una curva parabólica dependiente de la variación de R . El tiempo de retardo τ de los ecos puede ser descrito como función de la variación del rango R mediante la siguiente ecuación [17] [22]:

$$\tau = \frac{2}{c} R(t) \quad (2.10)$$

Una vez que los datos son focalizados en rango, las respuestas de un blanco se encontrarán también en una curva haciendo que la respuesta migre a través de las celdas en rango. A este problema se lo conoce como Range Cell Migration (RCM) [17] [2].

Esta migración complica el procesamiento, pero es una característica fundamental e indispensable para el procesamiento SAR. Esta variación de retardos en rango es la que le impone

características de FM a la señal en dirección de acimut y permite obtener resoluciones finas en tal dirección. La Fig. 2.10 muestra el efecto de esta curva de migración en rango.

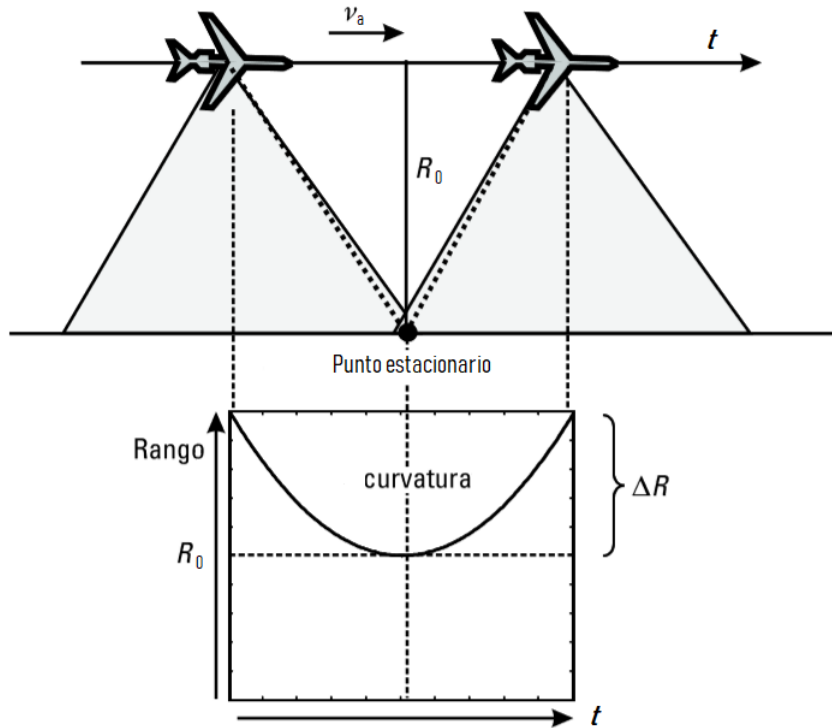


Figura 2.10: Migración de celdas en rango. Tomado y modificado de [4].

El principio de la migración en rango se puede observar también en la Fig. 2.7. Además, allí se señalan los diferentes retardos para cada pulsos, explicados en la ecuación 2.10.

La 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 [23]. Este proceso es llamado Range Cell Migration Correction (RCMC) y se grafica en la Fig. 2.11: a la izquierda se muestra la imagen de un blanco puntual donde se realizó la compresión en rango, mientras que a la derecha se muestra el resultado después de realizar la RCMC.

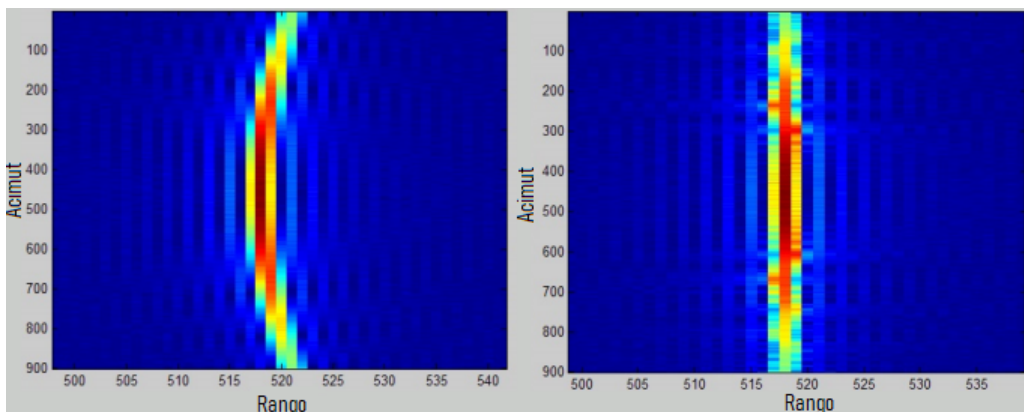


Figura 2.11: Corrección de migración de celdas en rango. Tomado y modificado de [23].

2.4.4. Señal en banda base

Para poder comprender y desarrollar algoritmos de detección de blancos móviles, resulta imprescindible entender las características de la señal SAR recibida. Por ello es necesario describir de forma analítica la respuesta de un blanco puntual en el dominio bidimensional del tiempo.

El eco recibido por el radar, contiene la portadora del radar, $\cos(2\pi f_0 \tau)$, la cual es removida a bordo del satélite por el proceso de demodulación antes de realizar el muestreo. La señal demodulada de un blanco puntual puede aproximarse de forma muy precisa [17]. En la sección 2.6 *Teoría de objetos en movimiento* se desarrolla el fundamento matemático de dicha señal que se denomina **señal en banda base**.

2.4.5. Dominio range-Doppler

Como se mostró en la Fig. 2.7, los datos SAR son adquiridos en el dominio bidimensional del tiempo. Para realizar el procesamiento de esta matriz, en general, es necesario transformar este dominio en otro por razones de eficiencia. Dos de los dominios comúnmente utilizados para este fin son el range-Doppler y el dominio bidimensional de las frecuencias [17] [24].

En este trabajo se utiliza el primero de ellos. Se realiza una FFT en dirección de acimut, sobre la matriz de datos SLC para llevar la imagen al plano range-doppler. Este dominio, tiene las mismas características que el plano de la frecuencia que se analiza durante el estudio de la transformada de Fourier [25]. Es decir, es un plano donde se puede realizar desplazamiento de fase con simples multiplicaciones de exponenciales complejas. Además, en este dominio se pueden analizar las características de la frecuencia Doppler presente en la dirección de acimut durante una adquisición SAR.

2.4.6. Profundidad de campo

Principalmente son dos las consideraciones que tienen impacto a la hora de realizar la compresión en acimut: la RCM y la profundidad de campo, también llamada Depth of Field (DOF) por sus siglas en inglés [2].

La DOF se relaciona con el hecho de que los parámetros f_{DC} (Doppler Centroide) y f_R (Tasa Doppler) utilizados durante la compresión en acimut, dependen del rango R . Para realizar la compresión en acimut se utiliza el rango de referencia (llamado R_0) de un pixel en particular (generalmente el pixel central) para comprimir toda la escena. De este modo, los parámetros f_{DC} y f_R son exactos y precisos para el punto de referencia, pero existen diferencias para el resto de los puntos (recordar que el rango varía según la posición del pixel) entre el chirp utilizado para comprimir, y el chirp teórico de cada pixel. Si estas diferencias no se mantienen dentro de un rango permitido, el proceso de compresión en acimut genera errores de enfoque [2].

El uso de un valor algo incorrecto de f_{DC} no es particularmente grave, pero la falta de coincidencia del valor f_R durante la compresión en acimut puede causar una pérdida inaceptable de la resolución acimutal [2].

Las diferentes distancias en rango inclinado que existen entre puntos diversos de una escena en observación, genera que los ecos que llega al radar desde cada punto tengan que recorrer distintas longitudes, lo que conlleva a la existencia de desfases entre los ecos captados por

el radar. Claramente, mientras mas extensa sea la escena, existirá mas desfase entre las señales del centro de la misma, y la señal de retorno de los bordes. De este modo se define la DOF como la dimensión máxima de la zona bajo observación, en la cual sea válido realizar una compresión en acimut, a través de una simple FFT [26].

Dicho con otras palabras, la DOF determina el rango máximo de desfase permitido entre las señales de retorno del radar y el chirp utilizado en la compresión, para obtener un enfoque válido. El rango de desfase que se utiliza habitualmente se muestra en la ecuación 2.11 [2].

$$|\Phi| \leq \frac{\pi}{4} \quad (2.11)$$

El concepto de DOF se ilustra en la Fig. 2.12.

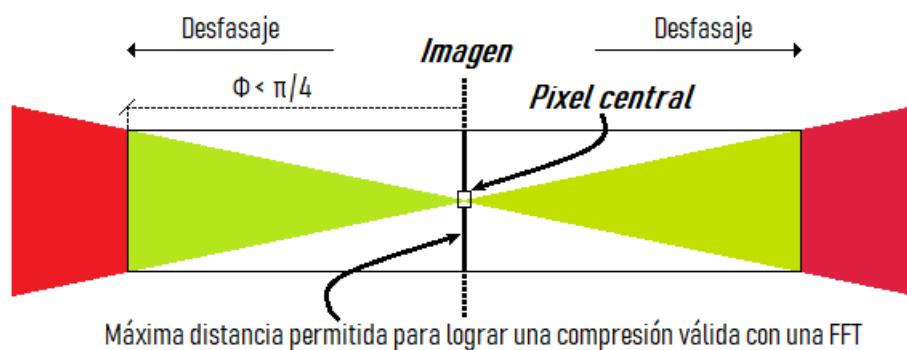


Figura 2.12: Concepto de DOF

2.5. Algoritmos de enfoque

A lo largo de los años fueron propuestas distintas aproximaciones a la solución de la formación de imágenes a partir de datos crudos. Entre los algoritmos más utilizados debido a la precisión que poseen se encuentran el Range Doppler Algorithm (RDA), el Chirp Scaling Algorithm (CSA) y el algoritmo ω KA [17].

Dado que en este trabajo se utiliza el CSA, es el único que se desarrolla. Esta elección se debe a que es un algoritmo muy eficiente desde el punto de vista de la carga computacional que el mismo requiere para funcionar.

2.5.1. Chirp Scaling Algorithm

CSA es un algoritmo ideado por R. Keith Raney [27] para enfocar datos SAR. La importancia de este algoritmo consiste en haber desarrollado un nuevo enfoque para la corrección de la RCM, es decir, ese fenómeno intrínseco a la recepción de la señal SAR y el principal responsable de la pérdida de calidad en la imagen.

Antes de su formulación, se utilizaban otra clase de algoritmos (RDA, ω KA) para enfocar los datos SAR, que abordaron la corrección de la RCM mediante la aplicación de técnicas complejas de interpolación.

Este algoritmo fue diseñado con la intención de realizar una ecualización de la curva de migración en rango. La ecualización de la curvatura es realizada de una forma simple, pero aún así precisa.

La señal se transforma al dominio bidimensional de las frecuencias y las trayectorias de RCM son ajustadas para tener curvas equivalentes a la trayectoria de un blanco retrodispersor a un rango de referencia seleccionado R_{ref} . Todas las trayectorias de curvas de migración resultantes tienen un único valor en el dominio espectral, y por lo tanto la RCMC puede ser completada por una multiplicación de fase que es conocida y tiene un único valor para cada punto.

El CSA se destaca por los excelentes resultados logrados y por su simplicidad, lo cual marcó el camino que condujo al desarrollo de otros dos algoritmos como el Extended Chirp Scaling Algorithm (ECSA) [28] y el Frequency Scaling Algorithm (FSA) [29].

El CSA se ha definido para el tratamiento de una señal adquirida en una geometría del tipo "tierra plana", es decir, bajo las siguientes hipótesis:

- el sensor se mueve a una altura constante con un movimiento rectilíneo uniforme.
- el vector de velocidad del sensor es paralelo a la superficie de la tierra y tiene dirección e intensidad constantes.

Los efectos de la curvatura de la órbita del satélite, los efectos de la curvatura de la superficie de la tierra, los efectos de la rotación de la tierra y cualquier desviación del sensor de la trayectoria predeterminada, por lo tanto, no se tienen en cuenta.

Una de las principales dificultades del procesamiento de datos consiste precisamente en realizar el enfocado corrigiendo el RCM (RCMC). Entre los diversos enfocadores disponibles, el CSA se distingue por su simplicidad de construcción que permite alcanzar la resolución azimutal máxima obtenible sin tener que adoptar técnicas complejas de interpolación de datos.

El CSA, de hecho, se basa solo en una serie de transformadas discretas directas e inversas de Fourier y en tres multiplicaciones complejas que no representan un peso computacional excesivo.

El CSA está diseñado de tal manera que lleva a cabo todo el filtrado en el dominio de la frecuencia, para tener que realizar solo una serie de multiplicaciones en lugar de convoluciones más complejas. El filtrado de acimut se realiza cuando la señal está en lo que llamaremos el dominio range-Doppler, es decir, cuando está en función del tiempo rápido y la frecuencia Doppler, mientras que el filtrado en rango se aplica en el dominio de las dos frecuencias.

La Fig. 2.13, muestra los pasos de ejecución del algoritmo CSA. La operación aplicada en cada paso se describe a continuación [17]:

1. Transformar el dato RAW desde el dominio de la señal al dominio range-Doppler mediante la aplicación de la FFT en acimut.
2. Multiplicar la señal en el nuevo dominio por la primera función de fase. Este paso es denominado Chirp Scaling y es el que da el nombre al algoritmo.
3. Transformar la matriz desde el dominio range-Doppler al dominio bidimensional de las frecuencias aplicando la FFT en rango.

4. Multiplicar la señal por la segunda función de fase. En este paso se logra la RCMC, la compresión en rango y la compresión secundaria en rango.
5. Transformar la matriz nuevamente al dominio range-Doppler aplicando la FFT inversa en rango.
6. Multiplicar la señal en el dominio range-Doppler por la tercera función de fase. A esta altura se logra remover los residuos de fase generadas en el paso 2 y se alcanza la compresión en acimut.

El dominio range-Doppler mencionado en el párrafo anterior, es muy importante para este trabajo, ya que, como se explicará en secciones posteriores, es el dominio en el cual se realizaran las compensaciones de los efectos provocados por los targets móviles.

7. Aplicar la FFT inversa en acimut para llevar la matriz al dominio de la imagen, obteniendo así la imagen enfocada.

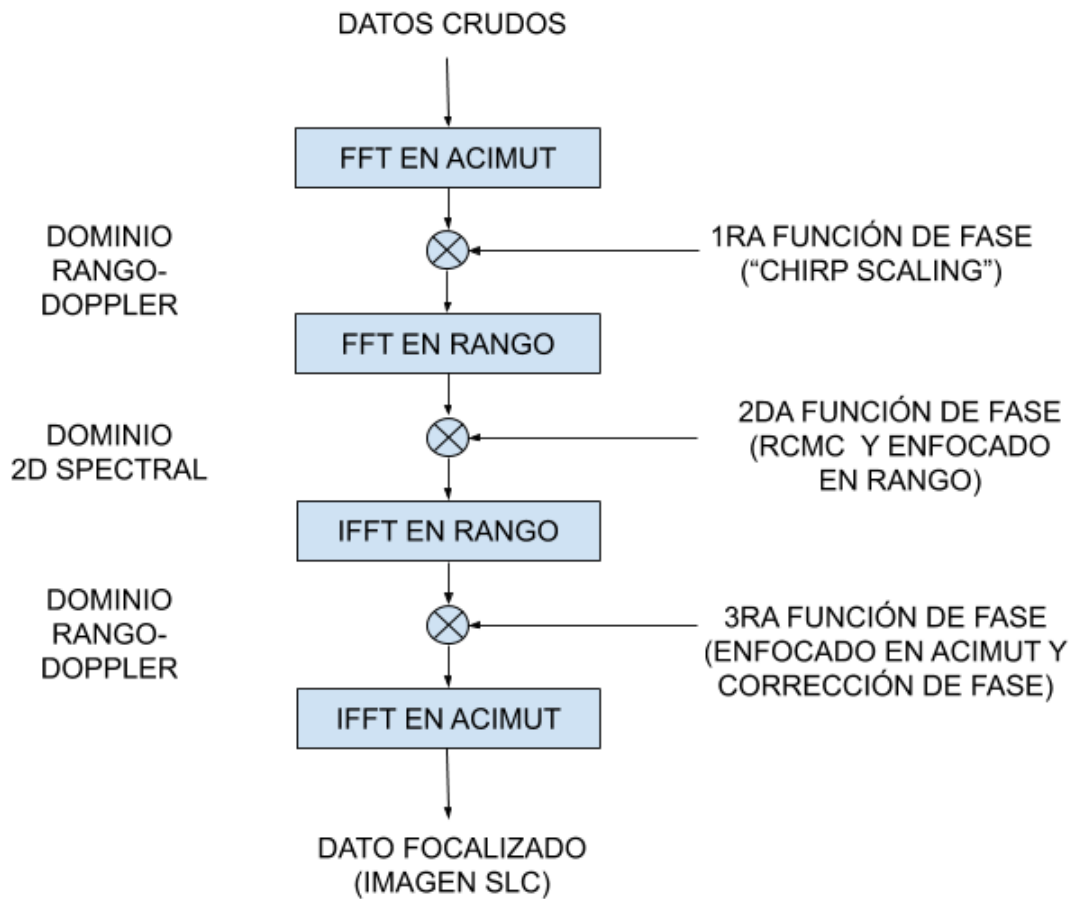


Figura 2.13: Diagrama en bloques del CSA. Tomado y modificado de [27].

2.5.1.1. Tercera función de fase

La totalidad de las funciones de fase mencionadas en el esquema de la Fig. 2.13 no se explican en este trabajo. La formulación matemática de las mismas puede encontrarse en [27].

Sin embargo, para el desarrollo de esta tesis es importante la tercera función de fase, la cual se detalla a continuación:

$$\Phi_3(\tau, f) = \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} c \tau \left[1 - \left[1 - \left(\frac{\lambda f}{2V} \right)^2 \right]^{1/2} \right] + j\theta(f; r) \right\} \quad (2.12)$$

donde λ es la longitud de onda a la que opera el radar, c es la velocidad de la luz, τ es el retraso de la señal en dirección slant-range, f es la variable de frecuencia correspondiente al tiempo en acimut y V es la velocidad relativa entre el sensor y el blanco.

2.6. Teoría de objetos en movimiento

Las imágenes SAR son mapas de alta resolución de la superficie terrestre. Si hay objetos en movimiento en la escena (también llamados targets), estos aparecerán como objetos desenfocados y desplazados espacialmente superpuestos en el mapa SAR [3]. Por lo tanto, cómo detectar y enfocar claramente los objetivos en movimiento se convierte en un tema importante.

En esta sección se discutirá primero sobre las características de las señales que vuelven al radar desde puntos estáticos, para luego, con esta base, estudiar las características de las señales de retorno para targets en movimiento. Posteriormente se analizará en profundidad el efecto que producen estos targets sobre las imágenes SAR.

2.6.1. Ecos de target estático

Cuando los objetos se están moviendo, inducen errores de fase que luego interactúan con el proceso de compresión, causando que los mismos aparezcan desplazadas en acimut, y desenfocados tanto en rango como acimut [4].

La Fig. 2.14 ilustra la geometría de visión lateral SAR y un target en movimiento. La plataforma SAR está volando en dirección x , con una velocidad V , a una altura h . El radar transmite un chirp [4]:

$$s_T(t) = \exp \left\{ j2\pi \left(f_0 t + \frac{\eta}{2} t^2 \right) \right\} \quad (0 \leq t \leq T) \quad (2.13)$$

donde f_0 es la frecuencia central, η es la tasa de variación de la frecuencia, T es el tiempo de duración de la señal, y la amplitud está normalizada a la unidad. La señal de retorno desde un punto estacionario es [4]:

$$s_R(t) = C_0 \exp \left\{ j2\pi \left[f_0(t - \tau) + \frac{\eta}{2}(t - \tau)^2 \right] \right\} \quad (0 \leq t \leq T) \quad (2.14)$$

donde la constante C_0 está determinada por el coeficiente de reflectividad del punto. El término $\tau = 2R/c$ representa el retardo de la señal al recorrer los dos caminos en el espacio (ida y vuelta) y R es el rango desde el radar hasta el punto en cuestión. De este modo, la señal en banda base se expresa como [4]:

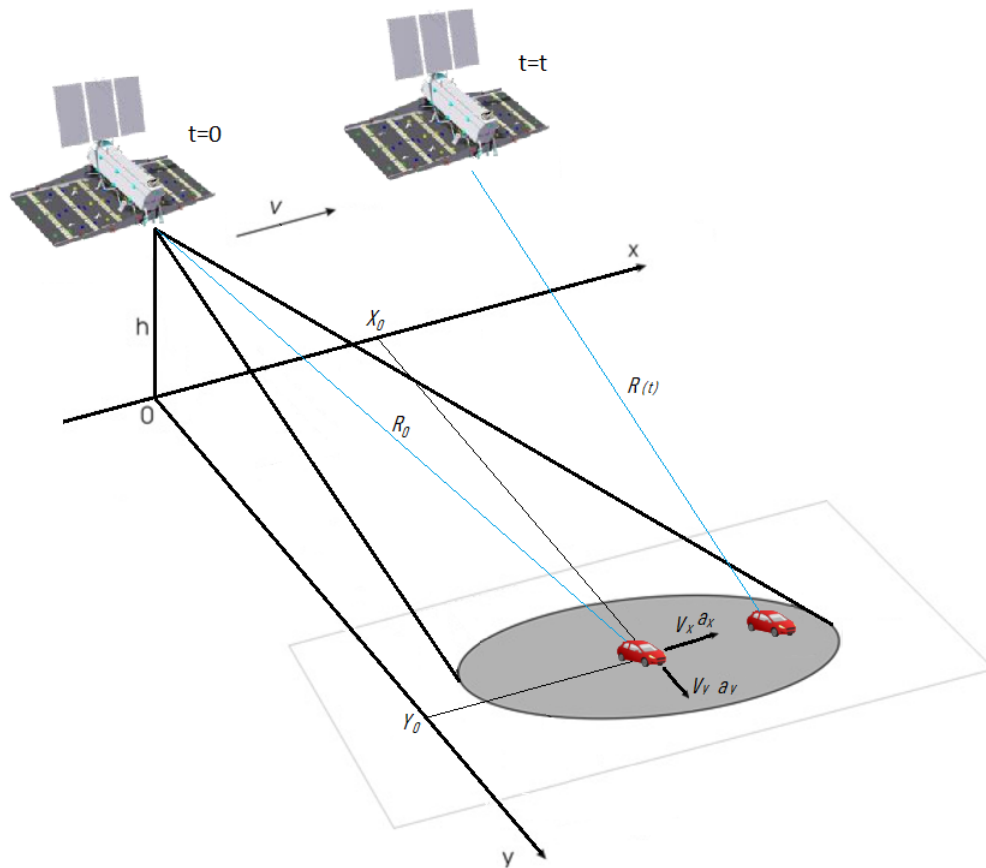


Figura 2.14: Modelo de señales para targets en movimiento

$$\begin{aligned}
 s_B(t) &= C_0 \exp \left\{ -j2\pi \left[f_0 \tau - \frac{\eta}{2} (t - \tau)^2 \right] \right\} \\
 &= C_0 \exp \{ -j\Phi(t) \} \quad (0 \leq t \leq T)
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

donde la función de fase es:

$$\Phi(t) = 2\pi \left[f_0 \tau - \frac{\eta}{2} (t - \tau)^2 \right] = \frac{4\pi R}{\lambda} - \pi\eta \left(t - \frac{2R}{c} \right)^2 \tag{2.16}$$

y la longitud de onda es $\lambda = c / f_0$, donde c es la velocidad de propagación de la onda electromagnética.

Después de la compresión, la salida de la señal en banda base para un punto estacionario viene dado por [4]:

$$s_0(t) = C_0 \exp \left\{ -j\frac{4\pi R}{\lambda} \right\} \text{sinc} \left[\pi\eta \delta T \left(t - \frac{2R}{c} \right) \right] \tag{2.17}$$

donde δT es el ancho del pulso comprimido. Cuando $t = 2R/c$, $\text{sinc}[\pi\eta \delta T(t - 2R/c)] = 1$ y el pico del valor de la salida en banda base se convierte en:

$$s_0(t = 2R/c) = C_0 \exp \left\{ -j \frac{4\pi R}{\lambda} \right\} \quad (2.18)$$

2.6.1.1. Curvatura en rango

Para un sistema SAR, si el radar se mueve a lo largo de una dirección x con una velocidad v , el rango de un punto estático se puede expresar en función de x y puede ser expresado del siguiente modo [4]:

$$R(x) \cong R_{min} + \frac{x^2}{2R_{min}} \quad (2.19)$$

donde $x = vt$ y R_{min} es el rango mínimo entre el radar y el punto estático a lo largo del camino de vuelo (revisar nuevamente la Fig. 2.10). Al momento $t = 0$, el rango alcanza su valor mínimo R_{min} .

