

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD
DEL CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
INFORMÁTICA Y MECÁNICA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESAMIENTO DE SEÑALES SAR PARA
ESTIMACIÓN DE LA ALTURA FORESTAL**

Tesis para optar el Título Profesional de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Autor: Bach. Jhohan Jancco Chara

Asesor: Dr. Ing. Facundo Palomino Quispe

CUSCO - PERÚ

2021

AGRADECIMIENTO

A mi Padre Alipio Jancco Luna que me ayudó en vida y hoy vela por mí desde el firmamento. A mi Madre Josefa Chara Qqueccaño por su apoyo, comprensión y motivación constante para que siga adelante en mis objetivos.

A mis familiares, a mi Asesor y a todos los Docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica que me forjaron en mi formación profesional.

Jhohan Jancco Chara

INTRODUCCIÓN

En las aplicaciones de observación remota de la tierra, un instrumento sobresaliente es el radar de apertura sintética (SAR) debido a que transmite ondas electromagnéticas capaces de penetrar las superficies de interés. Este sistema de radar puede ser transportado por un satélite, avión o UAV con una velocidad constante y una trayectoria rectilínea durante la adquisición de las señales retro dispersadas operando de forma independiente frente a condiciones climatológicas y meteorológicas; siendo esta una ventaja frente a sensores ópticos.

Las señales retro dispersadas adecuadamente acondicionado por el sistema SAR se denominan datos crudos SAR, las cuales no se utilizan directamente para algún fin, por lo tanto, se utilizan algoritmos de procesamiento para generar imágenes SAR habilitando la aplicabilidad en diversas disciplinas siendo una de ellas las ciencias forestales. En nuestro país, las técnicas usadas para medir la altura de los árboles no son exactas; esto provoca márgenes de error no despreciables en la estimación de las reservas de carbono de los bosques, debido al costo económico de los sensores de alta precisión a bordo de un satélite que solo pueden ser usados por los países desarrollados.

En la actualidad, la Agencia Espacial Europea tiene previsto lanzar el satélite BIOMASS P-Band SAR en 2021 que porta un radar de apertura sintética cuyo objetivo principal es determinar la distribución de la biomasa sobre el suelo y en los bosques del mundo para mejorar en gran medida nuestra comprensión del ciclo del carbono de la tierra, ya que las reservas de carbono están directamente relacionadas con el cambio climático, siendo este un problema a nivel mundial.

RESUMEN

En el presente proyecto de tesis, se diseña e implementa el procesamiento SAR para estimación de la altura forestal, parámetro indispensable para el cálculo de la biomasa; el cual es una alternativa de gran utilidad para el proyecto “Desarrollo de tecnologías basadas en UAV para el uso de radar de apertura sintética para la estimación de la cobertura forestal en selva alta del distrito de Santa Ana en la Convención” que se realiza en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

La implementación del procesamiento para la generación de imágenes SAR, se realizó determinando la calidad de enfoque del algoritmo Omega-k cuyos parámetros son: resolución espacial, ISLR y PSLR. La implementación del algoritmo Omega-k se validó utilizando datos crudos SAR simulados, datos crudos SAR adquiridos por el satélite ERS-2 de la Agencia Espacial Europea (ESA), y los datos MicroASAR (Edwards, et al., 2008) por cortesía de David G. Long de Brigham Young University (Long & Stringham, 2011).

Finalmente, se implementó el procesamiento utilizando la técnica de la interferometría SAR verificando con imágenes obtenidas a través del enfoque de datos crudos SAR maestro y esclavo. Adicionalmente, se validó con imágenes SAR Quad-Pol (Polarizaciones HH, HV, VH y VV) de árboles simulados con parámetros iniciales del sistema E-SAR utilizando el software PolSARproSim V6.0 desarrollado por el Dr. Mark L. Williams para la Agencia Espacial Europea.

Palabras clave: Radar de apertura sintética, algoritmo Omega-k, respuesta al impulso, interferometría SAR, modelamiento de elevación digital.

ABSTRACT

In this thesis, the design and implementation of the SAR signal processing is for estimating the forest height, indispensable parameter for the biomass calculation; a very useful alternative for the project “Development of technologies based in UAV for the use of synthetic aperture radar to estimate forest cover in the high jungle of the Santa Ana district at the Convention” that is carried out at the National University of San Antonio Abad of Cusco.

The implementation of the processing for the SAR image generation was performed by determining the focus quality of the Omega-k algorithm whose parameters are: spatial resolution, ISLR and PSLR. The implementation of the Omega-k algorithm was tested using simulated SAR raw data, SAR raw data acquired by the ERS-2 satellite from the European Space Agency (ESA), and data MicroASAR (Edwards, et al., 2008) data courtesy of David G. Long at Brigham Young University (Long & Stringham, 2011).

Finally, the processing was implemented using the SAR interferometry technique, verifying with images obtained by focusing the master and slave SAR raw data. Additionally, it was validated with Quad-Pol SAR images (HH, HV, VH and VV Polarizations) of simulated trees with initial parameters of the E-SAR system using the PolSARproSim V6.0 software developed by Dr. Mark L. Williams for the Agency European Space.

Keywords: Synthetic apertura radar, Omega-k algorithm, impulse response, interferometry SAR, digital elevation modeling.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	II
INTRODUCCIÓN	III
RESUMEN.....	IV
ABSTRACT.....	V
INDICE GENERAL	VI
CAPÍTULO I: GENERALIDADES.....	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.1.1. Descripción del problema	1
1.1.2. Formulación del problema	1
1.2. Justificación de la investigación	2
1.3. Objetivos de la investigación	2
1.3.1. Objetivos generales	2
1.3.2. Objetivos específicos	2
1.4. Variables	3
1.4.1. Variables dependientes	3
1.4.2. Variables independientes	3
1.5. Metodología	3
1.6. Alcances	3
1.7. Limitaciones.....	4
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Radar de apertura sintética.....	5
2.1.1. Geometría SAR.....	5
2.1.2. Señal chirp LFM	6
2.1.3. Frecuencia de repetición de pulso.....	9
2.2. Procesamiento de señales SAR.....	10
2.2.1. Transformada de Fourier.....	10
2.2.2. Algoritmo range-Doppler.....	11
2.2.3. Algoritmo Chirp Scaling.....	14
2.2.4. Algoritmo Omega-k	15

2.3.	Análisis de la calidad de las imágenes SAR	16
2.3.1.	Resolución espacial.....	17
2.3.2.	PSLR.....	17
2.3.3.	ISLR.....	18
2.4.	Procesamiento de imágenes SAR	18
2.4.1.	Polarimetría SAR.....	18
2.4.2.	Interferometría SAR.....	20
2.4.3.	PolSARproSim.....	22
CAPITULO III: PROCEDIMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN		24
3.1.	Sistemas SAR.....	24
3.1.1.	Modelamiento de señales SAR	25
3.1.2.	Matriz de datos crudos SAR	27
3.2.	Simulador SAR	29
3.2.1.	Diseño de simulador de datos crudos SAR.....	29
3.2.2.	Simulador InSAR.....	32
3.2.3.	Simulación de datos PolInSAR.....	34
3.3.	Procesamiento de señales SAR.....	36
3.3.1.	Definición del algoritmo de enfoque	37
3.3.2.	Algoritmo Omega-K.....	38
3.3.3.	Implementación del algoritmo Omega-k	41
3.4.	Procesamiento en sistemas SAR LFM-CW	43
3.4.1.	Desarrollo del algoritmo Omega-k	43
3.4.2.	Implementación del algoritmo Omega-K	48
3.5.	Interferometría SAR.....	50
3.5.1.	Corregistación.....	53
3.5.2.	Interferograma.....	53
3.5.3.	Remoción de fase de aplanamiento.....	54
3.5.4.	Desenvolvimiento de la fase	54
3.5.5.	Conversión de fase a altura	55
CAPITULO IV: RESULTADOS.....		56
4.1.	Introducción	56

4.2.	Sistema SAR	57
4.2.1.	Simulador de dato crudos SAR.....	57
4.2.2.	Análisis de calidad del algoritmo Omega-k.....	59
4.2.3.	Verificación del algoritmo Omega-k	64
4.3.	Interferometría SAR.....	72
4.3.1.	Procesamiento de imágenes SAR	74
4.3.2.	Altura forestal	76
CONCLUSIONES.....		78
RECOMENDACIONES		79
CITAS BIBLIOGRÁFICAS		80
ANEXOS.....		84

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: GEOMETRÍA SAR	6
FIGURA 2: SEÑAL CHIRP TRADICIONAL.....	7
FIGURA 3: SEÑAL CHIRP DE UN RADAR DE APERTURA SINTÉTICA LFM-CW	8
FIGURA 4: FRECUENCIA REPETICIÓN DE PULSO	9
FIGURA 5: VERSIONES DEL ALGORITMO RANGE-DOPPLER	13
FIGURA 6: CORRECCIÓN DE LA CURVA MIGRACIÓN DE CELDAS EN RANGO.....	13
FIGURA 7: ALGORITMO CHIRP SCALING.....	15
FIGURA 8: VERSIONES DEL ALGORITMO OMEGA-K.....	16
FIGURA 9: PERFIL DE LA RESPUESTA AL IMPULSO EN RANGO O AZIMUT	17
FIGURA 10: POLARIMETRÍA DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA	19
FIGURA 11: BLANCO PUNTUAL AISLADO E ISOTRÓPICO	20
FIGURA 12: GEOMETRÍA INSAR.....	21
FIGURA 13: SIMULADOR POLSARPROSIM.....	22
FIGURA 14: VISTA DEL RADAR A LOS ARBOLES	24
FIGURA 15: DEMODULACIÓN EN CUADRATURA.....	25
FIGURA 16: FILTRO PASABAJO.....	26
FIGURA 17: DEMODULACIÓN EN CUADRATURA PARA EL CASO LFM-CW SAR	27
FIGURA 18: SEÑAL RETRODISPERSADA EN RADARES DE APERTURA SINTÉTICA	28
FIGURA 19: SEÑAL RETRODISPERSADA LFM-CW SAR	28
FIGURA 20: ESTRUCTURA DE LA MATRIZ DE DATOS CRUDOS SAR.....	29
FIGURA 21: SIMULADOR DE DATOS CRUDOS SAR	32
FIGURA 22: SIMULADOR INSAR.....	33
FIGURA 23: LECTURA DE DATOS BINARIOS EN MATLAB	34
FIGURA 24: PROCESAMIENTO DE SEÑALES SAR COMPLETO.....	37
FIGURA 25: ALGORITMO OMEGA-K VERSIÓN PRECISA	39
FIGURA 26: DIFERENCIA DE FRECUENCIA PARA BLANCOS ESTACIONARIOS	47
FIGURA 27: ALGORITMO OMEGA-K MODIFICADO.....	48

FIGURA 28: PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SAR	50
FIGURA 29: DESENVOLVIMIENTO DE FASE	55
FIGURA 30: SIMULADOR DE DATOS CRUDOS SAR	57
FIGURA 31: MAGNITUD DE LOS DATOS CRUDOS SAR.....	58
FIGURA 32: FASE DE LOS DATOS CRUDOS SAR (UPCHIRP).....	58
FIGURA 33: FASE DE LOS DATOS CRUDOS SAR (DOWNCHIRP)	59
FIGURA 34: IMAGEN SAR DE UN BLANCO PUNTUAL.....	59
FIGURA 35: ANÁLISIS DE LA RESPUESTA AL IMPULSO EN RANGO	60
FIGURA 36: ANÁLISIS DE LA RESPUESTA AL IMPULSO EN AZIMUT	62
FIGURA 37: IMAGEN SAR DE TRES BLANCOS PUNTUALES	64
FIGURA 38: PERFIL EN AZIMUT (TRES BLANCOS PUNTUALES)	65
FIGURA 39: UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS DATOS CRUDOS SAR	66
FIGURA 40: MAGNITUD DE LOS DATOS CRUDOS SAR.....	67
FIGURA 41: IMAGEN SAR OBTENIDA CON EL ALGORITMO OMEGA-K.....	67
FIGURA 42: PROCESAMIENTO EN SISTEMAS LFM-CW SAR.....	69
FIGURA 43: IMAGEN MICROASAR Y ÓPTICA	69
FIGURA 44: REPRESENTACION DE LOS DATOS CRUDOS LFM-CW SAR.....	70
FIGURA 45: IMAGEN SAR OBTENIDA CON EL ALGORITMO OMEGA-K.....	71
FIGURA 46: IMAGEN SAR OBTENIDA CON EL ALGORITMO RANGE-DOPPLER.....	71
FIGURA 47: INTERFEROMETRIA SAR.....	72
FIGURA 48: ORGANIZACION DE LOS BLANCOS PUNTUALES	73
FIGURA 49: ENFOQUE DE LOS DATOS CRUDOS INSAR UTILIZANDO EL ALGORITMO OMEGA-K	73
FIGURA 50: IMAGEN FORESTAL (POLSARPROSIM).....	74
FIGURA 51: IMAGEN SAR DE BOSQUES	75
FIGURA 52: PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SAR	75
FIGURA 53: VERIFICACIÓN DEL PROCESAMIENTO DE SEÑALES SAR COMPLETO	76
FIGURA 54: MODELAMIENTO DE ELEVACION DIGITAL (ALTURA DE ARBOLES).....	77
FIGURA 56: NAVE ESPACIAL ERS-2 EN ORBITA (ESA).....	104

FIGURA 55: HARDWARE DEL SISTEMA MICROASAR 104

FIGURA 57: PARÁMETROS POR DEFECTO DEL SISTEMA E-SAR (ESA)..... 105

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 VARIABLES DEPENDIENTES	3
TABLA 2 VARIABLES INDEPENDIENTES	3
TABLA 3 PARÁMETROS BÁSICOS ERS-1.....	8
TABLA 4 PARÁMETROS BÁSICOS UN SISTEMA DE RADAR DE ONDA CONTINUA	9
TABLA 5 PARÁMETROS INICIALES SAR POR DEFECTO EN POLSARPROSIM	35
TABLA 6 VALORES PARA LA CALIBRACIÓN DE IMÁGENES SAR	51
TABLA 7 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA SAR.....	56
TABLA 8 PARÁMETROS DE CALIDAD EN RANGO (ÁNGULO DE SQUINT VARIABLE)	61
TABLA 9 PARÁMETROS DE CALIDAD EN RANGO (FRECUENCIA VARIABLE).....	62
TABLA 10 PARÁMETROS DE CALIDAD EN AZIMUT (ÁNGULO DE SQUINT VARIABLE)	63
TABLA 11 PARÁMETROS DE CALIDAD EN AZIMUT (FRECUENCIA VARIABLE)	63
TABLA 12 PARAMETROS INICIALES ERS-2 SAR	65
TABLA 13 PARAMETROS INICIALES DE LOS DATOS CRUDOS SAR LFM-CW	68
TABLA 14 PARAMETROS DE CALIDAD EN SISTEMAS SAR LFM-CW	69

ÍNDICE DE CÓDIGOS

CÓDIGO 1: FUNCIÓN DE LECTURA DE IMÁGENES SAR.....	36
CÓDIGO 2: FOCALIZACIÓN GENERAL.....	42
CÓDIGO 3: FOCALIZACIÓN DIFERENCIAL (INTERPOLACIÓN DE STOLT)	43
CÓDIGO 4: FOCALIZACIÓN GENERAL.....	49
CÓDIGO 5: FOCALIZACIÓN DIFERENCIAL (INTERPOLACIÓN DE STOLT)	49
CÓDIGO 6: FUNCIÓN DE CALIBRACIÓN DE IMÁGENES SAR.....	52
CÓDIGO 7: CALIBRACIÓN DE IMÁGENES SAR	52

GLOSARIOS Y ACRÓNIMOS

ESA: European Space Agency

NASA: National Aeronautics Space Administration

CONIDA: Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial

UAVSAR: Unmanned Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar

ERS: Europe Remote Sensing

CASIE-09: Characterization of Arctic Sea Ice Experiment 2009

SERFOR: Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre

SAR: Synthetic Aperture Radar

PolInSAR: Polarimetric Interferometric SAR

RCS: Radar Cross Section

RCM: Range Cell Migration

RCMC: Range Cell Migration Corection

RDA: Range Doppler Algorithm

IRF: Impulsive Responsive Function

PRF: Pulse Repetition Frequency

PSLR: Peak Side Lobe Ratio

ISLR: Integrated Side Lobe Ratio

FFT: Fast Fourier Transform

IFFT: Inverse Fast Fourier Transform

UAV: Unmanned Aerial Vehicle

LFM: Linear Frequency Modulated

LFM-CW: Linear Frequency Modulated Continuous Wave

ADC: Analogic Digital Converter

LPF: Low Pass Filter

BPF: Band Pass Filter

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Planteamiento del problema

1.1.1. Descripción del problema

Los radares de apertura sintética a bordo de un satélite resultan ser muy caros en comparación de un UAV, cuya función es generar imágenes a partir de los datos crudos SAR provenientes de las superficies de interés debido a que los datos crudos no tienen una utilidad directa. Las agencias espaciales proveen software de procesamiento de imágenes y, en algunos casos, el procesamiento de datos crudos SAR para sistemas SAR específicos, es decir, la implementación de un sistema SAR requieren de algoritmos de procesamiento para la generación de imágenes debido a que estos no son comerciales, por lo tanto, surge necesidad de la implementación del procesamiento de imágenes SAR. En países desarrollados, existen estudios acerca de la estimación de la altura forestal utilizando sensores SAR y Lidar, sin embargo, en nuestro país prácticamente no existen dichas investigaciones por lo que se requieren metodologías actualizadas para estimaciones de la altura forestal, la cual es un parámetro indispensable para la estimación de la biomasa, reservas de carbono y el monitoreo forestal, tomando en cuenta que los bosques ocupan el 53.2% del territorio nacional, además estos absorben los gases de efecto invernadero.

1.1.2. Formulación del problema

La inexistencia de un estudio previo acerca del procesamiento de señales SAR, es decir, señales crudas e imágenes SAR en conjunto genera la falta de una metodología alternativa para estimación de la altura forestal, variable fundamental en la cuantificación de las reservas de carbono de los bosques que ayudan a regular el clima.

1.2. Justificación de la investigación

El principal motivo de este proyecto es el diseño e implementación del procesamiento de radar de apertura sintética para estimación de la altura forestal, parámetro indispensable para el cálculo de las reservas de carbono de los bosques que cumplen un rol importante en la regulación del clima. El procesamiento de señales SAR será una alternativa de gran utilidad para el proyecto de investigación “Desarrollo de tecnologías basadas en UAV para el uso de radar de apertura sintética para la estimación de la cobertura forestal en selva alta del distrito de Santa Ana en la Convención” que se está realizando en la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica. La información generada en esta tesis será de utilidad para las siguientes instituciones: Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA), Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR) y para toda la comunidad científica que están inmersos en la implementación de los radares de apertura sintética aplicado a las ciencias forestales y otros fines.

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivos generales

Diseñar e implementar el procesamiento de señales SAR para estimación de la altura forestal.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar un simulador de datos crudos SAR.
- Definir el algoritmo para la generación de imágenes SAR.
- Analizar la calidad de las imágenes SAR.
- Desarrollar el procesamiento de imágenes SAR para la estimación de la altura forestal.
- Validar la altura forestal obtenida a través del procesamiento SAR.

1.4. Variables

1.4.1. Variables dependientes

Tabla 1

Variables dependientes

Variables	Indicadores
La altura de un árbol	Parámetro indispensable para el cálculo de las reservas de carbono de los bosques
Imagen SAR	Parámetro indispensable para realizar el procesamiento de imágenes

Fuente: Elaboración propia

1.4.2. Variables independientes

Tabla 2

Variables independientes

Variables	Indicadores
Altura y velocidad del Aeronave	Son los parámetros indispensables para el desarrollo del algoritmo
Frecuencia de operación del radar	Frecuencia a que será transmitida las OEM
Angulo de elevación	Es el ángulo de transmisión de la señal chirp
Resolución espacial	Parámetros iniciales de diseño del radar

Fuente: Elaboración propia

1.5. Metodología

Se utiliza el método analítico debido a que se explora información acerca del procesamiento de señales SAR para la generación de imágenes SAR.

1.6. Alcances

Esta tesis de investigación se enfoca en los siguientes aspectos:

- Diseño de un simulador de datos crudos SAR orientado al procesamiento, teniendo en cuenta un escenario idealizado que contiene una cantidad de blancos puntuales, aislados e isotrópicos (no para objetos tridimensionales).

- El análisis de la calidad de las imágenes SAR se realizará midiendo los parámetros de calidad sobre la función de respuesta al impulso del algoritmo seleccionado para generar imágenes SAR, estos parámetros son: resolución espacial, PSLR e ISLR.
- Desarrollo del procesamiento de imágenes SAR para la estimación de la altura forestal.
- La implementación del procesamiento SAR se realizará mediante la herramienta computacional Matlab.

1.7. Limitaciones

La investigación esta principalmente enfocado en el diseño e implementación del procesamiento de señales SAR para estimación de la altura forestal, es por ello que esta tesis se limitará en los siguientes aspectos:

- La simulación de datos crudos SAR no se realizará para escenarios extendidos, es decir para objetos tridimensionales, como el caso de un árbol.
- La tesis no incluye el diseño de las antenas, tampoco la implementación del sistema radar SAR.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Radar de apertura sintética

Un radar de apertura sintética (SAR) es un sensor activo instalado a bordo de una plataforma aérea o espacial cuya antena ilumina un área de la superficie de interés en dirección perpendicular al movimiento de dicha plataforma. En el presente proyecto, se enfoca en el procesamiento de señales para sensores SAR instalados a bordo de una plataforma aérea que puede ser un avión o UAV.

El sistema SAR utiliza una antena para la captura de señales retrodispersadas de las superficies de interés, dichas señales debidamente acondicionados son denominados datos crudos SAR, y utilizando algoritmos de enfoque se convierte en una imagen SAR, siendo estas hoy en día: las más utilizadas en las aplicaciones observación remota de la tierra.

Un sistema SAR es instalado generalmente en plataforma satelitales tales como: ERS-1/2 SAR, SEASAT, RADARSAT, etc.; En plataformas aéreas como: E-SAR, UAVSAR, EMISAR, etc., La principal ventaja de este tipo de sensores es la precisión en la resolución espacial. Por otro lado, un sistema SAR LFM-CW es instalado generalmente a bordo de una plataforma aérea para aplicaciones de observación remota de la tierra y es menos costosa la implementación a comparación del sistema SAR (pulsado).

2.1.1. Geometría SAR

Un sistema SAR es instalado a bordo de un vehículo aéreo no tripulado, cuya dirección de movimiento rectilínea se denomina azimut. Las antenas del radar emiten ondas electromagnéticas

hacia la superficie de interés, cuya dirección de propagación se le denomina rango oblicuo, y el punto justo debajo de la plataforma se le denomina Nadir como se muestra en la figura 1.

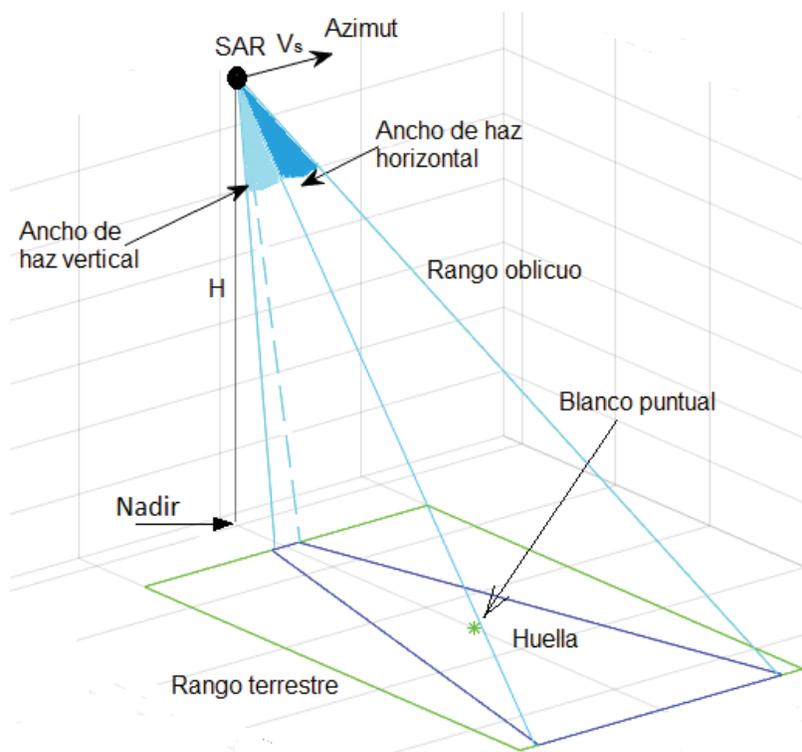


Figura 1: Geometría SAR

Fuente: Elaboración propia

En la figura 1, se muestra una plataforma aérea que se desplaza con una velocidad V_s y altura H constante, además se observa un parámetro denominado blanco puntual, el cual es un punto idealizado perteneciente al área iluminada por el radar, fundamental para el análisis de la calidad y calibración de imágenes. El área iluminada por el sistema de radar también es comúnmente denominada huella de la antena del sistema SAR.