Se asume que durante el período de tiempo ΔT (desde $t = -\Delta T/2$ hasta $t = +\Delta T/2$), el radar puede ver el punto estático. Por lo tanto, al tiempo $t = \pm\Delta T/2$, el rango alcanza su máximo valor [4]:

$$R_{min} + \frac{(\Delta T/2)^2}{2R_{min}} \quad (2.20)$$

Finalmente se concluye que la curvatura en rango es [4]:

$$\Delta R = \frac{(\Delta T/2)^2}{2R_{min}} \quad (2.21)$$

Al sustituir en la ecuación 2.18 la ecuación 2.19, la señal puede también expresarse en función de x :

$$\begin{aligned} s_0(x) &= C_0 \exp \left\{ -j \frac{4\pi R(x)}{\lambda} \right\} \\ &= C_0 \exp \left\{ -j \frac{4\pi R_{min}}{\lambda} \right\} \exp \left\{ -j \frac{2\pi x^2}{\lambda R_{min}} \right\} \\ &= C \exp \left\{ -j \frac{2\pi x^2}{\lambda R_{min}} \right\} \end{aligned} \quad (2.22)$$

donde C incluye la constante C_0 y una constante de fase $4\pi R_{min} / \lambda$. La ecuación (2.22) es la representación de un punto estacionario. La fase de la señal de banda base de salida es [4]:

$$\Phi(x) = \frac{2\pi x^2}{\lambda R_{min}} \quad (2.23)$$

Después de la compresión realizada sobre esta señal en banda base (ecuación 2.22), la fase del término cuadrático (ecuación 2.23) es removido y se puede observar una imagen clara del punto analizado [4].

Dicho en otras palabras, una compresión estándar se realiza para enfocar el tipo de señales descritas en la ecuación 2.22 donde se asume que los puntos están fijos en la tierra. Cuando se utiliza una compresión estándar para enfocar escenas donde existen puntos en movimiento, se producen efectos particulares sobre las imágenes SAR SLC, los cuales se estudian en las secciones subsiguientes.

2.6.2. Ecos de target en movimiento

Basado en las deducciones realizadas sobre los retornos de la señales para targets estáticos, ahora se puede presentar el estudio para targets en movimiento. Se asume que al tiempo $t = 0$, el target está ubicado en (x_0, y_0) y la plataforma del radar está ubicada en $(x = 0, y = 0, z = h)$ como se ilustra en la Fig. 2.14.

El target se mueve a una velocidad v_y y aceleración a_y en dirección del eje y , también llamada dirección radial, y a una velocidad v_x y aceleración a_x en dirección al eje x mientras que el radar se mueve con una velocidad v en dirección del eje x .

Para el tiempo t , el target se mueve hacia la posición $(x_0 + v_x t + a_x t^2/2, y_0 + v_y t + a_y t^2/2, 0)$ y el radar se mueve hacia $(x = vt, y = 0, z = h)$ como se muestra en la Fig. 2.14. De este modo, el rango desde el radar hacia el target al tiempo t se expresa del siguiente modo [4]:

$$\begin{aligned} R(t) &= [(vt - v_x t - a_x t^2/2 - x_0)^2 + (y_0 + v_y t + a_y t^2/2)^2 + h^2]^{1/2} \\ &= [R_{radar}^2(t) + R_{target}^2(t)]^{1/2} \end{aligned} \quad (2.24)$$

donde la componente del rango debido al movimiento del radar es:

$$R_{radar}(t) = [(vt - x_0)^2 + y_0^2 + h^2]^{1/2}$$

mientras que la componente del rango debido al movimiento del target es:

$$R_{target}(t) = [(v_x t + a_x t^2/2)^2 + (v_y t + a_y t^2/2)^2 - 2(vt - x_0)(v_x t + a_x t^2/2) + 2y_0(v_y t + a_y t^2/2)]^{1/2}$$

Al expandir ecuación del rango utilizando la serie de Maclaurin:

$$R(t) \cong R(t)|_{t=0} + \left. \frac{dR(t)}{dt} \right|_{t=0} t + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2R(t)}{dt^2} \right|_{t=0} t^2 \quad (2.25)$$

una expresión simplificada de $R(t)$ puede ser derivada como:

$$R(t) \cong R_0 + \frac{x_0 v_x + y_0 v_y - x_0 v}{R_0} t + \frac{v^2 + v_x^2 + v_y^2 + x_0 a_x + y_0 a_y - 2v v_x}{2R_0} t^2 \quad (2.26)$$

donde $R_0 = R(t)|_{t=0} = (x_0^2 + y_0^2 + h^2)^{1/2} \gg x_0$ es el rango inicial a $t = 0$. Debido a que x_0 es mucho mas chico que R_0 y y_0 es aproximadamente igual a R_0 , entonces el retorno en banda base del target en movimiento se puede derivar de (2.18), como [4]:

$$\begin{aligned}
 S_0(t) &= C_0 \exp \left\{ -j4\pi \frac{R(t)}{\lambda} \right\} \\
 &\cong C \exp \left\{ -j2\pi \frac{2v_y}{\lambda} t \right\} \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} [(v - v_x)^2 + v_y^2 + R_0 a_y] \frac{t^2}{2R_0} \right\} \\
 &= C \exp \{ -j\Phi_{Shift}(t) \} \exp \{ -j\Phi_{Defocus}(t) \}
 \end{aligned} \tag{2.27}$$

donde

$$\Phi_{Shift}(t) = 2\pi \frac{2v_y}{\lambda} t \tag{2.28}$$

es la fase lineal debido a la velocidad del target en la dirección radial (rango), y

$$\Phi_{Defocus}(t) = \frac{4\pi}{\lambda} [(v - v_x)^2 + v_y^2 + R_0 a_y] \frac{t^2}{2R_0} \tag{2.29}$$

es la función de fase cuadrática determinada por la velocidad relativa entre el radar y el target en movimiento en dirección del eje x (acimut), y la velocidad y aceleración radial del target (v_y y a_y respectivamente). Es importante señalar que la velocidad relativa es mucho mayor ($v \gg v_x$) que la velocidad v_y y aceleración a_y del target. Incluso, los targets móviles suelen ir a velocidad constante sobre las rutas, lo que equivale a una valor de $a_y = 0$. Por lo tanto, el desenfoque generado por v_y y a_y se pueden despreciar, y de este modo se puede asumir que el desfase $\Phi_{Defocus}$ es provocado únicamente por la velocidad relativa entre el sensor y el target en dirección acimutal.

De las funciones de fase anteriores se puede ver que al utilizar una compresión diseñada para enfocar escenas estacionarias, la fase lineal cambia debido a la velocidad radial del target v_y en (2.28) lo que genera que la imagen enfocada del target móvil se desplace en la dirección de acimut. Por otro lado, la variación de fase cuadrática en (2.29) genera que en la imagen SAR SLC el target móvil se desenfoque ya que durante el enfocado se compensa la fase cuadrática de la ecuación 2.23 en lugar de la fase cuadrática 2.29, lo que genera que toda la energía del eco correspondiente al target en movimiento se vea esparcida o distribuida en una zona amplia, en lugar de concentrarse toda la energía en un punto, que es lo que ocurría si el target estuviese bien enfocado [4].

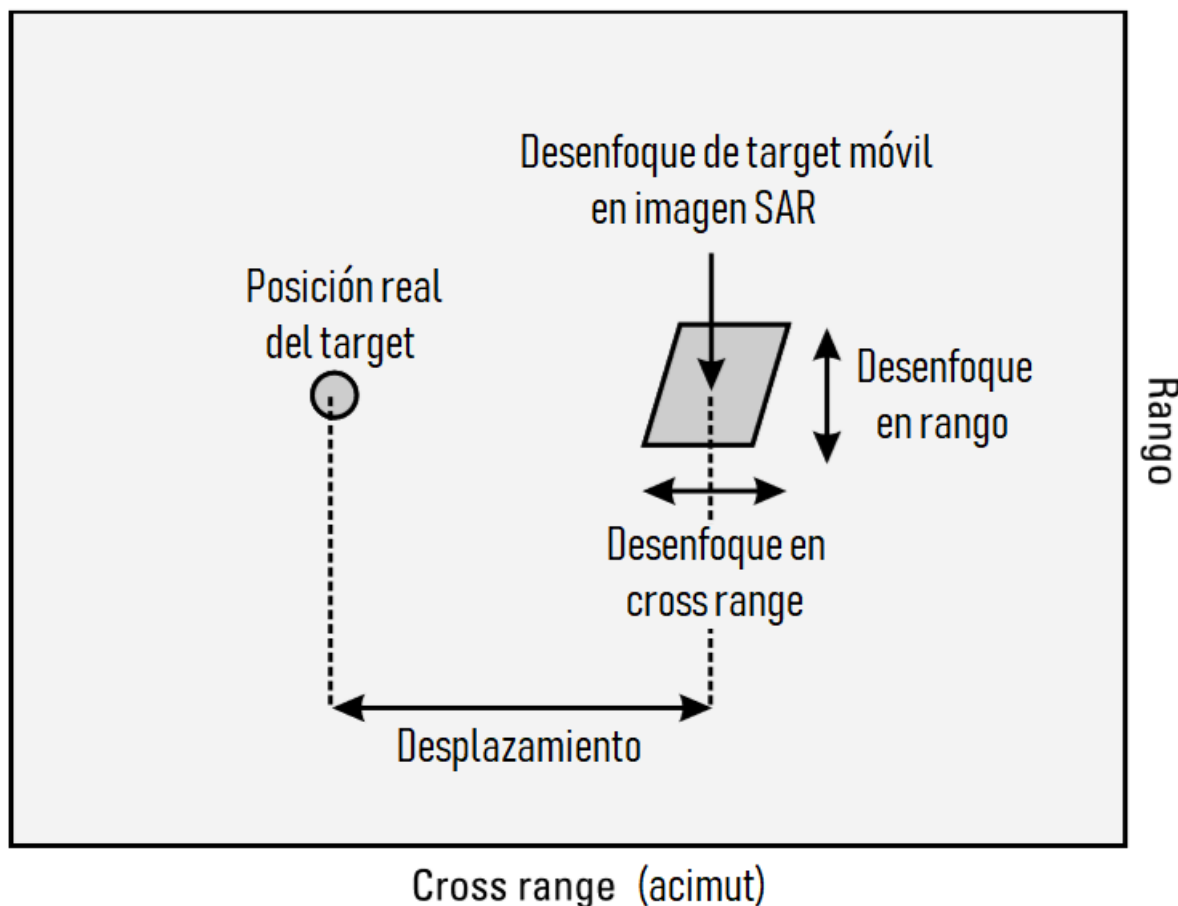


Figura 2.15: Efecto de targets en movimiento en imágenes SAR si se realiza el enfoque para escenas estacionarias. Tomado y modificado de [4].

Los conceptos desarrollados en los párrafos anteriores, se ilustran en la Fig. 2.15.

Si el lector desea estudiar los efectos del movimiento de los targets con más detalle, debe estudiarlo utilizando una función de ambigüedad modificada para investigar la falta de coincidencia entre las ecuaciones 2.22 y 2.23 y las ecuaciones 2.27, 2.28 y 2.29. Para ello dirigirse a [3].

2.6.3. Efecto producido por blancos móviles en imágenes SAR reales

A continuación se muestran los efectos de los targets móviles sobre imágenes reales.

En la figura 2.16 se observa el recorte de una imagen CSK SLC. Esto significa que es una imagen que fue enfocada por medios convencionales, lo que significa que durante el enfoque se asumió que la única diferencia de velocidad entre el objetivo y el radar es la correspondiente a la velocidad del sensor, lo que genera un desenfoque y un desplazamiento en targets móviles. En la Fig. 2.16 se muestra un ejemplo donde se pueden apreciar estos efectos. Los cuadros rojos están señalando las zonas donde están los targets móviles. Nótese el desenfoque a lo largo de la dirección de acimut. Prestemos especial atención a la zona 2. El cuadro está sobre el río, y claramente el auto no está circulando sobre el agua. Su posición está desplazada. Este efecto es esperable al igual que su desenfoque.

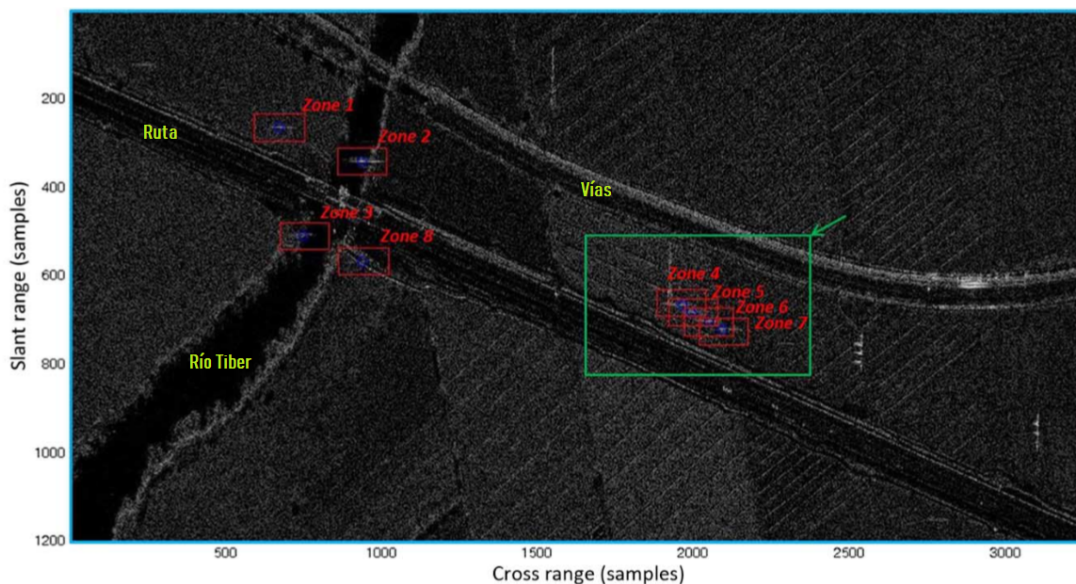


Figura 2.16: Efectos de targets móviles en imágenes SAR. Tomado y modificado de [5].

Con el objetivo de mostrar más detalladamente los efectos de los blancos móviles en las imágenes SAR, en Fig. 2.17 se muestra el zoom marcado con el cuadro verde en la Fig. 2.16.

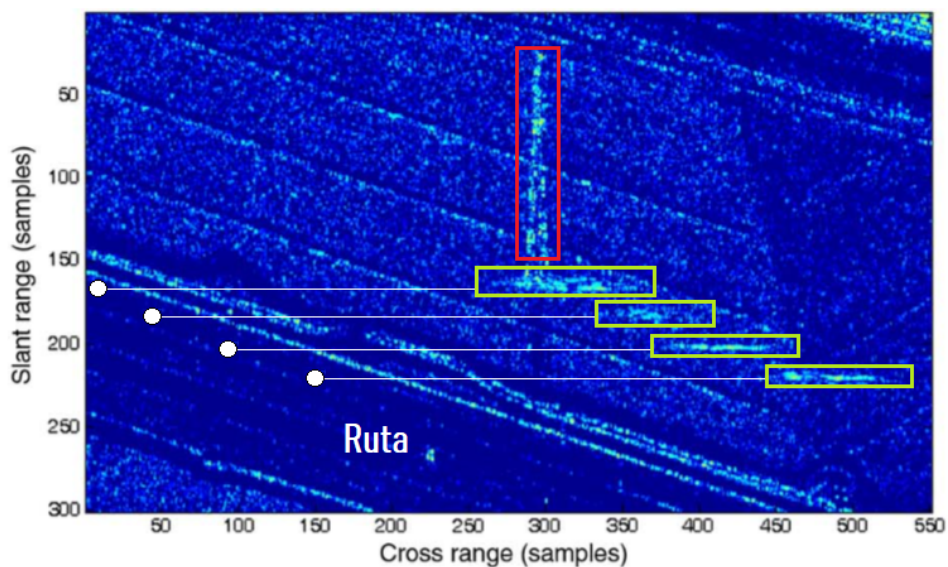


Figura 2.17: Efectos de targets móviles en imágenes SAR ampliada. Tomado y modificado de [5].

Observar la Fig. 2.17. Los cuadros verdes indican los 4 targets móviles presentes en la escena. Se puede observar el desenfoque, es decir, la mancha celeste que da sensación borrosa. Los cuatro autos circulan por la ruta, sin embargo, debido a los efectos ya mencionados, los mismos están desplazados y parecería que están circulando por el campo, cuando en realidad no es así. Con las líneas y puntos blancos se indican los desplazamientos y las posibles posiciones de los targets sobre la ruta. Finalmente, lo que está en el cuadro rojo es una torre de distribución de energía eléctrica. Se menciona únicamente para que el lector no se confunda pensando que la mancha celeste en sentido vertical es un target. Para los blancos móviles, el desenfoque se aprecia en mayor medida en dirección de acimut, no en dirección de rango.

2.7. COSMO-SkyMed: Descripción general

Constellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation (COSMO-SkyMed) es la mayor inversión italiana en sistemas espaciales para la observación de la tierra, encargada y financiada por la ASI y el ministerio de defensa italiano. Es concebido como un sistema de observación de la tierra de doble uso (civil y defensa) destinado a establecer un servicio global que proporcione datos, productos y servicios que cumplan con las normas internacionales y sean relevantes para una amplia gama de aplicaciones, tales como como gestión de riesgos, aplicaciones científicas y comerciales y aplicaciones de defensa e inteligencia [30].

El sistema consiste en una constelación de cuatro satélites de tamaño medio de órbita baja, cada uno equipado con un SAR multimodo de alta resolución que operan en banda X. El sistema se completa con infraestructuras terrestres completas con todas las funciones para gestionar la constelación y otorgar servicios para la recopilación, el almacenamiento y la distribución de los datos adquiridos [30].

El sistema está concebido para seguir un enfoque de misiones múltiples gracias a su interoperabilidad intrínseca con otras misiones. Bajo este contexto se crea el Sistema Ítalo Argentino de Satélites para la Gestión de Emergencias (SIASGE).

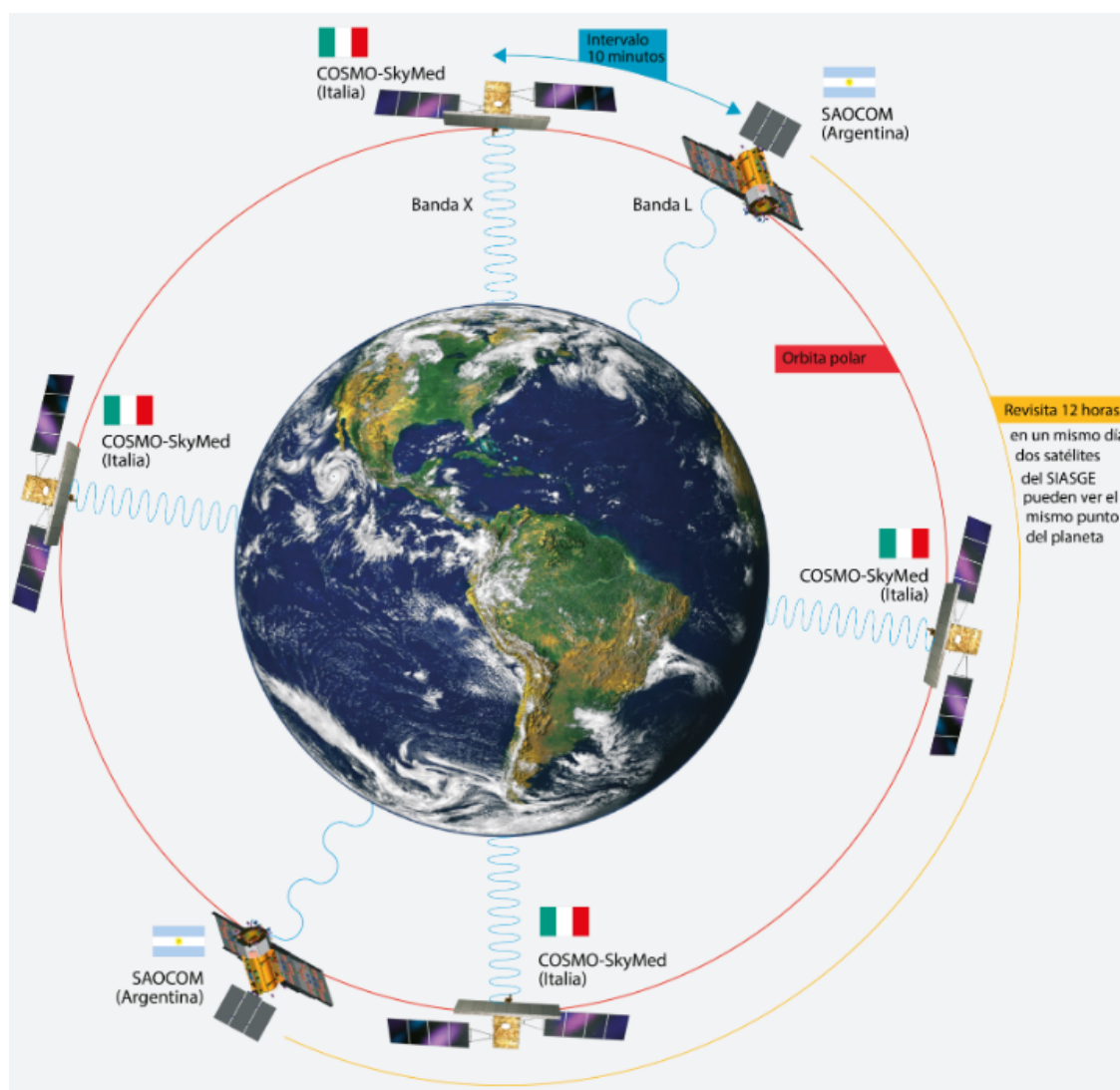


Figura 2.18: SIASGE. Tomado y modificado de [31].

El SIASGE estará integrado por dos Satélite Argentino de Observación Con Microondas (SAOCOM) provistos por la CONAE y por cuatro satélites CSK provistos por la ASI. En la actualidad, la constelación está operando con cuatro satélites CSK y con un SAOCOM (1A). Se espera que para la primera mitad del año 2020, el inminente lanzamiento de SAOCOM 1B complete la constelación.

Este conjunto de satélites permitirán obtener información certera y actualizada de incendios, inundaciones, erupciones, terremotos, avalanchas, derrumbes y deslaves [31].

Los 6 satélites se encontrarán ubicados en órbitas polares a la misma altura, en distintos planos orbitales, de tal manera que el conjunto funcione como un instrumento con un enorme ancho de visión sobre la tierra. Esto permitirá un monitoreo en tiempo casi real, ya que se obtendrá actualización de la información cada 12 horas, especialmente necesario para el monitoreo y seguimiento de la evolución de catástrofes [31]. Esto se ilustra en la Fig. 2.18.

2.7.1. Modos de adquisición

Debido a la necesidad de muchas combinaciones entre el tamaño de la imagen y la resolución espacial, se eligió el SAR CSK como un sensor multimodo que opera en [30]:

- **Modo Spotlight:** para resoluciones inferiores a un metro en imágenes de tamaño pequeño (generalmente 10 km x 10 km).
- **Dos modos stripmap:** para resoluciones del orden de los metros en imágenes de tamaño de decenas de kilómetros.
- **Dos modos scanSAR:** para resoluciones grandes (100 m) sobre imágenes grandes del orden de las centenas de kilómetros.

Los diferentes modos de adquisición se ilustran en la Fig. 2.19. Para este trabajo es importante profundizar únicamente en el modo Spotlight.