2.1.2. Señal chirp LFM

Una señal chirp está modulada linealmente en frecuencia transmitida con una frecuencia central f_0 a través de pulsos cortos por el sistema SAR, y está caracterizado por la ecuación (2.1).

$$s_p(t) = A_o \text{rect}\left(\frac{t}{t_p}\right) \exp(j\pi k_r t^2) \quad (2.1)$$

Donde: k_r es la tasa de modulación de la señal chirp, y la amplitud de la señal A_o contiene la información de la potencia de la señal en la transmisión del sistema SAR. La señal chirp es delimitado por una duración de pulso t_p , cuya derivada de la fase de dicha señal FM es descrita por las expresiones: $f_i = f_0$ y $f_f = f_0 + kt_p$ (Zozaya A. J., 2012), (Wang B.-C. , 2008), por consiguiente, la frecuencia varia de forma lineal respecto al tiempo, entonces, si la tasa de modulación es negativa la frecuencia tendrá una pendiente negativa o downchirp; sin embargo, si la tasa de modulación es positiva la frecuencia tendrá una pendiente positiva o upchirp.

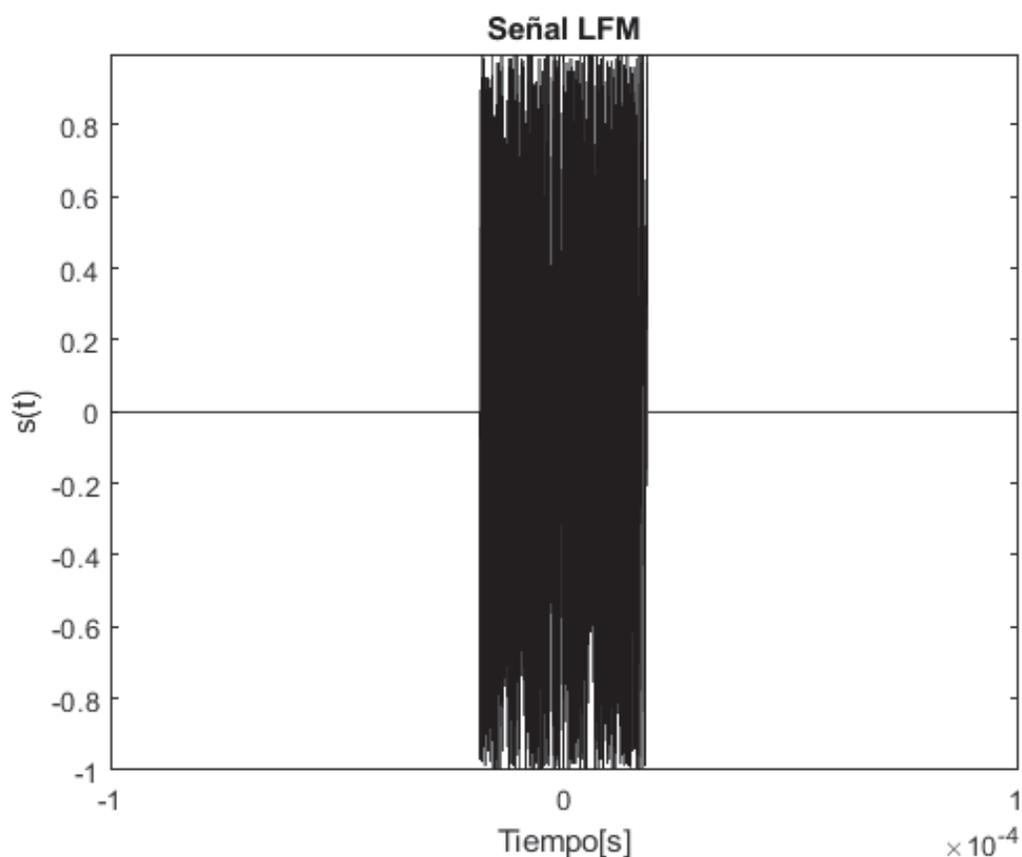


Figura 2: Señal chirp tradicional

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3*Parámetros básicos ERS-1*

Parámetro	Símbolo	Valor
Frecuencia central	f_0	5.3GHz
Duración de pulso	t_p	37.1 μ s
Tasa de modulación de chirp	k_r	4.18e11 Hz/s
Frecuencia de muestreo	f_s	18.96MHz

Nota: Parámetros básicos de un radar sistema SAR tomada de (Oliver & Quegan, 2004)

Un sistema radar de apertura sintética de bajo costo transmite una señal chirp LFM-CW, señal modulada linealmente en frecuencia de onda continua mostrada en la figura 3, que está descrita por la ecuación (2.2).

$$s_c(t) = A_o \exp(j\pi k_r t^2) \quad (2.2)$$

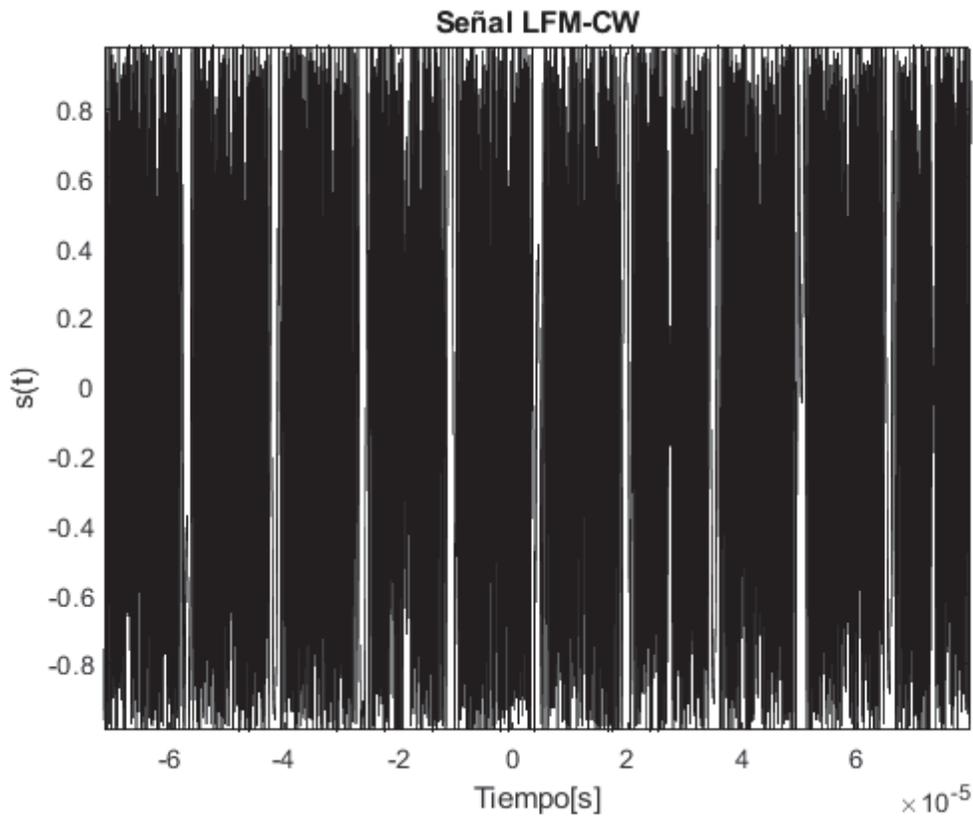


Figura 3: Señal chirp de un radar de apertura sintética LFM-CW

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4

Parámetros básicos un sistema de radar de onda continua

Parámetro	Símbolo	Valor
Frecuencia central	f_0	5.42879GHz
Tasa de modulación de chirp	k_r	$1.5972491392e12$ Hz/s
Frecuencia de muestreo	f_s	24.485MHz

Nota: Parámetros básicos MICROASAR tomados de (Long & Stringham, 2011)

2.1.3. Frecuencia de repetición de pulso

La frecuencia de repetición de pulso PRF es un parámetro importante en el procesamiento digital de señales SAR y la inversa de dicho parámetro se le denomina intervalo de repetición pulso PRI, cuya descripción gráfica se observa en la figura 4.

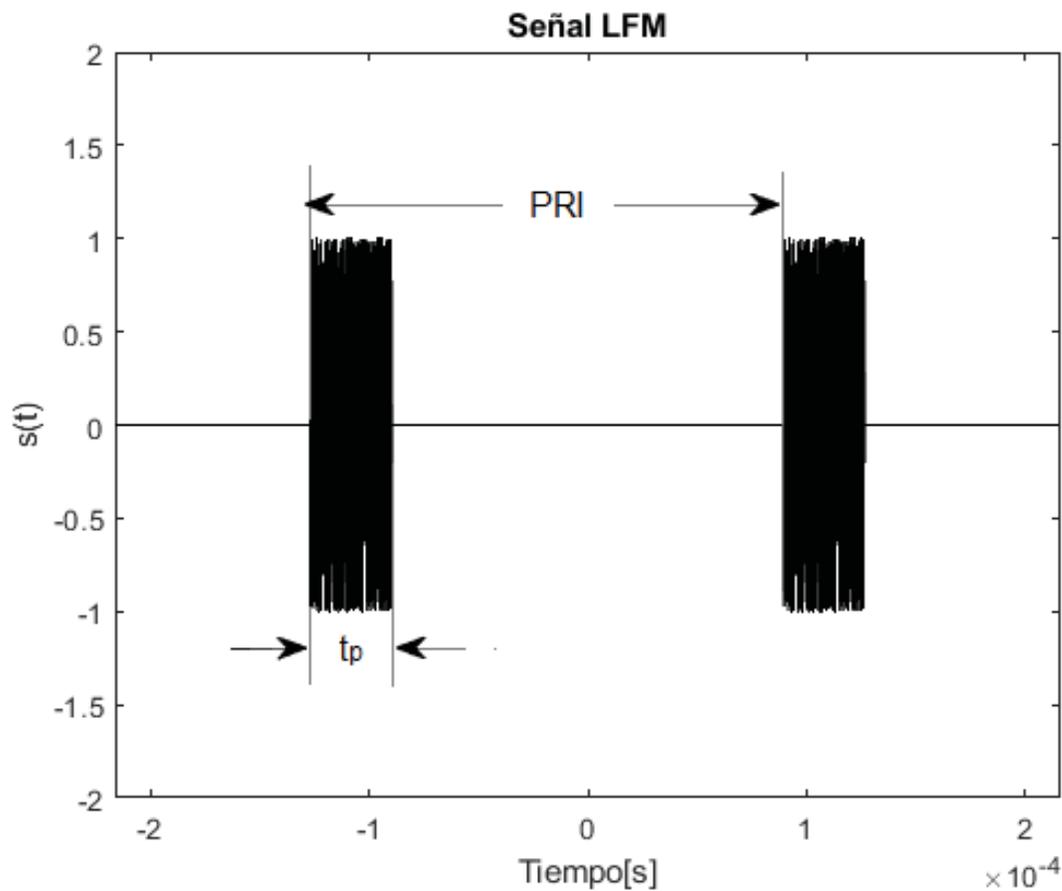


Figura 4: Frecuencia repetición de pulso

Fuente: Elaboración propia

En sistemas SAR pulsado, la duración de pulso t_p mostrado en la figura 4, es el instante de tiempo en la que se transmite una señal chirp a la superficie de interés. Mientras tanto el intervalo de tiempo $PRI - t_p$, se utiliza para la recepción de los ecos provenientes de sistemas SAR instalados a bordo de una plataforma aérea.

En sistemas SAR LFM-CW, el intervalo de repetición de pulso se cumple: $t_p = PRI$, es decir, la señal es continua como se muestra en la figura 3, por consiguiente, estos sistemas de radar generalmente son de tipo biestático, debido a que se utiliza una antena para la transmisión y otra para la recepción de señales retrodispersadas provenientes de la superficie terrestre.

2.2. Procesamiento de señales SAR

Los algoritmos utilizados en el procesamiento de señales del sistema SAR también se les conoce como algoritmos de enfoque o procesador SAR debido a la capacidad de convertir datos crudos SAR a imágenes. Los algoritmos más utilizados son: el algoritmo range-Doppler, el algoritmo Omega-k y el algoritmo Chirp Scaling debido a la calidad y precisión en la calidad de enfoque de datos crudos SAR.

2.2.1. Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es el corazón del procesamiento digital de señales SAR para la compresión de datos crudos y aplicar métodos como: la convolución e interpolación. La transformada de Fourier continua y su respectiva transformada inversa de Fourier son descritas en las siguientes ecuaciones.

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \exp(-j2\pi ft) dt \quad (2.3)$$

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) \exp(+j2\pi ft) dt \quad (2.4)$$

Donde $g(t)$ es una función de tiempo continuo, cuyo espectro complejo es $G(f)$. Por otro lado, la transformada discreta de Fourier está dada como:

$$G(k) = \sum_{n=0}^{N-1} g(n) \exp\left\{-j \frac{2\pi kn}{N}\right\} \quad k = 0, \dots, N - 1 \quad (2.5)$$

Donde $g(n)$ es una función de tiempo discreto, cuyo espectro complejo es $G(k)$ de N coeficientes espectrales. Los comandos en Matlab para la implementación en tiempo discreto de la transformada de Fourier y la transformada inversa de Fourier son: `fft` y `ifft`.

2.2.2. Algoritmo range-Doppler

El algoritmo range-Doppler fue desarrollado por Wu en 1976, para el primer radar de apertura sintética instalado a bordo del satélite SEASAT lanzado al espacio por la NASA. En la actualidad, el algoritmo range-Doppler es uno de los algoritmos más utilizados en el procesamiento de datos crudos SAR. La implementación básica del procesamiento digital de señales SAR utilizando el algoritmo range-Doppler, generalmente, se explica con los siguientes pasos:

1. Se transforma la matriz de las señales crudas SAR del dominio temporal al dominio de la frecuencia mediante una transformada de Fourier en rango.
2. Se implementa una réplica de la señal chirp transmitida por el sistema de radar, es decir, se construye una señal chirp con los parámetros iniciales del sistema SAR, como se muestra en la siguiente ecuación (Cumming & Wong, 2005).

$$h_R(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{t_p}\right) \exp(j\pi k_r t^2) \quad (2.6)$$

3. Se aplica la transformada Fourier a la réplica de la señal chirp, denominado función de referencia, transformando del dominio temporal al dominio de la frecuencia.
4. Se implementa la compresión en rango mediante la multiplicación de los datos crudos SAR y la conjugada de la función de referencia en el dominio de la frecuencia.

5. Se aplica la transformada inversa de Fourier en rango a los datos comprimidos para retornar al dominio temporal.
6. Se aplica la transformada de Fourier en azimut a los datos comprimidos en rango transformando del dominio temporal al dominio de la frecuencia.
7. Se implementa la corrección de la curva migración de celdas en rango, este paso puede ser ignorado para pequeños ángulos squint o ángulo de haz horizontal, la cual depende de la antena del sistema SAR.
8. Se elabora una señal chirp en azimut denominado función de referencia en azimut, descrita en la ecuación 2.7 (Cumming & Wong, 2005), con una tasa de variación temporal en tiempo lento k_A y luego se aplica una transformada de Fourier.

$$h_A(t) = \exp(j\pi k_A t^2) \quad (2.7)$$

9. Se implementa la multiplicación en el dominio de la frecuencia en azimut entre los datos SAR y la señal chirp en azimut resultando: comprimida los datos crudos en azimut.
10. Se aplica la transformada inversa de Fourier en azimut, teniendo los datos crudos SAR comprimidos tanto en rango y en azimut resultando una imagen SAR.

La curva de la migración de celdas en rango complica el procesamiento SAR, sin embargo, dicha curva es una característica esencial de los sistemas SAR especialmente en grandes aperturas sintéticas. La curva RCM aparece por la variación del rango inclinado en cada instante de tiempo imponiendo una característica en la señal chirp LFM en azimut.

Existen diversas formas de implementar el algoritmo range-Doppler como se muestra en la figura 5, además, la calidad de enfoque del algoritmo depende de la compresión secundaria en rango (SRC). En la figura 6 se muestra la curva RCM y la corrección de la curva migración de celdas en rango (RCMC) para el procesamiento de señales utilizando el algoritmo RDA.

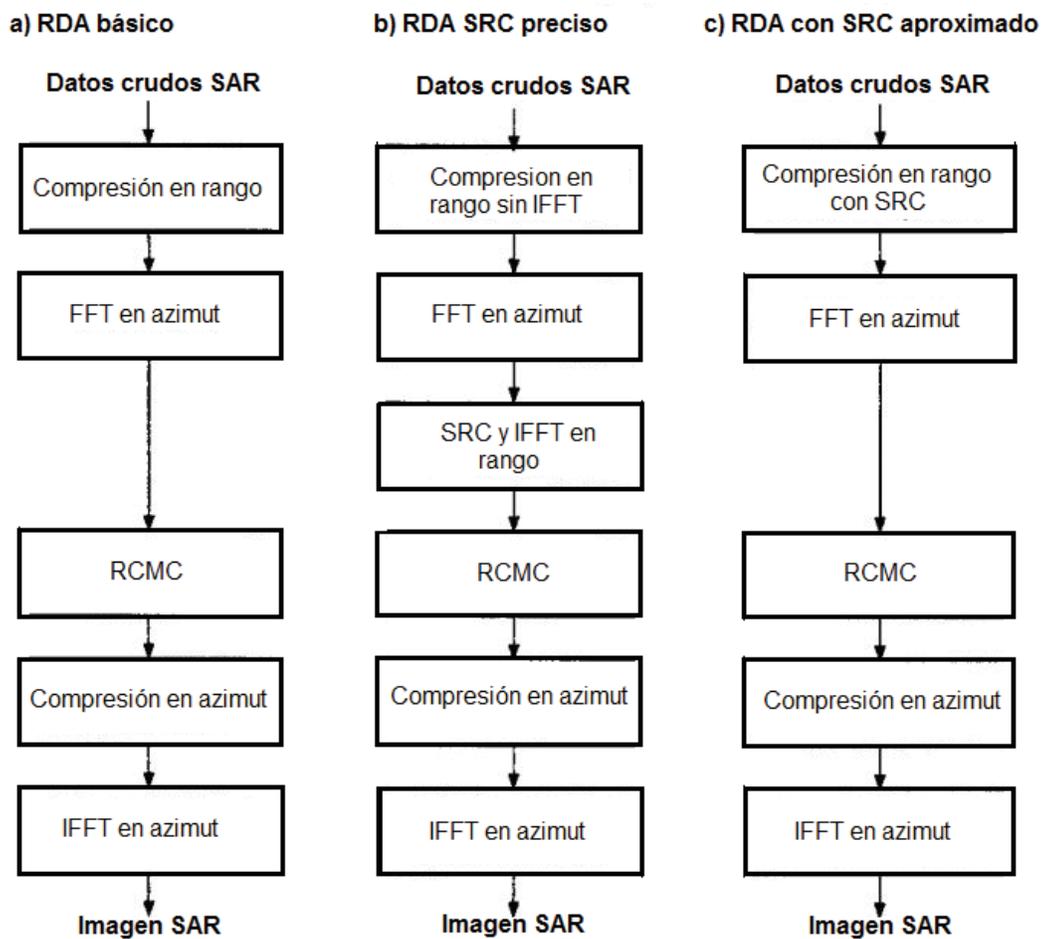


Figura 5: Versiones del algoritmo range-Doppler

Fuente: (Cumming & Wong, 2005)

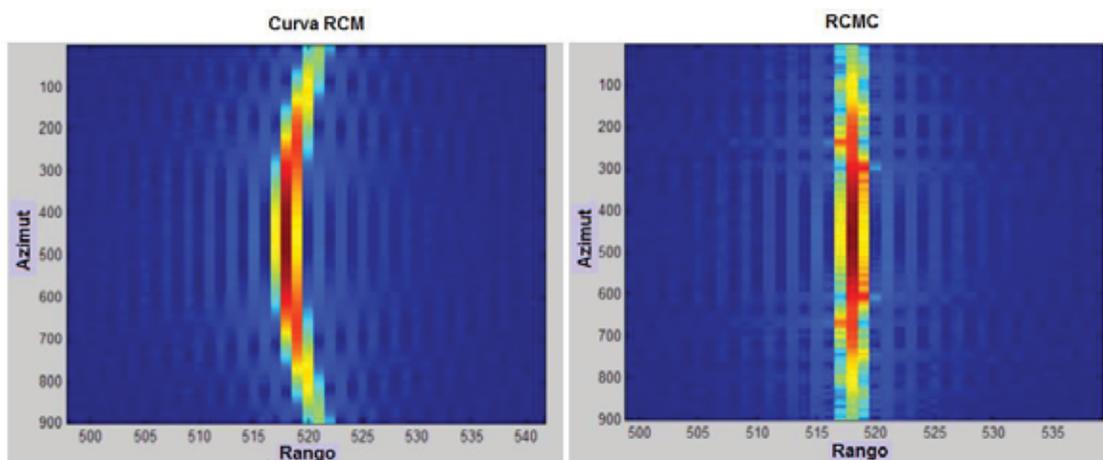


Figura 6: Corrección de la curva migración de celdas en rango

Fuente: (Parashar, 2015)

2.2.3. Algoritmo Chirp Scaling

El algoritmo Chirp Scaling fue desarrollado por Runge y Bamler de la Agencia Espacial de Alemania (DLR) en 1991. Este algoritmo es utilizado para eliminar el uso de la interpolación en la rectificación de la curva migración de celdas en rango (RCM) denominado ecualización de la curva RCM. El procesamiento utilizando el algoritmo Chirp Scaling se diseña en el dominio range-Doppler y el dominio bidimensional de la frecuencia, cuya implementación genérica se detalla en los siguientes pasos:

1. Primero, se transforma los datos crudos SAR del dominio temporal al dominio range-Doppler aplicando una transformada de Fourier en azimut.
2. Los datos crudos SAR en el dominio range-Doppler son multiplicados por la primera función de fase, debido a dicha operación se le conoce como algoritmo Chirp Scaling.
3. Se aplica la transformada de Fourier en rango a la matriz de los datos crudos SAR para transformar del dominio range-Doppler al dominio bidimensional de la frecuencia.
4. Se realiza la compresión en rango y se corrige la curva de migración de celdas en rango mediante la multiplicación por la segunda función de fase.
5. Se transforma la matriz de datos crudos SAR que se encuentra en el dominio bidimensional de la frecuencia al dominio range doppler mediante una transformada inversa de Fourier en rango.
6. Los datos SAR en el dominio range-Doppler son multiplicados por una tercera función de fase para comprimir los datos en azimut y la corrección de fase.
7. Finalmente, se aplica la transformada inversa de Fourier en azimut a los datos del dominio range-Doppler a una imagen SAR.

El procesamiento de señales SAR utilizando el algoritmo Chirp Scaling soluciona el problema de la curva de RCM sin la necesidad de elaborar un interpolador; sin embargo, presenta problemas en la calidad para grandes aperturas sintéticas o ángulos de squint.

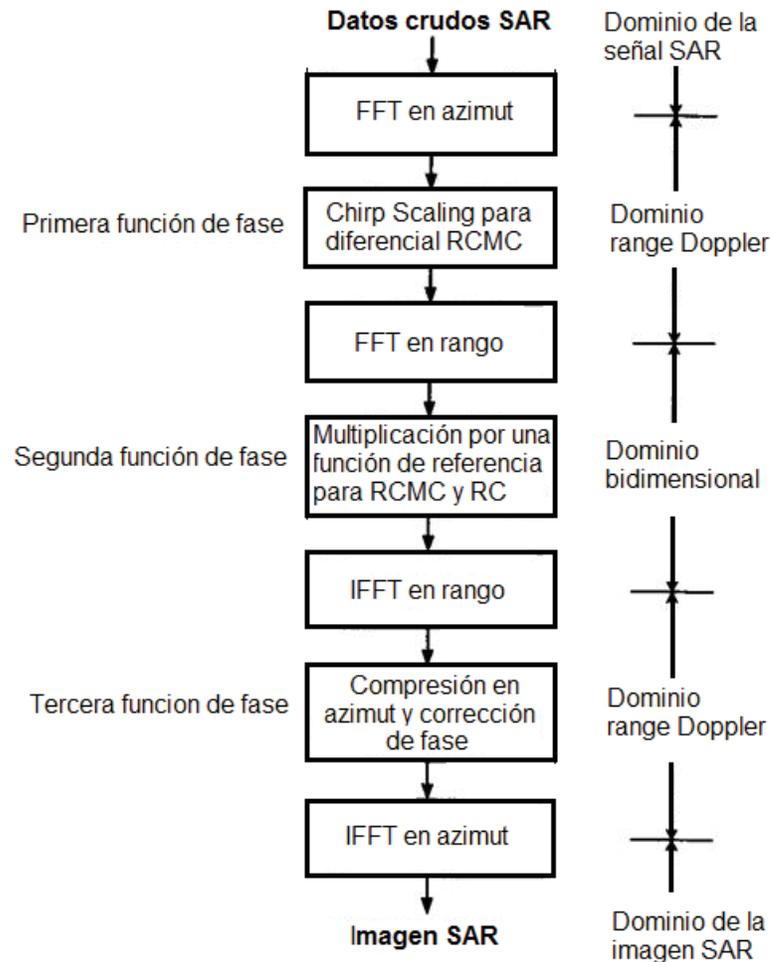


Figura 7: Algoritmo Chirp Scaling

Fuente: (Cumming & Wong, 2005)

2.2.4. Algoritmo Omega-k

El algoritmo Omega-k llamado también como algoritmo de número de onda fue desarrollado por Caforio, Prati y Rocca en 1991 en el politécnico de Milán. Se diseña e implementa el procesamiento SAR en el dominio bidimensional de la frecuencia, es decir con ω en rango y con k_x azimuth como indica el nombre de dicho algoritmo.

Existen dos versiones de la implementación del algoritmo Omega-k, como son: el algoritmo Omega-k versión precisa y el algoritmo Omega-k versión aproximada.

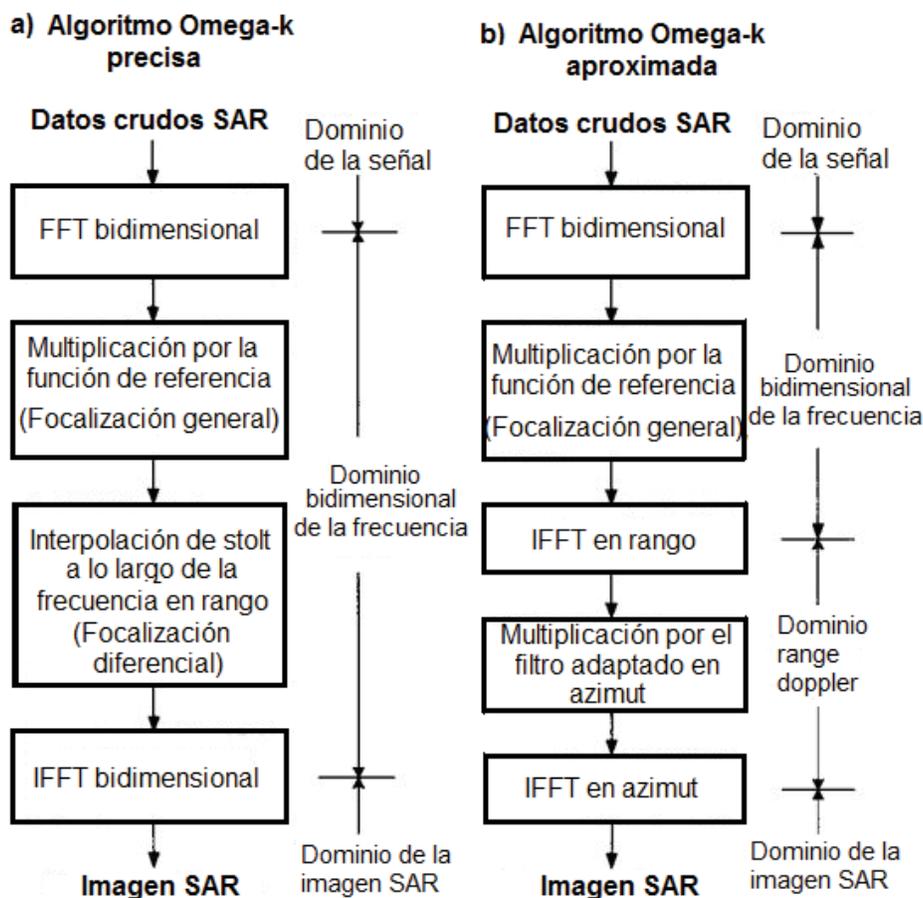


Figura 8: Versiones del algoritmo Omega-k

Fuente: (Cumming & Wong, 2005)

2.3. Análisis de la calidad de las imágenes SAR

El análisis de la calidad de las imágenes SAR se realiza teniendo como entrada al sistema SAR: un impulso y obteniendo en la salida una respuesta al impulso, es decir, se enfoca los datos crudos SAR para obtener imágenes SAR de un blanco puntual aislado e isotrópico con el objetivo de determinar los perfiles de la respuesta al impulso en rango y azimut que definen los parámetros de calidad de los algoritmos de enfoque.

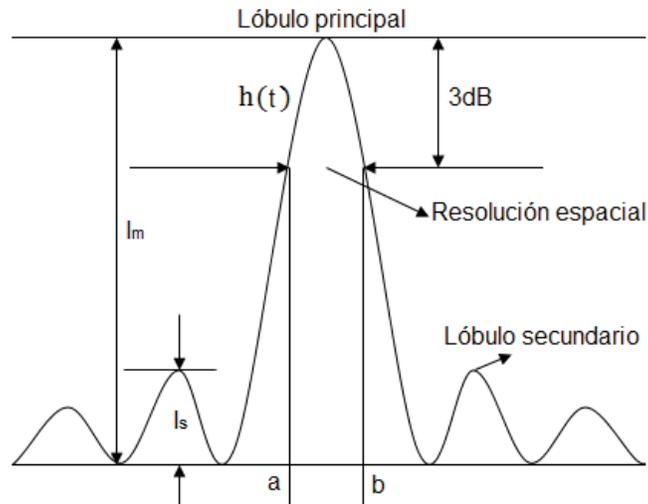


Figura 9: Perfil de la respuesta al impulso en rango o azimut

Fuente: Elaboración propia

En la figura 9, se observa la función de la respuesta al impulso $h(t)$ donde los puntos a y b son los puntos de media potencia, es decir 3dB, para determinar los parámetros de calidad, tales como: resolución en rango, azimut y ISLR. Mientras tanto, el lóbulo principal y el lóbulo secundario se utiliza para determinar PSLR.

2.3.1. Resolución espacial

La resolución espacial de una imagen SAR o single look complex (SLC), son las resoluciones en rango y azimut, y está expresada por la ecuación (2.8).

$$\delta_R = \frac{c}{2B} \text{ y } \delta_A = \frac{\lambda_0}{2\Delta\theta} \quad (2.8)$$

Donde: δ_R es la resolución en rango y δ_A resolución en azimut expresadas en función de la velocidad de la luz c , ancho de banda B , longitud de onda λ_0 , y ancho de haz del radar $\Delta\theta$.

2.3.2. PSLR

El PSLR es el cociente entre el valor de la intensidad del pico máximo del lóbulo secundario mayor y el pico máximo del lóbulo primario, cuyas unidades están en decibeles. Este parámetro de calidad determina, si el algoritmo de enfoque tiene la capacidad de identificar blancos

de baja reflectividad frente a blancos de alta reflectividad, y se calcula con la siguiente expresión matemática (Sun & Lu, 2007).

$$\text{PSLR} = 10\log\left(\frac{I_s}{I_m}\right) \quad (2.9)$$

Donde: I_s es la intensidad máxima del lóbulo secundario inmediato al lóbulo principal, mientras, I_m es la intensidad máxima del lóbulo principal.

2.3.3. ISLR

El ISLR es el cociente entre la energía contenida de bajo del punto de media potencia de los lóbulos secundarios y la energía contenida dentro del intervalo de dichos puntos de potencia del lóbulo primario, que esta expresada por la ecuación 2.10 (Sun & Lu, 2007).

$$\text{ISLR} = 10\log\left(\frac{\int_{-\infty}^a |h(t)|^2 dt + \int_b^{\infty} |h(t)|^2 dt}{\int_a^b |h(t)|^2 dt}\right) \quad (2.10)$$

Donde $h(t)$ es la función de respuesta al impulso, mientras, a y b son los puntos de media potencia o 3dB.

2.4. Procesamiento de imágenes SAR

2.4.1. Polarimetría SAR

Un sistema de radar transmite ondas electromagnéticas cuya dirección de propagación es perpendicular al campo eléctrico y al campo magnético con una orientación determinada, denominado polarización. Un radar que utiliza varias polarizaciones tiene más capacidad para identificar las propiedades de los objetos o blancos. Estos sistemas pueden ser: Single-Pol (HH o VV), Dual-Pol (HH, VH), Dual-Pol (HV, VV), Dual-Pol (HH, VV) y Quad-Pol. La polarimetría permite caracterizar y modelar la interacción de las señales con la superficie.

- **Polarizaciones iguales**

HH: transmisión horizontal de la señal chirp y recepción horizontal de los ecos

VV: transmisión vertical de la señal chirp y recepción vertical de los ecos

- **Polarizaciones verticales**

HV: transmisión horizontal de la señal chirp y recepción vertical de los ecos

VH: transmisión vertical de la señal chirp y recepción horizontal de los ecos

En países desarrollados, es común combinar la técnica de la interferometría con la polarimetría denominado PolInSAR para aplicaciones de monitoreo forestal, es decir un instrumento SAR que genera datos QuadPol permite caracterizar mejor la superficie de interes.

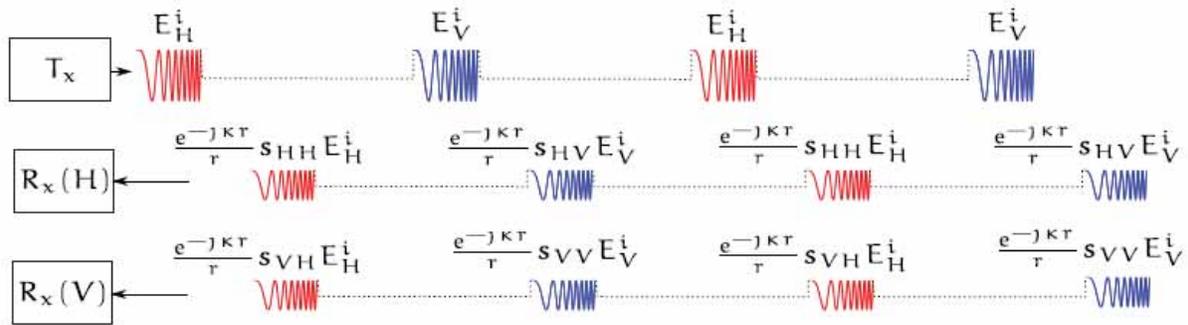


Figura 10: Polarimetría de radar de apertura sintética

Fuente: (Zozaya A. J., 2015)

En la figura 10 se muestra la transmisión y recepción de señales chirp para el caso del radar de apertura sintética completamente polarimétrico (Quad-Pol). El transmisor T_x emite señales pulso LFM hacia el objetivo con polarizaciones H y V, mientras el receptor R_x con polarizaciones H y V captura señales retrodispersadas que están expresadas como:

$$\begin{pmatrix} E_H^s \\ E_V^s \end{pmatrix} = \frac{e^{-jkr}}{r} \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_H^i \\ E_V^i \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

Donde, E^s es el campo eléctrico recepcionado por las antenas del radar y E^i es el campo eléctrico incidente sobre el objetivo o blanco puntual. Por otro lado, $[S]$ es la matriz de dispersión,

la cual, es vital para el procesamiento SAR. La sección transversal del radar (RCS) y el coeficiente de dispersión son sensibles a la polarización.

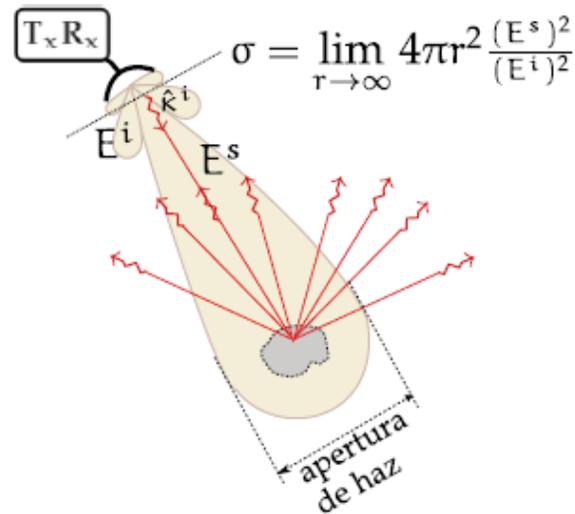


Figura 11: Blanco puntual aislado e isotrópico

Fuente: (Zozaya A. J., 2015)

Donde σ es la sección transversal del radar, la cual, es de utilidad para definir el coeficiente de retrodispersión, expresado como la media de σ por unidad de área iluminada por el radar A_0 .

$$\sigma^0 = \frac{\langle \sigma \rangle}{A_0} \quad (2.12)$$

El coeficiente de reflectividad está definida como la razón de la amplitud del campo eléctrico reflejada y el campo eléctrico incidente.

$$\rho = \frac{E^s}{E^i} \quad (2.13)$$

2.4.2. Interferometría SAR

La interferometría de radar de apertura sintética es utilizada para generar modelamiento de elevación digital de la superficie terrestre a partir de la obtención de la fase interferométrica, la cual, se obtiene a través del procesamiento de imágenes SAR.

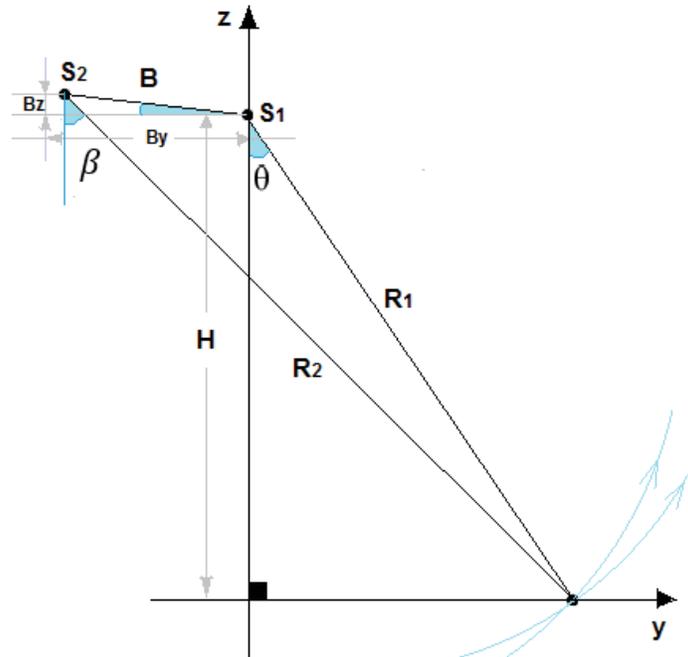


Figura 12: Geometría InSAR

Fuente: Elaboración propia

Donde: B es la línea de base o baseline, la cual, se descompone en la línea de base horizontal B_y y vertical B_z . Los sensores SAR están a una altura H y con un ángulo de incidencia θ , mientras los rangos inclinados son R_1 y R_2 .

En la figura 12, se observa la interferometría de un solo paso (Single Pass Interferometry) que es una representación genérica de la interferometría que utiliza dos antenas para la adquisición de señales retrodispersadas de la superficie terrestre, siendo S_1 antena maestra y S_2 antena esclava; sin embargo, es posible utilizar con una o más antenas esclavas.

Las fases correspondientes a las antenas S_1 y S_2 están representadas por las siguientes ecuaciones (Hein, 2004):

$$\varphi_1 = \frac{4\pi R_1}{\lambda} + \varphi_0$$

$$\varphi_2 = \frac{4\pi R_2}{\lambda} + \varphi_0 \text{ y } R_2 = R_1 + \Delta R$$

$$\varphi = -\frac{4\pi\Delta R}{\lambda} \quad (2.14)$$

Donde: φ representa la fase interferométrica expresado en función de la diferencia de rango inclinado ΔR , la cual, puede tener valores de unos cuantos metros hasta cientos y miles de metros. La fase interferométrica es obtenida a través del procesamiento digital de imágenes InSAR.

2.4.3. PolSARproSim

Es un software de código abierto desarrollado por el Dr. Mark L. Williams de la Agencia Espacial Europea ESA para fines educativos e investigación científica acerca del procesamiento de imágenes SAR. En PolSARproSim se simula imágenes SAR de árboles con un alto realismo, es decir, toma en cuenta la interacción de las señales chirp con el bosque tales como: hojas, troncos, la superficie terrestre, coeficiente de dispersión, el ruido speckle y las propiedades de coherencia polarimétrica. En el presente proyecto de tesis, se utiliza imágenes SAR de árboles simulados en PolSARproSim para la validación del procesamiento SAR implementado en Matlab, que es masivamente utilizado por la comunidad estudiantil y científica.



Figura 13: Simulador PolSARproSim

Fuente: (Williams, 2006)

Los datos SAR se expresan mediante matrices de dispersión, como son: datos maestros S_1 y datos esclavos S_2 .

$$S_1 = \begin{pmatrix} S_{11}^1 & S_{12}^1 \\ S_{21}^1 & S_{22}^1 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

$$S_2 = \begin{pmatrix} S_{11}^2 & S_{12}^2 \\ S_{21}^2 & S_{22}^2 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

Donde: S_{11} , S_{12} , S_{21} y S_{22} son los elementos de la matriz dispersión con polarizaciones HH, HV, VH y VV respectivamente, a esta característica se le conoce como polarimetría SAR. La combinación de las técnicas polarimetría y interferometría se le denomina polarimetría interferometría SAR (PolInSAR) útil para realizar el modelamiento de elevación digital (DEM) determinando la altura de los bosques.

CAPITULO III

PROCEDIMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Sistemas SAR

Las ondas electromagnéticas transmitidas por el radar tienen distintos efectos sobre el dosel de los árboles debido a la frecuencia de la señal chirp.

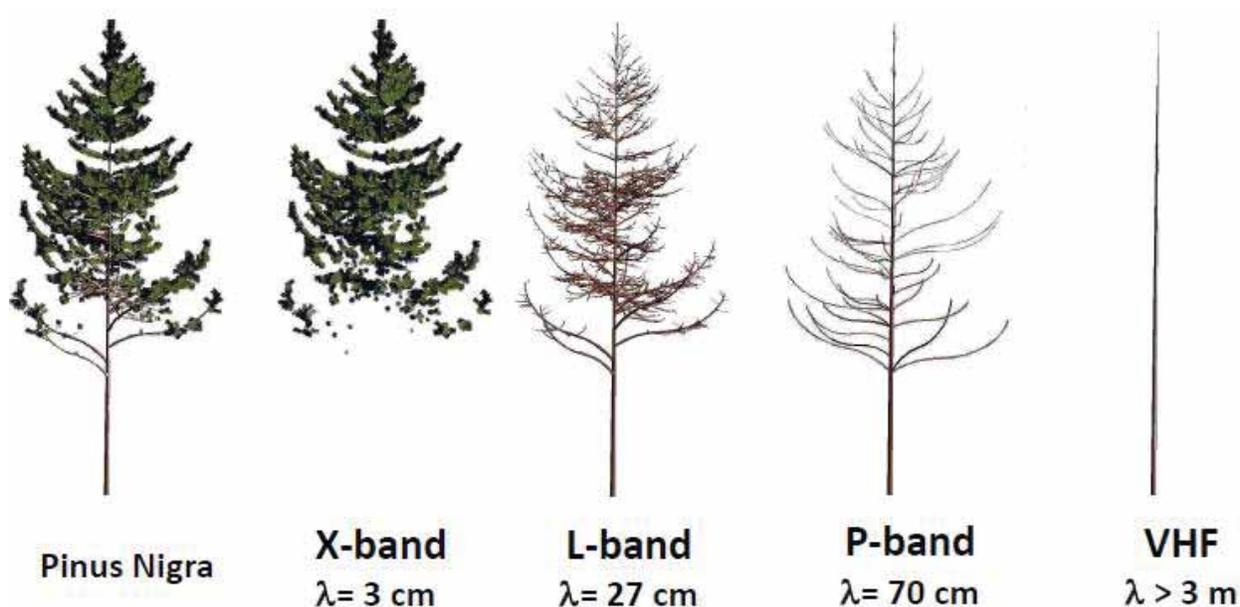


Figura 14: Vista del radar a los arboles

Fuente: (Thuy Le Toan, CESBIO, Toulouse, France & The Biomass Mission Advisory Group, 2015)

En la figura 14, se observa a simple vista que las frecuencias que se encuentran en las bandas P, L, C y X son adecuadas para estimaciones de la altura forestal, además, cuando se disminuye la longitud de onda de la señal chirp en la transmisión, la penetración sobre el dosel del árbol es menor; sin embargo, la estimación de la altura forestal frente a una frecuencia baja tales como la banda L son más estables comparado con una frecuencia alta como la banda C (Yong, Zengyuan, sun, Erxue, & Xuejian, 2003). Por lo tanto, el procesamiento de señales SAR para estimación de la altura forestal se implementa en la banda L, específicamente en la frecuencia de 1.3GHz; sin embargo, el procesamiento de señales SAR a implementar se adapta para cualquier

frecuencia. El diseño e implementación del procesamiento de señales SAR requiere de la comprensión del principio de funcionamiento de un radar de apertura sintética y la adquisición de las señales retrodispersadas.

3.1.1. Modelamiento de señales SAR

El modelamiento tiene como objetivo determinar las señales crudas a partir de la transmisión y recepción de la señal chirp tomando en cuenta la ecuación (2.1), se obtiene la señal retrodispersada con un retardo Δt proveniente de los blancos puntuales captado por las antenas del sistema SAR, y tiene la siguiente forma:

$$s_r(t) = A_o \text{rect}\left(\frac{t - \Delta t}{t_p}\right) \exp(j\pi k_r(t - \Delta t)^2) \quad (3.1)$$

Considerando la fase de la señal chirp retrodispersada, se tiene la siguiente ecuación:

$$s_r(t) = \cos(2\pi f_o(t - \Delta t) + \pi k_r(t - \Delta t)^2) \quad (3.2)$$

$$s_r(t) = \cos(2\pi f_o t + \phi(t)) \quad (3.3)$$

En el procesamiento se considera la fase: $\phi(t) = -2\pi f_o \Delta t + \pi k_r(t - \Delta t)^2$

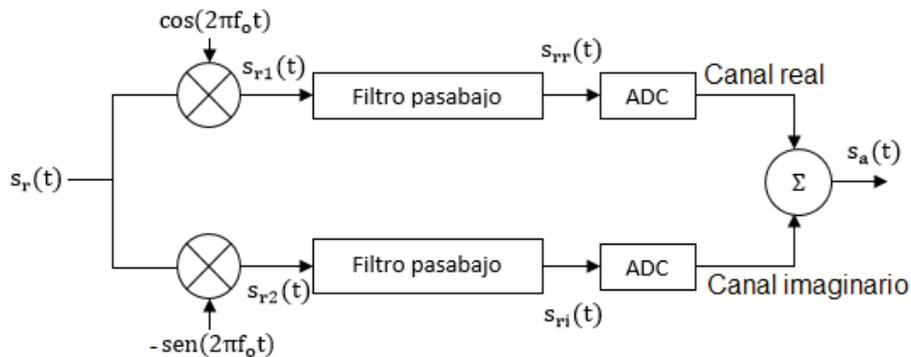


Figura 15: Demodulación en cuadratura

Fuente: Elaboración propia

Luego de la multiplicación, se obtienen las señales:

$$s_{r1}(t) = s_r(t) \cos(2\pi f_o t) \quad (3.4)$$

$$s_{r1}(t) = \frac{1}{2} \cos(\varnothing(t)) + \frac{1}{2} \cos(4\pi f_0 t + \varnothing(t)) \quad (3.5)$$

$$s_{r2}(t) = -s_r(t) \text{sen}(2\pi f_0 t) \quad (3.6)$$

$$s_{r2}(t) = \frac{1}{2} \text{sen}(\varnothing(t)) - \frac{1}{2} \text{sen}(4\pi f_0 t + \varnothing(t)) \quad (3.7)$$

Se aplica el filtro pasabajo para eliminar la portadora de las señales s_{r1} y s_{r2} , cuya representación espectral se muestra en la figura 16.

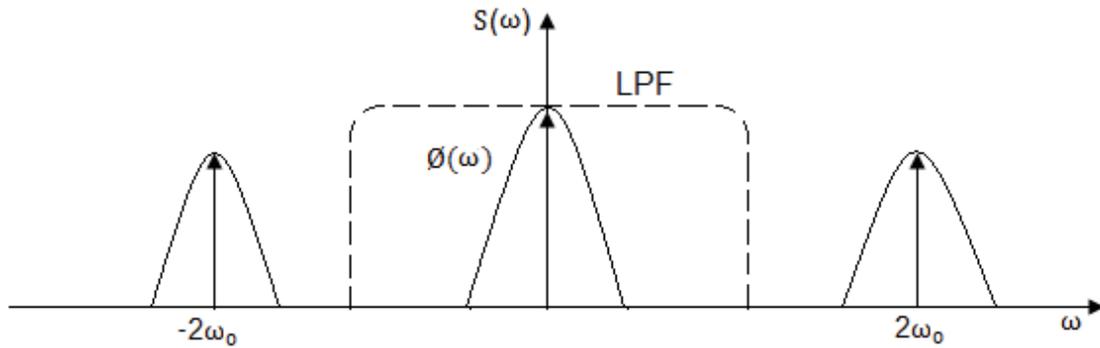


Figura 16: Filtro pasabajo

Fuente: Elaboración propia

$$s_{rr}(t) = \frac{1}{2} \cos(\varnothing(t)) \quad (3.8)$$

$$s_{ri}(t) = \frac{1}{2} \text{sen}(\varnothing(t)) \quad (3.9)$$

$$s_a(t) = s_{rr}(t) + js_{ri}(t) \quad (3.10)$$

El procesamiento se implementa en la fase, por lo tanto, la amplitud se considera como una unidad, cuya señal resultante s_a , se obtiene reemplazando las ecuaciones (3.8) y (3.9) en (3.10).

$$s_a(t) = \exp(j(-2\pi f_0 \Delta t + \pi k_r (t - \Delta t)^2)) \quad (3.11)$$

Por otro lado, el modelamiento de la señal cruda para los radares de apertura sintética de onda continua se realiza la demodulación multiplicando con la réplica de la señal chirp transmitida. La señal retrodispersada se obtiene utilizando la ecuación (2.2).

$$s_r(t) = \exp(j\pi k_r(t - \Delta t)^2) \quad (3.12)$$

$$s_r(t) = \cos(2\pi f_0(t - \Delta t) + \pi k_r(t - \Delta t)^2) \quad (3.13)$$

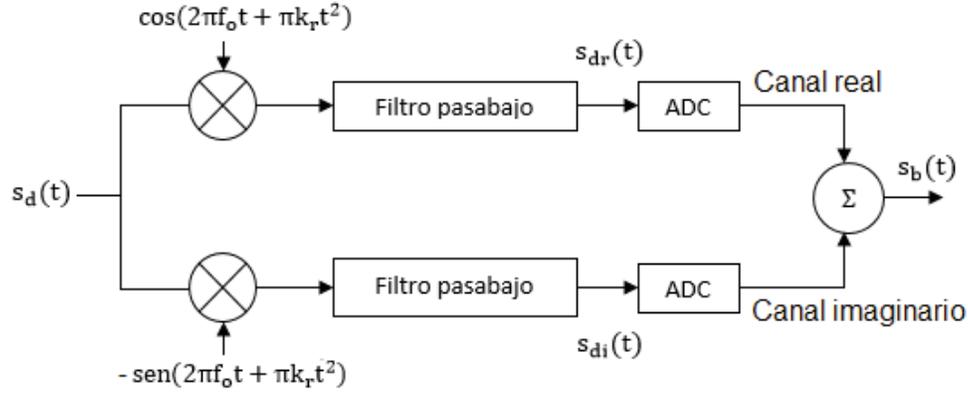


Figura 17: Demodulación en cuadratura para el caso LFM-CW SAR

Fuente: Elaboración propia

Realizando la multiplicación y filtrado pasabajo, se obtienen las siguientes expresiones:

$$s_{rr}(t) = \frac{1}{2} \cos(2\pi f_0 \Delta t + 2\pi k_r t \Delta t - \pi k_r \Delta t^2) \quad (3.14)$$

$$s_{ri}(t) = \frac{1}{2} \text{sen}(2\pi f_0 \Delta t + 2\pi k_r t \Delta t - \pi k_r \Delta t^2) \quad (3.15)$$

Finalmente, considerando la amplitud como una unidad y sumando las señales s_{rr} y s_{ri} se obtiene la señal cruda expresada por la ecuación (3.16).

$$s_b(t) = \exp(j(2\pi f_0 \Delta t + 2\pi k_r t \Delta t - \pi k_r \Delta t^2)) \quad (3.16)$$

3.1.2. Matriz de datos crudos SAR

Los ecos captados por el radar de apertura sintética independientemente si es instalado a bordo de una plataforma espacial o aérea tienen la forma mostrada en la figura 18, mientras tanto, para un radar de apertura sintética de onda continua los ecos tienen la forma mostrada en la figura 19, cuya estructura final para ambos casos mencionados es la misma.