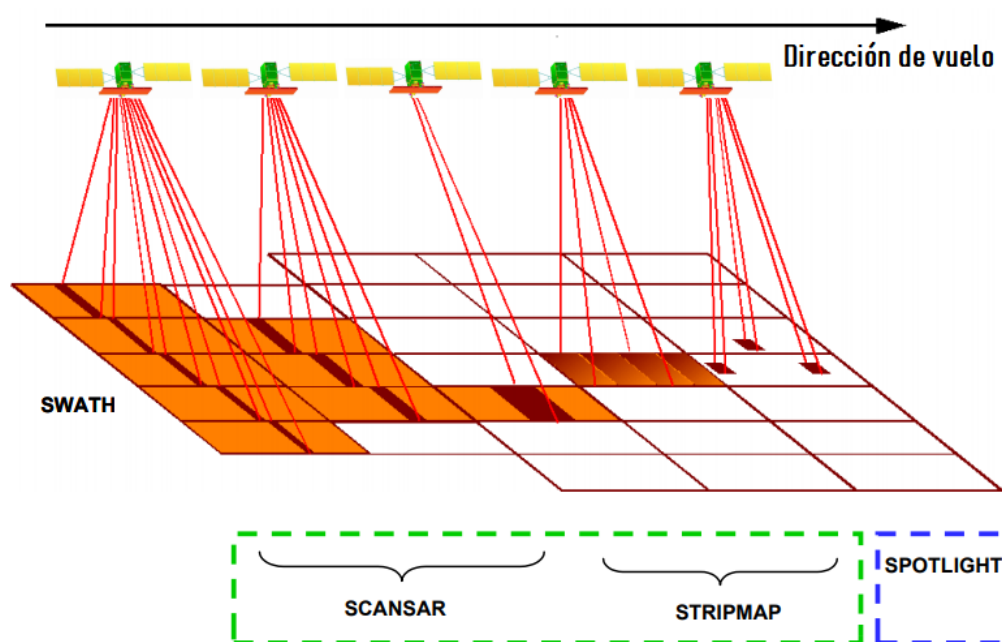


Figura 2.19: Modos de adquisición de CSK. Tomado y modificado de [30].

2.7.1.1. Modo de adquisición Spotlight

En el modo de operación Spotlight, la antena se dirige (tanto en el plano de acimut como en el plano de elevación) hacia un área determinada, durante todo el tiempo de la adquisición. De este modo, se ilumina la escena durante un período de tiempo más largo que en el resto de los modos, aumentando la longitud de la antena sintética y, por lo tanto, la resolución (a expensas de la cobertura) [30]. El concepto de ilustra en la Fig. 2.20.

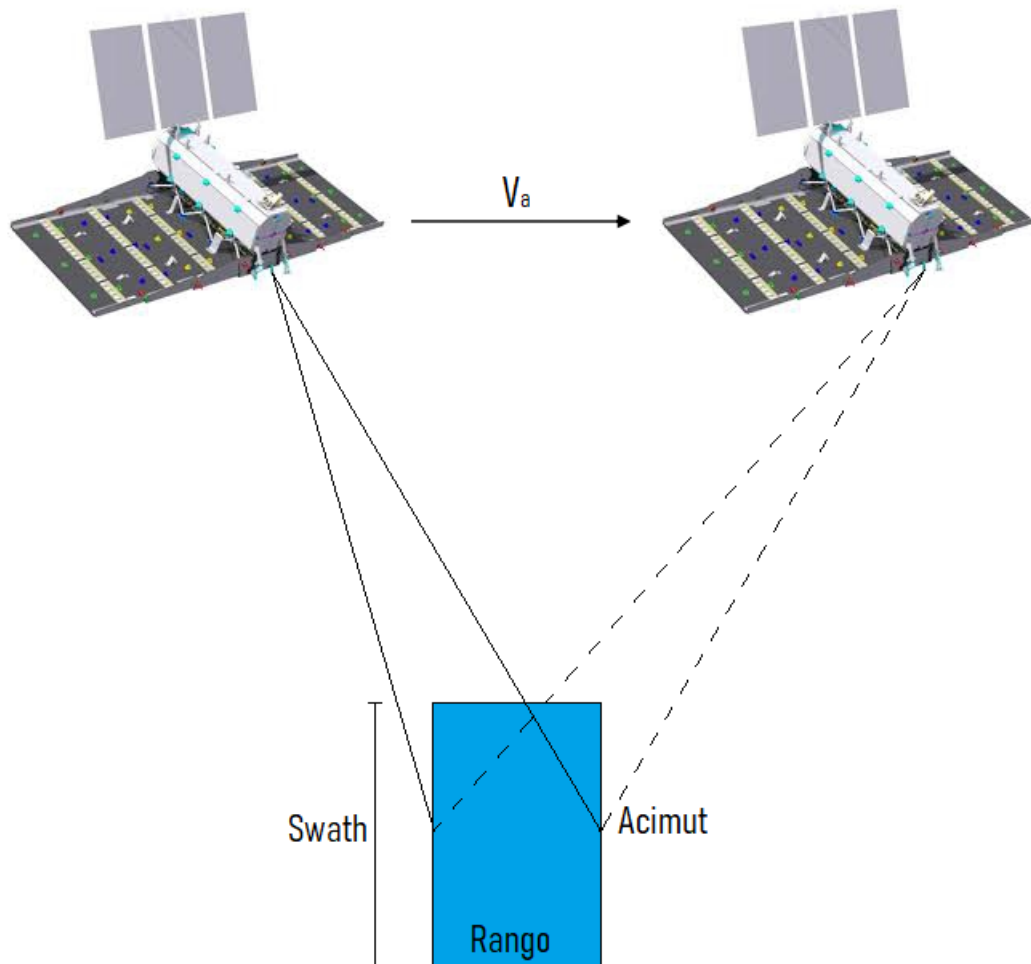
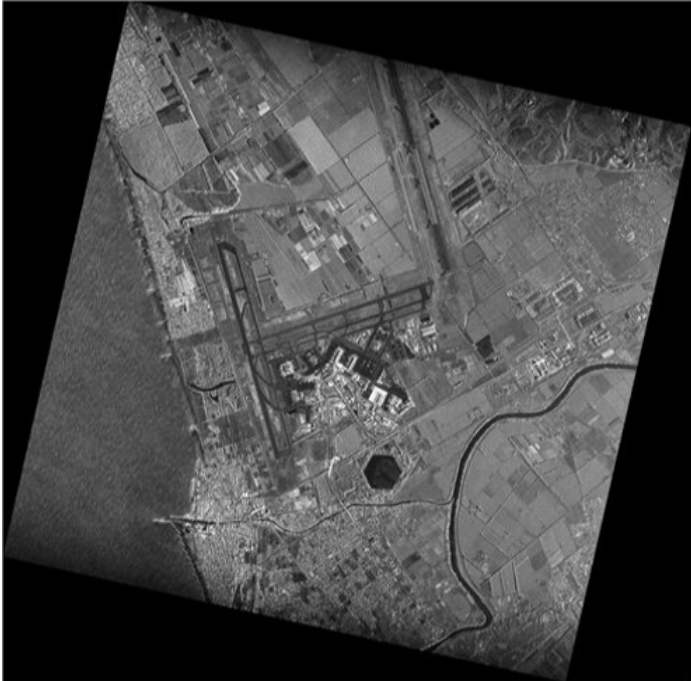


Figura 2.20: Adquisición en modo spotlight.

Las dos implementaciones diferentes permitidas para este modo de adquisición son SMART (solo para fines de defensa y, por lo tanto, no se analizan en este trabajo) y Enhanced Spotlight [30].

En el modo enhanced spotlight, el apuntamiento se logra mediante un esquema de direccionamiento electrónico de antena y se caracteriza por una extensión de imagen en acimut de aproximadamente 11 km, una extensión en rango de aproximadamente 11 km, valores de PRF que van desde un mínimo de 3148.1 Hz a un máximo de 4116.7 Hz, duración de chirp permitida en el rango [70, 80] microsegundos (dependiendo del área de acceso específica), un ancho de banda de chirp (a lo largo del rango) que varía de 185.2 MHz a 400.0 MHz y, finalmente una frecuencia de muestreo igual a 187.5 MHz [30].

La Fig. 2.21 muestra las características principales de las imágenes spotlight CSK.



SPOTLIGHT	
Resolution (m)	1
Scene size (Km)	10 x 10
Polarization (T/R)	SINGLE HH or VV
Incidence angles (deg)	20,0 - 59,5

Figura 2.21: Características de imágenes spotlight. Tomado de [32].

2.7.2. Niveles de procesamiento estándar

Los datos de las adquisiciones CSK, pueden ser solicitado en cualquiera de sus niveles de procesamiento estándares habilitados, descritos a continuación [32]:

- **Nivel 0:** también llamados datos crudos o RAW. Estos son datos de ecos ordenados y desempaquetados en formato de número complejo, es decir componentes en fase y en cuadratura. Se incluyen además todos los datos auxiliares (por ejemplo: trayectoria, coordenadas del satélite, vector de velocidad, modelo de sensor geométrico, estado de la carga útil, datos de calibración, entre otros) necesarios para producir los otros productos estándares [32].
- **Nivel 1A:** también llamado producto SLC. Son datos RAW enfocados en proyección de rango inclinado, que es la proyección de adquisición natural del sensor. El producto contiene datos en fase y en cuadratura de los datos enfocados, ponderados y ecualizados radiométricamente [32].
- **Nivel 1B:** Este nivel toma los datos del nivel 1A, realiza un procesamiento llamado multi-look y luego se realiza la proyección en una cuadrícula de terreno [32].
Hay muchos algoritmos multi-look, y básicamente es un proceso que reduce el ruido (o "speckle") en las imágenes SAR promediando píxeles adyacentes. A menudo, los procesadores SAR permiten al usuario definir alguna ventana $N \times N$ sobre la cual promediar, aunque existen también métodos mas sofisticados.
- **Nivel 1C:** se llama también producto Geocoded Ellipsoid Corrected (GEC). Un producto GEC, obtenido después de un nivel de procesamiento 1C, contiene datos enfocados, ubicados geográficamente en un elipsoide de referencia y representados en un sistema de representación cartográfico preseleccionado [32].

- **Nivel 1D:** se llama también producto Geocoded Terrain Corrected (GTC). Un producto GTC, obtenido después de un nivel de procesamiento 1D, contiene datos enfocados proyectados sobre una superficie de elevación de referencia en una cuadrícula obtenida de un sistema de referencia cartográfica. La imagen se ubica con mucha precisión sobre un mapa, mediante el uso de puntos de control (Ground Control Points (GCP)) y modelos de elevación digital (Digital Elevation Model (DEM)) [32].

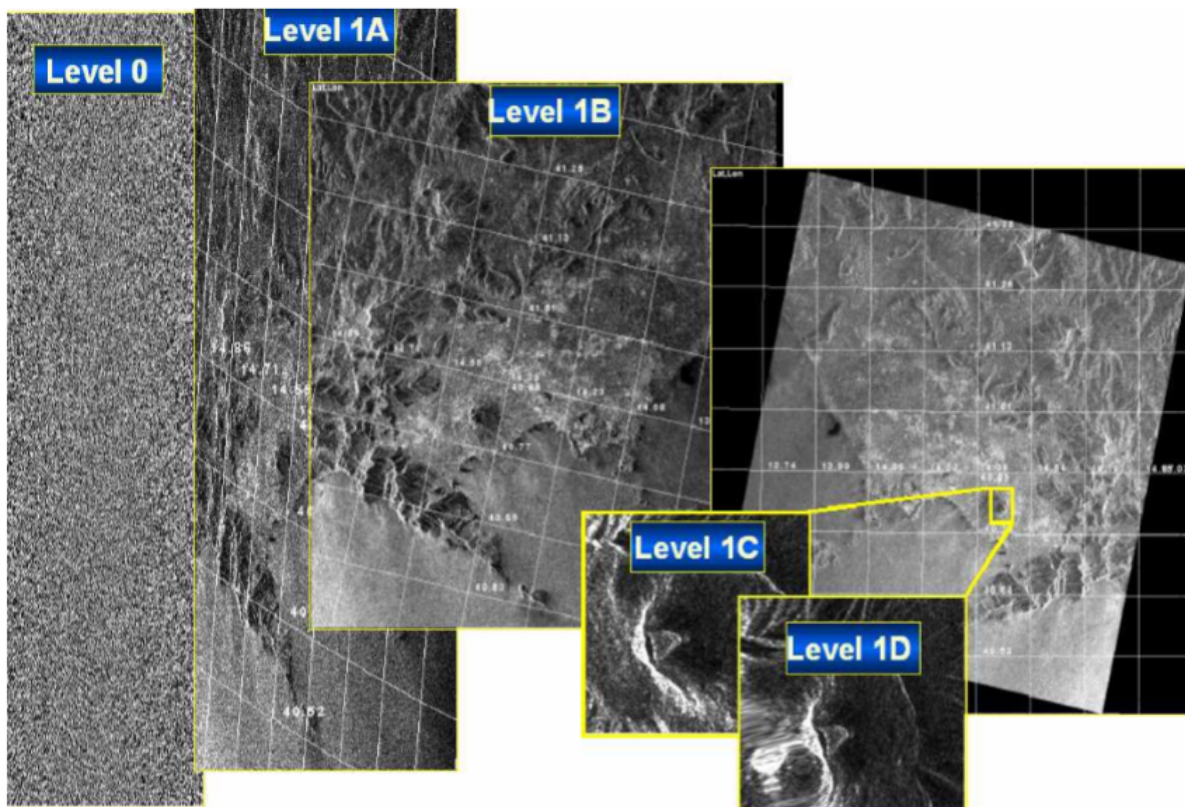


Figura 2.22: Los cinco productos estándares de CSK. Tomado de [32].

Cabe destacar que los niveles de procesamiento descritos anteriormente (desde el nivel 0 hasta el 1D) cumplen con las definiciones de estándares internacionales para la observación de la tierra (por ejemplo, las pautas establecidas por el Committee on Earth Observation Satellites (CEOS)).

A parte de los productos estándares, existen:

- Productos de nivel superior.
- Productos de servicio (solo para uso interno)

Estos últimos no son de interés para este trabajo, por lo tanto no son desarrollados. Si el lector desea buscar información adicional, la puede encontrar en [32].

Debido al procesamiento convencional utilizado para la formación de imágenes SAR, los targets en movimiento dentro de dichas imágenes aparecen desplazados y desenfocados debido a su movimiento.

En particular, una componente de velocidad radial del objetivo da lugar a un desplazamiento erróneo del target en dirección de acimut. Por otro lado, una componente de velocidad del target en dirección de acimut, determina un cambio en la fase de la señal que retorna al radar, lo que genera una variación en la frecuencia de chirp en acimut resultante y consecuentemente se genera una discrepancia con los parámetros utilizados para enfocar la escena estacionaria, lo que da lugar a manchas difusas (desenfocado).

En esta sección se explica el esquema propuesto en este trabajo para detectar estos desenfoces y utilizarlos para determinar las velocidades de los targets presentes en la escena.

3.1. Imágenes seleccionadas

El primer paso es definir el tipo de imágenes a utilizar. En este caso se seleccionan imágenes CSK adquiridas en modo spotlight, con un nivel de procesamiento 1A.

Se selecciona el modo spotlight debido a la gran resolución que tienen este tipo de imágenes. Un auto estándar, por ejemplo, tiene aproximadamente 4 metros de largo y 2 metros de ancho, por lo que la resolución es crucial para alcanzar a apreciar los efectos que estos producen en las imágenes de radar.

Por otro lado, el nivel 1A es fundamental ya que es el nivel de procesamiento más cercano a los datos crudos, y en donde la información sobre los objetos en movimiento se puede obtener con precisión. Procesamientos adicionales significarían la pérdida de información de los blancos móviles. Un filtrado de speckle, por ejemplo, significaría una pérdida completa de la información que se intenta recuperar.

3.2. Esquema de procesamiento

Cuando hay objetos en movimiento en la escena SAR, no pueden producir simultáneamente imágenes claras de los targets en movimiento y de la escena estacionaria. Si se enfocan los targets, se desenfoca el resto de la escena y viceversa. En este trabajo no nos interesa la escena estática, sino los targets.

Si se parte de una imagen SAR SLC (imagen enfocada), es fácil detectar los objetos en movimiento buscando las zonas desenfocadas en dirección de acimut. Se sabe también que este desenfoco se debe al desfase que agrega el movimiento en acimut del target, en la señal de retorno. Se propone entonces compensar este cambio de fase para que el target quede bien enfocado.

Para realizar la compensación de fase, una opción efectiva es pasar del dominio de la imagen SAR, al dominio range-Doppler, ya que como se mencionó anteriormente, en este plano las compensaciones de fase se llevan a cabo con una simple multiplicación por una exponencial compleja.

Para llegar a dicho plano, se debe realizar una transformada de Fourier sobre la imagen SLC, en dirección de acimut, tal como se ilustra en la Fig. 3.1.

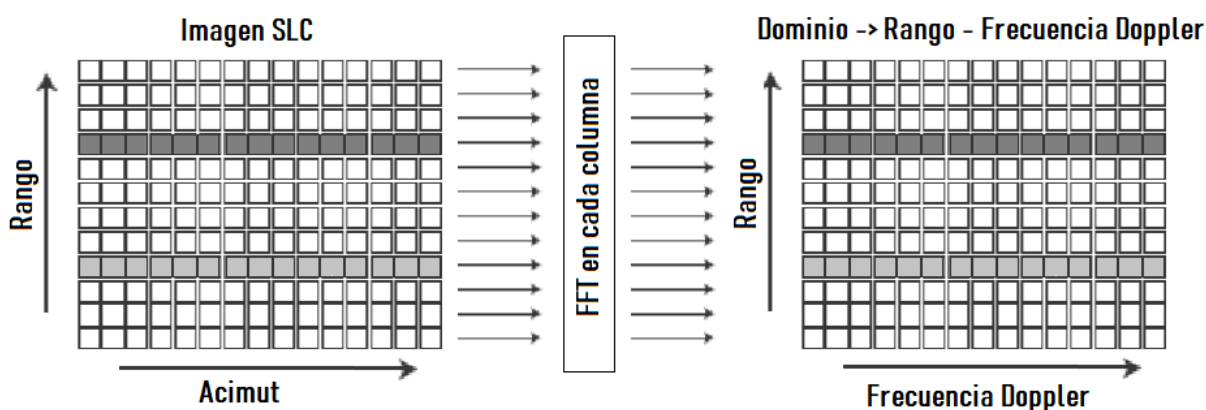


Figura 3.1: FFT sobre imagen SLC

Al realizar esta transformación, se lleva la imagen al dominio Range-Doppler, que es el mismo dominio donde se aplica la tercera función de fase en el algoritmo de enfocado CSA, descrito en el capítulo 2. Por lo tanto, se podría pensar esta transformación como un paso hacia atrás en el proceso de enfoque.

En la Fig. 3.2 se presenta nuevamente el diagrama en bloques del esquema CSA, el cual está resaltado con un cuadro violeta. La flecha naranja muestra como se toma la imagen SAR SLC CSK y se le aplica la FFT. El dominio de llegada, en el cual se realizará la compensación de fase, se resalta con un rectángulo verde.

Es importante mencionar que este cambio de dominio entre el plano de la imagen SAR y el plano range-Doppler se puede realizar aplicando la FFT y luego la Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) debido a la reversibilidad que caracteriza a tales operaciones [25].

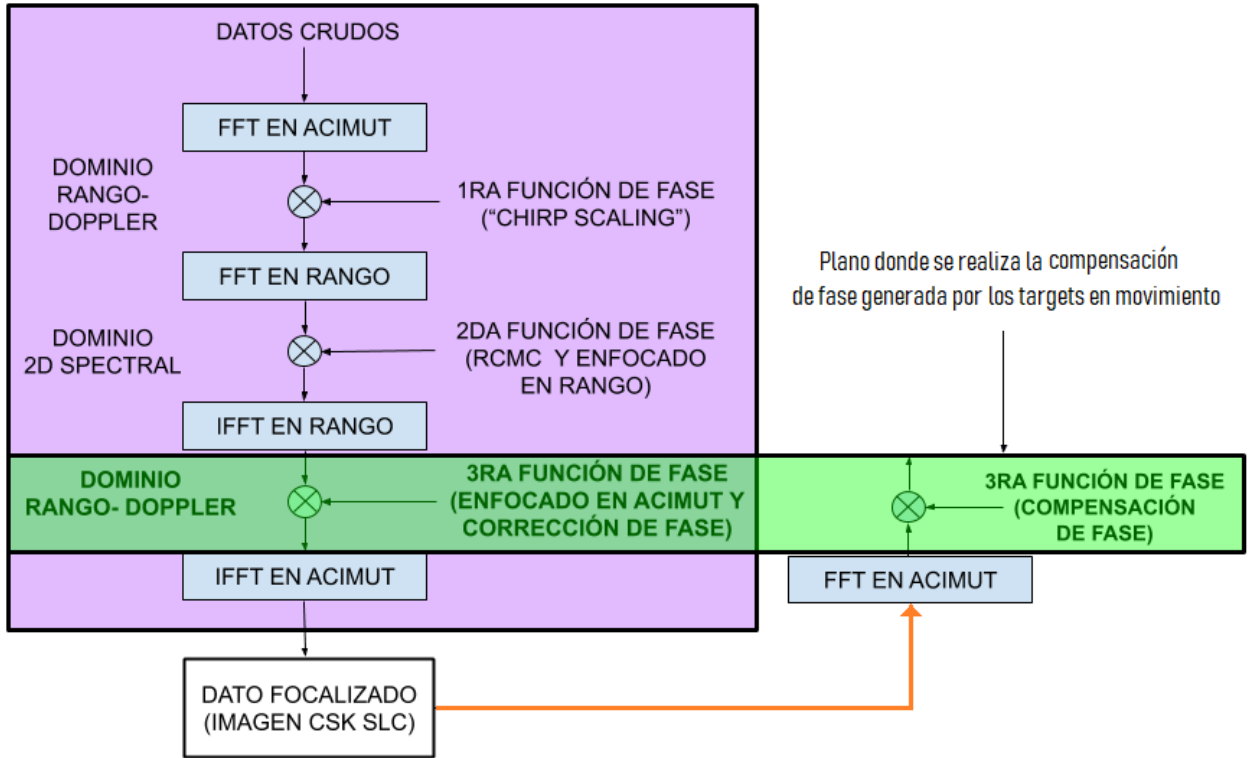


Figura 3.2: Esquema de Procesamiento General

Retomemos el concepto mostrado en la ecuación 2.12, que relaciona la velocidad en la escena observada, con el desfase que genera en la señal de retorno:

$$\Phi_3(\tau, f) = \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} c\tau \left[1 - \left[1 - \left(\frac{\lambda f}{2V} \right)^2 \right]^{1/2} \right] + j\theta(f; r) \right\} \quad (3.1)$$

Como se explicó anteriormente, V representa la velocidad relativa entre el sensor y el blanco. Cuando una imagen SLC es enfocada, se asume que la escena es estática. Esto significa que no es tenido en cuenta el desfase que agregan los targets en movimiento.

Para compensar tal desfase, una solución es hacerlo en el dominio range-Doppler, multiplicando la imagen por una exponencial compleja, cuya fase sea la determinada por la ecuación 3.1, pero reemplazando el parámetro V , por la diferencia de velocidad entre el sensor y el target.

Sin embargo hay que tener en cuenta dos cosas:

1. La velocidad del target no es conocida. Por lo tanto, se debe asumir un rango de velocidades posibles que puedan tomar los targets y compensar el desfase que se produciría si el target se mueve a dicha velocidad. En este trabajo se toma un rango de análisis que va desde los $-40/40$ [m/s] ($-144/144$ km/hr).

Para cada velocidad asumida, se multiplica la imagen que está en el dominio range-Doppler, por una exponencial compleja, generando de este modo una imagen distinta para cada velocidad. El conjunto de estas imágenes se llama stack o pila.

2. Obviamente no es posible considerar los infinitos valores de velocidades que existen en el rango $-40/40$ [m/s]. Se debe definir entonces, un conjunto finito de valores para realizar las compensaciones de fase. Este es el momento donde se utiliza el concepto de DOF.

Se deben tomar variaciones de velocidad (saltos o pasos) que generen variaciones de fase cuyo módulo sea menor o igual a $\frac{\pi}{4}$. Esto se elige siguiendo el criterio de DOF, cuyo concepto indica cuál es el desfase máximo que se puede tolerar, para generar imágenes enfocadas válidas por medio de una FFT.

$$\frac{\pi}{4} \leq |\Delta\Phi_3| = \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} c \tau \left[1 - \left[1 - \left(\frac{\lambda f}{2\Delta V} \right)^2 \right]^{1/2} \right] + j\theta(f; r) \right\} \quad (3.2)$$

En otras palabras, un cambio en el parámetro ΔV , genera un cambio en el desfase $\Delta\Phi_3$, cuyo módulo debe ser menor a $\frac{\pi}{4}$ para que el enfoque sea válido, tal como se indica en la ecuación 3.2.