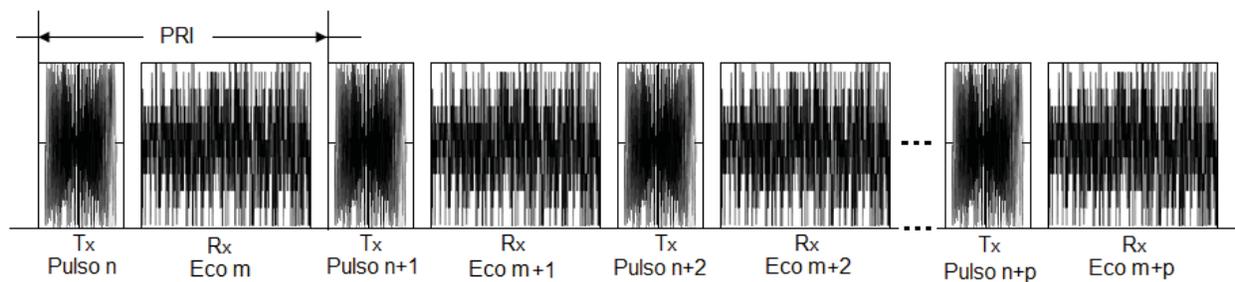


Figura 18: Señal retrodispersada en radares de apertura sintética

Fuente: Elaboración propia

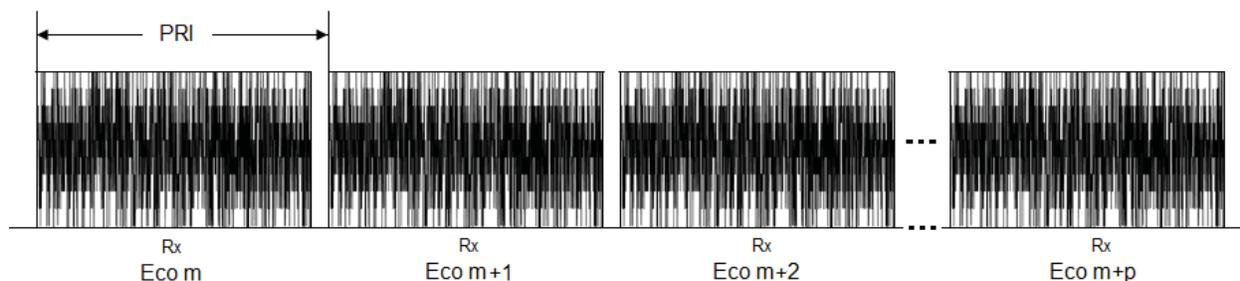


Figura 19: Señal retrodispersada LFM-CW SAR

Fuente: Elaboración propia

Donde el intervalo repetición de pulso PRI es la inversa de la frecuencia repetición de pulso PRF conocida también como la frecuencia de muestreo en tiempo lento, por otro lado, T_x es el transmisor y R_x es el receptor. Los datos crudos SAR es la matriz de los ecos del radar expresado en el dominio bidimensional temporal muestreados en rango por la frecuencia de muestreo en tiempo rápido f_s y muestreados en azimut por la frecuencia de muestreo en tiempo lento PRF, es decir, la señal de los ecos capturados por las antenas del radar con una duración de pulso t_p es colocado en cada fila de la matriz de los datos crudos, cuya estructura de datos crudos SAR se muestra en la figura 20. Los datos crudos SAR no tienen una aplicación directa por lo que es necesario implementar el procesamiento digital de señales SAR para generar imágenes, y utilizar para distintos fines y aplicaciones.

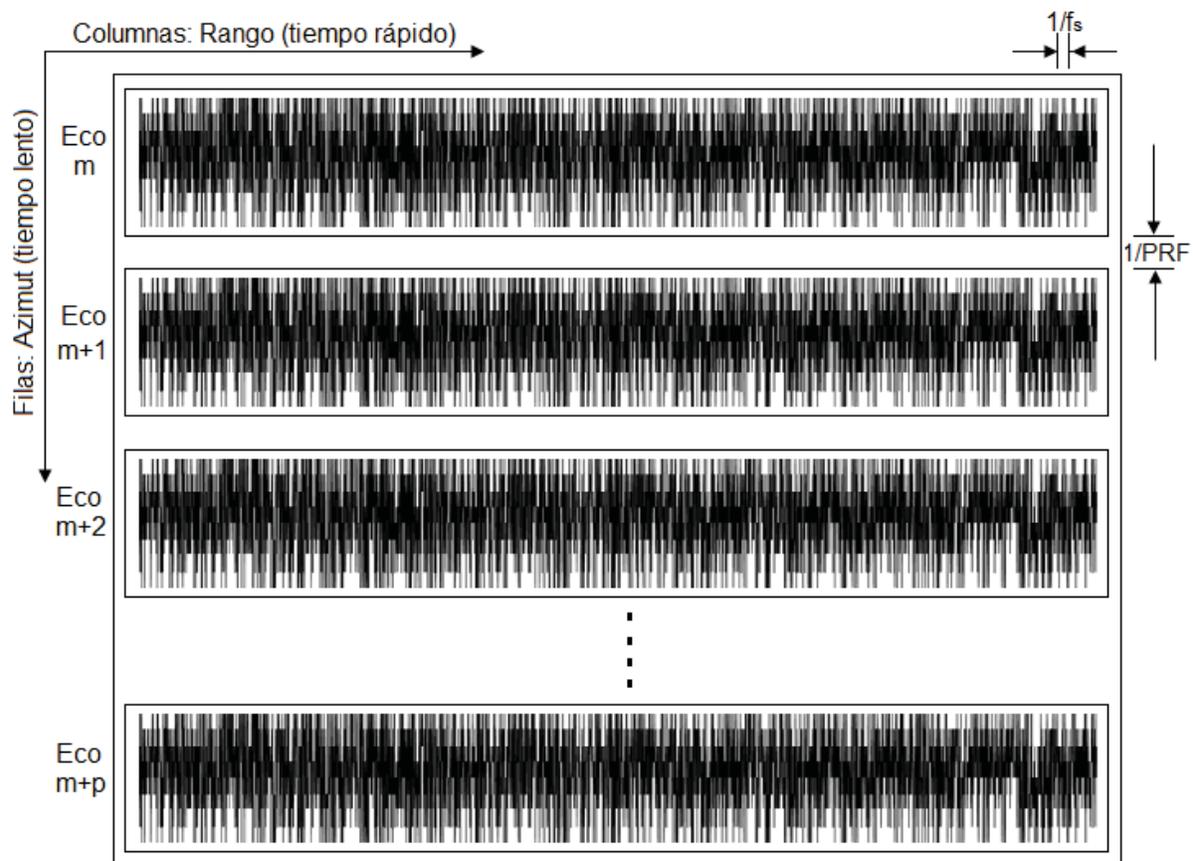


Figura 20: Estructura de la matriz de datos crudos SAR

Fuente: Elaboración propia

3.2. Simulador SAR

El diseño e implementación de un simulador de datos crudos SAR está orientado para el testeo de los algoritmos de enfoque. Los datos crudos SAR de un árbol es muy complicado de implementar, por tal motivo, se implementa un simulador de datos crudos SAR de una cantidad determinada de blancos puntuales aislado e isotrópico tomando en cuenta la estructura de la matriz de la figura 20.

3.2.1. Diseño de simulador de datos crudos SAR

Un radar de apertura sintética es conocida también como un sistema SAR pulsado, cuya simulación de datos crudos debe incluir la función rectangular y la fase desplazado con un retardo Δt en la ecuación (3.11) obteniendo la ecuación (3.17).

$$s_a(t) = \text{rect}\left(\frac{t - \Delta t}{T_p}\right) \exp(j(-2\pi f_o \Delta t + \pi k_r (t - \Delta t)^2)) \quad (3.17)$$

El eco s_a representa a una señal chirp retrodispersada, y el retardo temporal está en función del rango oblicuo y la velocidad de la luz $\Delta t = \frac{2R(n)}{c}$, mientras tanto, el rango oblicuo es representado en función del dominio de tiempo en azimut n , la distancia entre el sensor SAR y el blanco puntual R_o , y la velocidad de la plataforma SAR V_s (Cumming & Wong, 2005).

$$R(n) = \sqrt{R_o^2 + (V_s n)^2} \quad (3.18)$$

La longitud de onda de la señal chirp es igual a $\lambda = \frac{c}{f_o}$. Luego, reemplazando λ y Δt en la ecuación (3.17), la señal es resultante en el dominio del tiempo en rango y azimut es parecida a la ecuación de datos crudos SAR utilizada en el artículo para escenarios extendidos (Zeng, Hu, Sun, & Chen, 2014).

$$s_1(t, n) = \text{rect}\left(\frac{t - \frac{2R(n)}{c}}{T_p}\right) \exp\left(-j\frac{4\pi R(n)}{\lambda}\right) \exp\left(j\pi k_r \left(t - \frac{2R(n)}{c}\right)^2\right) \quad (3.19)$$

En un sistema SAR LFM-CW, la señal retrodispersada esta expresada por la ecuación (3.16), la misma que es reescrita:

$$s_b(t) = \exp(j(2\pi f_o \Delta t + 2\pi k_r t \Delta t - \pi k_r \Delta t^2)) \quad (3.20)$$

Reemplazando Δt en la ecuación (3.20), la señal $s_{cr}(t)$ es expresada en el dominio del tiempo en rango y azimut, como se muestra en la ecuación (3.21).

$$s_2(t, n) = \exp\left(j\frac{4\pi f_o R(n)}{c}\right) \exp\left(j\frac{4\pi k_r t R(n)}{c}\right) \exp\left(-j\pi k_r \left(\frac{2R(n)}{c}\right)^2\right) \quad (3.21)$$

Se implementa un simulador de datos crudos SAR en Matlab utilizando el principio de funcionamiento de la adquisición de los ecos durante el movimiento de la plataforma del sistema SAR, y teniendo en cuenta los parámetros iniciales SAR (metadatos), los cuales son: la frecuencia

central de la señal chirp, ancho de banda, frecuencia repetición de pulso, duración de pulso, ángulo de haz, velocidad del sensor SAR y la velocidad de la luz. Por otro lado, se determina el tiempo de vuelo de la plataforma aérea (UAV) con la ecuación $t_v = \frac{x_f - x_i}{2}$, donde: x_i es la posición inicial y x_f es la posición final de la plataforma del radar. Luego, se calcula las dimensiones de los ecos de la matriz de datos crudos SAR ($M \times N$). La dimensión en azimut se determina mediante la razón entre el tiempo de vuelo y el intervalo de repetición de pulso, mientras, la dimensión en rango se determina mediante la multiplicación entre la duración de pulso más el retardo promedio de la señal retrodispersada con la frecuencia de muestreo en tiempo rápido.

Luego, se determina el tiempo de muestreo en rango llamado tiempo rápido (fast time), el cual, es expresado por la siguiente ecuación $t = \frac{2R_0}{c} + \left(-\frac{N}{2} : \frac{N}{2}\right) \times T_s$. Finalmente, se inicializa los bucles for para M y N_b , e implementando la huella con las condicionales if siguiendo mostrado en el diagrama de flujo de la figura 21.

Si un blanco puntual es ubicado dentro de la huella del sistema de radar se determina la distancia r entre el sensor y la huella utilizando los parámetros iniciales como son: el tiempo de retardo de la señal retrodispersada Δt , el desplazamiento temporal D_r , la señal chirp S_{r1} y la señal chirp de onda continua S_{r2} utilizando las ecuaciones (3.19), y (3.21) respectivamente, es decir, el diagrama de flujo mostrado en la figura 21 es válida para radares de apertura sintética y radares de apertura sintética de onda continua.

Por otro lado, la expresión $x_u \leftarrow x_u + PRI * V_s$ representa el movimiento de la plataforma en la dirección de azimut, mientras almacena ecos con la expresión $m \leftarrow m + 1$ en cada fila de la matriz utilizando la estructura de datos crudos SAR de la figura 20. La reflectividad σ_0 se considera como una unidad debido a que se diseñó para una cantidad determinada de blancos puntuales

aislados e isotrópicos. La simulación de radar de apertura sintética termina cuando la plataforma recorre toda la trayectoria asignada generando señales crudas SAR en cada instante de tiempo.

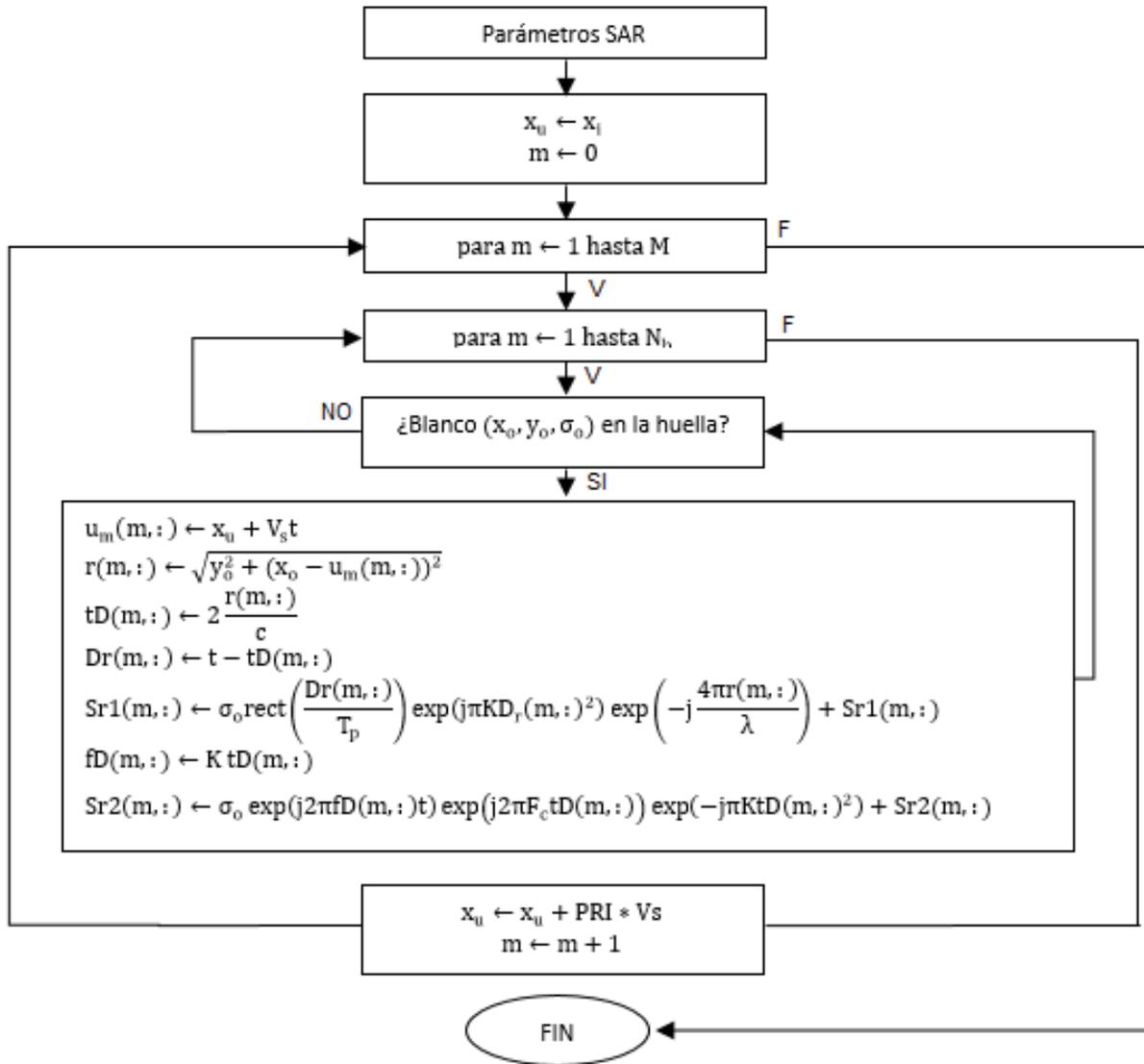


Figura 21: Simulador de datos crudos SAR

Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Simulador InSAR

La simulación de la interferometría de radar de apertura sintética se implementa para un blanco puntual aislado e isotrópico ubicado en la coordenada (x_0, y_0, z_0) utilizando la geometría InSAR de la figura 12, obteniendo las siguientes ecuaciones.

$$x_m = tV_s \quad (3.22)$$

$$R_1 = \sqrt{y_0^2 + (x_0 - x_m)^2 + (H - z_0)^2} \quad (3.23)$$

$$R_2 = \sqrt{(y_0 + B_y)^2 + (x_0 - x_m)^2 + (H + B_z - z_0)^2} \quad (3.24)$$

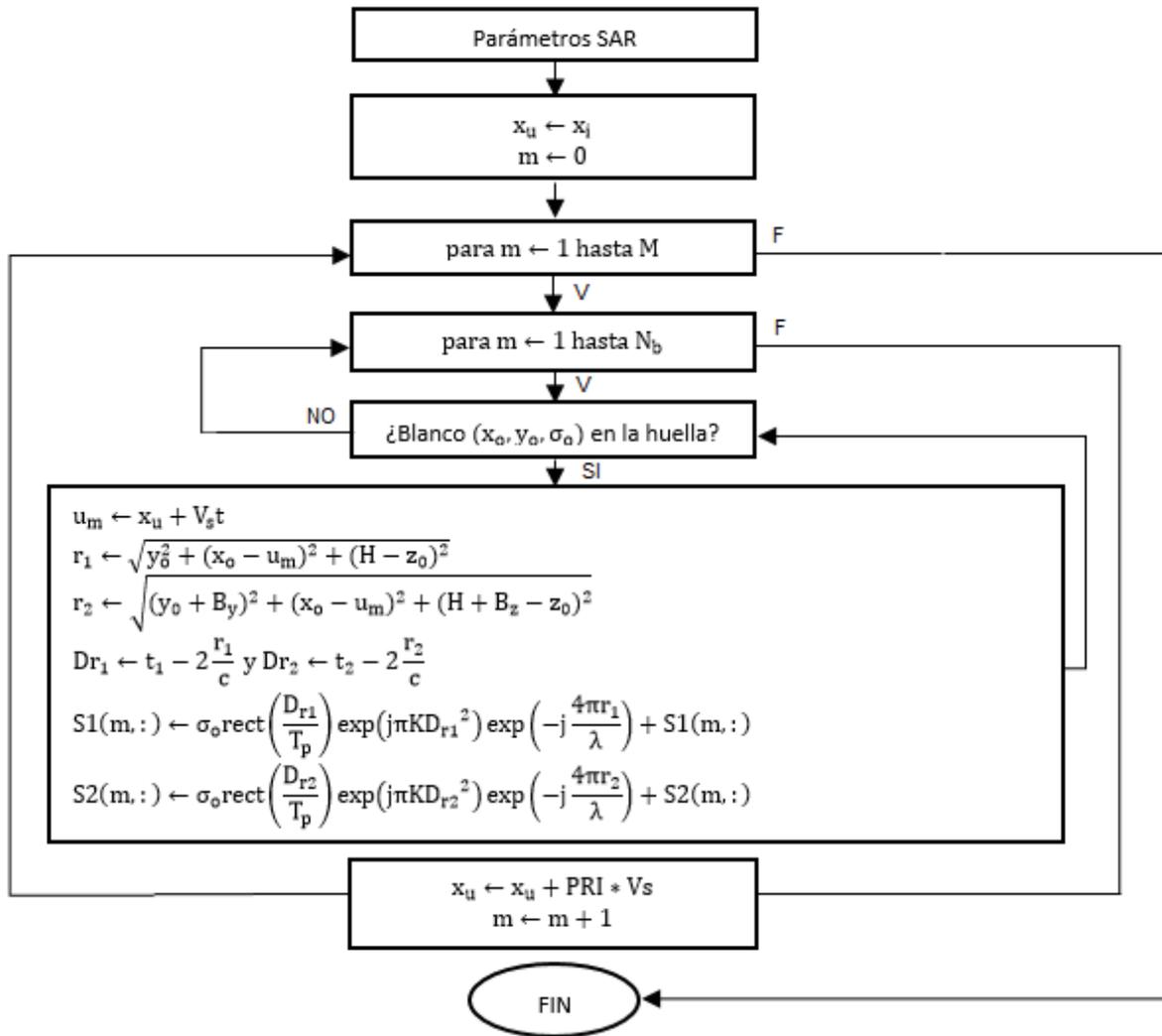


Figura 22: Simulador InSAR

Fuente: Elaboración propia

La simulación de la interferometría de un radar de apertura sintética para una cantidad determinada de blancos puntuales ubicados en tres dimensiones requieren de las ecuaciones (3.23) y (3.24) para generar las señales crudas SAR correspondientes a las antenas S_1 y S_2 .

$$S_1(n, t) = \sum_{k=1}^{N_b} \sigma_0 \text{rect} \left[\frac{t - \frac{2R_1(n)}{c}}{T_p} \right] \exp \left[-j \frac{4\pi R_1(n)}{\lambda} \right] \exp \left\{ j\pi k_r \left(t - \frac{2R_1(n)}{c} \right)^2 \right\} \quad (3.25)$$

$$S_2(n, t) = \sum_{k=1}^{N_b} \sigma_0 \text{rect} \left[\frac{t - \frac{2R_2(n)}{c}}{T_p} \right] \exp \left[-j \frac{4\pi R_2(n)}{\lambda} \right] \exp \left\{ j\pi k_r \left(t - \frac{2R_2(n)}{c} \right)^2 \right\} \quad (3.26)$$

3.2.3. Simulación de datos PolInSAR

El software PolSARproSim se utiliza para simular imágenes SAR completamente polarimétrico e interferométrico para aplicaciones de percepción remota. PolSARproSim genera datos en formato binario que no se exportan directamente en Matlab, por consiguiente, se implementa el diagrama de bloques de lectura para validar el procesamiento de imágenes SAR.

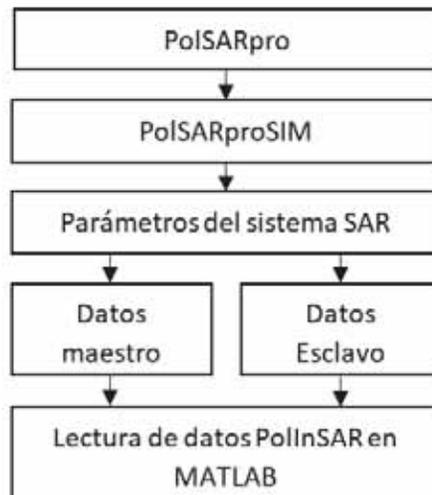


Figura 23: Lectura de datos binarios en Matlab

Fuente: Elaboración propia

La Agencia Espacial Europea (ESA) dispuso por defecto los parámetros iniciales del sistema de radar de apertura sintética E-SAR en la interfaz gráfica de PolSARproSim, es decir, se generan datos adecuados para aplicaciones de la cobertura forestal basado en el sensor E-SAR cuya frecuencia central de la señal chirp se encuentra en la banda L con un ángulo de incidencia de 45° para la dispersión volumétrica de los bosques.