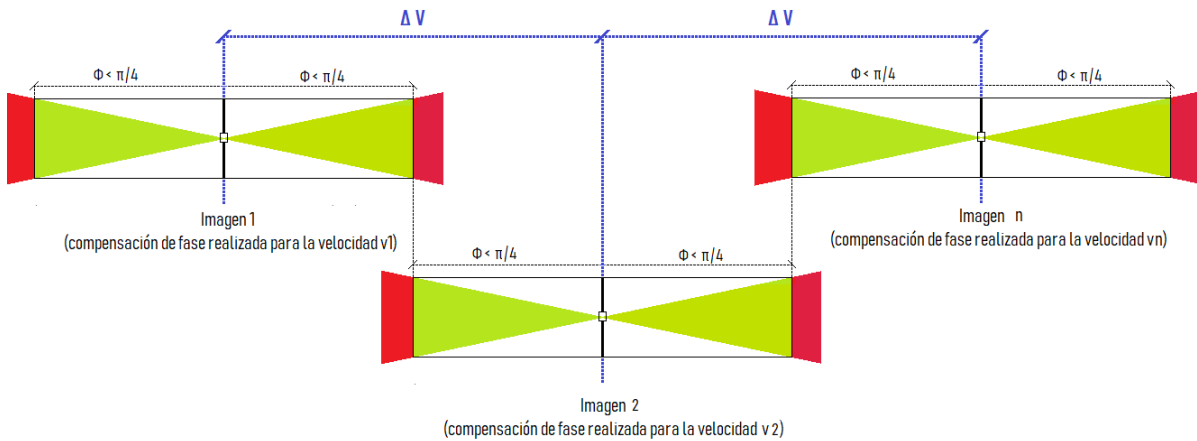


Figura 3.3: Concepto de DOF para compensar desfase producidos por targets en movimiento

Observar ahora la Fig. 3.3, mas precisamente la zona que dice “Imagen 1” que representa una imagen donde se realizó una compensación de fase asumiendo una velocidad V_1 . La imagen queda enfocada para todos los objetos que están a la velocidad V_1 , pero también se enfocaran aquellas zonas de la imagen cuya velocidad relativa generen un desfase menor o igual que $\frac{\pi}{4}$. Es decir, se enfoca la imagen para un rango de velocidades, centrada en la velocidad V_1 y abarcando un rango de velocidades relativas que no generen un desfase en la señal de retorno superior a $\frac{\pi}{4}$. Luego se asume una velocidad 2, y el razonamiento se repite. Lo importante es que los rangos de velocidades abarcados entre una velocidad y la subsiguiente se superpongan al menos en un punto, caso contrario quedarán velocidades sin contemplar en el análisis.

Una vez que ya están definidos los saltos de velocidad correctamente, lo que resta es aplicar la compensación de fase reiteradas veces. Una por cada velocidad asumida.

Cada vez que la compensación es ejecutada, se debe considerar un posible valor de velocidad diferente entre el objetivo y la antena del radar. Esto significa que dentro de la i -ésima

la velocidad del sensor V debe ser reemplazada por la velocidad relativa entre el sensor y el objetivo (en dirección de acimut) $[V_{sensor} - V_{target}(i), i = 1, 2, \dots, L1]$. Esto se ilustra en la Fig. 3.4 donde se muestra el esquema global detallado propuesto en este trabajo.

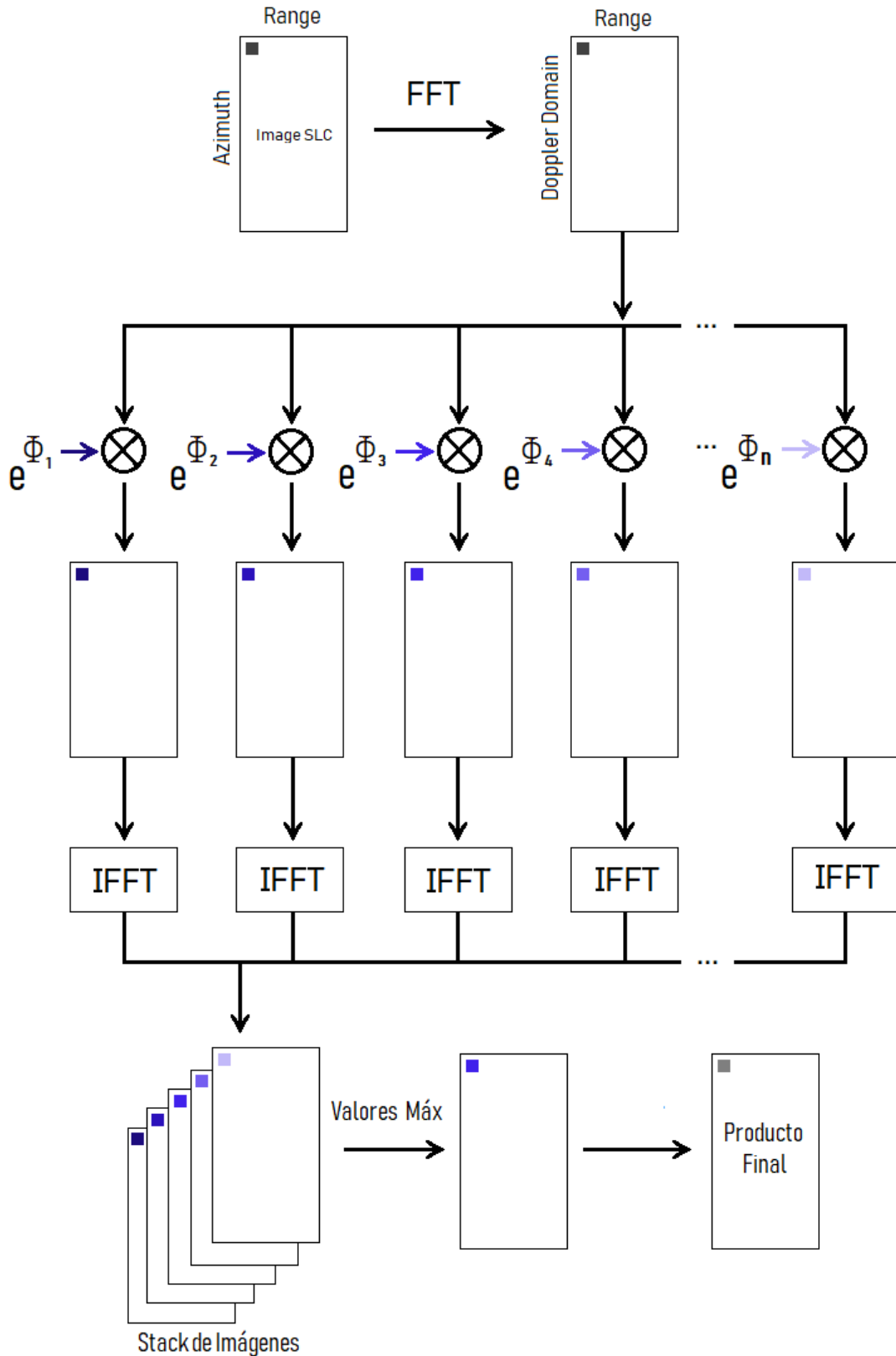


Figura 3.4: Esquema de Procesamiento Detallado

Luego de la compensación de fase, se realiza la IFFT sobre cada una de las imágenes para volver al dominio de la imagen SAR.

El número de ramificaciones paralelas L1 es igual el número de velocidades que se asumen. Cada objeto en movimiento se enfocará de manera diferente en cada una de las ramas, mostrando la mayor intensidad en la salida de la rama que mejor se aproxima al valor verdadero de la velocidad en dirección de acimut. Del mismo modo, un objetivo fijo se enfocará correctamente a través de la compensación de fase correspondiente a la “velocidad cero”. Por lo tanto, esta diferencia en el enfoque se puede utilizar como medida para estimar la velocidad de los objetos en movimiento.

Resumiendo, de cada una de las ramas se obtiene una imagen, formando de esta manera un stack de imágenes. Cada una se corresponde con una velocidad estimada distinta. El siguiente paso es analizar dicho stack.

La velocidad estimada que mejor se aproxima a la velocidad real del blanco en movimiento, genera una amplitud mayor en la imagen. Por lo tanto, en las zonas que fueron identificadas como lugares con posibles objetos en movimiento, se debe analizar en que imagen se alcanza el valor máximo. Una vez determinado esto, se debe identificar la velocidad que se asumió para generar dicha imagen. Esta velocidad, es la velocidad real del target. El concepto se ilustra en Fig. 3.5.

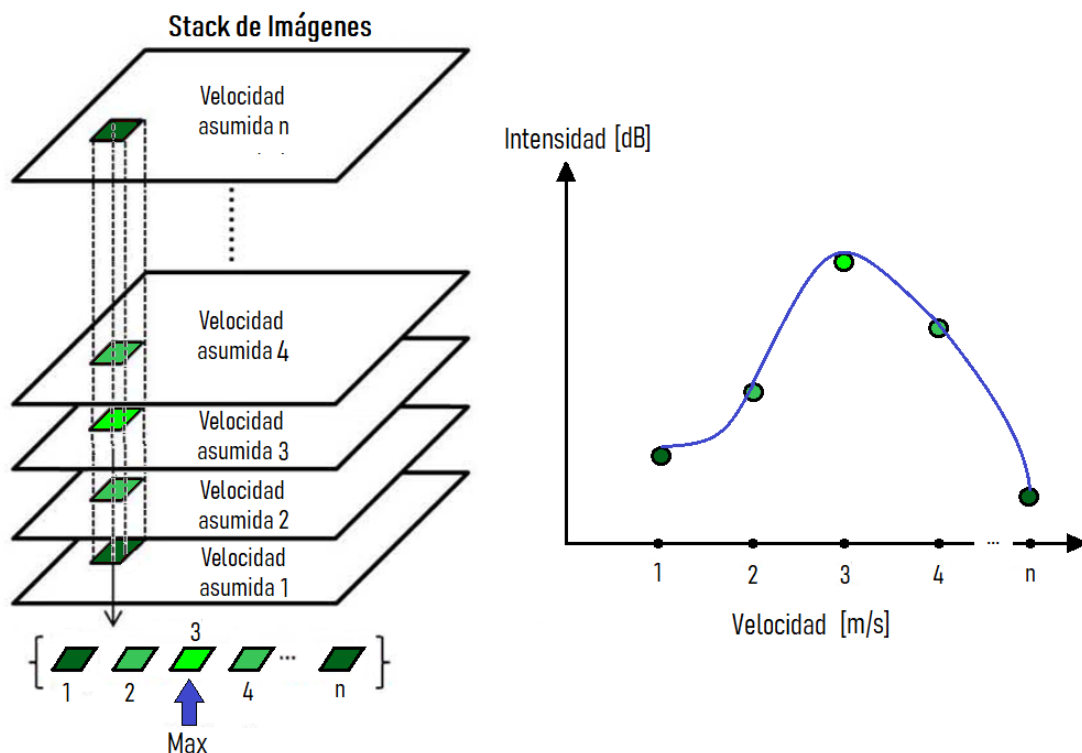


Figura 3.5: Análisis de Stack de Imágenes

Si para el caso de la figura anterior se toma como ejemplo que la velocidad asumida 1 es igual a 15 [m/s], y los incrementos en la velocidades son siempre de 1 [m/s], entonces la intensidad máxima del stack de imágenes se alcanza cuando se asume una velocidad de 17 [m/s], y este valor es precisamente la velocidad del target presente en el área bajo análisis.

3.3. Descripción del algoritmo

Para implementar el esquema de procesamiento propuesto en la Fig. 3.4, se desarrolló un algoritmo en Matlab. Con el objetivo de lograr una buena comprensión del mismo, se presenta el siguiente diagrama en bloques, donde en los rectángulos celestes se indica la función principal, y a la derecha se muestra un resumen de las funciones de Matlab utilizadas.

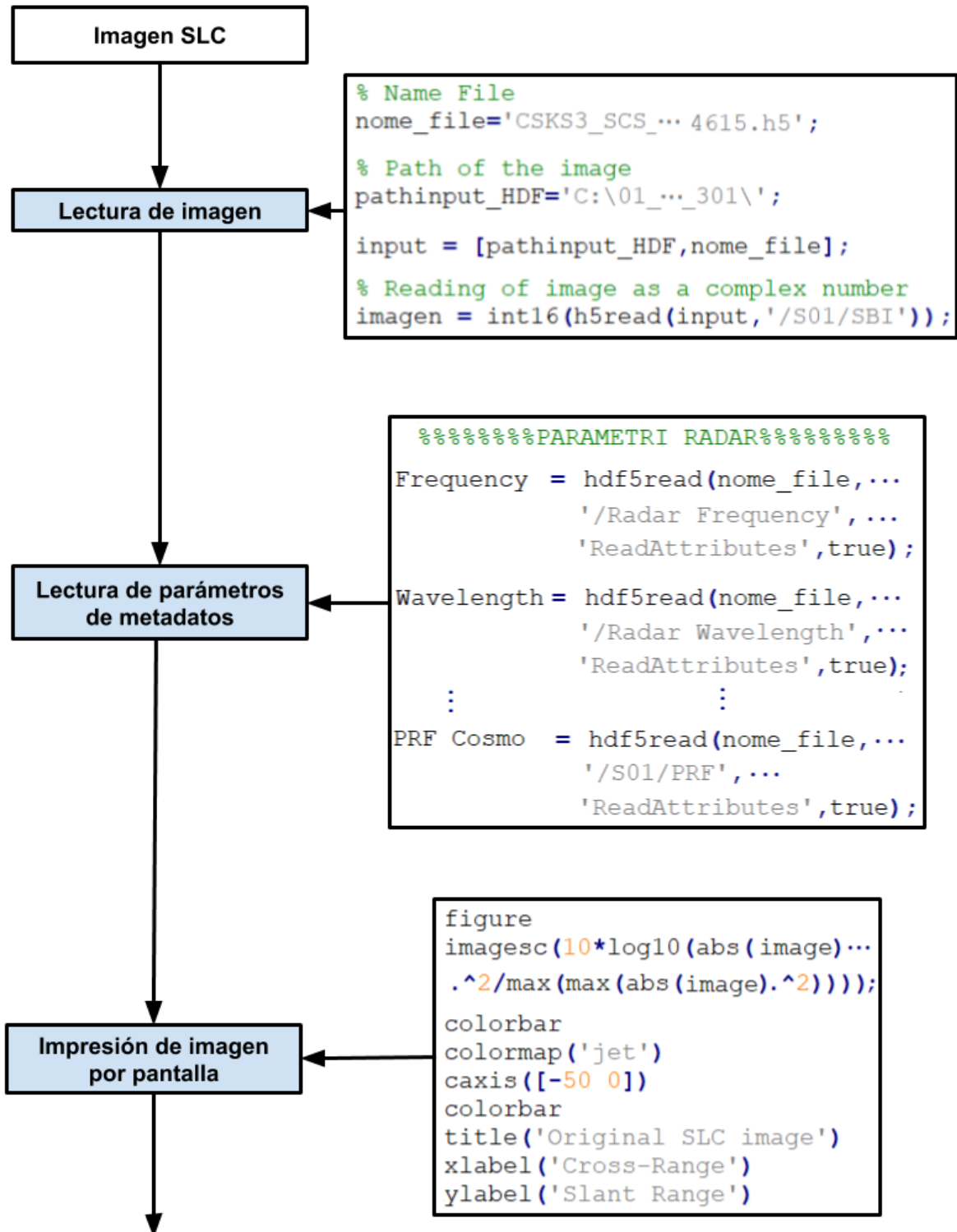


Figura 3.6: Diagrama en bloques del algoritmo - Parte 1

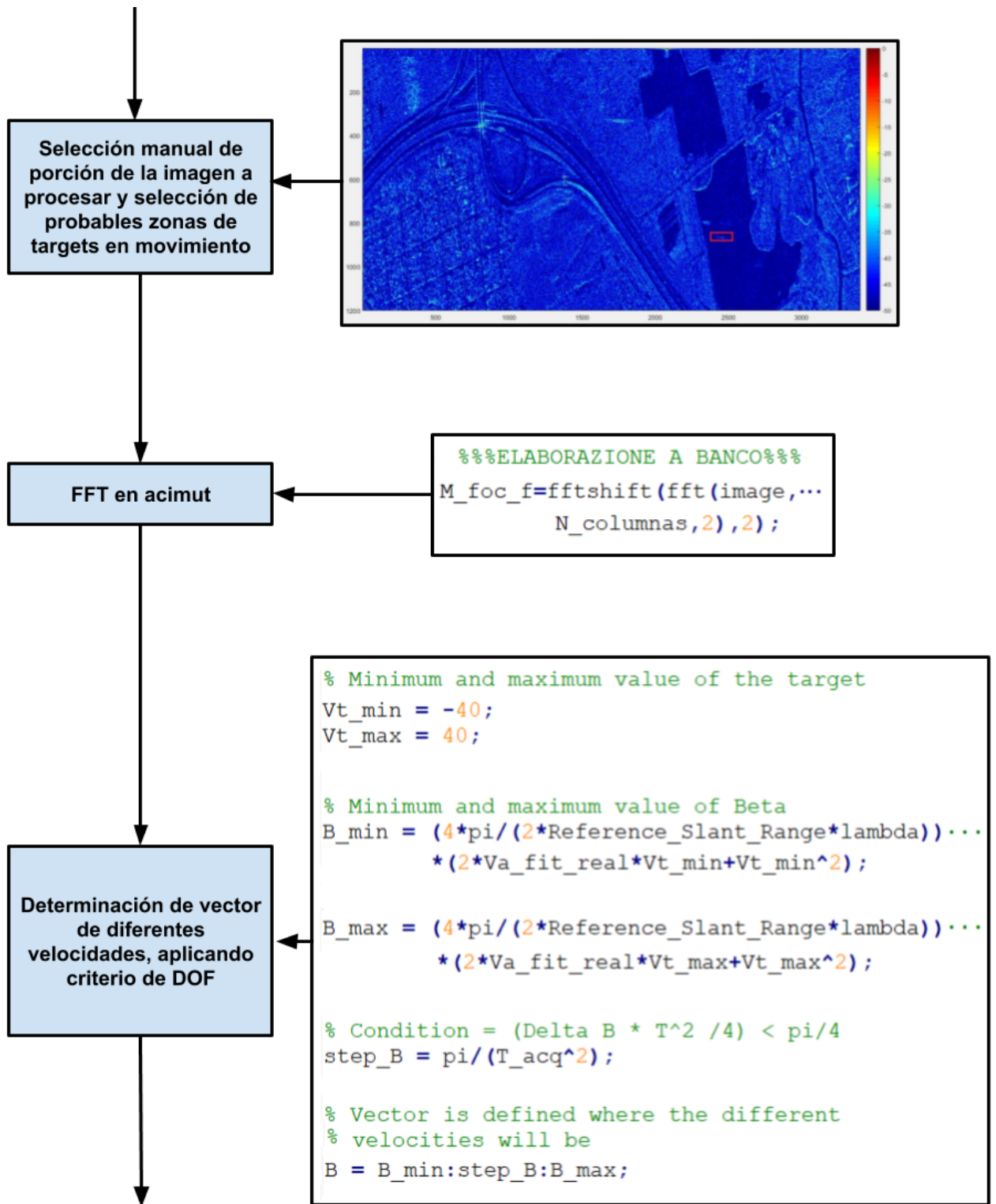


Figura 3.7: Diagrama en bloques del algoritmo - Parte 2

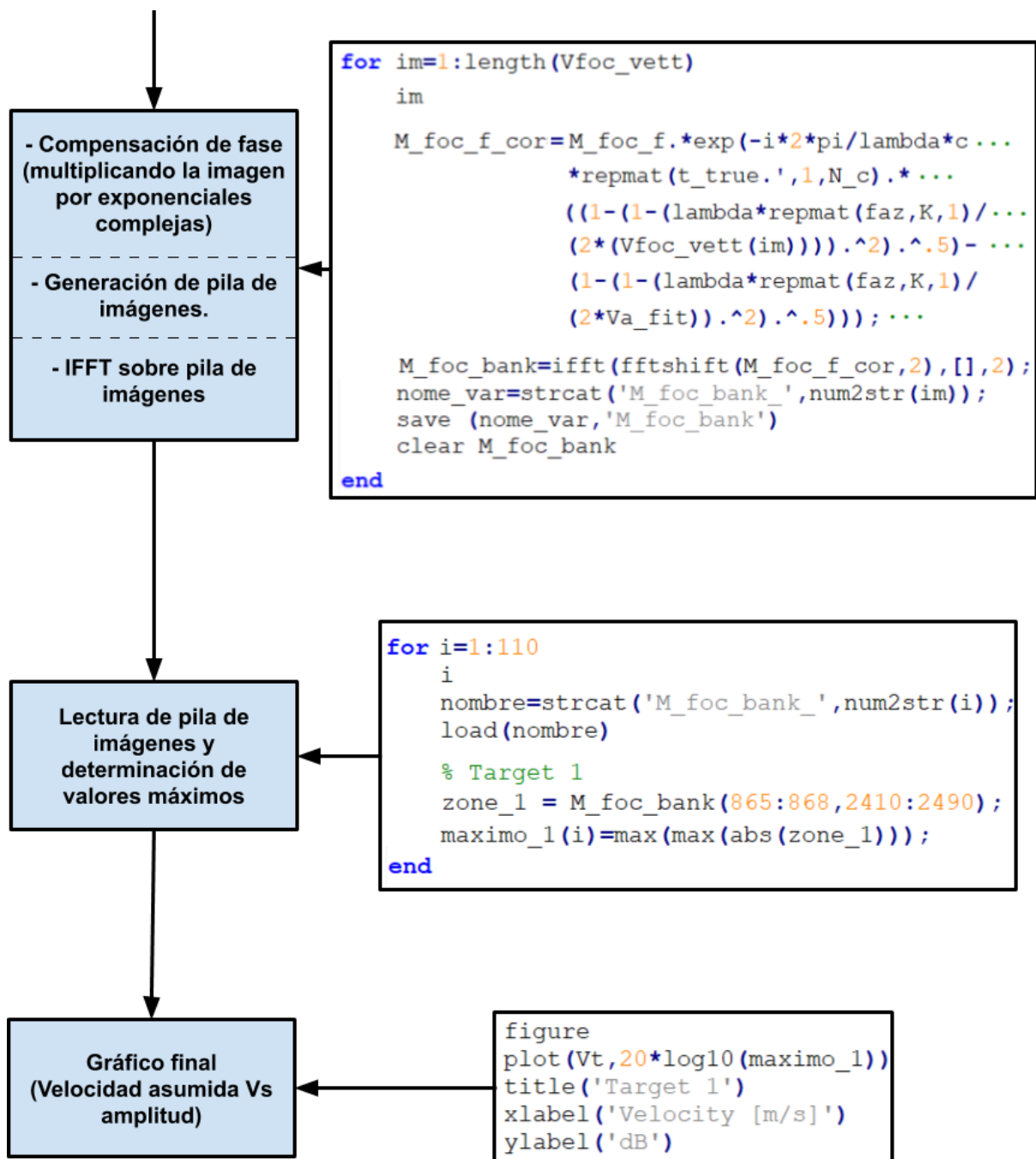


Figura 3.8: Diagrama en bloques del algoritmo - Parte 3

El primer paso es la lectura de la imagen CSK SLC para colocar los datos complejos en una matriz sobre la cual se realizarán todas las operaciones. Luego se obtienen los parámetros de la adquisición tales como el tiempo de integración de la escena, la frecuencia de operación del radar, la longitud de onda, PRF, entre otros, exportando los mismos desde el archivo de metadatos.

El siguiente paso es imprimir por pantalla la escena. Se realiza en este momento la primera inspección visual, y se determina una zona de análisis (generalmente se han seleccionado zonas de 1200 píxeles en rango y 4000 en acimut) que contenga puntos desenfocados ya que podrían estar relacionados con objetos en movimiento. Se corta la imagen original ya que para procesar la imagen completa se requiere de mucho poder de procesamiento.

En la imagen recortada se determinan rectángulos pequeños (generalmente 150/200 píxeles en acimut, y 5/10 en rango) que contengan los puntos desenfocados. Estas son las zonas de análisis, donde es posible que exista un target móvil.

El paso siguiente es realizar la FFT en cada fila en dirección de acimut. Este concepto fue explicado detalladamente en la Fig. 3.1. De este modo se lleva la imagen, al plano range-Doppler.