Tabla 5*Parámetros iniciales SAR por defecto en PolSARproSim*

Parámetros E-SAR	Símbolo	Descripción
Banda de operación	---	Banda L
Polarización	---	Quad-Pol
Frecuencia	f_0	1.3GHz
Angulo de incidencia	θ	45°
Línea de base horizontal	B_y	10m
Línea de base vertical	B_z	1m
Resolución en azimut	R_{az}	1.5m
Resolución en rango	R_{rg}	1.06066m
Altura del árbol	h	18m
Número de filas	M	105
Número de columnas	N	141
Área circular del bosque	A_{bosque}	2827.45m ²
Longitud en azimut	L_x	104.760740m
Longitud en rango	L_y	140.760740m

Nota: Parámetros iniciales adecuados para la simulación de imágenes SAR de árboles, configuración por defecto, tomado de PolSARproSim (ESA).

PolSARproSim genera datos PolInSAR, los cuales son matrices de dispersión: S_{11} , S_{12} , S_{21} y S_{22} descritas por las ecuaciones (2.15) y (2.16), es decir, son datos polarimétricos SAR maestra y esclava.

Una imagen SAR tales como S_{11} es una variable compleja en formato binario que contiene $M \times N \times 2 \times 4$ bytes, tomando en cuenta este principio se implementa la función LecturaSAR que es útil para interpretar valores complejos de la matriz sinclair en Matlab para el testeado del procesamiento digital de imágenes SAR.

En el código 1, se observa que las variables M y N son dimensiones de la matriz de los datos en azimut y rango respectivamente, Dir es la ubicación del archivo, y SXX representa los datos crudos SAR, imágenes SAR o simplemente datos procesados en formato binario. Finalmente, $JSXX$ representa a la matriz interpretada en Matlab.

```

function JSXX=LecturaSAR(M,N,Dir,SXX)
fileID = fopen(fullfile(Dir,SXX));
dato1 = fread(fileID,[M 2*N],'float');
fclose(fileID);
dato=reshape(dato1,[1 2*N*M]);
pReal=dato(1:2:end);
pImag=dato(2:2:end);
complejo=complex(pReal,pImag);
aux=reshape(complejo,[N M]);
JSXX=aux.';
end

```

Código 1: Función de lectura de imágenes SAR

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, los datos crudos SAR adquiridos por el satélite ERS-2 son complejas y es proporcionado en formato “.raw”, es decir, son datos binarios que no se importan directamente a Matlab debido a que no existe un comando o software para tal caso, por consiguiente, se interpretan los datos teniendo en cuenta como base en el código 1 debido a que se realizan modificaciones según los metadatos y el tipo del dato matricial. Luego, los datos interpretados en Matlab son guardados en archivo “.mat” o “MAT-file” para el testeo del procesamiento de datos crudos SAR y el procesamiento de imágenes SAR.

3.3. Procesamiento de señales SAR

El procesamiento SAR se desarrolla utilizando uno de los algoritmos de enfoque más populares como son: el algoritmo range-Doppler, el algoritmo Omega-k y el algoritmo Chirp-Scaling. Estos algoritmos de enfoque se implementan en el dominio de la frecuencia para acelerar la velocidad del procesamiento, ya sea en el dominio range-Doppler o en el dominio bidimensional de la frecuencia. El desarrollo de estos algoritmos de enfoque es amplio, debido a que se pueden implementar de diversas formas cada uno de estos algoritmos, por consiguiente, se selecciona un algoritmo específico para la implementación del procesamiento digital de señales SAR utilizando la revisión bibliográfica.

3.3.1. Definición del algoritmo de enfoque

En la tesis de investigación para optar título de Ingeniero de Telecomunicaciones, se realizó un estudio comparativo entre el algoritmo range-Doppler y el algoritmo $\omega - k$ utilizando un simulador SAR 2D en Octave, concluyendo que el algoritmo range-Doppler presenta baja calidad para elevados ángulos squint; sin embargo, el algoritmo Omega-k muestra buena calidad para grandes aperturas sintéticas o ángulos de squint (Vasquez & Alvarado, 2018).

Por otro lado, en el estudio comparativo del algoritmo Omega-k frente a otros algoritmos, como son: el algoritmo RDA y Chirp Scaling, se concluye que el algoritmo Omega-k muestra mejor desempeño para grandes aperturas sintéticas o elevados ángulos de squint (Cumming, Neo, & Wong, 2003). Por esta razón, en la tesis se desarrolla el procesamiento SAR basado en el algoritmo Omega-k versión precisa.

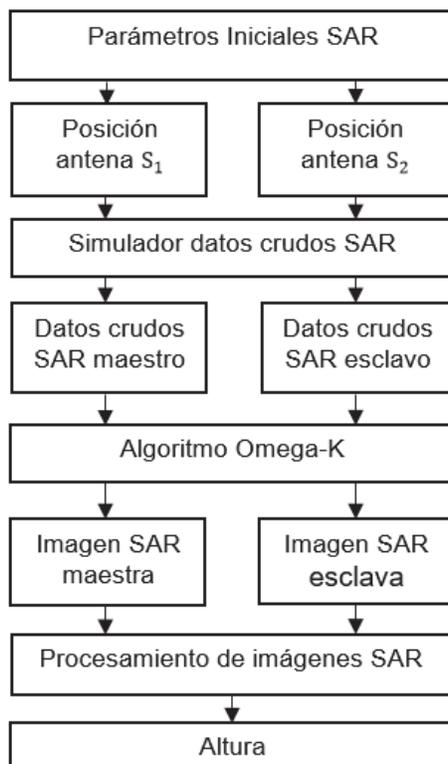


Figura 24: Procesamiento de señales SAR completo

Fuente: Elaboración propia

El algoritmo Omega-k versión precisa a implementar, utiliza los datos crudos SAR cuya estructura se muestra en la figura 20 para generar imágenes SAR, por consiguiente, el procesamiento SAR utilizando el algoritmo Omega-k se puede adecuar a cualquier sistema SAR debido a que solamente se requiere los parámetros iniciales SAR (metadatos). Las imágenes SAR tienen dimensiones en rango y azimut, y sus pixeles son numeros complejos. El procesamiento SAR completo incluyendo el procesamiento de imágenes se muestra en la figura 24.

3.3.2. Algoritmo Omega-K

El algoritmo Omega-k se implementa en el dominio bidimensional de la frecuencia por lo que es necesaria transformar las señales mediante una transformada de fourier bidimensional, es decir en rango y azimut, luego, reescribiendo la ecuación (3.11), se tiene:

$$s_a(t) = \exp(j(-2\pi f_0 \Delta t + \pi k_r (t - \Delta t)^2)) \quad (3.27)$$

Luego, se determina la transformada de Fourier en rango:

$$S_0(f_t, n) = \int_{-\infty}^{\infty} s_b(t, n) \exp(-j2\pi f_t t) dt \quad (3.28)$$

$$\theta(t) = -2\pi f_0 \Delta t + \pi k_r (t - \Delta t)^2 - 2\pi f_t t \quad (3.29)$$

Donde la fase de la señal S_0 es $\theta(t)$. Luego se aplica el método de la fase estacionaria, es decir, $\frac{d\theta(t)}{dt} = 0$. Resolviendo dicha igualdad se despeja el tiempo rápido.

$$t = \Delta t + \frac{f_t}{k_r} \quad (3.30)$$

Reemplazando la ecuación (3.30) en (3.29), se obtiene:

$$S_0(f_t, n) = \exp\left\{-j2\pi(f_0 + f_t)\Delta t - j\frac{\pi f_t^2}{k_r}\right\} \quad (3.31)$$

Además, reemplazando la ecuación (3.18) en Δt , se obtiene: $\Delta t = \frac{2\sqrt{R_0^2 + (V_s n)^2}}{c}$, luego, reemplazando en la señal S_0 se obtiene:

$$S_0(f_t, n) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi(f_0 + f_t)\Delta t \sqrt{R_0^2 + (V_s n)^2}}{c} - j \frac{\pi f_t^2}{k_r} \right\} \quad (3.32)$$

Se aplica la transformada de Fourier en azimut utilizando el método de la fase estacionaria obteniendo una señal en dominio bidimensional de la frecuencia, cuyas expresiones resultantes son iguales a las expresiones descritas por (Cumming & Wong, 2005).

$$S_{2df}(f_t, f_n) = \int_{-\infty}^{\infty} S_0(f_t, n) \exp(-j2\pi f_n n) dn \quad (3.33)$$

$$S_{2df}(f_t, f_n) = \exp \left(j \frac{4\pi R_0}{c} \sqrt{(f_0 + f_t)^2 - \left(\frac{c f_n}{2V_r} \right)^2} - \frac{\pi f_t^2}{k_r} \right) \quad (3.34)$$

La implementación del procesamiento digital de señales SAR utilizando el algoritmo Omega-k toma en cuenta la fase en el dominio bidimensional de la frecuencia $\theta_{2Df}(f_t, f_n)$ que se desarrolla siguiendo los pasos descritos en el diagrama de bloques de la figura 25 como son: la focalización general y diferencial.

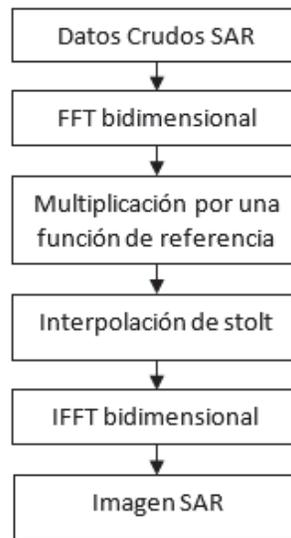


Figura 25: Algoritmo Omega-k versión precisa

Fuente: Elaboración propia

El procesamiento de señales SAR se realiza utilizando la fase descrita en la ecuación (3.34), y se implementa siguiendo los siguientes pasos:

1. Se aplica la transformada de Fourier en dos dimensiones tanto en rango y en azimut, es decir, se convierte los datos crudos SAR en el dominio bidimensional de la frecuencia expresada por la siguiente ecuación (Cumming & Wong, 2005).

$$\theta_{2Df}(f_t, f_n) = -\frac{4\pi R_o}{c} \sqrt{(f_0 + f_t)^2 - \left(\frac{cf_n}{2V_r}\right)^2} - \frac{\pi f_t^2}{k_r} \quad (3.35)$$

2. Luego, se realiza la focalización general mediante la multiplicación por una función de referencia, cuya fase de la señal de referencia esta descrita por la siguiente expresión matemática (Cumming & Wong, 2005).

$$\theta_{ref}(f_t, f_n) = +\frac{4\pi R_{ref}}{c} \sqrt{(f_0 + f_t)^2 - \left(\frac{cf_n}{2V_s}\right)^2} + \frac{\pi f_t^2}{k_r} \quad (3.36)$$

3. El resultado de la multiplicación en el dominio de la frecuencia denomindo focalización general está dado por la ecuación 3.17 (Cumming & Wong, 2005):

$$\theta_{RFM}(f_t, f_n) = -\frac{4\pi(R_{ref} - R_o)}{c} \sqrt{(f_0 + f_t)^2 - \left(\frac{cf_n}{2V_r}\right)^2} \quad (3.37)$$

4. Se implementa la focalización diferencial conocido también como la interpolación de stolt en el dominio bidimensional de la frecuencia, es decir, este método se basa en el reemplazo de la variable f_t por f'_t para la corrección de la curva migración de celdas en rango, dicha función se muestra en la ecuación 3.38, (Cumming & Wong, 2005).

$$\sqrt{(f_0 + f_t)^2 - \left(\frac{cf_n}{2V_r}\right)^2} = f'_t + f_0, \quad f'_t + f_0 = f_0 \sqrt{1 - \left(\frac{cf_n}{2f_0 V_r}\right)^2} + \frac{f_t}{\sqrt{1 - \left(\frac{cf_n}{2f_0 V_r}\right)^2}} \quad (3.38)$$

5. El resultado de la interpolación de stolt queda expresada de la siguiente manera (Cumming & Wong, 2005).

$$\theta_{\text{Stolt}}(f'_t, f_n) \cong \frac{4\pi(R_0 - R_{\text{ref}})}{c} (f_0 - f'_t) \quad (3.39)$$

6. Finalmente, se implementa la transformada inversa de Fourier en las direcciones de azimut y rango obteniendo una imagen SAR.

La focalización general funciona como la compresión en rango en el dominio bidimensional. Por otro lado, la interpolación de stolt funciona como la compresión en azimut, pero adicionalmente soluciona el problema de la curva de migración de celdas en rango de esta manera es efectiva para grandes aperturas sintéticas debido a que dicha curva aparece en un gran ángulo de haz horizontal o elevados ángulos squint.

3.3.3. Implementación del algoritmo Omega-k

El procesamiento de señales SAR se implementa en el dominio discreto en Matlab utilizando la transformada rápida de Fourier tanto unidimensional y bidimensional (fft y fft2). Por otro lado, se sabe que los datos crudos SAR están en el dominio temporal, cuyas dimensiones son M y N; aplicando la transformada de Fourier se convierte en una matriz de datos en el dominio bidimensional de la frecuencia con dimensiones M_{az} y N_{rg} , siendo estas dimensiones potencias de 2, realizando el zero padding para evitar la fuga de espectro. Existen ventanas para mejorar el procesamiento tales como la ventana: hanning, hamming, káiser y taylorwin siendo esta ultima la más utilizada en el procesamiento de datos crudos SAR.

Se implementa la focalización general aplicando el comando fft2 a los datos crudos SAR para convertir al dominio bidimensional de la frecuencia, luego, se genera los siguientes vectores como son: la frecuencia en rango $f_t = \left[-\frac{N_{\text{rg}}}{2} : \left(\frac{N_{\text{rg}}}{2} - 1 \right) \right] * \frac{f_s}{N_{\text{rg}}}$, es decir, se implementa un vector

de N_{rg} elementos multiplicado por una frecuencia de muestreo f_s . Por otro lado, la frecuencia en azimut $f_n = \left[-\frac{M_{az}}{2} : \left(\frac{M_{az}}{2} - 1 \right) \right] * \frac{PRF}{M_{az}}$ tiene M_{az} elementos, muestreado por la frecuencia en tiempo lento PRF con el propósito de construir una función de referencia descrita en la ecuación (3.36) basado en una distancia referencial igual a $\frac{y_m + y_M}{2}$, la cual es constante, luego se multiplica la función de referencia con los datos crudos en el dominio de la frecuencia quedando implementado la focalización general.

```

Nrg=2^nextpow2(N);
Maz=2^nextpow2(M);
sr1 = sr1.*(taylorwin(M).*ones(1,N));
sar=fft2(sr1,Maz,Nrg);
sar=fftshift(sar,2);
sar=fftshift(sar,1);
fn=(-Maz/2:(Maz/2-1))*PRF/Maz;
ft=(-Nrg/2:(Nrg/2-1))*fs/Nrg;
ref=(ym+yM)/2;
r=ones(Maz,Nrg)*ref;
ft1=f0+ft;
fn1=c*fn/(2*Vs);
Ft=ones(Maz,1).*ft1;
Fn=fn1'.*ones(1,Nrg);
F=sqrt((Ft).^2-Fn.^2);
Fref1=exp(+1j*(4*pi*F.*r/c+pi*ones(Maz,1).*ft.^2/kr));
sar1=sar.*Fref1;
figure, imagesc(abs(sar1)),title('Focalización general')

```

Código 2: Focalización general

Fuente: Elaboración propia

La focalización diferencial depende de la implementación del vector de la frecuencia en rango f_t' descrita en la ecuación (3.38), este paso, se realiza mediante el cambio de variable f_t por f_t' utilizando el comando interp1. Finalmente, se aplica la transformada inversa de Fourier bidimensional utilizando el comando ifft2, obteniendo una imagen SAR comprimida en rango y azimut. En el código 3, se observa una matriz de datos crudos SAR con dimensiones M y N, ref es

una distancia promedio entre rango máximo y mínimo, mientras tanto F es la función de referencia implementada.

```

D=sqrt(1-(lambda*fn/(2*Vs*f0)).^2);
ftp=f0*(D'-1)+ft./D';
% ftb2=(f0+ft).^2;
% fp2=((c/(2*Vs)).^2)*fn;
% [Ftb2,Fn2]=meshgrid(ftb2,fp2);
% ftp=sqrt(Ftb2+Fn2)-f0;
isar1=zeros(Maz,Nrg);
for ii=1:Maz
isar1(ii,:)=interp1(ft(:),sar1(ii,:),ftp(ii,:),'spline','extrap');
end
sar1=ifft2(isar1);
figure,imagesc(abs(sar1)),xlabel('Rango'),ylabel('Azimut'),...
title('Focalizacion diferencial')

```

Código 3: Focalización diferencial (Interpolación de stolt)

Fuente: Elaboración propia

En los códigos 2 y 3, se muestran las partes más importantes de la implementación del algoritmo Omega-k; sin embargo, para mejorar la calidad de una imagen SAR se agregan filtros, para esta tesis se utilizó el filtro multilook para eliminar el ruido speckle llamado también como ruido multiplicativo que es bastante común en imágenes SAR.

3.4. Procesamiento en sistemas SAR LFM-CW

El procesamiento digital de señales en sistemas SAR de onda continua es poco explorado, por lo tanto, se modifica el algoritmo Omega-k versión precisa para el procesamiento de datos crudos SAR LFM-CW, la cual, es instalada generalmente en plataformas aéreas.

3.4.1. Desarrollo del algoritmo Omega-k

En la ecuación (3.16), el término $\Delta t^2 \rightarrow 0$, entonces, se desprecia la expresión $\pi k_r \Delta t^2$ quedando expresado por la ecuación (3.40).

$$s_o(t, n) = \exp j(2\pi f_0 \Delta t + 2\pi k_r t \Delta t) \quad (3.40)$$

Luego, se aplica la transformada de Fourier en rango y la frecuencia central de la señal chirp f_0 es intervenido por la frecuencia en rango: $f_0 \rightarrow f_0 + f_t$ (Zozaya A. , 2017).

$$S(f_t, n) = \int_{-\frac{t_0}{2}}^{\frac{t_0}{2}} s_o(t, n) \exp(-j2\pi f_t t) dt \quad (3.41)$$

$$S(f_t, n) = t_0 \text{sinc}(\pi t_0 (f_t - k_r \Delta t)) \exp(2\pi (f_o + f_t) \Delta t) \quad (3.42)$$

Donde t_0 es la duración de pulso o intervalo repetición de pulso, luego, se tiene en cuenta el tiempo de retardo de la señal retro dispersada en el receptor del sistema SAR como: $\Delta t = \alpha \frac{2R(n)}{c}$, siendo α conocida como factor de doppler y está dada por la ecuación (3.40) (Wang, et al., 2010).

$$\alpha = \frac{c^2}{c^2 - V_s^2} \quad (3.43)$$

Donde V_s es la velocidad de la plataforma SAR. La UNSAAC posee un vehículo aéreo no tripulado UAV Matrice 600 pro cuya velocidad máxima es 18 m/s . Las plataformas aéreas como el sistema E-SAR tiene una velocidad máxima de 95 m/s y el sistema UAVSAR tiene una velocidad máxima de 250 m/s . Por lo tanto, el factor de doppler es $\alpha \cong 1$, entonces, la ecuación se transforma en (3.44).

$$S(f_t, n) = t_0 \text{sinc} \left\{ \pi t_0 \left(f_t - \frac{2k_r R(n)}{c} \right) \right\} \exp \left\{ \frac{4\pi (f_o + f_t) R(n)}{c} \right\} \quad (3.44)$$

Se aplica la transformada de Fourier en azimut, cuya fase en el dominio del tiempo en azimut de la señal S es $\theta(n)$.

$$S(f_t, f_n) = \int_{-\infty}^{\infty} s_o(f_t, n) \exp(-j2\pi f_n n) dn \quad (3.45)$$

$$\theta(n) = \frac{4\pi (f_o + f_t)}{c} \sqrt{R_o^2 + (V_s n)^2} - j2\pi f_n n \quad (3.46)$$

La integral se resuelve mediante el método de la fase estacionaria que consiste en maximizar dicha fase mediante una derivada respecto al dominio del tiempo e igualando a cero

$\frac{d\theta(n)}{dn} = 0$, se obtiene:

$$n = \frac{cf_n R_o}{2V_s \sqrt{(f_o + f_t)^2 - \left(\frac{cf_n}{2V_s}\right)^2}} \quad (3.47)$$

Reemplazando la ecuación (3.47) en (3.46), se obtiene:

$$\theta(f_t, f_n) = \frac{4\pi R_o}{c} \sqrt{(f_o + f_t)^2 - \left(\frac{cf_n}{2V_s}\right)^2} \quad (3.48)$$

Finalmente, los datos crudos SAR en el dominio bidimensional de la frecuencia están expresadas por la siguiente ecuación:

$$S(f_t, f_n) = t_o \text{sinc}(\pi t_o (f_t - k_r \Delta t)) \exp\left(j \frac{4\pi R_o}{c} \sqrt{(f_o + f_t)^2 - \left(\frac{cf_n}{2V_s}\right)^2}\right) \quad (3.49)$$

El procesamiento de datos crudos SAR LFM-CW en el dominio bidimensional de la frecuencia, se implementa tomando en cuenta solamente la fase.

$$S(f_t, f_n) = \exp\left(j \frac{4\pi R_o}{c} \sqrt{(f_o + f_t)^2 - \left(\frac{cf_n}{2V_s}\right)^2}\right) \quad (3.50)$$

El procesamiento digital de señales en radares SAR LFM-CW se divide en dos partes, como son: La focalización general que comprende la multiplicación por la función de referencia y la focalización diferencial conocida también como interpolación de stolt, y se implementa siguiendo los siguientes pasos:

1. Como primer paso, se aplica la transformada bidimensional de la frecuencia a los datos crudos SAR LFM-CW obteniendo una fase descrita por la ecuación (3.49).
2. Luego, se implementa la focalización general construyendo una fase de referencial a partir de la ecuación (3.50), como se muestra en la expresión matemática (3.51).

$$\theta_{\text{ref}}(f_t, f_n) = \exp\left(-j \frac{4\pi R_{\text{ref}}}{c} \sqrt{(f_o + f_t)^2 - \left(\frac{cf_n}{2V_s}\right)^2}\right) \quad (3.51)$$

3. El resultado de la focalización general está dado por la ecuación (3.52):

$$\theta_{\text{RFM}}(f_t, f_n) = -\frac{4\pi(R_{\text{ref}} - R_o)}{c} \sqrt{(f_o + f_t)^2 - \left(\frac{cf_n}{2V_s}\right)^2} \quad (3.52)$$

4. La focalización diferencial se realiza mediante el reemplazo de variables de f_t por f'_t , similar al caso del radar SAR pulsado, por consiguiente para el caso del sistema SAR LFM-CW se implementa mediante una diferencia entre el factor cuadrático en el dominio bidimensional y el factor cuadrático en el dominio doppler con el fin de corregir la curva de migración de celdas en rango.

$$f'_t = D(f_t, f_n) - D(f_n) \quad (3.53)$$

$$f'_t = \sqrt{(f_o + f_t)^2 - \left(\frac{cf_n}{2V_s}\right)^2} - f_o \sqrt{1 - \left(\frac{cf_n}{2V_s f_o}\right)^2} \quad (3.54)$$

5. El resultado de la interpolación de stolt queda similar a la ecuación (3.39) que se reescribe como se muestra (Cumming & Wong, 2005):

$$\theta_{\text{Stolt}}(f'_t, f_n) \cong \frac{4\pi(R_o - R_{\text{ref}})}{c} (f_o - f'_t) \quad (3.55)$$

6. Finalmente, se realiza la transformada inversa de Fourier en azimut obteniendo una imagen SAR.

En la focalización general, se implementa la compresión de los datos crudos SAR en rango para el caso del sistema SAR LFM-CW mediante una transformada de Fourier en rango, mientras la focalización diferencial comprime los datos en azimut; sin embargo, no se aplica la transformada inversa de Fourier en azimut para sistemas SAR LFM-CW debido a que dicha transformada empeora la imagen SAR, lo que difiere el procesamiento de señales frente a sensores SAR pulsado.