Luego se determina un vector que contiene cada una de las velocidades asumidas, adoptando el criterio de DOF. Cada una de estas velocidades es utilizada en el término de fase de una exponencial compleja para multiplicar la matriz, con el objetivo de compensar el desfase que agregan los objetos en movimiento a la señal. Para realizar esta multiplicación se usa la exponencial con una velocidad específica, para multiplicar cada una de las filas (es decir en dirección de acimut) de la imagen, es decir, en la misma dirección en que se realiza la FFT. Luego se repite el proceso para todas las velocidades. Como resultado, se obtiene un conjunto de imágenes: la pila.

A las imágenes se le realiza la IFFT para volver al dominio original.

Finalmente se realiza un análisis a través del stack de imágenes, en cada uno de los rectángulos pequeños que se definieron al principio como zonas probables de existencias de targets móviles. Se realizan los gráficos colocando el máximo valor alcanzado dentro de los rectángulos en función de cada velocidad asumida. En dichos gráficos se puede apreciar a que valores de velocidad se alcanza la amplitud máxima. Estos gráficos deben ser analizados por el operador y determinar si las zonas seleccionadas como targets móviles, realmente lo son.

Esto es importante de mencionar, ya que si el operador no tiene experiencia en los efectos que producen los targets en movimiento, podría haber seleccionado una zona de análisis que en realidad no sea un target moviéndose.

A continuación se muestran dos imágenes donde se seleccionaron zonas donde en realidad había objetos fijos.

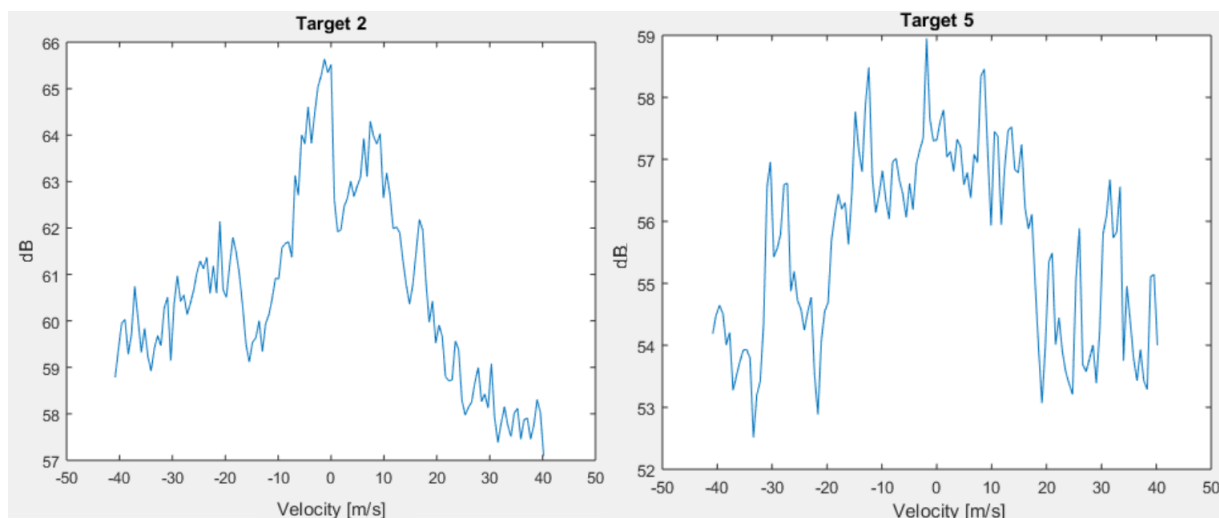


Figura 3.9: Curvas de análisis para targets fijos

Como puede apreciarse, las intensidades máximas se alcanzan para la velocidad 0, lo que indica que en realidad no había objetos móviles en la zona.

Casos de Aplicación: Procesamiento y Resultados

Se utiliza el algoritmo estudiado en la sección 3.3 para procesar imágenes SAR CSK. En este capítulo se exponen los casos de aplicación seleccionados y se muestran y analizan los resultados obtenidos.

4.1. Procesamiento de imagen italiana

En [5] se realizó un trabajo similar a este, y se estimaron parámetros de velocidad de 8 targets móviles, pero aplicando otro esquema de procesamiento. La imagen utilizada en dicho trabajo fue adquirida sobre Italia, y por lo tanto a través de CONAE no se se la puede solicitar ya que los convenios con la ASI habilitan únicamente el acceso a imágenes CSK adquiridas sobre el territorio de la República Argentina. Sin embargo, durante la pasantía en Italia se tuvo acceso a dicha imagen y se la utilizó para estimar los parámetros de velocidad de los mismos targets, pero aplicando el esquema de procesamiento propuesto en este trabajo. De este modo, si con el algoritmo propio se alcanzan valores del orden de aquellos que se reportaron en [5], significaría que el algoritmo está funcionando correctamente y por lo tanto se podría utilizar para procesar otras imágenes. Esto puede ser considerado como una validación del algoritmo.

Por cuestiones de confidencialidad, en este trabajo solo se presentan los gráficos obtenidos del procesamiento propio, mientras que todas las imágenes de la escena fueron tomadas de [5] y [33], que son artículos ya publicados.

4.1.1. Descripción de la escena

La imagen SAR CSK italiana seleccionada, se identifica con el record number 100618933. La misma fue adquirida sobre el norte de Roma el 5 de mayo del año 2010. El recorte procesado tiene un tamaño aproximado de 1 km x 3km en rango y acimut respectivamente. En la escena puede identificarse el río Tíber junto a la ruta A1 Milan-Nápoles y las vías del ferrocarril [33].

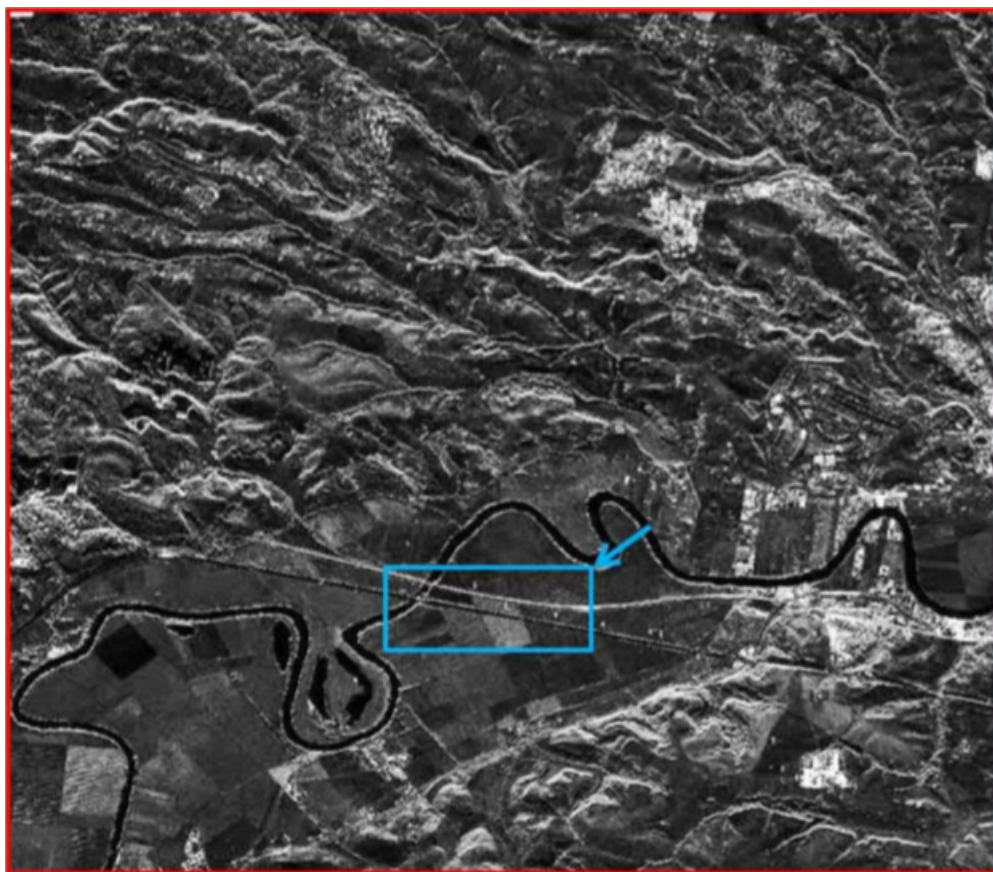


Figura 4.1: Escena completa de imagen italiana. Tomado de [5].

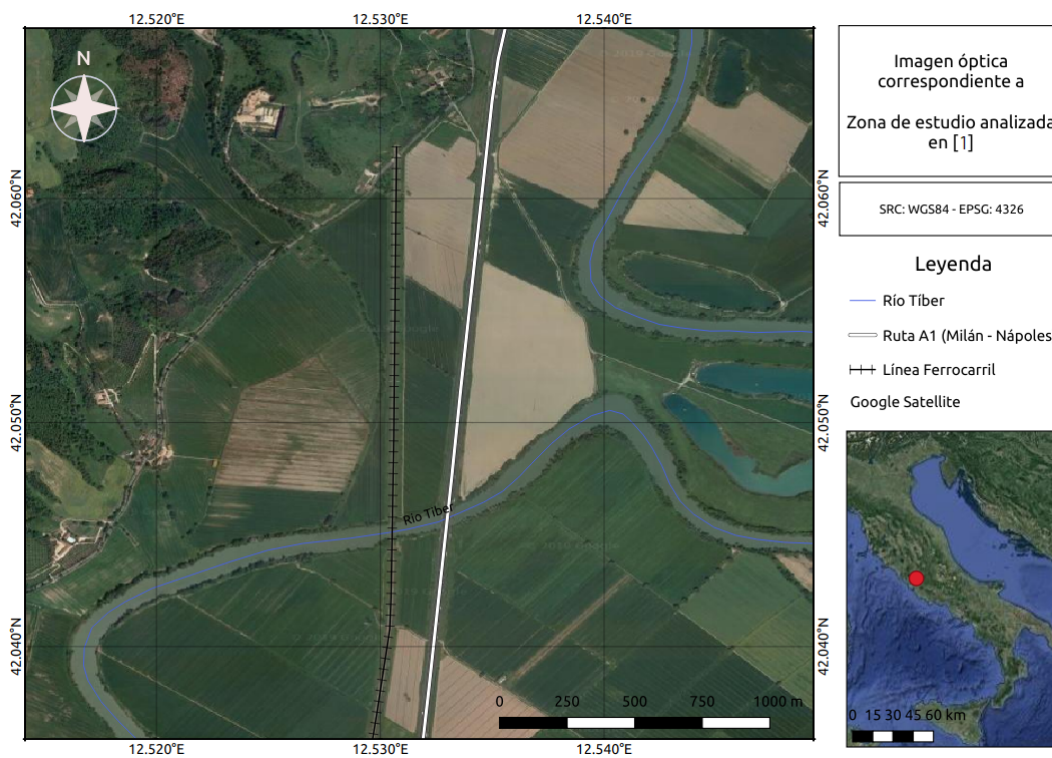


Figura 4.2: Imagen óptica correspondiente a zona analizada en [5].

La escena completa de la imagen italiana se muestra en la Fig.4.1. El cuadro celeste indica el recorte utilizado para procesar, el cual puede verse con mas detalle en la Fig. 2.16, donde además se señalan las zonas de cada target y su respectiva identificación. La imagen óptica correspondiente a la zona bajo análisis, se presenta en la Fig. 4.2.

4.1.2. Procesamiento de la imagen

Se utiliza la imagen descrita en la sección anterior, como entrada del algoritmo de procesamiento desarrollado en este trabajo y explicado en la sección 3.3.

Los gráficos posteriores muestran los resultados. En el eje x , están las velocidades asumidas en acimut para generar el stack de imágenes. En el eje y , se observa la amplitud alcanzada en cada una de las 8 zonas. De este modo, donde se encuentra el pico máximo, es la velocidad asumida que mejor aproxima la velocidad real del objeto.

Cabe destacar que para el procesamiento se considera una cantidad discreta de valores de velocidad. Sin embargo, se grafica una línea continua para una mejor interpretación visual.

En esta imagen, el paso de velocidades calculado es de 0.72 [m/s].

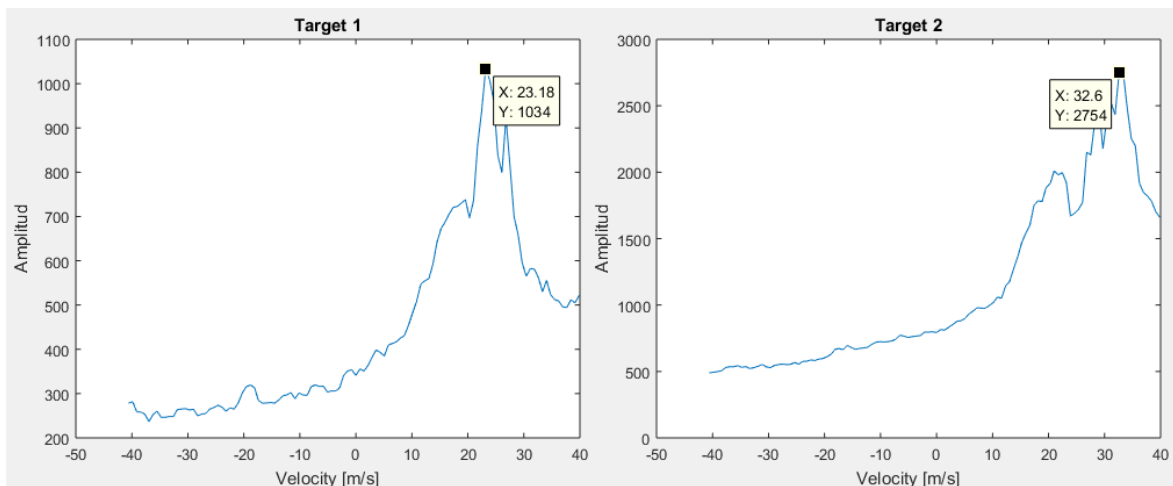


Figura 4.3: Análisis de Target 1 y Target 2

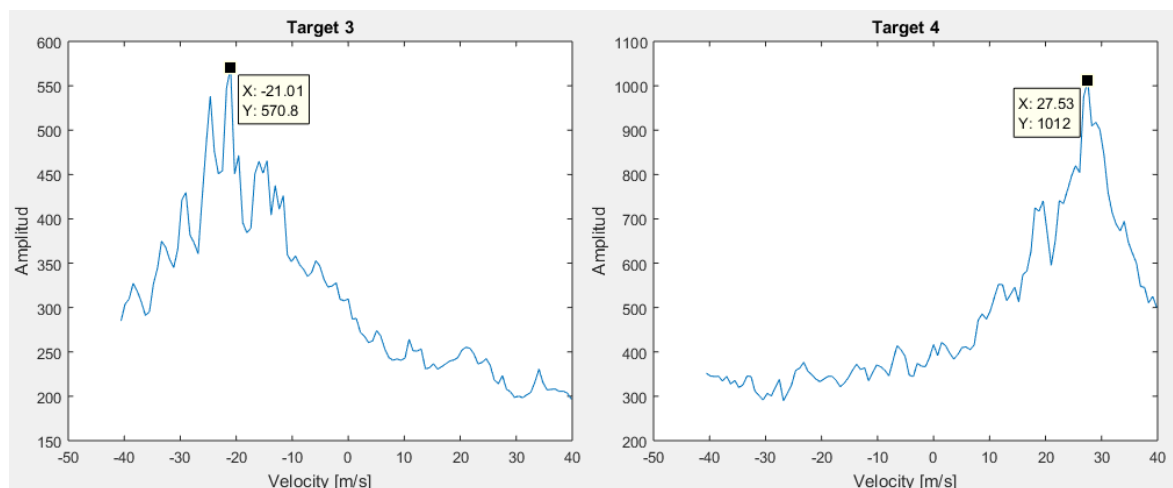


Figura 4.4: Análisis de Target 3 y Target 4

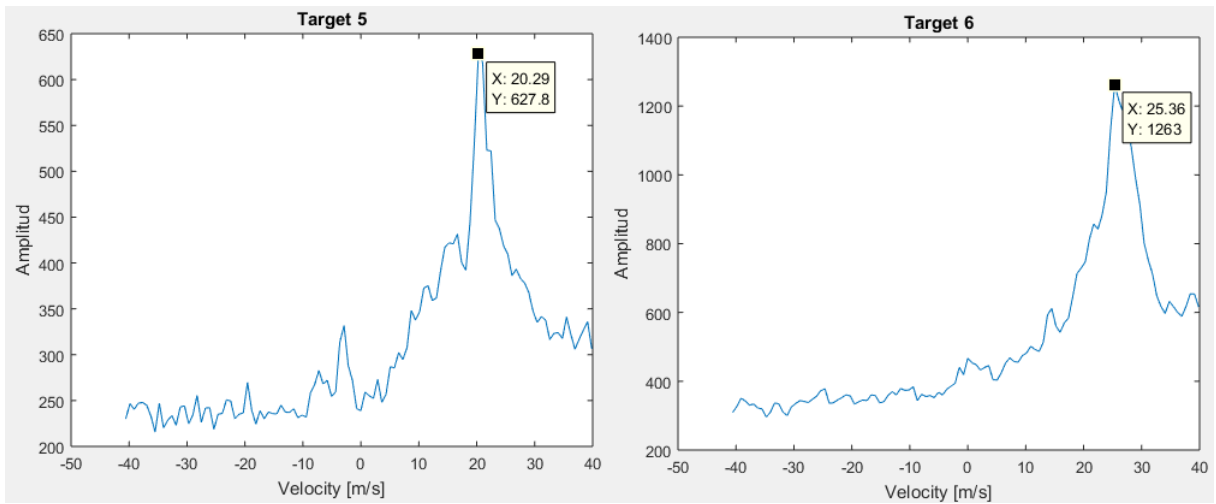


Figura 4.5: Análisis de Target 5 y Target 6

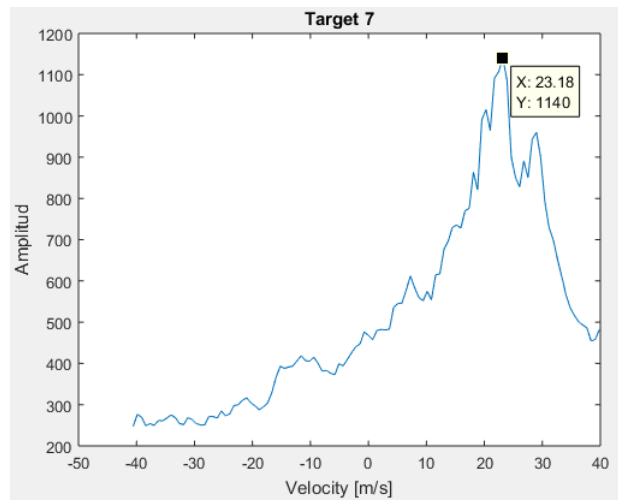


Figura 4.6: Análisis de Target 7

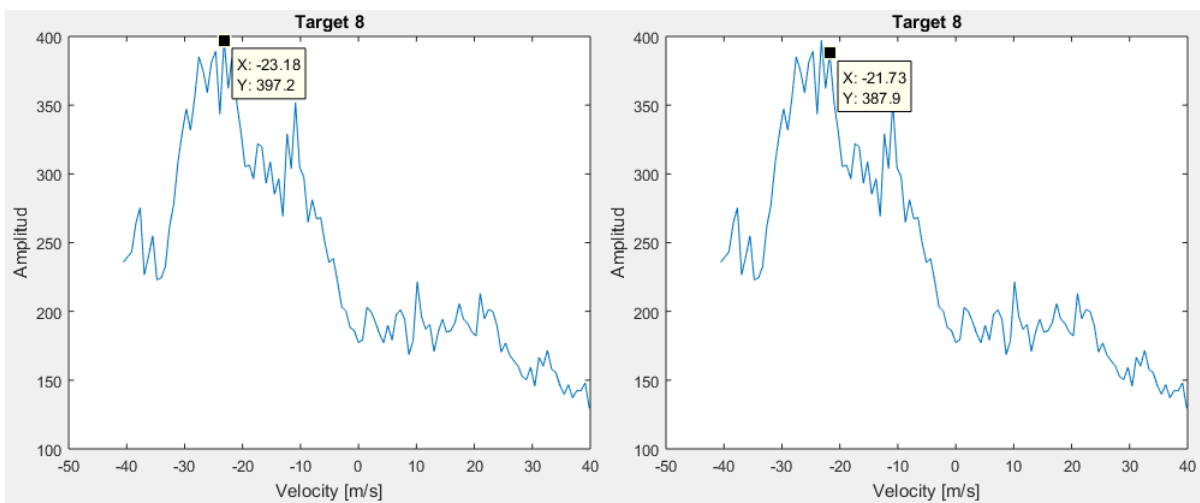


Figura 4.7: Análisis de Target 8

En la siguiente tabla se muestran los valores máximos (peak power) obtenidos para cada zona bajo análisis. Además se realiza la comparación entre los valores reportados en [5] y los valores obtenidos con el procesamiento propio.

Target "Zone"	Vcross [m/s] Peak Power (paper [5])	Vcross [m/s] Peak Power (esquema propio)
1	23,91	23,18
2	32,60	32,60
3	-21,01	-21,01
4	27,53	27,53
5	20,29	20,29
6	25,36	25,36
7	23,18	23,18
8	-21,73	-23,18 / -21,73

Tabla 4.1: Velocidades estimadas en [5] Vs velocidades obtenidas con esquema propio

Como puede verse en la Tabla 4.1, para los targets 2, 3, 4, 5, 6 y 7 los valores obtenidos son exactamente los mismos, tanto para el esquema de procesamiento propuesto en [5], como para el esquema propuesto en este trabajo. Para el caso del target 1, la diferencia entre los valores es de 0,73 [m/s], lo que equivale a 2,6 [Km/h]. Esta diferencia no es significativa. La diferencia mas grande se obtiene en el target 8, con una desviación de 1,45 [m/s] (5,22 [Km/h]) que tampoco se considera una diferencia importante. Para este último caso cabe destacar que el pico máximo y el segundo pico máximo (que coincide con el valor reportado en [5]), tienen un valor muy cercano.

4.1.3. Reubicación de targets sobre la ruta

Aprovechando el conocimiento previo de la topología de la escena y suponiendo que los targets están circulando en realidad sobre la autopista, es posible recuperar una estimación de la componente de la velocidad del target en dirección de rango y en la dirección de la ruta, a partir de la estimación de la velocidad en acimut (calculada previamente por el algoritmo) y la orientación (o pendiente) de la autopista en el plano de imagen SAR. El concepto se ilustra en la Fig. 4.8 donde se toma como referencia el "target 1". Se seleccionan dos puntos sobre la ruta (punto A y B) y se traza una recta. Conociendo la orientación de la recta se puede realizar la proyección de la velocidad en acimut sobre la ruta, lo que representa la velocidad del target sobre el lugar real de circulación. Con estos datos, y aplicando trigonometría básica, se determina también la velocidad del target en rango.

La componente de velocidad del target en rango se puede utilizar para calcular el desplazamiento que experimenta el mismo target en la dirección de acimut y por consiguiente, se lo puede reubicar teóricamente. De esta manera se demuestra la eficacia del esquema propuesto si cada objetivo reubicado queda sobre la autopista. Para este cálculo se utiliza la siguiente fórmula, presentada en [34]:

$$\Delta X_{teorico} = \left(\frac{v_r^{est}}{V_p} \right) R_0 \quad (4.1)$$

donde $\Delta X_{teorico}$ representanta el desplazamiento del target en dirección x (acimut), v_r^{est} representa la velocidad del target en dirección del rango, V_p la velocidad del SAR y R_0 el rango inclinado.

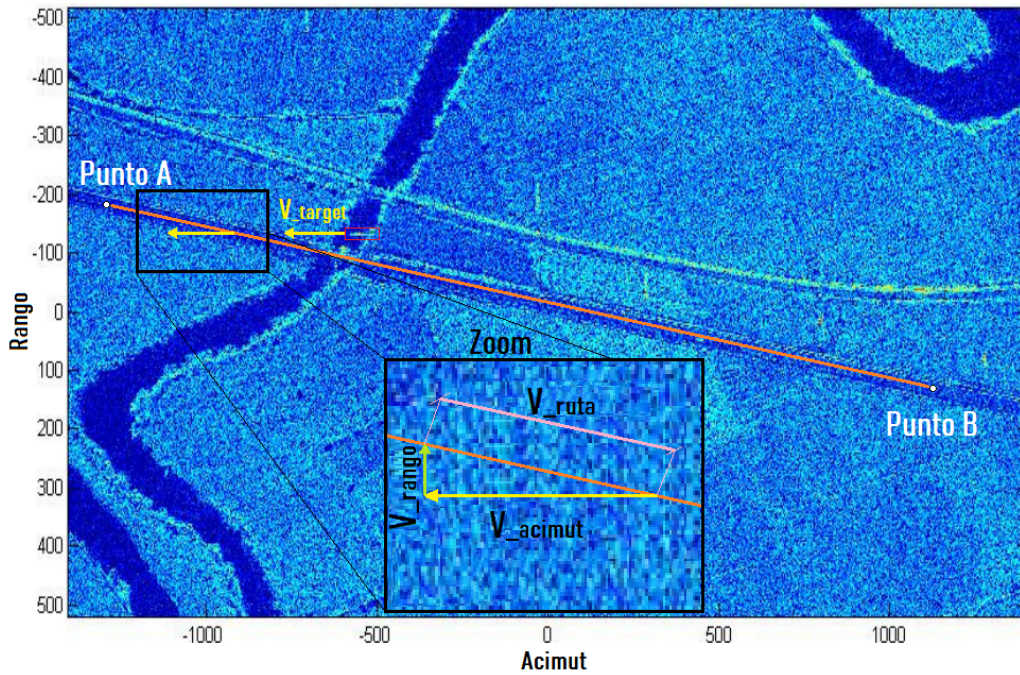


Figura 4.8: Proyecciones de velocidades sobre imagen italiana. Tomado y modificado de [33].

Para realizar la reubicación, se debe corregir el desplazamiento del target $\Delta X_{teorico}$. Si queda reubicado dentro del intervalo $\Delta X_{interval}$, que se corresponde con el intervalo de pixeles que representa la ruta en la imagen SAR, entonces se puede concluir que la reubicación es correcta. La Fig. 4.9 muestra esta idea gráficamente.

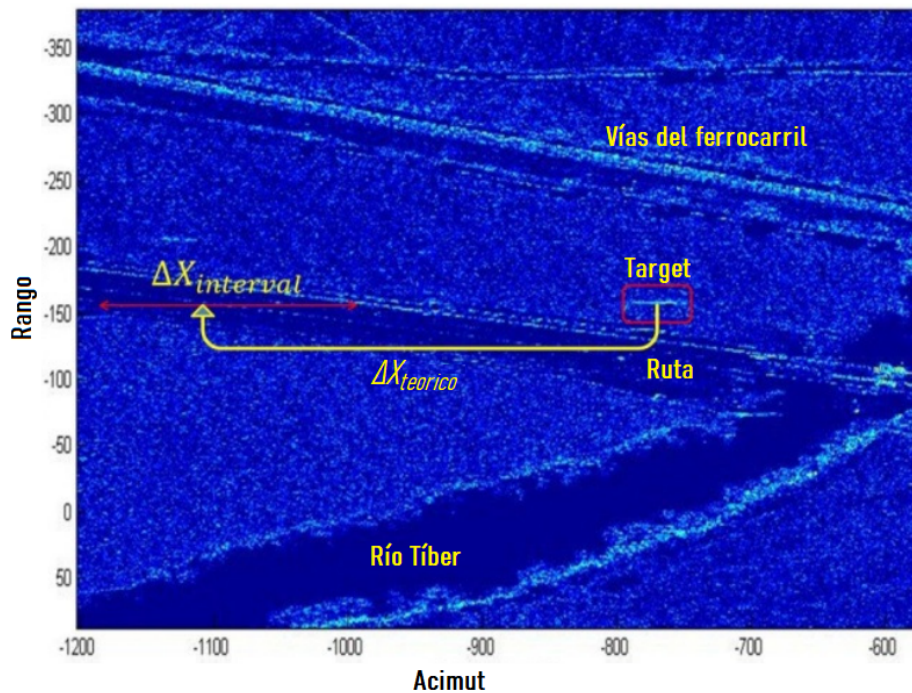


Figura 4.9: Reubicación de target. Tomado y modificado de [33]

Las componentes de velocidad, los desplazamientos teóricos y los intervalos válidos para la reubicación de los 8 targets analizados en [5], se resumen en la Tabla 4.2. Se pueden observar tanto los valores calculados con el esquema propio como los calculados con el esquema propuesto en [5].

Como puede observarse, existen diferencias mínimas entre las velocidades de los targets en la dirección de rango, calculadas entre los distintos esquemas. Esto se debe a que los valores dependen de la recta seleccionada para realizar las proyecciones. En [5] no está especificada la orientación precisa, por lo tanto no se pudo replicar exactamente los valores. Estas diferencias provocan una variación en el cálculo del desplazamiento $\Delta X_{teorico}$. Sin embargo, lo importante es que luego de realizar la reubicación, los targets estén dentro del intervalo permitido $\Delta X_{interval}$ y esto se cumple para los 8 targets.

Zona	Velocidad en acimut [m/s] (tomado de [1])	Velocidad en acimut [m/s] (esquema propio)	Velocidad en rango [m/s] (tomado de [1])	Velocidad en rango [m/s] (esquema propio)	$\Delta X_{teorico}$ [m] (tomado de [1])	$\Delta X_{teorico}$ [m] (esquema propio)	$\Delta X_{interval}$ X [m]
1	23.91	23.18	2.46	2.38	240.94	240.69	220 a 330
2	32.60	32.60	3.35	3.3536	328.55	338.51	250 a 350
3	-21.01	-21.01	-2.16	-2.1613	-211.73	-218.14	-189 a - 310
4	27.53	27.53	2.83	2.8320	277.44	285.91	220 a 350
5	20.29	20.29	2.08	2.0872	204.43	210.72	190 a 330
6	25.36	25.36	2.60	2.6088	255.54	263.37	200 a 340
7	23.18	23.18	2.38	2.3846	233.64	240.74	220 a 350
8	-21.73	-23.18 / -21.73	-2.23	-2.3845 / -2.2353	-219.03	-241.94 / -2.2681	-160 a - 340

Tabla 4.2: Parámetros estimados en [5] Vs parámetros estimados con esquema propio

La reubicación realizada se muestra en la Fig. 4.10. Los círculos y cuadrados blancos muestran la posición incorrecta de los targets en la imagen SAR original. Los círculos y cuadrados de colores, representa los targets reubicados sobre la ruta luego del procesamiento de la imagen.

Con estos resultados, se puede concluir que el esquema propuesto en este trabajo se encuentra calibrado y listo para ser utilizado en imágenes argentinas.

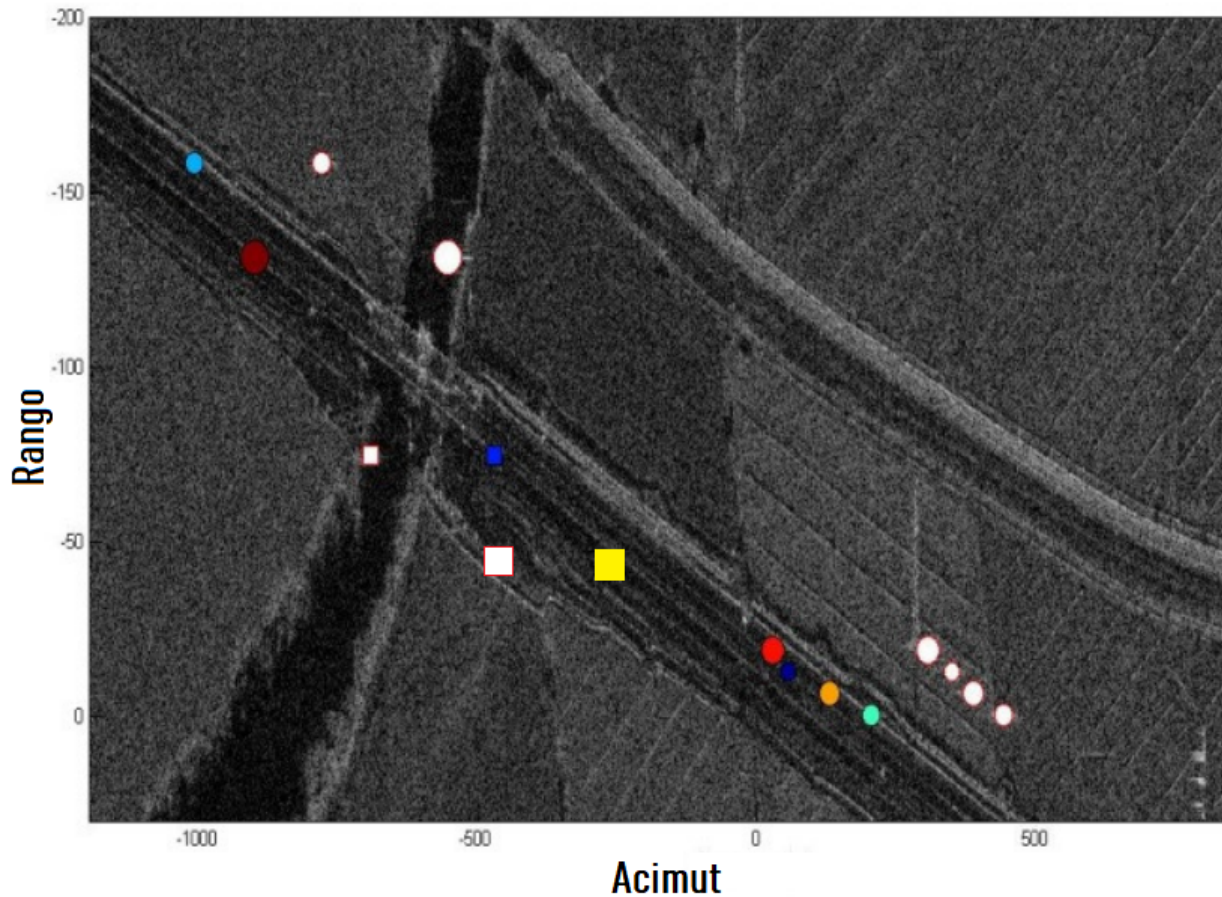


Figura 4.10: Reubicación realizada sobre imagen italiana. Tomado y modificado de [33].

4.1.4. Esquema de procesamiento propuesto en [5]

Para comprender la causa de las diferencias entre los valores de velocidad de los targets en la dirección de acimut (observables en la Tabla 4.1), obtenido al procesar la imagen italiana con el esquema de procesamiento propio y el utilizado en [5], se presenta el esquema de procesamiento de este último.

En [5] se desarrolló un esquema de dos pasos. El primero (llamado *BCSA-CR Technique*) realiza la supresión del eco recibido desde las zonas estacionarias, mientras que el segundo (*BCSA-MTD Technique*) realiza detección de objetivos en movimiento y la estimación de los parámetros de velocidad. Ambos pasos se basan en el uso de un banco de filtros de enfoque CSA, sin embargo, el concepto se puede extender utilizando cualquier otro enfocador.

La técnica BCSA-CR tiene como objetivo identificar principalmente los ecos de zonas estáticas. De esta manera se divide la escena en dos: zonas estáticas y zonas móviles. Luego se limpia o elimina la contribución los ecos recibidos en el radar a causa de objetos fijos en la superficie. Esta técnica necesita como entrada datos RAW, tal como se indica en la Fig. 4.11.

El paso BCSA-MTD es nuevamente un banco de filtrado CSA aplicado a la señal limpia tal como se indica en la Fig. 4.12. Cada filtro del banco coincide con un valor de velocidad específico dentro de la región en movimiento. El banco proporciona un conjunto de imágenes de salida dentro de las cuales los targets móviles se puede detectar mejor ya que no tienen que competir contra fuertes ecos de estructura fija.

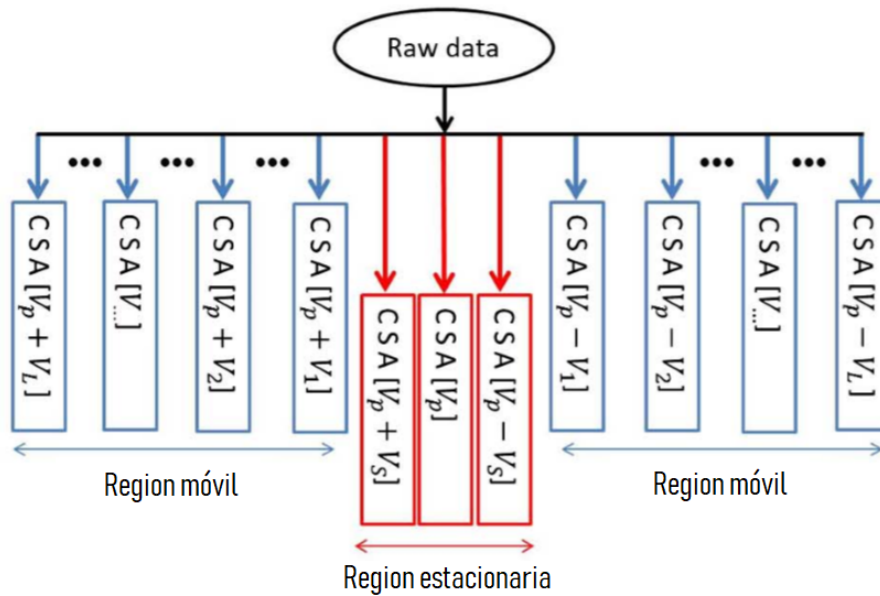


Figura 4.11: Primer paso del esquema de procesamiento propuesto en [5]. Tomado y modificado de [5].

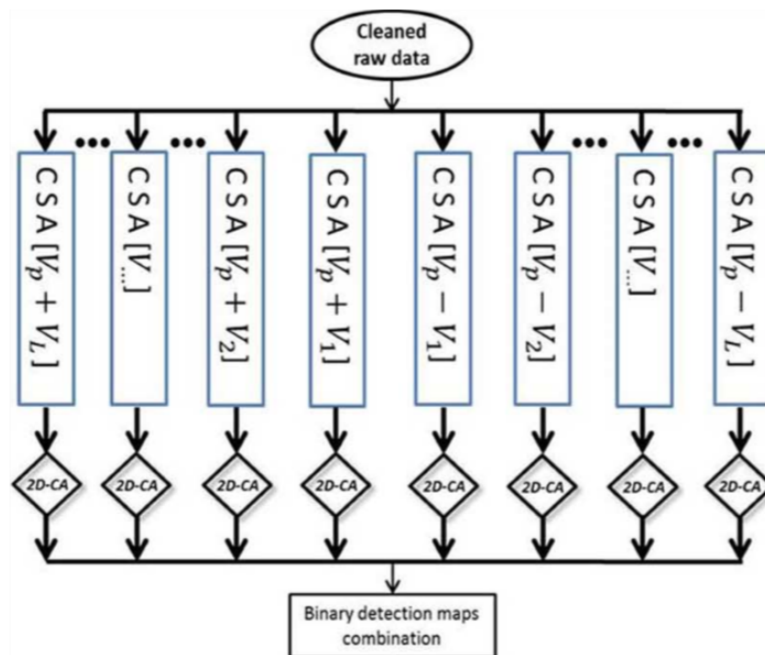


Figura 4.12: Segundo paso del esquema de procesamiento propuesto en [5]. Tomado y modificado de [5].

Con esta explicación, se puede concluir que el esquema propuesto en [5] es más eficiente ya que realiza una supresión de los ecos de las zonas estacionarias antes de estimar la velocidad de los objetos en movimiento. Esto le permite a los ecos recibidos desde los targets móviles ser más claros y fáciles de procesar.

Sin embargo, esto se logra a expensas de incrementar drásticamente el costo computacional, ya que no solo se debe realizar la supresión de ecos estacionarios, sino que además se debe aplicar una cadena de enfoque completa para cada una de las ramas correspondientes a velocidades distintas.

El esquema propuesto en este trabajo y explicado en la Fig. 3.4 puede no ser tan preciso. Sin embargo, esta falencia se compensa al ser un procesamiento sencillo que se puede llevar a cabo simplemente aplicando transformaciones de Fourier directas e inversas, y multiplicaciones por señales complejas, lo que requiere una carga computacional muy baja.

4.2. Procesamiento de imagen argentina

4.2.1. Dataset

Para la realización de este trabajo, se contó con la disponibilidad de las imágenes descritas en la Tabla 4.3.

Record Number	Fecha	Modo	Dirección de órbita	Mirada	Nivel	País
584080	2016/08/03	Spotlight	Descendente	Derecha	1A (SLC)	Argentina
54198	2011/03/12	Spotlight	Ascendente	Derecha	1A (SLC)	Argentina
54007	2011/03/08	Spotlight	Ascendente	Derecha	1A (SLC)	Argentina
448516	2015/03/18	Spotlight	Ascendente	Derecha	1A (SLC)	Argentina
594272	2016/08/30	Spotlight	Ascendente	Derecha	1A (SLC)	Argentina
124464	2012/01/31	Spotlight	Ascendente	Derecha	1A (SLC)	Argentina
54187	2011/03/11	Spotlight	Ascendente	Derecha	1A (SLC)	Argentina

Tabla 4.3: Conjunto de imágenes disponibles para procesar

Se utilizó una única imagen argentina de todas las disponibles dado que pareciera existir un problema en la generación de los productos Spot adquiridos sobre Argentina que no ha podido ser determinado pero que produce imágenes de menor calidad de la esperada.

A modo ilustrativo, en la Fig. 4.13 se presenta una imagen de intensidad de la adquisición record number 54198. Nótese la diferencia de claridad entre esta imagen y la Fig. 2.16. Claramente la primera pareciera tener una especie de ruido “sal y pimienta” excesivo, lo que imposibilita llevar a cabo el procesamiento GMTI.

Para intentar descifrar el problema, se contrastaron los metadatos de la imagen italiana y las argentinas, pero no se encontraron grandes diferencias entre los parámetros de cada una de ellas.

Si bien este problema no se solucionó, para el procesamiento se seleccionó la imagen Argentina record number 124464, ya que si bien no se veía una escena tan clara como la imagen italiana, era la mejor de todo el conjunto.



Figura 4.13: Imagen de intensidad de adquisición con record number 54198

4.2.2. Procesamiento de imagen argentina con record number 124464

La imagen seleccionada fue adquirida sobre la región de la ciudad de Córdoba. En la misma se puede observar la Av. de circunvalación Agustín Tosco y toda la edificación de la ciudad. En la Fig. 4.14 se muestra una imagen óptica que abarca toda la escena, mientras que en la Fig. 4.15 se muestra la imagen Quick Look anexada junto con la adquisición.

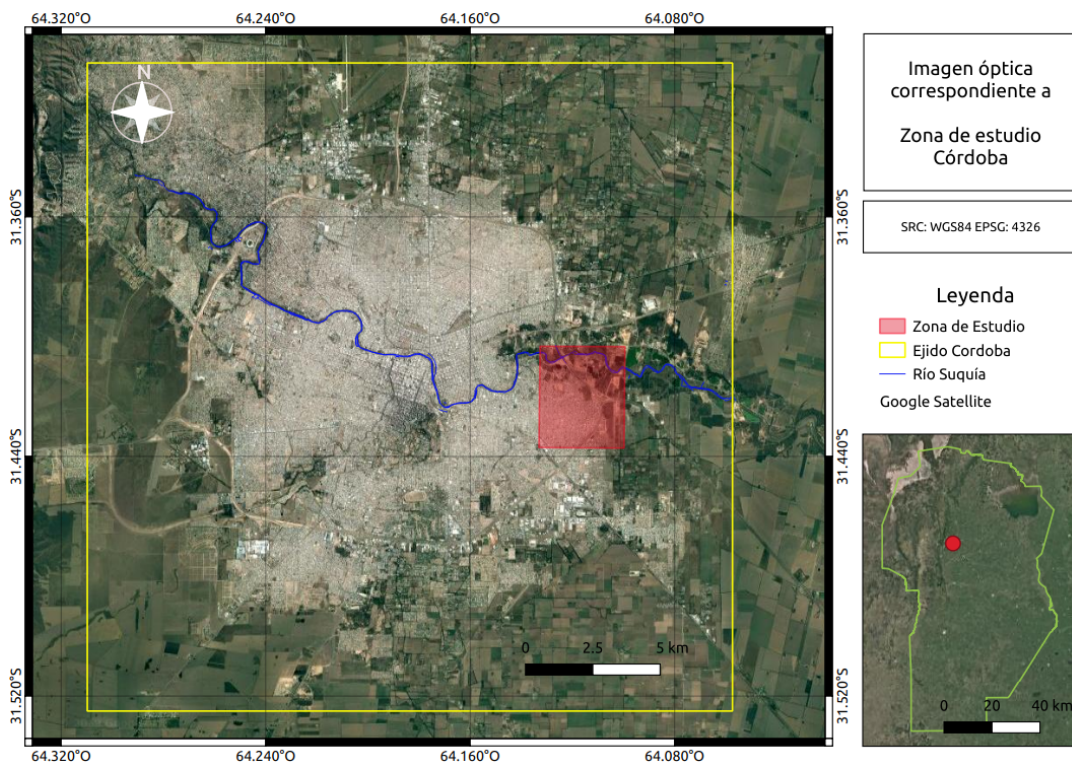


Figura 4.14: Imagen Óptica del Área de Estudio

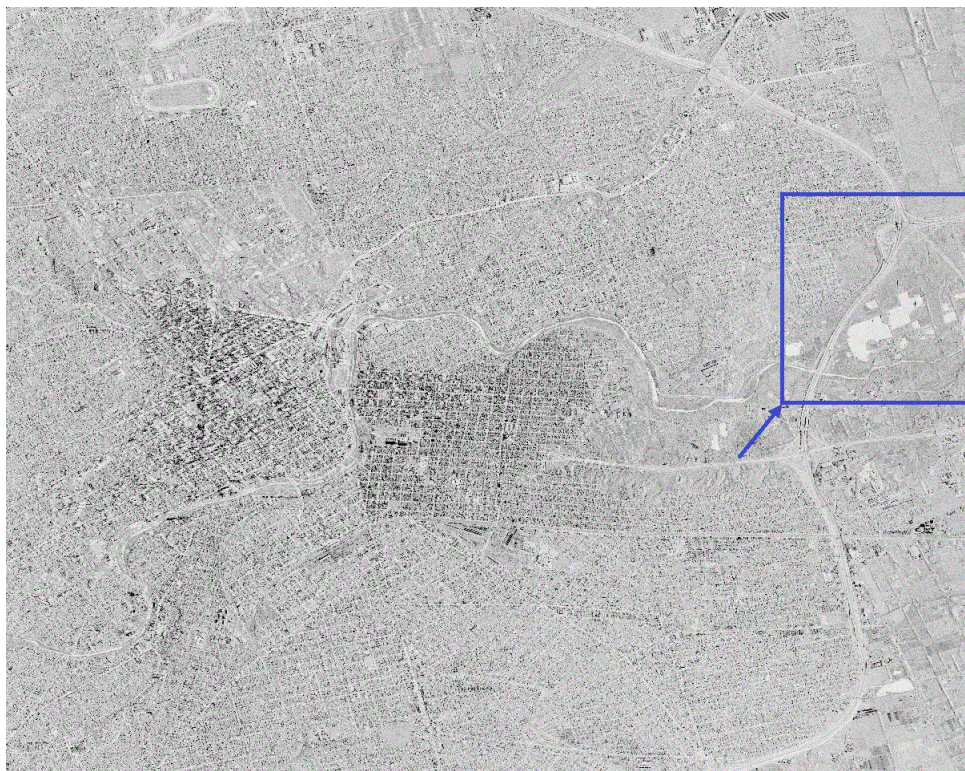


Figura 4.15: Imagen Quick Look del área de estudio

El rectángulo rojo de la Fig. 4.14 y el rectángulo azul de la Fig. 4.15 se corresponde con el recorte que se utiliza para procesar. La zona ampliada de tal recorte puede observarse en la imagen óptica de la Fig. 4.16, mientras que en la Fig. 4.17 se muestra la imagen en intensidad generada a partir de los datos SLC de la adquisición CSK .