Por otro lado, en el procesamiento digital de señales se necesita determinar el rango de referencia, para ello, se utiliza la figura 26, donde se observa la señal LFM-CW triangular transmitida y recibida, cuya tasa de cambio de frecuencia es $k_r = \frac{\Delta f}{t_0}$, mientras la diferencia de frecuencia está dada por la ecuación (3.56).

$$f_b = \Delta t k_r \quad (3.56)$$

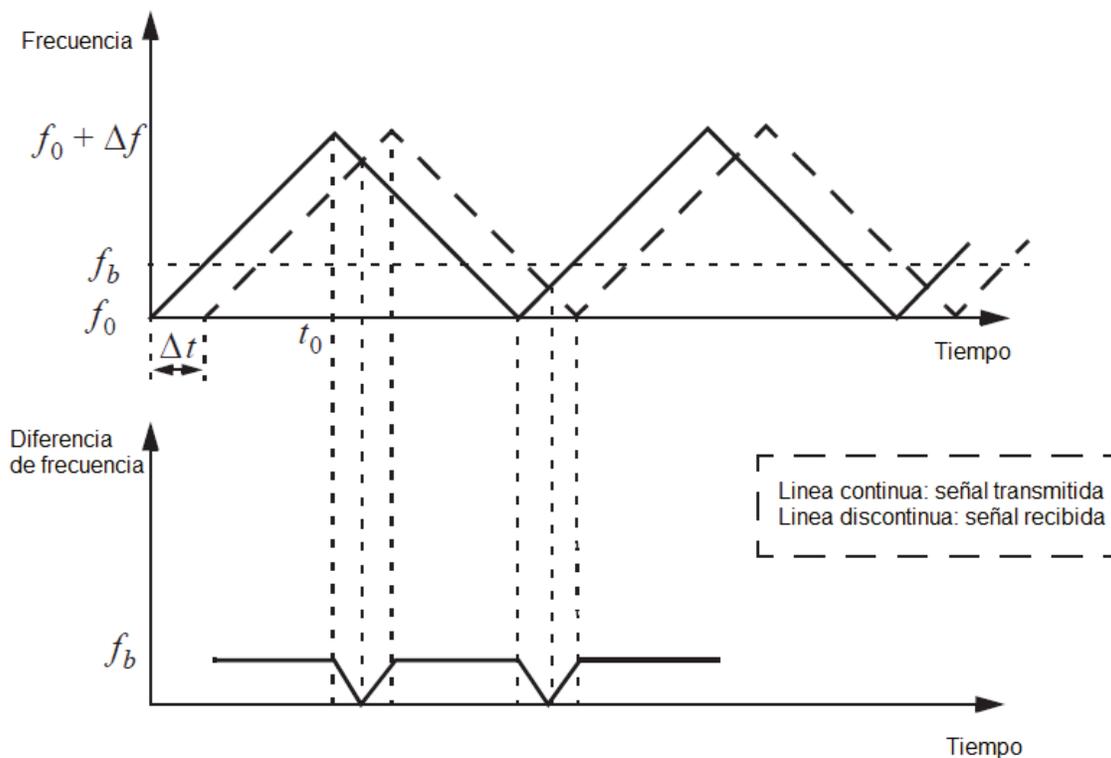


Figura 26: Diferencia de frecuencia para blancos estacionarios

Fuente: (Mahafza, 2000)

Si se conoce que el tiempo de retardo entre el radar y el blanco puntual $\Delta t = \frac{2R}{c}$, reemplazando en la ecuación (3.56) y despejando el rango se obtiene:

$$R_{\text{ref}} = \frac{c f_b}{2k_r} \quad (3.57)$$

3.4.2. Implementación del algoritmo Omega-K

La implementación del procesamiento para sistemas SAR LFM-CW es similar al caso del procesamiento en sensores SAR pulsado, por lo tanto, el procesamiento basado en el algoritmo Omega-k modificado, cuyas partes principales tales como: la implementación de la focalización general y diferencial se muestran en los códigos 4 y 5 respectivamente.

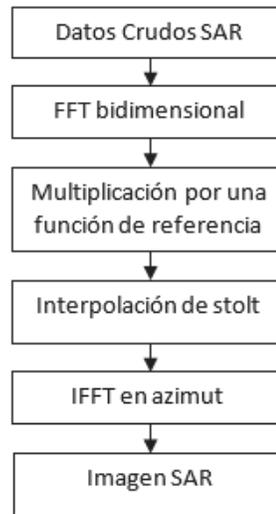


Figura 27: Algoritmo Omega-k modificado

Fuente: Elaboración propia

La focalización general comprende los pasos establecidos 1 y 2, para tal caso, se implementa el procesamiento generando el vector de la frecuencia en rango $f_t = [0: N_{rg}] \frac{f_s}{N_{rg}}$ y el vector de la frecuencia en azimut $f_n = \left[-\frac{M_{az}}{2} : \left(\frac{M_{az}}{2} - 1 \right) \right] * \frac{PRF}{M_{az}}$ siendo: la frecuencia de muestreo en tiempo rápido f_s y la frecuencia de muestreo en tiempo lento PRF. Luego, se implementa el vector de distancias en rango $r = \frac{cf_t}{2k_r}$, con el objetivo de implementar la función de referencia descrita en la ecuación (3.51).

La focalización diferencial comprende los pasos 3, 4 y 5, soluciona el problema de la implementación interpolación para sistemas SAR LFM-CW utilizando la ecuación (3.54), es

decir f_t' para realizar el cambio de variables que corrige la curva de migración de celdas en rango, luego, se aplica la transformada inversa de Fourier en azimut siendo esto suficiente para generar una imagen SAR; sin embargo, si se aplica una transformada inversa bidimensional empeora la calidad de una imagen SAR.

```

Nrg=2^nextpow2(N);
Maz=2^nextpow2(M);
sr2 = sr2.*(taylorwin(M).*ones(1,N));
sar=fft2(sr2,Maz,Nrg);
sar=fftshift(sar,1);
fn=(-Maz/2:(Maz/2-1))*PRF/Maz;
ft=(0:(Nrg-1))*fs/Nrg;
r=(c/(2*kr))*ft;
ft1=f0+ft;
fn1=c*fn/(2*Vs);
Ft=ones(Maz,1).*ft1;
Fn=fn1' .*ones(1,Nrg);
F=sqrt((Ft).^2-Fn.^2);
D=sqrt(1-(lambda*fn/(2*Vs*f0)).^2);
Fref1=exp(-1j*(4*pi*F.*(ones(Maz,1).*r)/c));
sar=sar.*Fref1;
figure, imagesc(abs(sar)), title('Focalización general')

```

Código 4: Focalización general

Fuente: Elaboración propia

```

fn2=fn' .*ones(1,Nrg);
ftp=F-f0*sqrt(1-(lambda*fn2/(2*Vs)).^2);
isar=zeros(Maz,Nrg);
for ii=1:Maz
isar(ii,:)=interp1(ft(:),sar(ii,:),ftp(ii,:),'linear','extrap');
end
sar1=ifft(isar,[],1);
figure, imagesc(abs(sar1)),title('Focalización diferencial')

```

Código 5: Focalización diferencial (Interpolación de stolt)

Fuente: Elaboración propia

En el enfoque de datos crudos SAR LFM-CW, la imagen obtenida puede ser mejorado por un filtro multilook y una compensación en rango aproximada que es descrita por la función t^3 (Long & Stringham, 2011).

3.5. Interferometría SAR

El procesamiento digital interferométrico SAR es la clave para determinar la altura forestal ya sea usando datos con una sola polarización o hasta datos Quad-Pol, es decir datos PolInSAR. El procesamiento InSAR implementado en este proyecto de tesis consta de los siguientes pasos: Lectura de datos en Matlab, calibración de imágenes SAR, cálculo del coeficiente de correlación, generación de la interferograma, fase de aplanamiento o remoción de la fase de la curvatura de la tierra, conversión de fase a altura y el uso del filtro de la mediana.

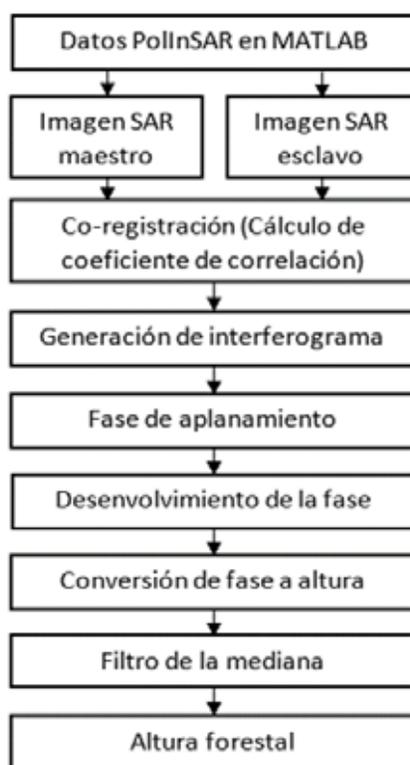


Figura 28: Procesamiento de imágenes SAR

Fuente: Elaboración propia

La calibración de imágenes SAR no es necesaria para radares Dual-Pol, ya sea con polarizaciones iguales o cruzadas, como es el caso de la imagen SAR previamente obtenida con el algoritmo Omega-k. La calibración de las imágenes esclava y maestra se realizan utilizando las siguientes expresiones matemáticas (Cloude):

$$s_1 = w_1^1 \frac{(s_{hh}^1 + s_{vv}^1)}{\sqrt{2}} + w_1^2 \frac{(s_{hh}^1 - s_{vv}^1)}{\sqrt{2}} + w_1^3 \sqrt{2} s_{hv}^1 \quad (3.58)$$

$$s_2 = w_2^1 \frac{(s_{hh}^2 + s_{vv}^2)}{\sqrt{2}} + w_2^2 \frac{(s_{hh}^2 - s_{vv}^2)}{\sqrt{2}} + w_2^3 \sqrt{2} s_{hv}^2 \quad (3.59)$$

Donde: s_1 representa una imagen SAR maestra y s_2 representa una imagen SAR esclava debidamente calibrados utilizando datos InSAR completamente polarimétricos. Por otro lado, el vector de los pesos estan dadas por la siguiente expresión matemática (Cloude):

$$w = [w^1 \ w^2 \ w^3] = [\cos\alpha \ \sin\alpha \cos\beta e^{j\varepsilon} \ \sin\alpha \sin\beta e^{j\mu}]^T \quad (3.60)$$

Luego, se obtienen los valores para la calibración de las imagenes SAR para cada polarizacion sea lineal o circular.

Tabla 6

Valores para la calibración de imágenes SAR

Polarización	α	β	ε	μ	w^1	w^2	w^3
HH	45°	0°	0°	0°	0.707	0.707	0
HV	90°	90°	0°	0°	0	0	1
VV	45°	180°	0°	0°	0.707	-0.707	0
HH + VV	0°	0°	0°	0°	1	0	0
HH - VV	90°	0°	0°	0°	0	1	0
LL	90°	45°	0°	90°	0	0.707	0.707i
LR	0°	0°	0°	0°	1	0	0
RR	90°	45°	0°	-90°	0	0.707	-0.707i

Nota: Los valores para la calibración de imágenes SAR es tomado de (Cloude)

En la tabla 6, se observa los ángulos de polarización tales como son: α , β , ε y μ , además, también se observa polarizaciones lineales como son: HH, HV, VV, HH+VV, HH-VV y las polarizaciones circulares: LL, LR y RR que se calibran utilizando el código 7 denominado función de calibración de imágenes SAR, luego, dichos datos calibrados se utilizan para el testeo de la implementación del procesamiento digital de imagenes SAR.

```

function Image_cal=ImagenPol_SAR(IHH,IHV,IVV,alfa,beta,e,u)
% IHH: Imagen SAR HH
% IHV: Imagen SAR HV
% IVV: Imagen SAR VV
w1=[cos(alfa) sin(alfa)*cos(beta)*exp(1j*e) sin(alfa)*sin(beta)*exp(1j*u)];
Image_cal=w1(:,1)*((IHH+IVV)/sqrt(2))+w1(:,2)*((IHH-IVV)./sqrt(2))+....
w1(:,3)*IHV*sqrt(2);
end

```

Código 6: Función de calibración de imágenes SAR

Fuente: Elaboración propia

En el código 6, los parámetros IHH, IHV y IVV representan a las imágenes SAR polarimétricos, mientras tanto, alfa, beta, e y u son ángulos. Por otro lado, el parámetro Image_cal representa a una imagen SAR calibrada.

```

%% Polarización HH
alfa=deg2rad(45);
beta=deg2rad(0);
e=deg2rad(0);
u=deg2rad(0);
MHH=ImagenPol_SAR(MS11,MS12,MS22,alfa,beta,e,u);
SHH=ImagenPol_SAR(SS11,SS12,SS22,alfa,beta,e,u);
%% Polarización HV
alfa=deg2rad(90);
beta=deg2rad(90);
e=deg2rad(0);
u=deg2rad(0);
MHV=ImagenPol_SAR(MS11,MS12,MS22,alfa,beta,e,u);
SHV=ImagenPol_SAR(SS11,SS12,SS22,alfa,beta,e,u);
%% Polarización VV
alfa=deg2rad(45);
beta=deg2rad(180);
e=deg2rad(0);
u=deg2rad(0);
MVV=ImagenPol_SAR(MS11,MS12,MS22,alfa,beta,e,u);
SVV=ImagenPol_SAR(SS11,SS12,SS22,alfa,beta,e,u);

```

Código 7: Calibración de imágenes SAR

Fuente: Elaboración propia

Luego, se utiliza la función de calibración previamente implementada para cada polarización, como son: HH, HV y VV aplicando a la matriz Sinclair maestra y a la matriz Sinclair esclava usando los valores de calibración de la tabla 6. Esta técnica es válida para datos recolectados por la polarimetría interferométría SAR mono estáticos; sin embargo, estos pasos se

pueden despreciar para la interferometría de una sola polarización. En la implementación del código 7, se observa imágenes SAR maestra calibradas las cuales son: MHH, MHV y MVV. Las imágenes esclavas calibradas son: SHH, SHV y SVV teniendo en cuenta la igualdad $S_{HV} = S_{VH}$, debido a que el sistema SAR simulado es mono estático, siendo esta una característica propia de los sistemas de radar mono estático.

3.5.1. Corregistación

Se determina el grado de coherencia entre una imagen SAR maestra y una imagen SAR esclava calibrada, para ello, se procede a calcular el coeficiente de correlación utilizando la siguiente expresión matemática:

$$\gamma = \frac{\langle s_1 s_2^* \rangle}{\sqrt{\langle s_1 s_1^* \rangle} \sqrt{\langle s_2 s_2^* \rangle}} \quad (3.61)$$

En forma práctica, se utiliza la siguiente ecuación matemática (Cloude):

$$\gamma = |\gamma| \exp(j\varphi) = \frac{\sum_{i=1}^L s_{1i} s_{2i}^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^L s_{1i} s_{1i}^*} \sqrt{\sum_{i=1}^L s_{2i} s_{2i}^*}} \quad (3.62)$$

Donde: $0 \leq |\gamma| \leq 1$ y $-\pi \leq \varphi \leq \pi$, en la cual $|\gamma| = 1$ indica un buen grado de coherencia entre las imágenes SAR maestra y esclava adecuado para realizar el procesamiento digital de imágenes.

3.5.2. Interferograma

La interferograma se basa en la multiplicación de los datos complejos maestro con la conjugada de los datos complejos esclavo resultando otro dato complejo. La fase dicho dato complejo, se le conoce como interferograma que es descrita por la ecuación 3.64 (Hein, 2004).

$$s = s_1 s_2^* \quad (3.63)$$

$$s = A \exp(j\varphi) \quad (3.64)$$

Donde, $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ se le denomina como interferograma, y es el corazón del procesamiento interferométrico.

3.5.3. Remoción de fase de aplanamiento

La fase de aplanamiento o flat earth, se realiza con el objetivo de remover la curvatura de la tierra, descrita por la ecuación 3.65 (Cloude):

$$\varphi_{fe} = \frac{4\pi}{\lambda} (R_2 - R_1) \quad (3.65)$$

Donde: R_1 es el rango inclinado perteneciente a la antena maestra, mientras R_2 pertenece a la antena esclava.

$$R_1 = \sqrt{h^2 + y^2} \quad (3.66)$$

$$R_2 = \sqrt{h^2 + (y + B)^2} \quad (3.67)$$

PolSARproSIM provee la matriz φ_{fe} y se puede calcular utilizando la geometría, pero en el caso de otros sensores tales como UAVSAR provee información de latitud, altitud y longitud para determinar la fase de aplanamiento. La remoción de fase se implementa utilizando la expresión matemática que se menciona a continuación (Cloude):

$$S = s_1 s_2^* \exp(-j\varphi_{fe}) \quad (3.68)$$

3.5.4. Desenvolvimiento de la fase

El desenvolvimiento de la fase o unwrapping, en esta etapa la fase queda expresado en múltiplos de 2π , específicamente en el rango de $[0 \ 2\pi]$, se usa para evitar cambios elevados de fase o discontinuidad solucionando la ambigüedad del mapeo de la altura.

En la figura 29, se muestra el diagrama de flujo del desenvolvimiento de fase para una dimensión, donde: φ es la fase con flat earth removida y φ_1 es la fase con desenvolvimiento de fase. En el procesamiento digital de imágenes SAR se utiliza el diagrama de flujo para las direcciones de azimut y rango.

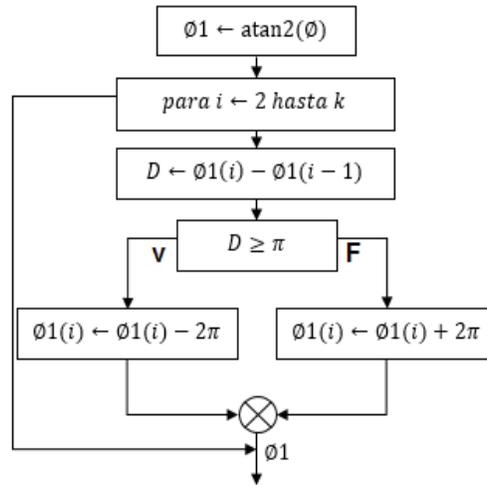


Figura 29: Desenvolvimiento de fase

Fuente: Elaboración propia

3.5.5. Conversión de fase a altura

Como primer paso, utilizando los parámetros iniciales de sistema SAR, se estima el número de onda vertical k_z utilizando la ecuación 3.70 (Cloude):

$$\Delta\theta = \tan^{-1}\left(\tan\theta + \frac{B}{H}\right) - \theta \quad (3.69)$$

$$k_z = \frac{4\pi\Delta\theta}{\lambda \sin\theta} \quad (3.70)$$

Donde: $B = \sqrt{B_z^2 + B_y^2}$ es la línea de base resultante, mientras λ es la longitud de onda. La altura se mediante la siguiente relación matemática: $h = \varphi_z/k_z$, siendo φ_z la fase interferométrica.

La altura de los bosques h están expresadas mediante matrices de orden $M \times N$, luego se utiliza el filtro de la mediana con ventana 7×7 eliminar el ruido gaussiano. La implementación completa del procesamiento digital de imágenes SAR se muestran en los anexos, y los resultados se muestran en el próximo capítulo.

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1. Introducción

La UNSAAC evalúa la posibilidad de la implementación de un sistema de radar utilizando equipos como: USRP N210 y VNA 9913, estos dispositivos tienen una frecuencia de operación máxima de 6GHz, y las antenas vivaldi poseen un gran ancho de banda y ancho de haz. Luego, para realizar la síntesis del radar (SAR), el proyecto de la UNSAAC plantea utilizar una plataforma aérea como el vehículo aéreo no tripulado UAV Matrice 600pro cuya velocidad máxima es 18 m/s . Por estas razones, se simula el sistema SAR con frecuencia central de la señal chirp f_0 y ancho de haz $\Delta\theta$ variables para observar la calidad de enfoque del algoritmo Omega-k frente a variaciones de dichos estímulos.

Tabla 7

Parámetros de simulación del sistema SAR

Parámetros SAR	Símbolo	Valor
Frecuencia	f_0	1.3GHz (variable)
Ancho de banda	B	150MHz
Duración de pulso	T_p	5us
Frecuencia de repetición de pulso	PRF	100Hz
Ancho de Haz	$\Delta\theta$	11° (Variable)
Velocidad de la plataforma	V_s	15 m/s
Velocidad de la propagación	c	$3 * 10^8 \text{ m/s}$
Posición inicial de la plataforma	x_i	-50m
Posición final de la plataforma	x_f	50m
Rango cercano	y _m	20m
Rango lejano	y _M	450m
Número de blancos	N	1
Posición	(x_0, y_0, z_0)	(0,235,0)
RCS del blanco	σ	1 m^2

Nota: Los parámetros iniciales del simulador de datos crudos SAR, siendo las principales la frecuencia central de la señal chirp y el ancho de haz de la antena SAR para el análisis del algoritmo Omega-k. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Sistema SAR

4.2.1. Simulador de dato crudos SAR

La simulación del sistema SAR se implementó tomando en cuenta los parámetros iniciales de la tabla 7, generando ecos de una cantidad determinada de blancos puntuales.

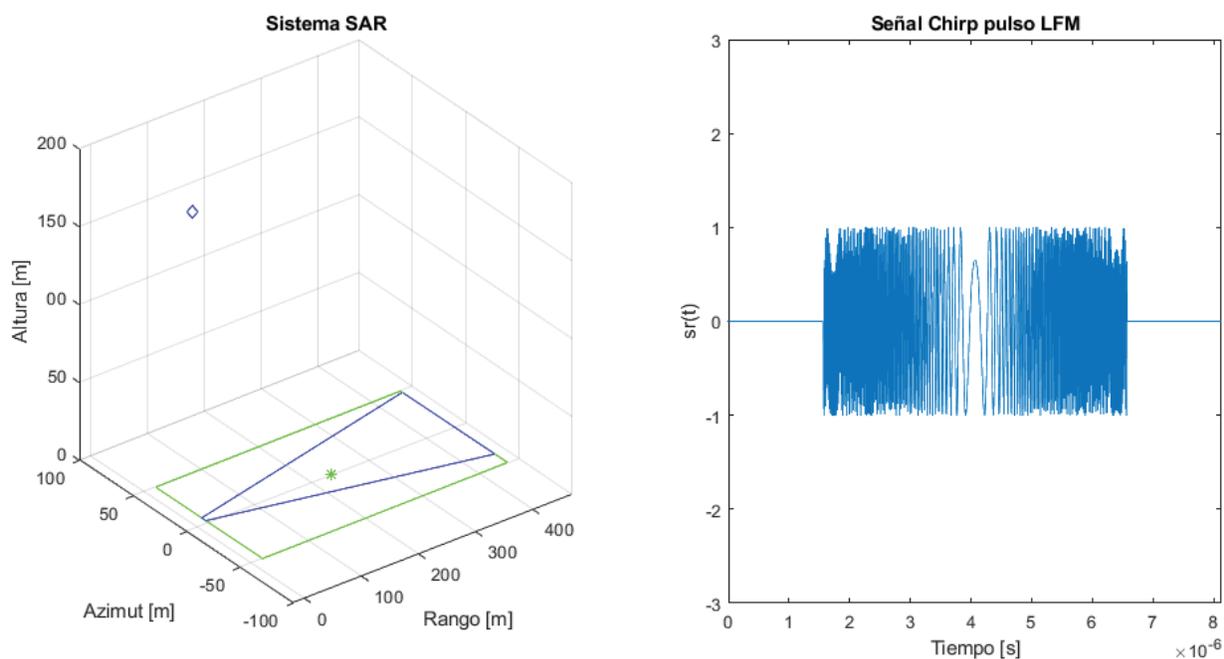


Figura 30: Simulador de datos crudos SAR

Fuente: Elaboración propia

En la figura 30, se muestra la adquisición de señales retrodispersadas durante el movimiento del sistema SAR en dirección de azimut simulando el principio de síntesis en la adquisición de señales retro dispersadas provenientes de objetivos de interés. Por otro lado, en dicha figura se observa un rectángulo (color verde) que representa la zona a ser sondeada, el asterisco (color verde) representa a un blanco puntual y el cuadrilátero (color azul) representa la huella de la antena en el plano del rango del sistema, mientras el cuadrilátero diminuto (color azul)

representa la antena del sistema. La matriz de datos crudos SAR resultante cuya magnitud y fase son mostrados en las figuras 31, 32 y 33 respectivamente.

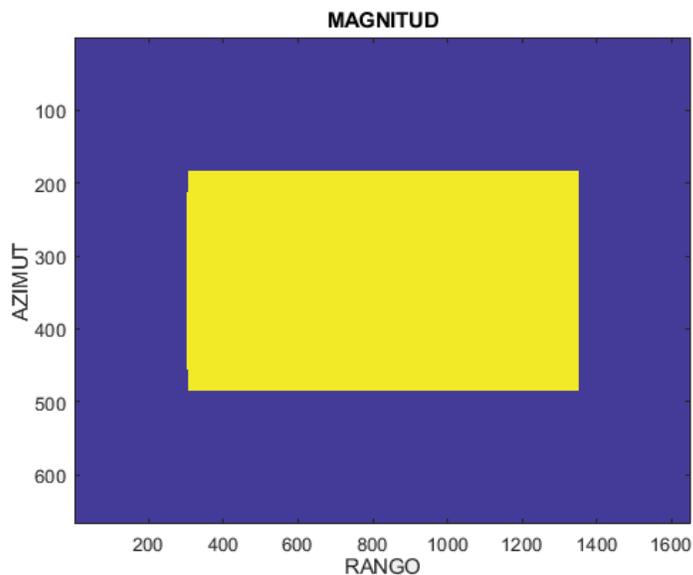


Figura 31: Magnitud de los datos crudos SAR

Fuente: Elaboración propia

La fase de los datos crudos SAR para una pendiente positiva tiene una forma de una hipérbola conocido como upchirp.

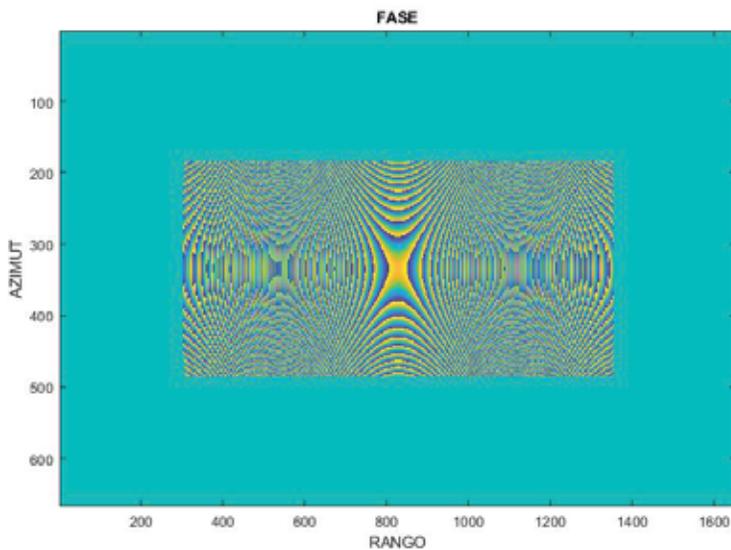


Figura 32: Fase de los datos crudos SAR (Upchirp)

Fuente: Elaboración propia

Mientras tanto, para una pendiente negativa la fase de los datos crudos SAR tiene una forma de una elipse conocido como downchirp.

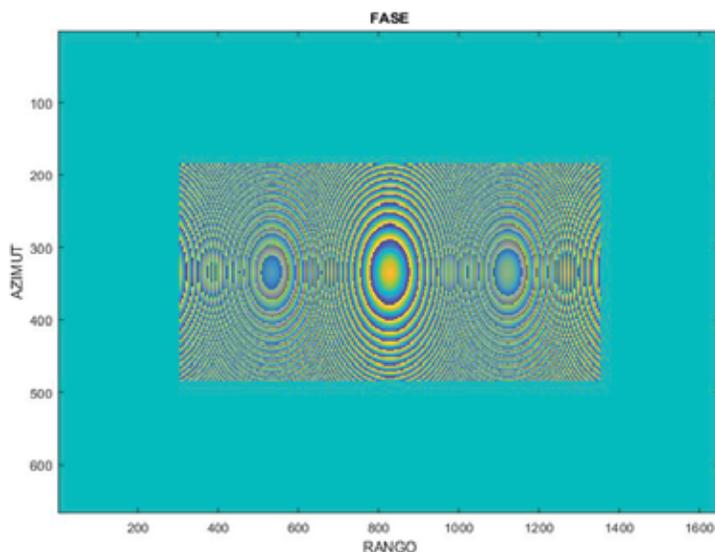


Figura 33: Fase de los datos crudos SAR (Downchirp)

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Análisis de calidad del algoritmo Omega-k

El enfoque de datos crudos SAR se realizó utilizando el algoritmo Omega-k previamente implementado.

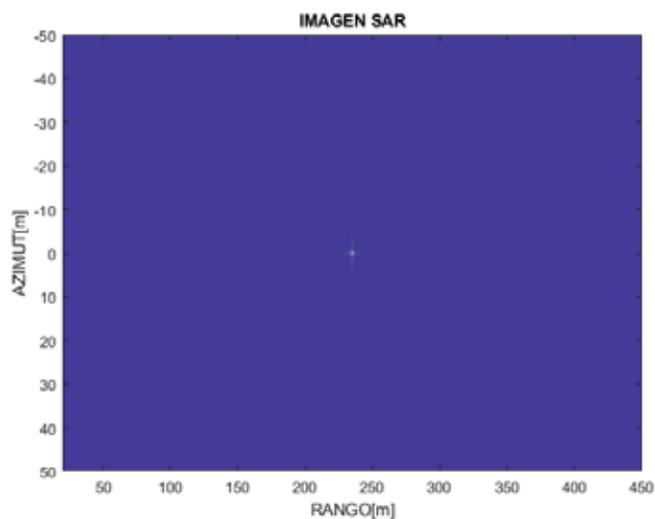


Figura 34: Imagen SAR de un blanco puntual

Fuente: Elaboración propia

En la figura 34 se muestra una imagen SAR, por lo tanto, el algoritmo Omega-k está verificado, adicionalmente se utiliza un blanco puntual para el análisis de la calidad de enfoque del algoritmo Omega-k obteniendo perfiles de la respuesta al impulso en rango y azimut.

a. Análisis en rango

Primero, se ubica los puntos de media potencia, es decir 3dB, en el perfil de la respuesta al impulso en rango como se muestra en la figura 35.

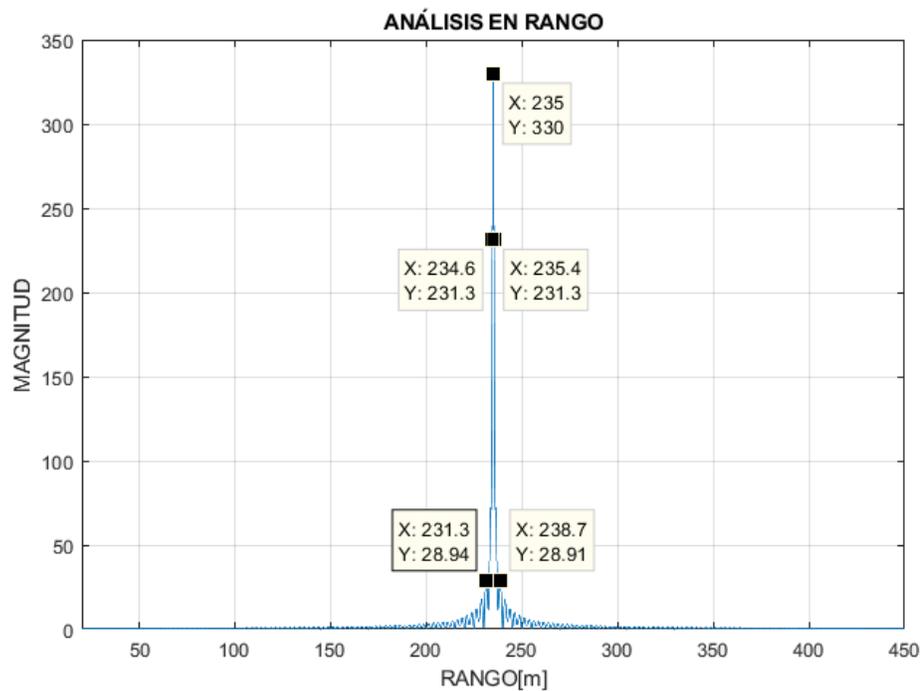


Figura 35: Análisis de la respuesta al impulso en rango

Fuente: Elaboración propia

Tomando en cuenta la figura 35, primero se identifica los puntos de media potencia 3dB, luego, se determina la resolución en rango de la siguiente manera:

$$\delta_R = 235.4 - 234.6$$

$$\delta_R = 0.8$$

Mientras tanto, el PSLR se determina utilizando la ecuación (2.9), luego, reescribiendo y reemplazando valores en dicha ecuación se obtiene:

$$\text{PSLR}_R = 10\log_{10} \frac{I_s}{I_m}$$

$$\text{PSLR}_R = 10\log_{10} \frac{28.94}{330}$$

$$\text{PSLR}_R = -10.5702\text{dB}$$

Por otro lado, el parámetro de calidad ISLR se calcula computacionalmente utilizando la ecuación (2.10) convirtiendo en una expresión discreta para la implementación.

$$\text{ISLR} = 10\log \left(\frac{\sum_{k=-\infty}^a |h[k]|^2 + \sum_{k=b}^{\infty} |h[k]|^2}{\sum_a^b |h[k]|^2} \right) \quad (4.1)$$

Manteniendo constante la frecuencia central de la señal chirp $f_0 = 1.3\text{GHz}$ y variando el ángulo de squint, y realizando los mismos pasos descritos anteriormente se obtiene la tabla 8.

Tabla 8

Parámetros de calidad en rango (Ángulo de squint variable)

Análisis en rango				
Valores teóricos		Valores experimentales		
$\Delta\theta$	$\delta_R(\text{m})$	$\delta_R(\text{m})$	PSLR(dB)	ISLR(dB)
3°	1	0.8	-10.5727	-2.7354
5°	1	0.8	-10.5641	-2.7355
7°	1	0.8	-10.5667	-2.7359
9°	1	0.8	-10.5671	-2.7364
11°	1	0.8	-10.5702	-2.7379
13°	1	0.8	-10.5663	-2.7366

Nota: Manteniendo la frecuencia constante $f_0 = 1.3\text{GHz}$. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 8, se determinó que los parámetros de calidad tales como: la resolución espacial, PSLR y ISLR son constantes aproximadamente frente a variaciones de ángulos de squint para una frecuencia central de la señal chirp f_0 constante.

Por otro lado, se varia la frecuencia de la señal chirp considerando constante el ángulo de squint $\Delta\theta = 7^\circ$, y determinando los parámetros de calidad de la misma forma como se determinó para el anterior caso, se obtienen valores de los parámetros, las cuales, se muestran en la tabla 9.

Tabla 9

Parámetros de calidad en rango (frecuencia variable)

Análisis en rango				
Valores teóricos		Valores experimentales		
f_0	$\delta_R(m)$	$\delta_R(m)$	PSLR(dB)	ISLR(dB)
1GHz	1	0.8	-10.5677	-2.7338
2GHz	1	0.8	-10.5665	-2.7376
3GHz	1	1	-10.5640	-2.7384
4GHz	1	1	-10.5650	-2.7386
5GHz	1	1	-10.5669	-2.7388
6GHz	1	1	-10.5646	-2.7388

Nota: Manteniendo el ángulo squint constante en $\Delta\theta = 7^\circ$. Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, los parámetros de calidad del algoritmo de enfoque evaluados frente a una variación de frecuencia son aproximadamente constantes.

b. Análisis en azimut

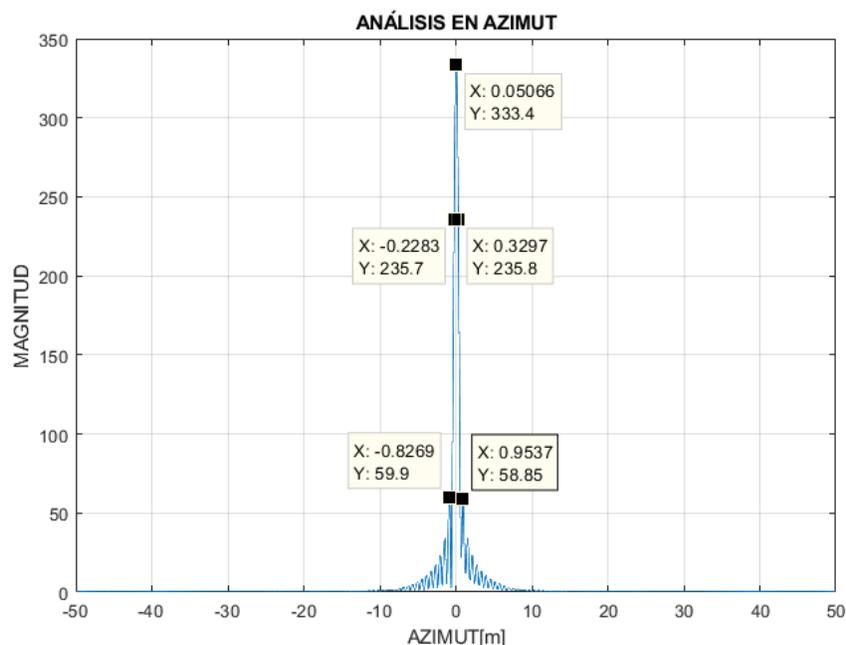


Figura 36: Análisis de la respuesta al impulso en azimut

Fuente: Elaboración propia

Ubicando los puntos de media potencia en la respuesta al impulso en azimut de la figura 36, se determina la resolución en azimut:

$$\delta_A = 0.2283 - (-0.3297)$$

$$\delta_A = 0.5580$$

Por otro lado, el parámetro PSLR en azimut es: $PSLR_A = 10\log_{10} \frac{59.9}{333.4}$

$$PSLR_A = -7.4554\text{dB}$$

Tabla 10

Parámetros de calidad en azimut (Ángulo de squint variable)

Análisis en azimut				
Valores teóricos		Valores experimentales		
$\Delta\theta$	$\delta_A(\text{m})$	$\delta_A(\text{m})$	PSLR(dB)	ISLR(dB)
3°	2.2037	1.9604	-6.7497	-4.5058
5°	1.3222	1.1836	-6.8726	-4.5292
7°	0.9444	0.8506	-7.0693	-4.6515
9°	0.7346	0.6735	-7.2570	-4.7734
11°	0.6010	0.5580	-7.4554	-4.9318
13°	0.5085	0.4950	-7.8232	-5.1753

Nota: Se mantiene constante la frecuencia $f_0 = 1.3\text{GHz}$. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 10, se observa que los parámetros de calidad mejoran a medida que se incrementa el ángulo de squint y manteniendo constante la frecuencia de la señal chirp $f_0 = 1.3\text{GHz}$, debido al aumento de valor absoluto de PSLR e ISLR.

Tabla 11

Parámetros de calidad en azimut (Frecuencia variable)

Análisis en azimut				
Valores teóricos		Valores experimentales		
f_0	$\delta_A(\text{m})$	$\delta_A(\text{m})$	PSLR(dB)	ISLR(dB)
1GHz	1.2278	1.1116	-7.0031	-4.7118
2GHz	0.6139	0.5520	-6.8636	-4.8692
3GHz	0.4093	0.3765	-6.8020	-4.8059
4GHz	0.3070	0.2655	-6.9045	-4.1619
5GHz	0.2456	0.2085	-6.8227	-4.3292
6GHz	0.2046	0.1906	-6.9045	-4.0888

Nota: Se mantiene constante el ángulo de squint en $\Delta\theta = 7^\circ$. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 11, se observa que los parámetros de calidad del algoritmo Omega-k son aproximadamente constantes cuando se incrementa la frecuencia de la señal chirp y manteniendo constante el ángulo de squint. Finalmente, el algoritmo Omega-k implementado genera imágenes SAR para cualquier frecuencia central de la señal chirp y ancho de haz de la antena.

4.2.3. Verificación del algoritmo Omega-k

Anteriormente se validó el algoritmo Omega-k utilizando datos crudos SAR de un blanco puntual, con la cual, se determinó los parámetros de calidad. En esta sección, se valida el algoritmo implementado utilizando datos crudos SAR reales y simulados.

a) Enfoque de datos crudos SAR

Los datos crudos SAR provenientes de tres blancos puntuales, son procesados por el algoritmo Omega-k, obteniendo una imagen SAR mostrada en la figura 37.

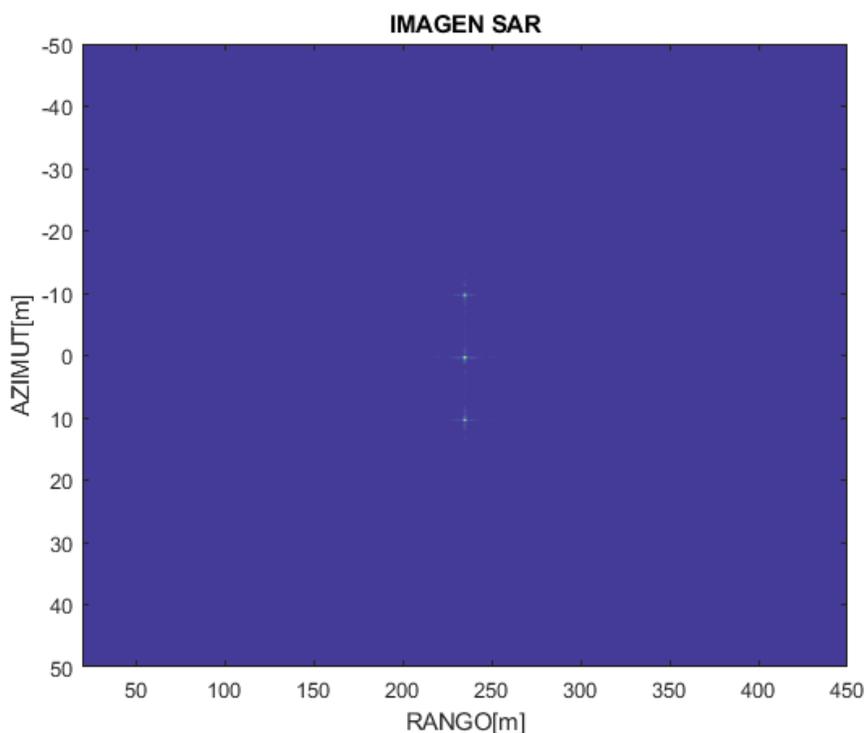


Figura 37: Imagen SAR de tres blancos puntuales

Fuente: Elaboración propia

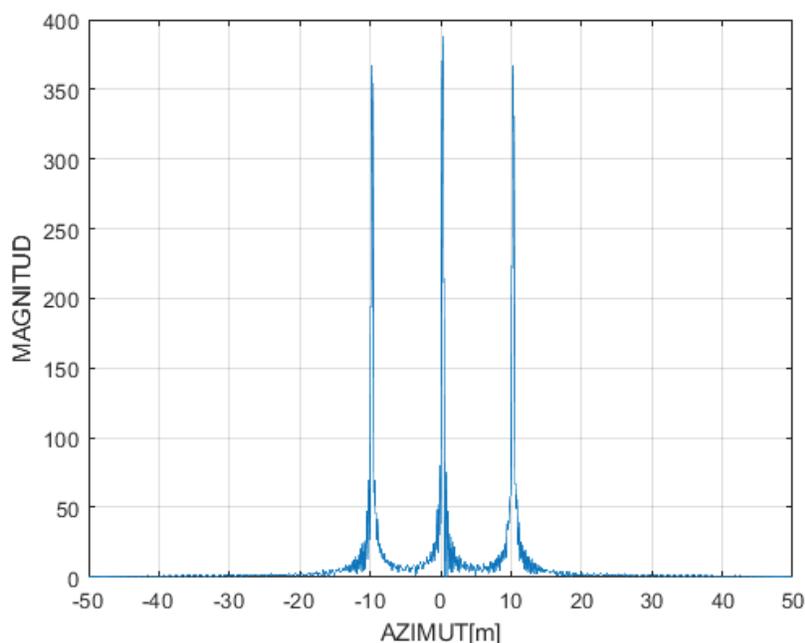


Figura 38: Perfil en azimut (Tres blancos puntuales)

Fuente: Elaboración propia

b) Enfoque de datos crudos SAR ERS-2

El algoritmo Omega-k implementado se valida utilizando datos crudos SAR reales, dichas señales fueron adquiridas a bordo de una plataforma satelital ERS-2 con los parámetros iniciales SAR que se muestra en la tabla 12.

Tabla 12

Parámetros iniciales ERS-2 SAR

Parámetros ERS-2 SAR	Símbolo	Valor
Frecuencia	f_0	5.3GHz
Ancho de banda	B	15.5MHz
Frecuencia de muestreo	f_s	18.86MHz
Frecuencia repetición de pulso	PRF	1679.90233438Hz
Ángulo de incidencia	θ	23°
Velocidad de la plataforma	V_s	7543.41 m/s
Velocidad de la propagación	c	$3 * 10^8$ m/s
Tasa de modulación chirp	k_r	$4.17788 * 10^{11}$
Filas de la matriz de datos crudos	M	4800
Columna de la matriz de datos crudos	N	4096

Nota: Los metadatos durante la adquisición de los datos crudos SAR a bordo del satélite ERS-2 fue tomado de (ESA)

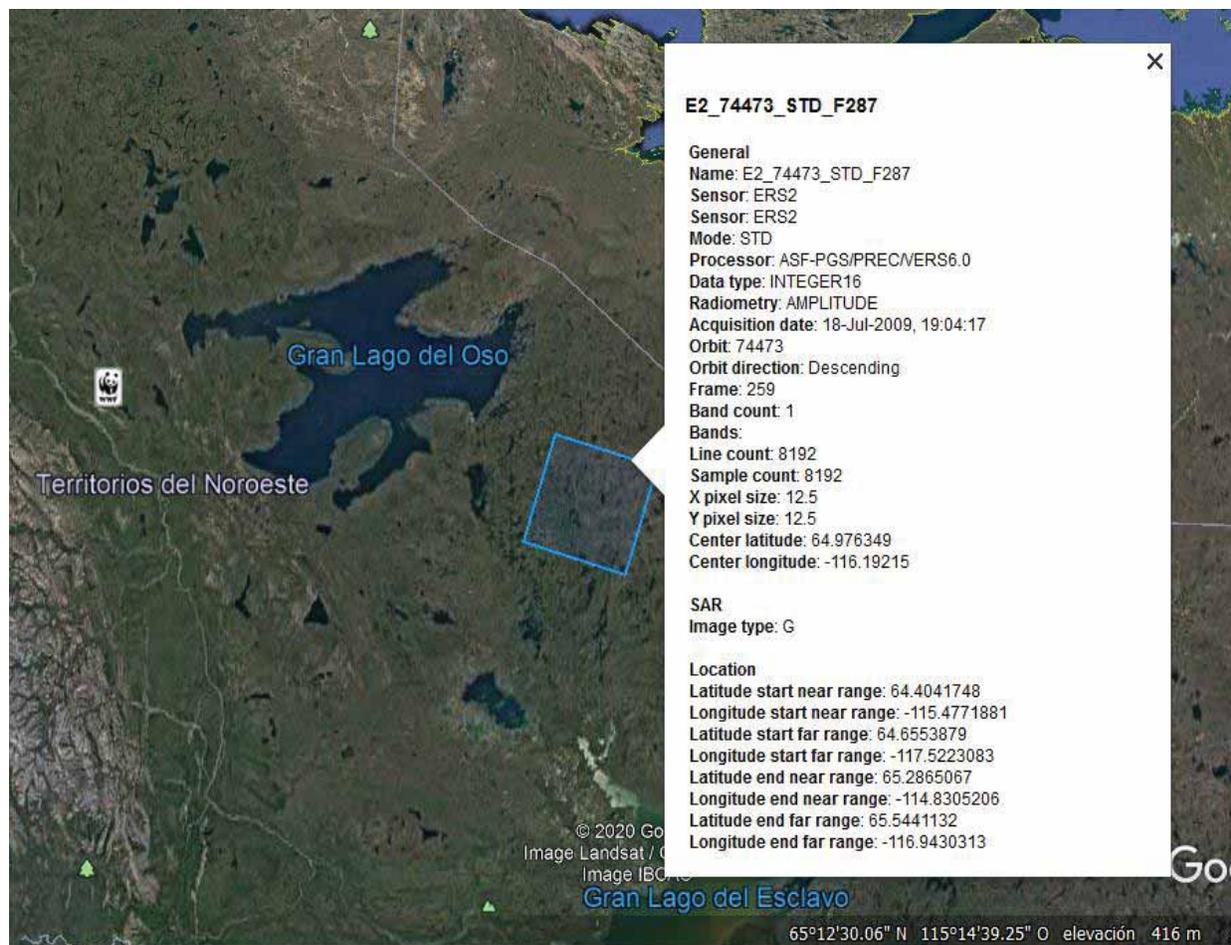


Figura 39: Ubicación geográfica de los datos crudos SAR

Fuente: (ESA)

La matriz de datos crudos SAR E2_74473_STD_F287 fue adquirido el día 18 de julio del 2009, cerca del Gran Lago del Oso cuya ubicación geográfica es mostrado en la figura 39. La magnitud de los datos crudos SAR adquiridos por el satélite ERS-2 se muestra en la figura 40, los mismos que son procesados por el algoritmo Omega-k previamente implementado generando una imagen SAR real. Los datos procesados por el algoritmo Omega-k resulta una imagen cuyos pixeles son números complejos, y cuya representación de la magnitud de la imagen SAR se muestra en la figura 41.