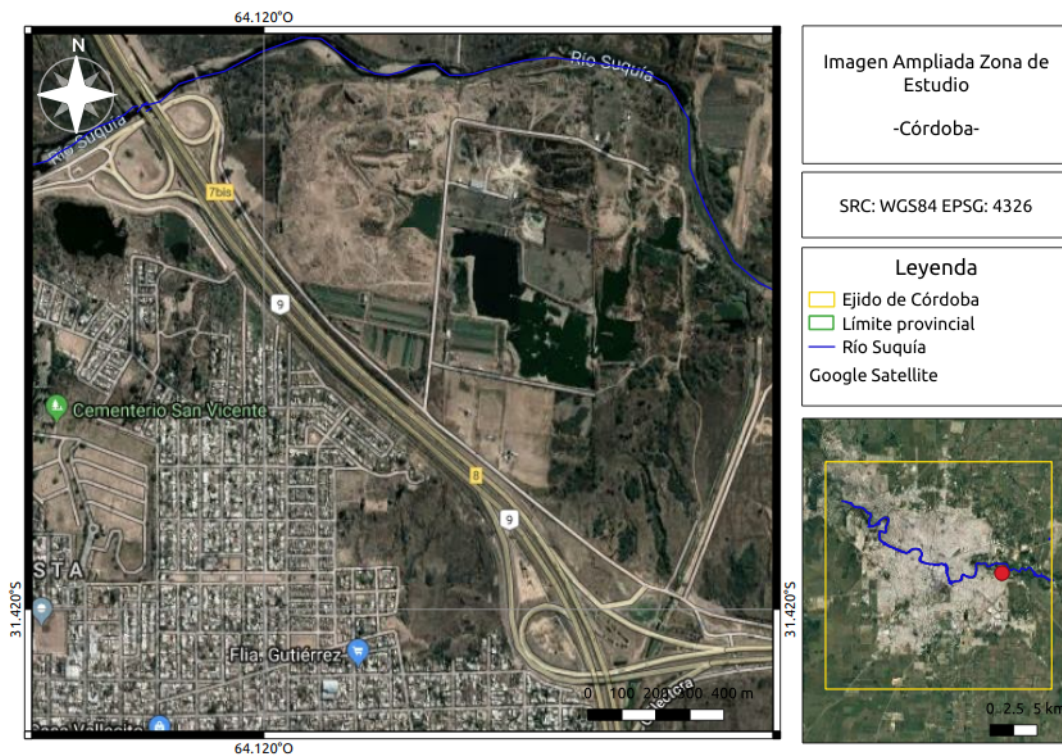


Figura 4.16: Imagen Óptica ampliada del Área de Estudio

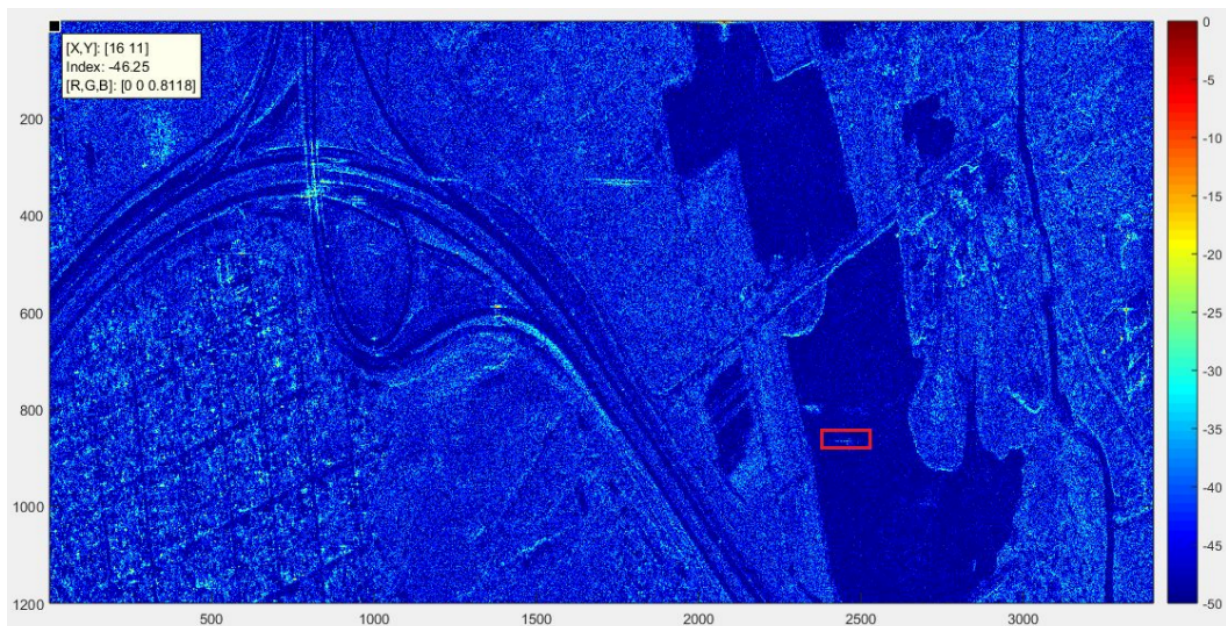


Figura 4.17: Zona de análisis

En la escena se observan un número de zonas desenfocadas y desplazadas que podrían potencialmente estar relacionadas con objetos en movimiento. Por lo tanto en esta sección se mostrará el análisis realizado en la zona reportada con el cuadro rojo de la Fig. 4.17.

En la Fig. 4.18 se realiza un zoom sobre la zona de interés. En el cuadro rojo se señala lo que a partir de ahora llamaremos "Target 1", que se encuentra claramente sobre una acumulación de agua poco extensa y poco profunda. Este tipo de cuerpos de agua es común en esta zona cercana al río donde los desniveles producidas por la extracción de áridos se suelen inundar.

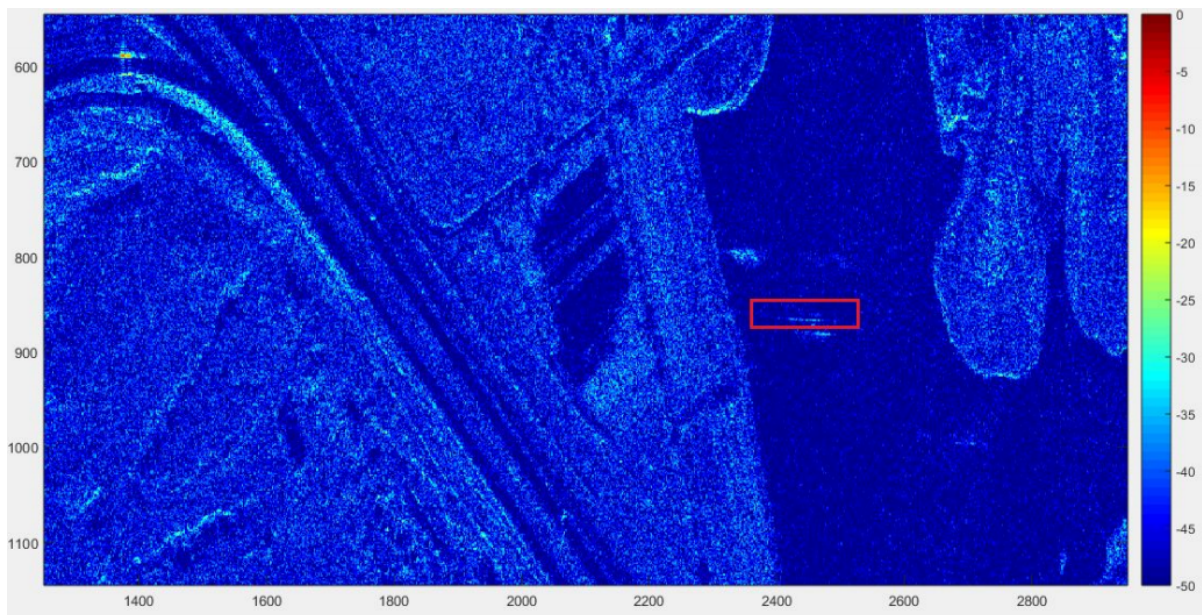


Figura 4.18: Zona de análisis - Zoom - Target 1

Se realiza el procesamiento de la imagen CSK SLC con el script desarrollado en Matlab destinado a implementar el esquema de procesamiento explicado en la sección 3.

La salida del procesamiento puede verse en la Fig. 4.19. En el eje x se encuentran las velocidades asumidas en [m/s] mientras que en el eje y se encuentran las intensidades alcanzadas en el rectángulo seleccionado, para cada velocidad asumida. El paso de velocidades calculado para esta imagen es de 0.41 [m/s].

Como se aclaró anteriormente, el pico máximo de esta curva representa la velocidad estimada que mejor se aproxima a la velocidad real, lo que genera un mejor enfoque en la zona y de esta manera se alcanza un valor de intensidad mayor.

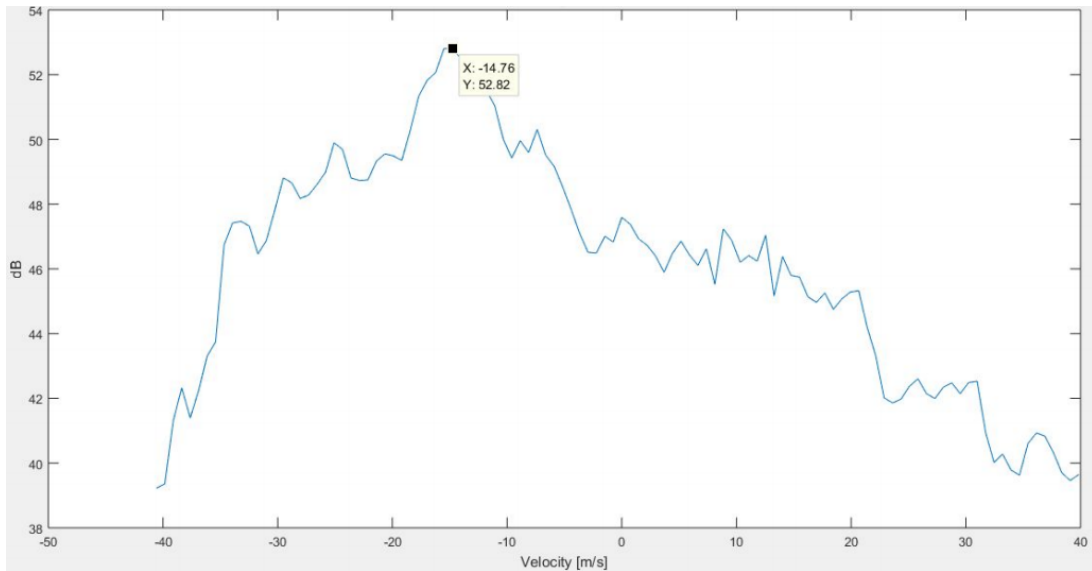


Figura 4.19: Target 1 - Velocidades estimadas Vs Intensidad de píxel

Por otro lado, en la Fig. 4.20 a) se muestra el Target 1 enfocado para una velocidad relativa entre el sensor y el target igual 0 [m/s]. En la Fig. 4.20 b), en cambio, se muestra la imagen que fue enfocada utilizando una velocidad relativa de -14,76 [m/s], valor donde se detecta en pico máximo en la Fig. 4.19. En el último caso, se puede apreciar claramente que el objeto en movimiento no parece estar desenfocado a lo largo de tantas celdas de resolución, si lo comparamos con la imagen a).

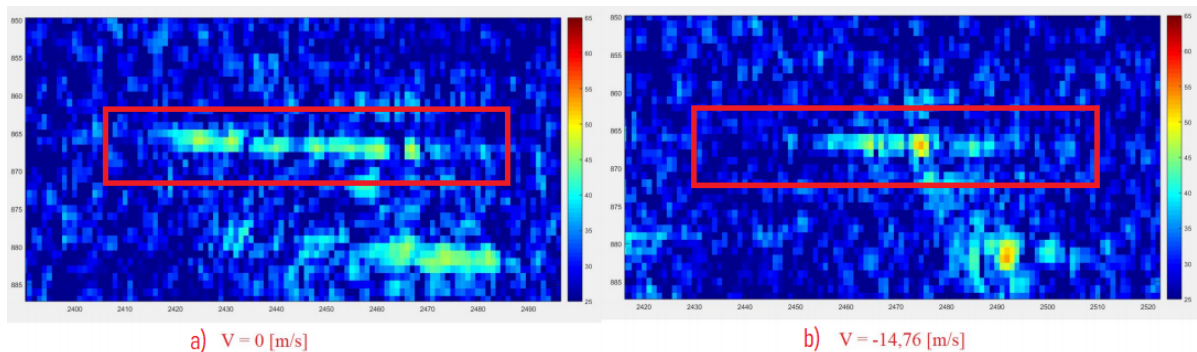


Figura 4.20: Target 1 enfocado

Se realiza exactamente el mismo análisis sobre el Target 2 (cuadro rojo en 4.21). En la Fig. 4.22 se muestra la curva de velocidad estimada Vs la intensidad de pixel alcanzada en la zona de interés. Finalmente en la Fig. 4.23 se observan los diferentes enfoques alcanzados entre la imagen enfocada a 0 [m/s] y la imagen enfocada asumiendo una velocidad de -14,02 [m/s].

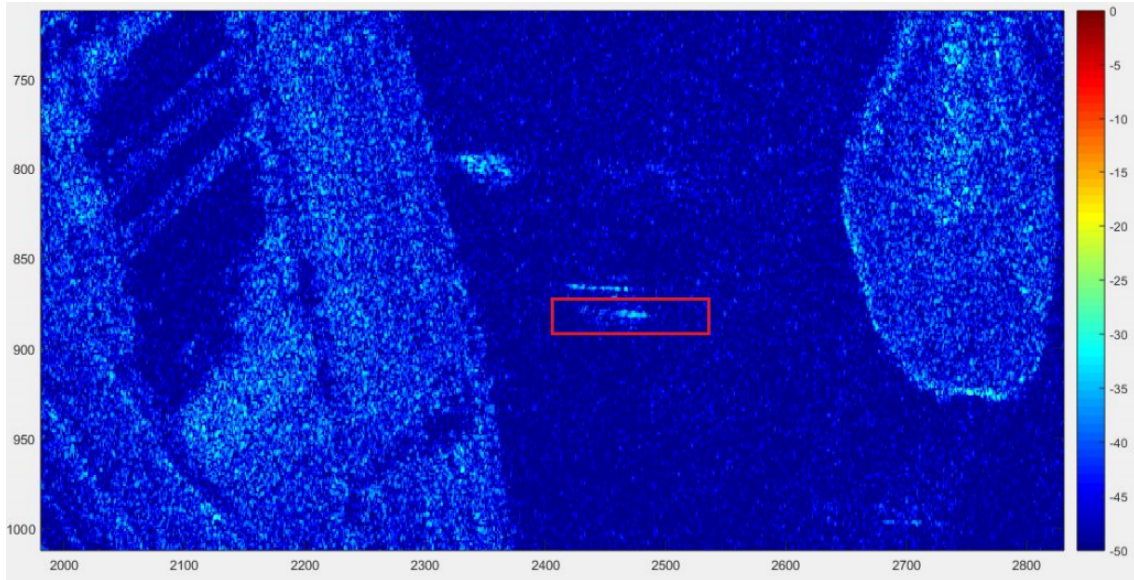


Figura 4.21: Zona de análisis - Zoom - Target 2

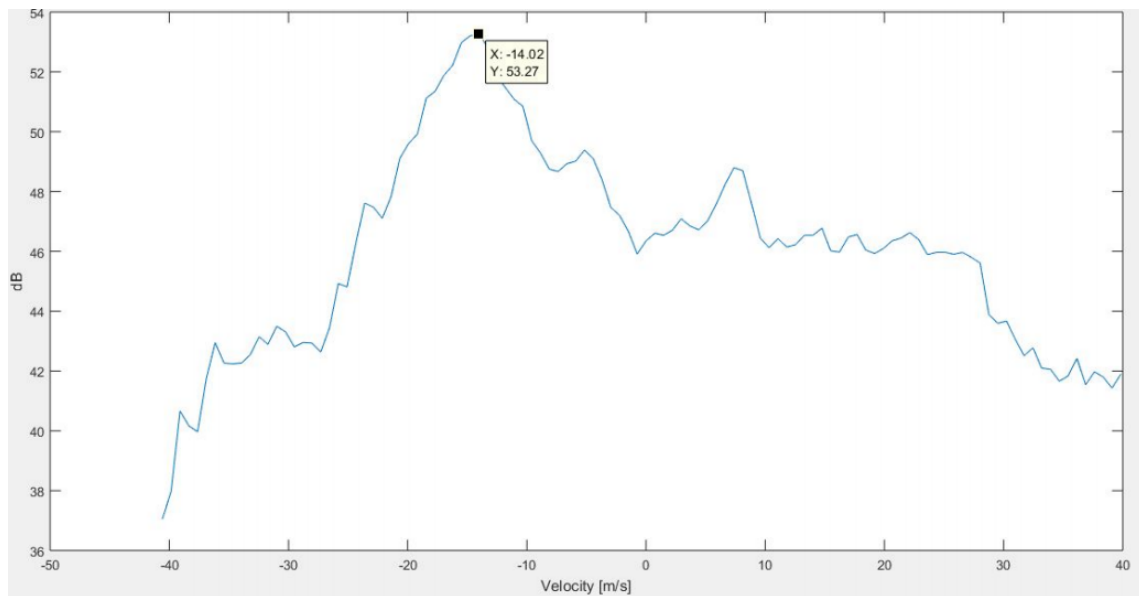


Figura 4.22: Target 2 - Velocidades estimadas Vs Intensidad de pixel

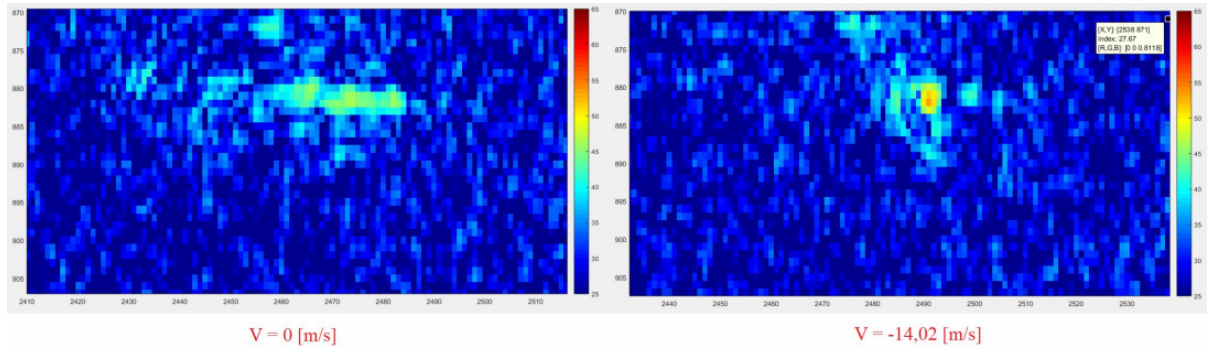


Figura 4.23: Target 2 enfocado

4.2.2.1. Reubicación de targets sobre la ruta

Tal como se explicó anteriormente, partiendo de la suposición que la posición real en acimut del target está sobre la ruta, es posible recuperar una estimación de la componente de velocidad en rango inclinado. Para ellos se utiliza la estimación de velocidad en la dirección de acimut obtenida en el punto anterior y la orientación de la ruta respecto de la trayectoria del radar.

El primer paso es estimar la orientación de la ruta. Para ello se deben seleccionar dos puntos y trazar la recta que los une. El concepto se ilustra en la Fig. 4.24.

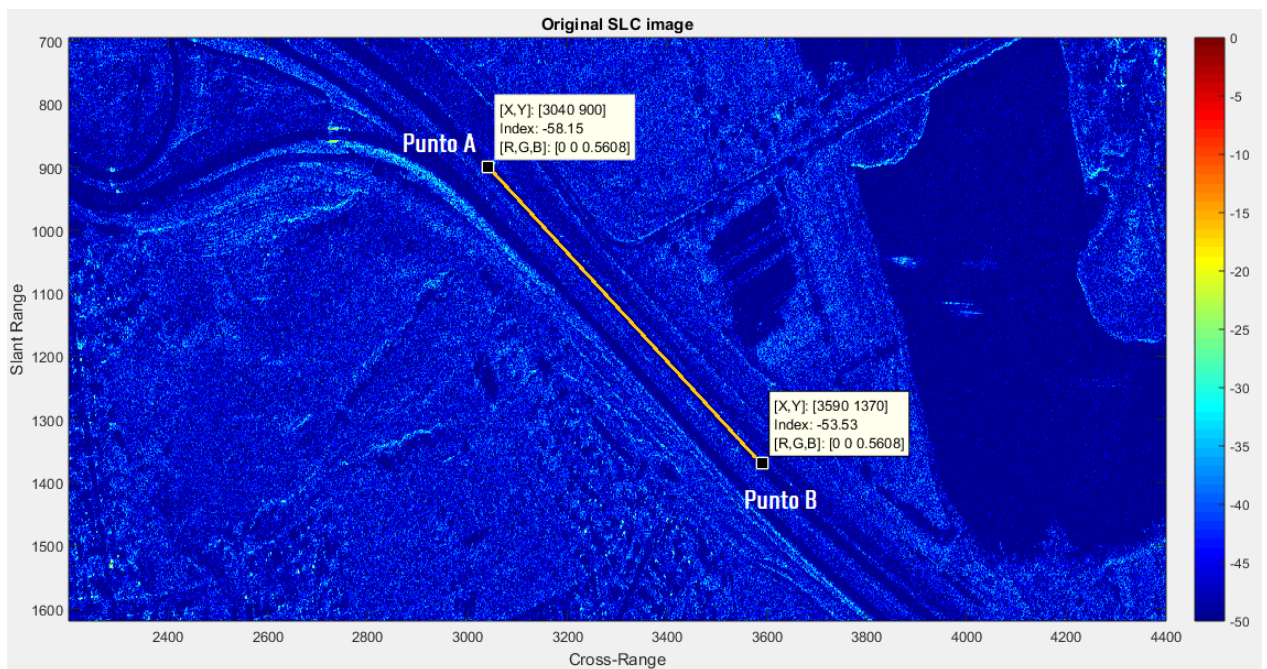


Figura 4.24: Pendiente de ruta

Las coordenadas (x,y) del punto A son (3040,900) y las del punto B (3590,1370). El cálculo de la orientación se desarrolla a continuación:

$$\begin{aligned}
 m &= \frac{\Delta y}{\Delta x} \\
 &= \frac{(1370 - 900)}{(3590 - 3040)} \\
 &= \frac{470}{550}
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Sin embargo, lo importante es la orientación sobre el terreno, por lo tanto se deben tener en cuenta los tamaños de los píxeles, los cuales no son cuadrados. Para esta imagen los tamaños son:

$$\text{range_spacing} = 0,296498035384615 \text{ [m]}$$

$$\text{azimuth_spacing} = 0,702247885002505 \text{ [m]}$$

La orientación entonces toma el valor:

$$\begin{aligned}
 m &= \frac{470 \cdot 0,296498035384615}{550 \cdot 0,702247885002505} \\
 &= 0,360800016391187
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

Con la orientación de la ruta y la velocidad del target en la dirección de acimut calculada previamente se pueden determinar las velocidades del target en todas las direcciones. Se realizan primero los cálculos para el target 1:

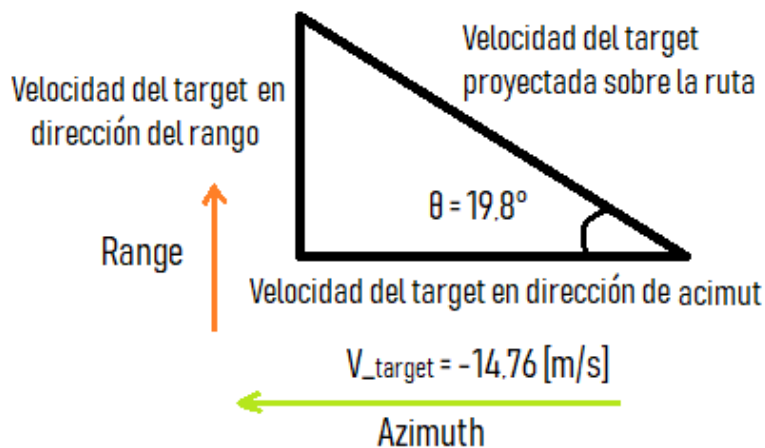


Figura 4.25: Cálculo de componentes de velocidad para target 1.

- Velocidad del target en dirección de acimut = -14,76 [m/s]
- Velocidad del target en dirección de rango = 5,33 [m/s]
- Velocidad del target en dirección de la ruta = 15,69 [m/s]

El triángulo de la Fig. 4.25, se superpone sobre la imagen SAR en la Fig. 4.26. La flecha verde indica el movimiento del radar, en rojo se indica el desplazamiento del auto respecto a su posición real y con la flecha blanca se marca la velocidad en dirección de acimut del “target 1” calculada previamente. El signo negativo indica que el sentido de la velocidad es opuesto al sentido del movimiento del radar.

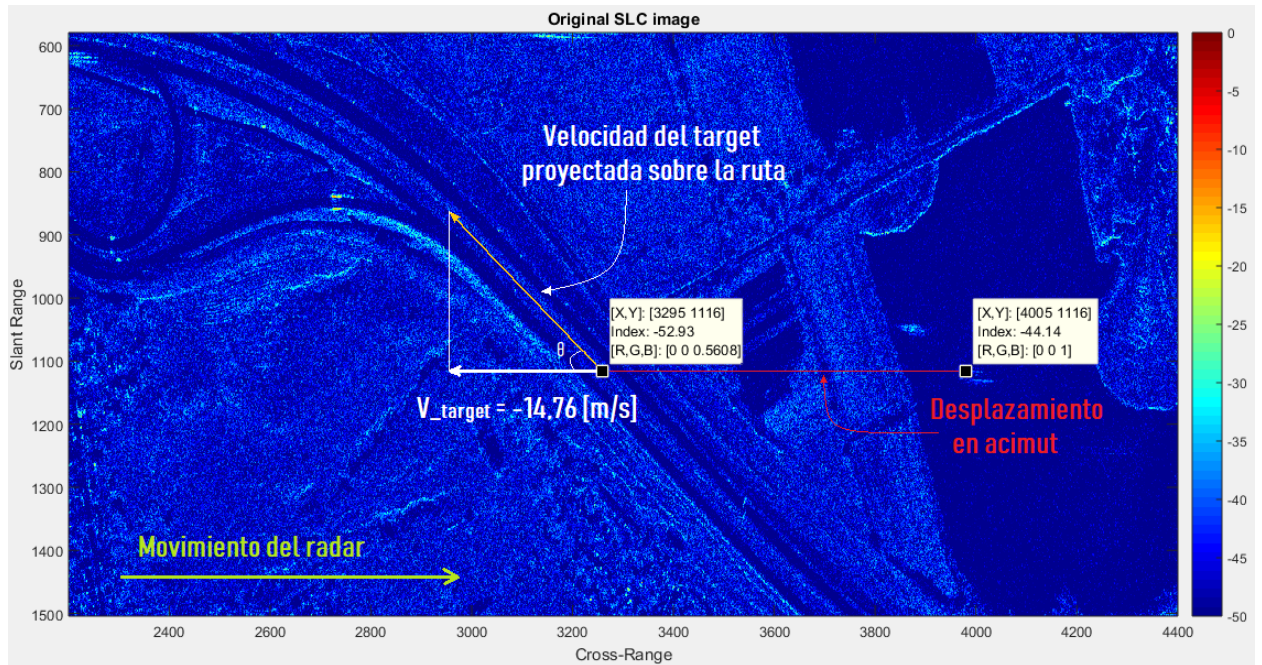


Figura 4.26: Proyección de vector de velocidad del target 1 sobre la ruta

Finalmente, la velocidad del target en dirección del rango se utiliza para reubicar el mismo teóricamente. Para ello se utiliza nuevamente la fórmula 7 del artículo [34]:

$$\Delta X_{teorico} = \left(\frac{v_r^{est}}{V_p} \right) R_0 \quad (4.4)$$

Para este caso en particular, los valores son:

$$\begin{aligned} \Delta X_{teorico} &= \left(\frac{v_r^{est}}{V_p} \right) R_0 \\ &= \frac{5,33[m/s]}{7621[m/s]} * 7367279[m] \\ &= 515[m] \end{aligned} \quad (4.5)$$

Es decir, con las condiciones planteadas en la Fig. 4.26, el desplazamiento teórico del target 1 es de 515 metros.

Para medir el desplazamiento real sobre la imagen SAR, se deben contar los pixeles entre el desenfoque del target, y su posición en la ruta, tal como se observa en la siguiente figura:

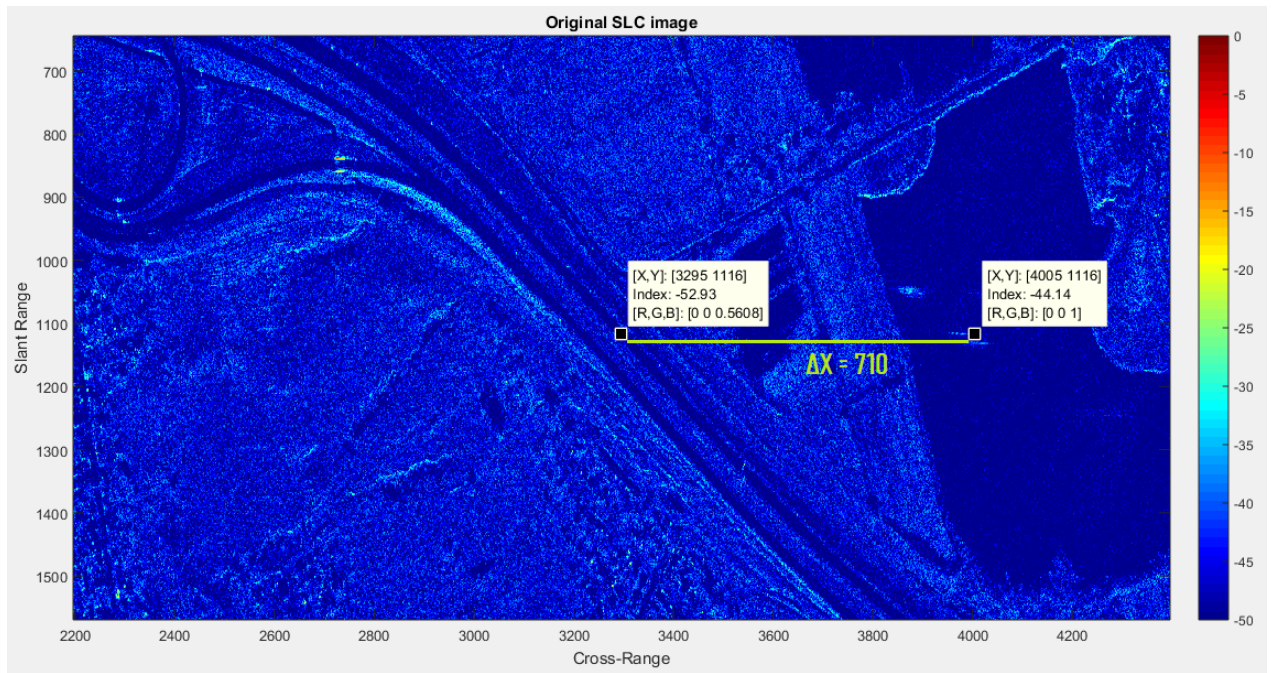


Figura 4.27: Medición de desplazamiento del target 1 en la imagen SAR

El desplazamiento es de 710 píxeles en acimut, multiplicado por el tamaño del pixel en esa dirección da un desplazamiento medido de 499 metros.

La diferencia existente entre el desplazamiento teórico y el desplazamiento medido es del orden del tamaño de la ruta, por lo tanto afirmamos que la reubicación del target lo coloca sobre el intervalo permitido correspondiente a la ruta de circulación. Se concluye entonces que la reubicación del target 1 es exitosa.

Se realiza el mismo análisis pero sobre el target 2. El triángulo de velocidades para este caso es:

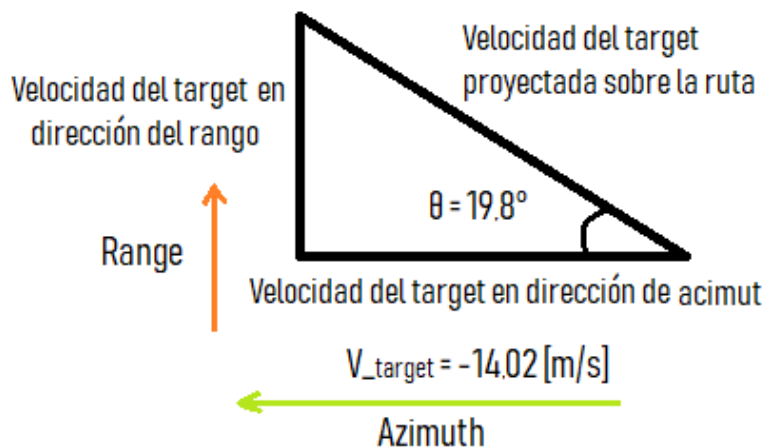


Figura 4.28: Cálculo de componentes de velocidad para target 2.

4.2 PROCESAMIENTO DE IMAGEN ARGENTINA

- Velocidad del target en dirección de acimut = -14,02 [m/s]
- Velocidad del target en dirección de rango = 5,058 [m/s]
- Velocidad del target en dirección de la ruta = 14,90 [m/s]

Finalmente, el desplazamiento teórico ($\Delta X_{teorico}$) para el target 2 es de 489 [m], mientras que el desplazamiento medido (ver Fig. 4.29) es de 491 [m].

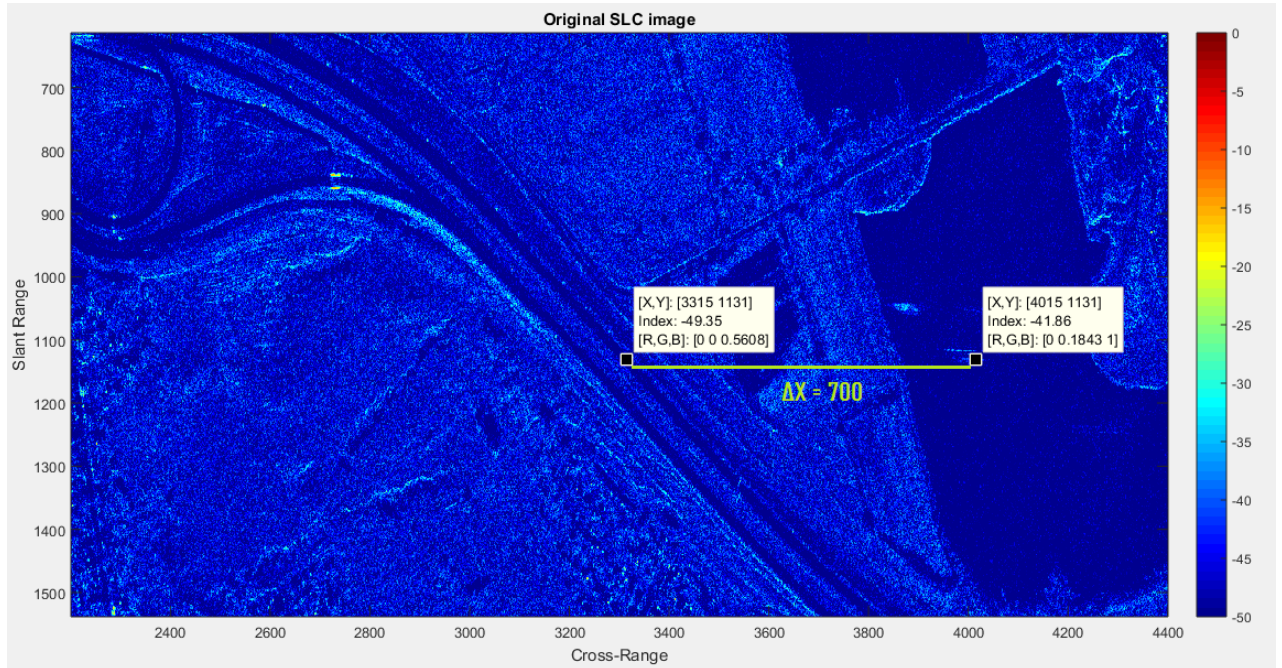


Figura 4.29: Medición de desplazamiento del target 2 en la imagen SAR

Finalmente, la reubicación del target 2 también es exitosa. De esta forma queda verificada la eficiencia del esquema propuesto en este trabajo.

Conclusiones y Trabajos Futuros

5.1. Conclusiones

Se ha propuesto y aplicado a datos SAR CSK, una técnica para la la detección y estimación de parámetros de velocidad de objetos en movimiento sobre la superficie terrestre. El concepto podría expandirse incluso a objetos en movimiento en cuerpos de agua, como lo son buques de pesca, cruceros, botes, lo que aumenta las aplicaciones de la técnica propuesta.

Los resultados que se presentan en el documento demuestran que se pueden obtener capacidades GMTI efectivas a pesar de las restricciones impuestas por los sistemas SAR satelitales de un solo canal (como lo es CSK), mediante la aplicación de técnicas adecuadas.

Se realizó un estudio teórico, explicando detalladamente tanto los conceptos relacionados a adquisiciones SAR, como así también las ecuaciones relacionadas al modelado de señales para objetos en movimiento. Con esta información, se planteó un esquema de procesamiento para estimar los parámetros de velocidad de objetos en movimiento, basándose en el algoritmo CSA y se desarrolló un algoritmo en Matlab para implementar tal esquema.

Se procesaron dos imágenes SAR CSK, una adquirida sobre Italia y otra sobre Argentina. Los resultados obtenidos de la primera, se compararon con los resultados obtenidos en el artículo [5]. Los resultados fueron muy similares. Se procesó luego la imagen argentina y se estimaron los parámetros de velocidad de dos targets. Cabe destacar que es probable la existencia de targets adicionales en la zona analizada. De ser así, no fueron detectados ya que los mismos están enmascarados con el eco recibido desde la escena estacionaria. Esta es una de las limitaciones de trabajar con radares de un solo canal. Existen técnicas para radares de múltiples canales que permiten cancelar eficientemente los ecos de zonas estacionarias, lo que permite detectar fácilmente los targets móviles.

También se realizó la reubicación de los targets sobre la ruta en ambas imágenes, lo que confirma la eficiencia del esquema propuesto.

La importancia de este trabajo radica en haber desarrollado un algoritmo en Matlab para implementar el esquema propuesto, y haberlo utilizado para procesar datos reales adquiridos

por satélites CSK. De este modo se verifica la teoría con adquisiciones concretas.

Por otro lado, este trabajo es una contribución al conocimiento desde el punto de vista de la experiencia en nuestro país. En la literatura no se encuentran trabajos publicados en la Argentina sobre esta temática, razón por la cual se puede considerar que éste es un puntapié inicial. Además, para poder afrontar el estudio de esta temática, se tuvieron que generar lazos nuevos con el grupo de investigación de la Universidad de Roma "La Sapienza", llamado Radar Remote Sensing & Navigation Group (RRSN) que tiene amplia experiencia en detección de blancos móviles, no solo utilizando imágenes SAR, sino también radares pasivos. Esto significa un incremento en la red de contacto del Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich (IG) lo cual es muy valioso para cualquier institución educativa.

Otro punto importante a destacar, es que en el Plan Nacional Espacial [11] se agrega el ciclo *Gestión de Riesgos de Seguridad* recién en su última actualización (año 2010-2015). En dicho ciclo se menciona que debido a los problemas que enfrenta la sociedad de hoy relacionados con la delincuencia y demás actividades ilegales, se sugiere el uso de la información satelital para colaborar con la vigilancia y control de las fronteras, zonas económicas exclusivas y otras áreas urbanas y rurales. Debido a que este agregado es reciente, no hay muchos trabajos realizados en la Maestría en Aplicaciones de Información Espacial (MAIE) o la Maestría en Actividades Espaciales para Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias (MAEARTE) relacionados a la seguridad nacional. Por lo tanto este trabajo se enmarca en un ciclo de información poco explorado y de gran interés para la República Argentina.

Para finalizar las conclusiones, es inevitable pensar en la posibilidad de implementar este esquema de procesamiento en imágenes de SAOCOM. Teniendo en cuenta que SAOCOM no tiene disponible el modo spotlight, no se considera viable esta posibilidad. La mejor resolución espacial alcanzable es del orden de 10 metros, por lo tanto la detección y estimación de parámetros de velocidad de autos sobre la superficie terrestre no se considera alcanzable. Además, SAOCOM opera en banda L cuya longitud de onda es mas larga a la utilizada por los satélites CSK. Tal como se puede deducir de la ecuación 2.29, una longitud de onda mayor genera un desfase cuadrático mas chicos lo que produce desenfoques menores. Esto dificulta la detección de target móviles y por consiguiente la estimación de la velocidad, ya que no es lo mismo procesar imágenes con grandes desenfoques (como se observan en imágenes CSK) que imágenes donde el desenfoque es pequeño (como los que produciría SAOCOM). Sin embargo, es probable que sea factible utilizar imágenes de SAOCOM para detección y estimación de velocidad de buques de gran tamaño sobre el agua.

5.2. Trabajos Futuros

En primer lugar, se propone utilizar el esquema de procesamiento desarrollado en esta tesis, en mas casos de estudio, incluso considerando diferentes sensores. Además, se podría realizar un análisis de sensibilidad de dicho esquema.

En este trabajo final, se han procesado imágenes CSK nivel 1A, esto es, imágenes enfocadas. Sin embargo, se pueden aplicar técnicas GMTI para detectar blancos móviles y estimar sus parámetros de velocidad a partir de imágenes RAW. Por ejemplo, una de las técnicas que se pueden estudiar, es dividir las imágenes en sub-imágenes a partir del fraccionamiento de los ecos en la matriz raw, luego focalizar cada una de las imágenes y compararlas. Las zonas donde hay cambios podrían estar asociadas a objetos que se movieron durante la adquisición.

Otra de las técnicas que se propone como trabajo futuro, es aplicar bancos de procesamiento

para separar las zonas estáticas de las zonas móviles, y luego realizar un segundo enfoque pero sobre las zonas "móviles". De este modo, los ecos fuertes de las zonas estáticas como lo son las rutas y los árboles, no perjudican los ecos más débiles de los objetos móviles que son los que se desean detectar en este trabajo.

Adicionalmente se podrían aplicar varias técnicas y realizar un análisis de costo computacional entre ellas, analizando los objetivos alcanzables con la carga computacional requerida. Incluso podría pensarse en la aplicación del procesamiento utilizando Unidades de Procesamiento Gráficos (Graphics Processing Unit (GPU)) y analizar la eficiencia obtenida.

Algo que aportaría mucho, sería programar una adquisición, y que mientras la adquisición se esté realizando, tener varios automóviles en la escena equipados con Global Positioning System (GPS) para tener registro de la posición y la velocidad de los mismos. De esta manera se tendrían datos reales para comparar los datos obtenidos durante el procesamiento.

Otra propuesta es utilizar imágenes generadas por radares multicanales como por ejemplo RADARSAT. El procesamiento es más complejo pero los resultados obtenidos son más precisos. Serviría además para poder contrastar los resultados obtenidos con sistemas SAR de un solo canal.

Esta temática se seguirá abordando en el marco de un doctorado a realizarse en el grupo de investigación donde se llevó a cabo la pasantía. Específicamente, se seguirá trabajando con detección y estimación de parámetros de velocidad de targets en movimiento, pero aplicado a imágenes generadas por sistemas SAR pasivos. Se llaman así precisamente porque no emiten señales para iluminar la escena, sino que recibe y procesa los reflejos de fuentes de energía electromagnética ya existentes, llamadas "fuentes de oportunidad", como por ejemplo las señales de televisión digital, ondas de radio o señales satelitales como GPS.

Referencias bibliográficas

- [1] C. Noviello, “Techniques for inverse synthetic aperture radar imaging and monitoring of deformation with differential interferometric synthetic aperture radar,” *Tesis de Doctorado. Universita degli Studi di Napoli Federico II*.
- [2] J. C. Curlander and R. N. McDonough, “Synthetic aperture radar- systems and signal processing (book),” *New York: John Wiley & Sons, Inc*, 1991.
- [3] R. K. Raney, “Synthetic aperture imaging radar and moving targets,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-7, pp. 499–505, May 1971.
- [4] V. C. Chen and H. Ling, *Time-frequency transforms for radar imaging and signal analysis*. Artech house, 2002.
- [5] D. Pastina and F. Turin, “Exploitation of the cosmo-skymed sar system for gmti applications,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 8, no. 3, pp. 966–979, 2015.
- [6] D. Cristallini, D. Pastina, F. Colone, and P. Lombardo, “Efficient detection and imaging of moving targets in sar images based on chirp scaling,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, pp. 2403–2416, April 2013.
- [7] V. T. Vu, M. I. Pettersson, T. K. Sjögren, and A. Gustavsson, “A hybrid gmti method for reliable detection results in sar images,” in *2018 2nd International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications Computing (SigTelCom)*, pp. 73–78, Jan 2018.
- [8] S. V. Baumgartner and G. Krieger, “Large along-track baseline sar-gmti: First results with the terrasar-x/tandem-x satellite constellation,” in *2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 1319–1322, July 2011.
- [9] C. H. Gierull, I. Sikaneta, and D. Cerutti-Maori, “Two-step detector for radarsat-2’s experimental gmti mode,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, pp. 436–454, Jan 2013.
- [10] S. Chiu, C. Gierull, and M. Rashid, “First results of experimental polarimetric sar-gmti modes on radarsat-2,” in *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 1340–1343, IEEE, 2018.

- [11] Conae, “Plan Espacial Nacional Argentina en el espacio. 2004-2015. Actualización 2010-2015,” p. 99, 2008.
- [12] A. Moreira, “Synthetic aperture radar (sar): Principles and applications,” *4th Advanced training course in land remote sensing, Athens*, 2013.
- [13] E. Buemi, “Tratamiento de imágenes de radar de apertura sintética mediante filtros stack,” *Tesis de Doctorado. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales*.
- [14] A. Love, “In memory of carl a. wiley,” *IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter*, vol. 27, no. 3, pp. 17–18, 1985.
- [15] G. Schreier, *SAR geocoding: data and systems*. Wichmann, 1993.
- [16] D. E. M. Nievas, “Sistema de generación de imágenes mediante RADAR,” *Tesis de Ingeniería Civil Electrónica, de la Universidad Católica de Valparaíso*, 2018.
- [17] M. P. Zénere, “Focalización de imágenes SAR utilizando el algoritmo Omega-K. Simulación y Validación. Tesis de Maestría (MAIE). Instituto Mario Gulich, CONAE y UNC,” 2013.
- [18] C. Olmsted, “Alaska sar facility scientific sar user’s guide,” *Analyst*, 1993.
- [19] I. G. Cumming and F. H. Wong, “Digital processing of synthetic aperture radar data,” *Artech house*, vol. 1, no. 3, 2005.
- [20] N. Agrawal and K. Venugopalan, “Analysis of complex sar raw data compression,” in *Progress In Electromagnetics Research Symposium*, pp. 155–160, 2008.
- [21] M. Soumekh, *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms*, vol. 7. New York: Wiley, 1999.
- [22] H. Runge and R. Bamler, “A novel high precision sar focussing algorithm based on chirp scaling,” in *[Proceedings] IGARSS '92 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol. 1, pp. 372–375, May 1992.
- [23] A. Parashar, “A Study on Range Cell Migration Correction in SAR Imagery and MATLAB Implementation of Algorithms,” *Tesis de Maestría. Department of Electronics and Communication Engineering. National Institute of Technology, Rourkela*, 2015.
- [24] R. Bamler, “A comparison of range-doppler and wavenumber domain sar focusing algorithms,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, pp. 706–713, July 1992.
- [25] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, and S. H. Nawab, *Señales y sistemas segunda edición*. Prentice-Hall, 1998.
- [26] G. Picardi, “Elaborazione del segnale radar,” *Franco Angeli*, pp. 146–152, 1988.
- [27] 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, pp. 786–799, July 1994.

- [28] 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.
- [29] J. Mittermayer, A. Moreira, and O. Loffeld, “Spotlight sar data processing using the frequency scaling algorithm,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, no. 5, pp. 2198–2214, 1999.
- [30] ASI, “Cosmo-skymed system description & user guide,” *Rep. ASI-CSM-ENG-RS-093-A*, 2007.
- [31] “Conae – siasge.” <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/misiones-espaciales/siasge/>. (Accedido el 13/10/2019).
- [32] ASI, “COSMO-SkyMed Mission and Products Description,” no. 2, pp. 1–151, 2016.
- [33] D. Pastina, L. Buratta, F. Turin, and D. Cristallini, “Exploiting cosmo-skymed spotlight sar images for gmti applications,” in *Proceedings of 2011 IEEE CIE International Conference on Radar*, vol. 2, pp. 1918–1921, Oct 2011.
- [34] P. Lombardo, D. Pastina, and F. Turin, “Detection of ground moving targets via mimo sar systems,” in *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 5067–5070, July 2015.