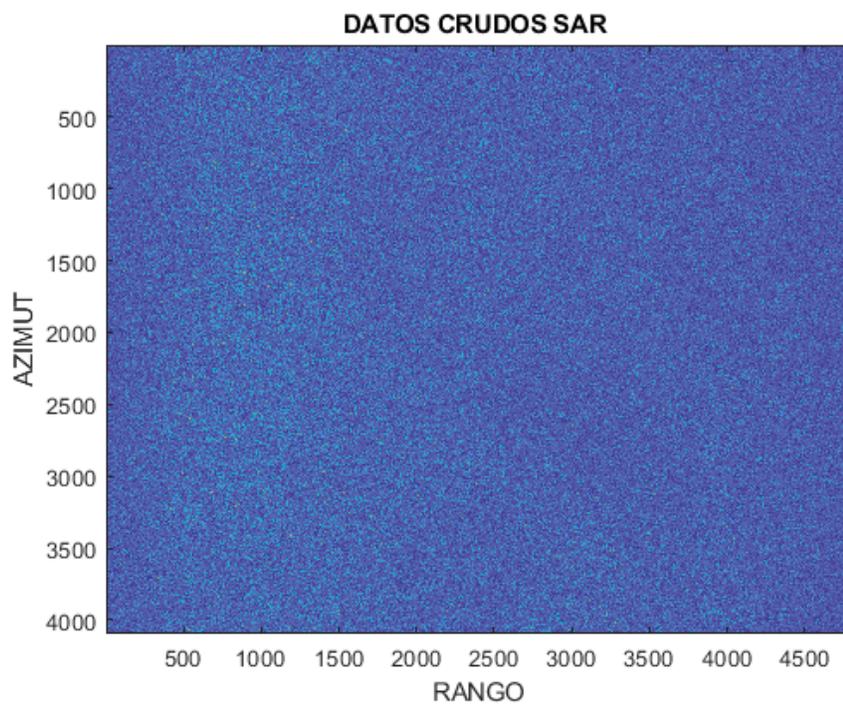


Figura 40: Magnitud de los datos crudos SAR

Fuente: Elaboración propia

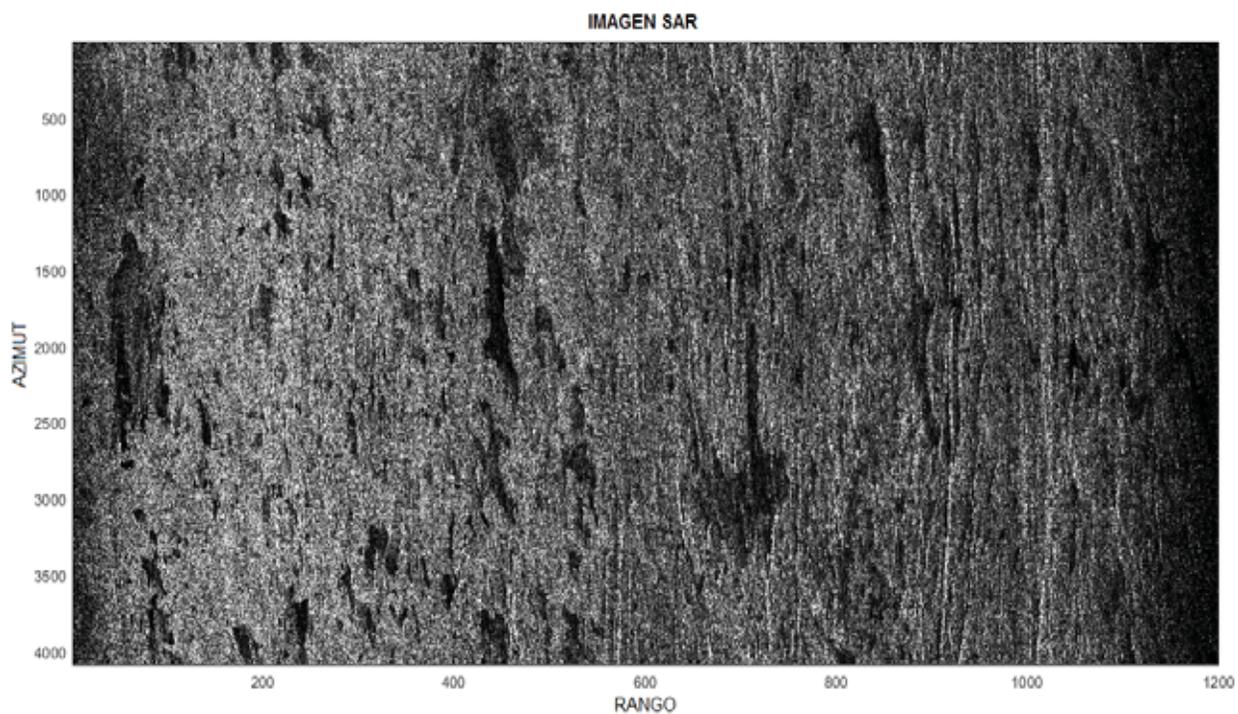


Figura 41: Imagen SAR obtenida con el algoritmo Omega-k

Fuente: Elaboración propia

c) Enfoque de datos crudos MicroASAR

El sistema MICROASAR, es un radar de apertura sintética con modulación LFM-CW que fue utilizado durante la caracterización de experimento del mar ártico de hielo de la isla Svalbard en 2009 (CASIE 09). Luego, se simula un sistema SAR LFM-CW con los parámetros iniciales de la tabla 13 generando datos crudos SAR de un blanco puntual, para determinar los parámetros de calidad del algoritmo de enfoque.

El algoritmo Omega-k implementado para radares de apertura sintética con modulación de frecuencia lineal de onda continua, es verificado utilizando datos crudos MicroASAR cuyos parámetros iniciales (metadatos) se muestran en la tabla 13. El procesamiento en sistemas SAR LFM se muestra en la figura 42 y los parámetros de calidad del algoritmo Omega-k modificado se muestra en la tabla 14.

Tabla 13

Parámetros iniciales de los datos crudos SAR LFM-CW

Parámetros MICROASAR	Símbolo	Valor
Frecuencia	f_0	5.42876GHz
Ancho de banda	B	170MHz
Frecuencia de muestreo	f_s	24.875MHz
Frecuencia repetición de pulso	PRF	307.292Hz
Ancho de Haz	$\Delta\theta$	11°
Velocidad de la plataforma	V_s	30.1938 m/s
Velocidad de la propagación	c	$3 * 10^8$ m/s
Tasa de modulación chirp	k_r	$1.5972563681 * 10^{12}$
Filas de la matriz de datos crudos	M	3884
Columna de la matriz de datos crudos	N	1702

Nota: Parámetros iniciales del sistema MicroASAR durante la adquisición de datos crudos en la caracterización del hielo en el mar ártico de la isla Svalbard en 2009 (CASIE 09) son tomados de (Long & Stringham, 2011)

La muestra de los datos crudos SAR LFM-CW reales son adquiridos por el sistema MicroASAR a bordo de un UAV (Edwards, et al., 2008) son proveídos por cortesía del Dr. David G. Long de Brigham Young University (Long & Stringham, 2011).

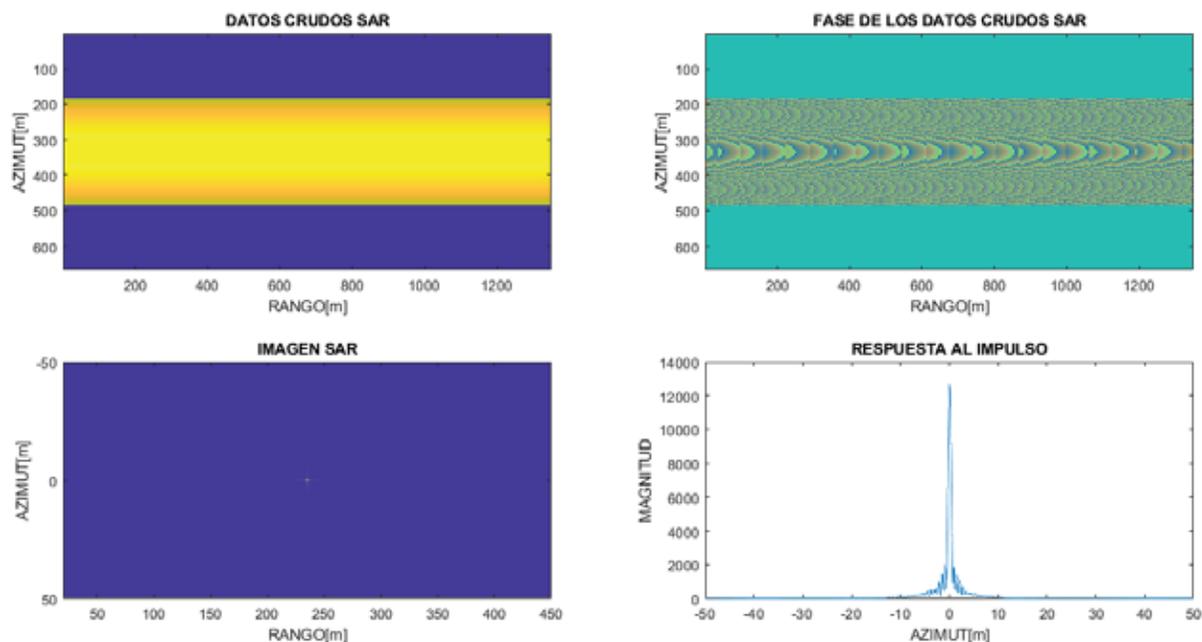


Figura 42: Procesamiento en sistemas LFM-CW SAR

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14

Parámetros de calidad en sistemas SAR LFM-CW

Análisis de la respuesta al impulso							
Valores teóricos		Valores experimentales					
δ_R	δ_A	δ_R	δ_A	PSLR _R	PSLR _A	ISLR _R	ISLR _A
1m	1.228	0.9m	0.137m	-8.572dB	-8.065dB	-5.043dB	-2.827dB

Nota: Parámetros de calidad utilizando los metadatos de datos crudos MicroASAR. Fuente: Elaboración propia.

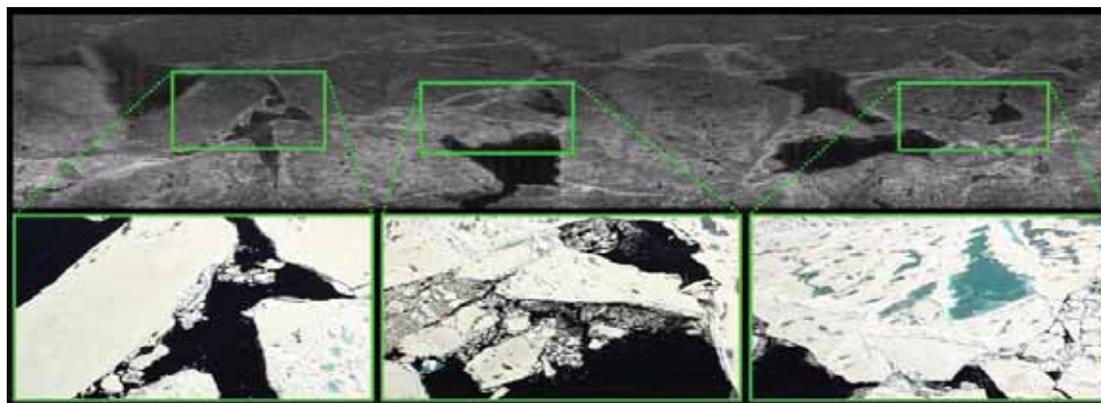


Figura 43: Imagen MicroASAR y óptica

Fuente: (Long, Zaugg, Edwards, & Maslanik, 2010)

Los datos de muestra CASIE-09 microASAR son proveídos en un archivo denominado flight9_9_sample.mat que contiene dos matrices como son: dat y geom. La matriz geom contiene datos geométricos tales como: datos de tiempo, latitud, longitud y altitud. Por otro lado, la matriz dat representa a los datos crudos SAR de 3884 filas y 1702 columnas adquirido con los parámetros de radar de apertura sintética de onda continua mostrado en la tabla 13, cuya representación gráfica de dichos datos crudos SAR es mostrado en la figura 44.

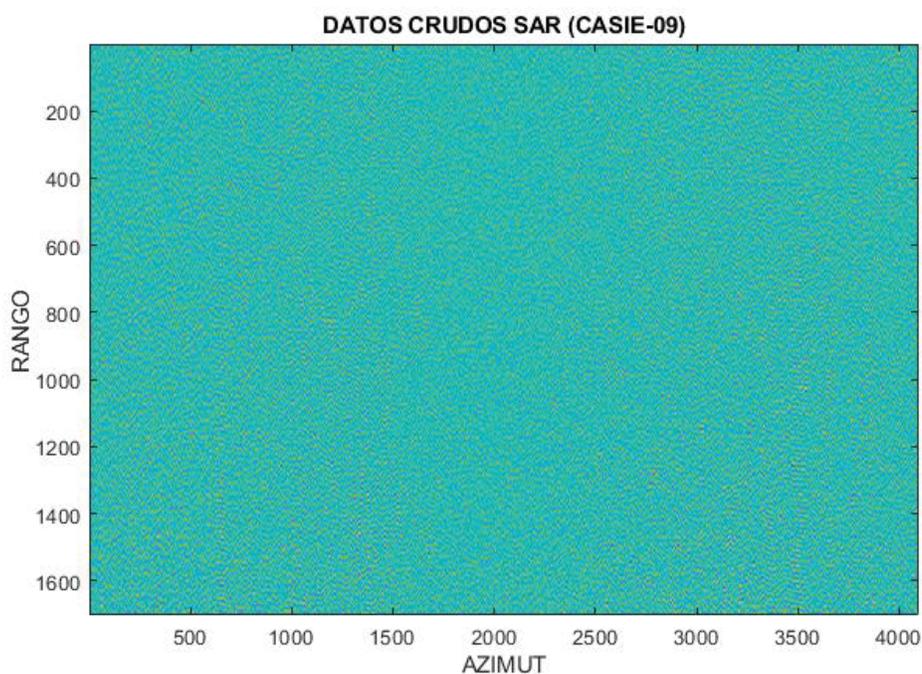


Figura 44: Representación de los datos crudos LFM-CW SAR

Fuente: Elaboración propia.

Se verifica el algoritmo Omega-k implementado utilizando datos crudos SAR reales de la figura 44, cuya imagen SAR generada se muestra en la figura 45 mejorando la imagen mediante el filtro multilook que elimina el ruido multiplicado llamado también como ruido speckle, además, la parte superior de la imagen SAR presenta mayor contraste y se puede distinguir mejor algunas zonas, verificando la similitud de la imagen obtenida con el algoritmo range-Doppler mejorado, la cual, es mostrada en la figura 46.

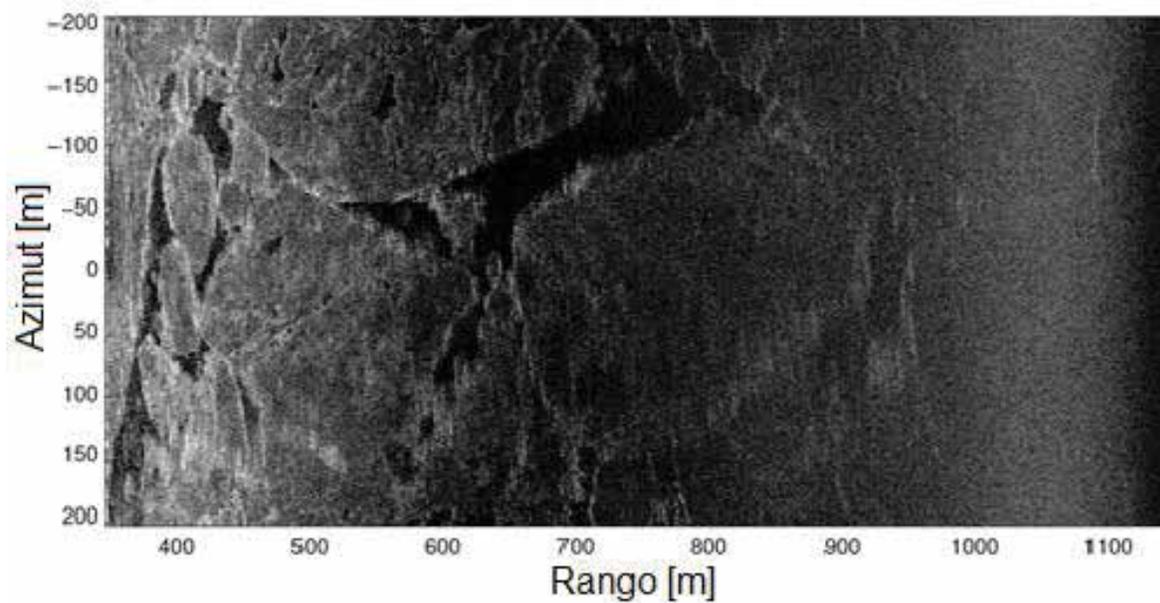


Figura 45: Imagen SAR obtenida con el algoritmo Omega-k

Fuente: Elaboración propia

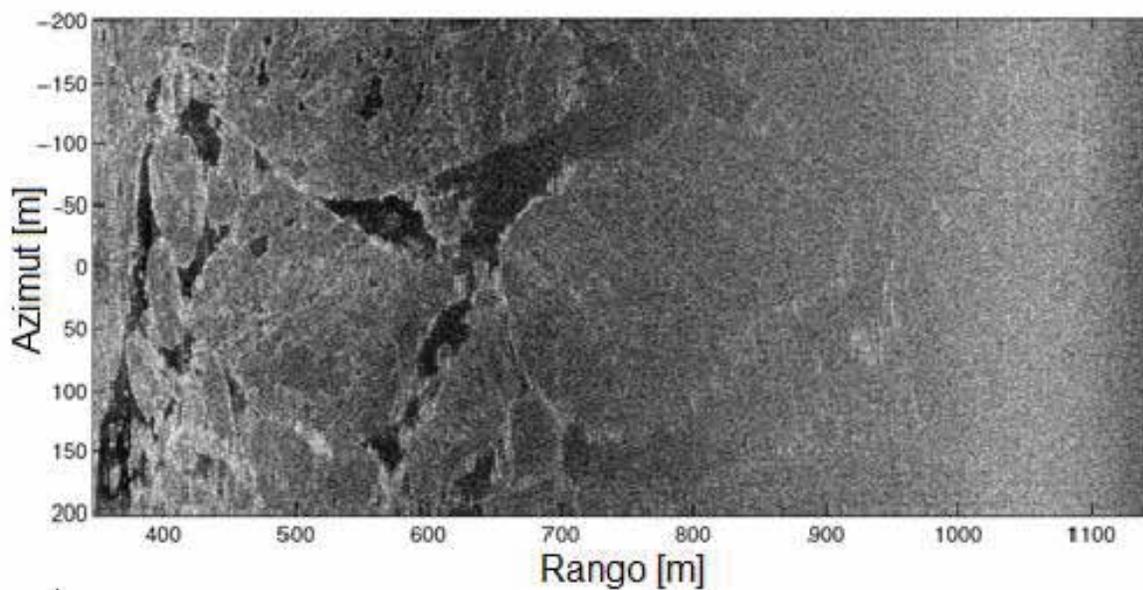


Figura 46: Imagen SAR obtenida con el algoritmo range-Doppler

Fuente: (Long & Stringham, 2011)

Las imágenes SAR generadas por algoritmo Omega-k, recién, se pueden aplicar a diversos temas.

4.3. Interferometría SAR

La simulación de los datos crudos SAR esclava y maestra son obtenidas tomando en cuenta los parámetros iniciales de la tabla 5.

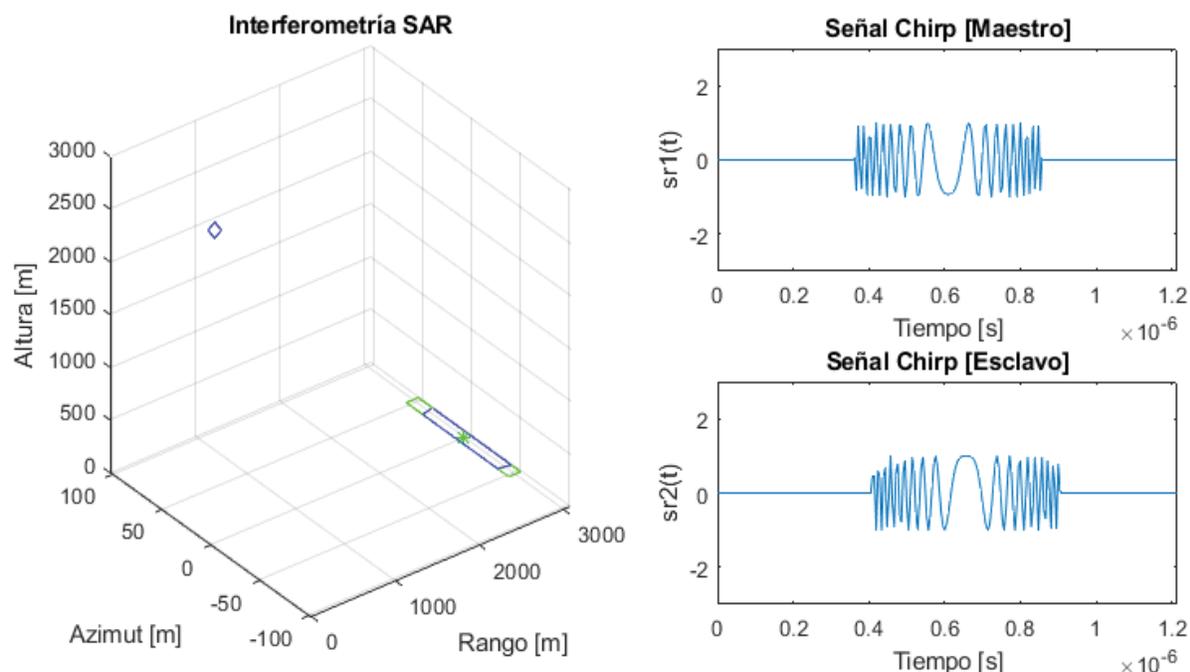


Figura 47: Interferometria SAR

Fuente: Elaboración propia

En la figura 47, se muestra la adquisición sintética de las señales chirp que se obtienen a través de la interacción entre el radar y el blanco puntual determinando los datos crudos SAR, los cuales, son procesados por el algoritmo Omega-k para generar imágenes SAR maestra y esclava. Para obtener una matriz de datos crudos InSAR, se determinan los ecos de radar de apertura sintética interferométrica para elevados ángulos de squint provenientes de 14805 blancos puntuales aislados e isotrópicos ubicados en un plano tridimensional en forma de un cilindro, cuya altura es 18m, como se muestra en la figura 48. Las imágenes SAR maestra y esclava mostrado en la figura 49 son generados por el algoritmo Omega-k al enfocar datos crudos InSAR de 14805 blancos puntuales.

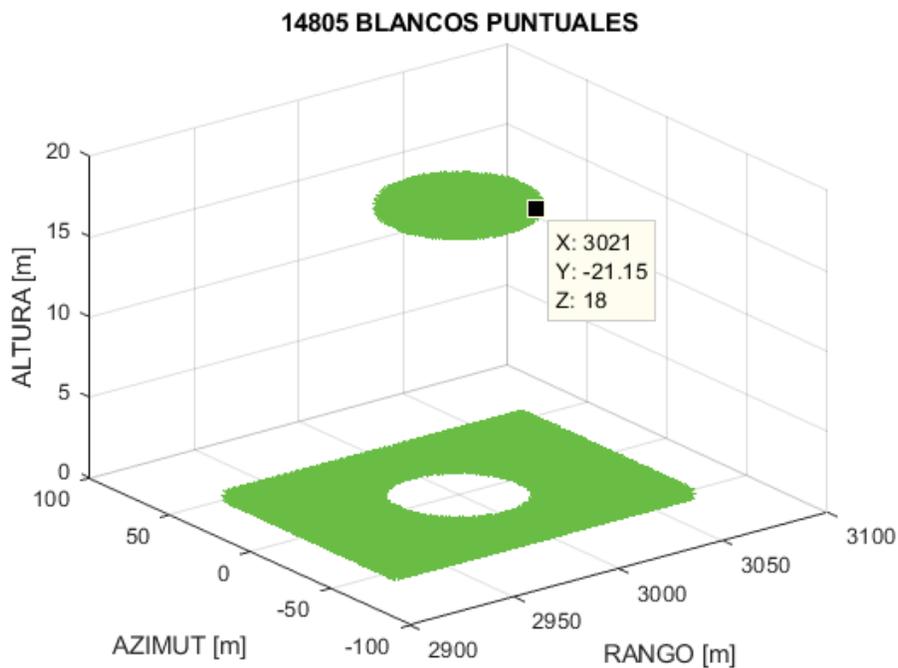


Figura 48: Organización de los blancos puntuales

Fuente: Elaboración propia

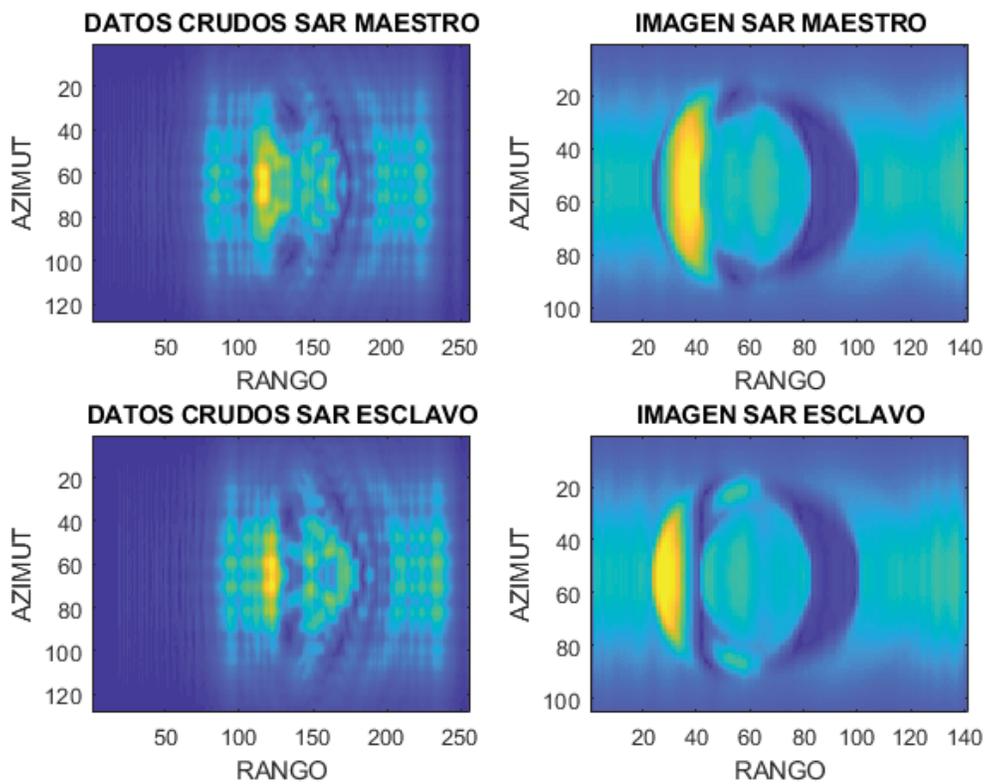


Figura 49: Enfoque de los datos crudos InSAR utilizando el algoritmo Omega-k

Fuente: Elaboración propia

4.3.1. Procesamiento de imágenes SAR

Las imágenes PolInSAR Quad-Pol de árboles mostrados en la figura 50, son simuladas en PolSARproSim con los parámetros iniciales que se muestra en la tabla 5. Los datos simulados son interpretados en Matlab utilizando el código 1 propuesto. Estas imágenes SAR son mostrados en la figura 51 utilizando el comando `imagesc` en Matlab.

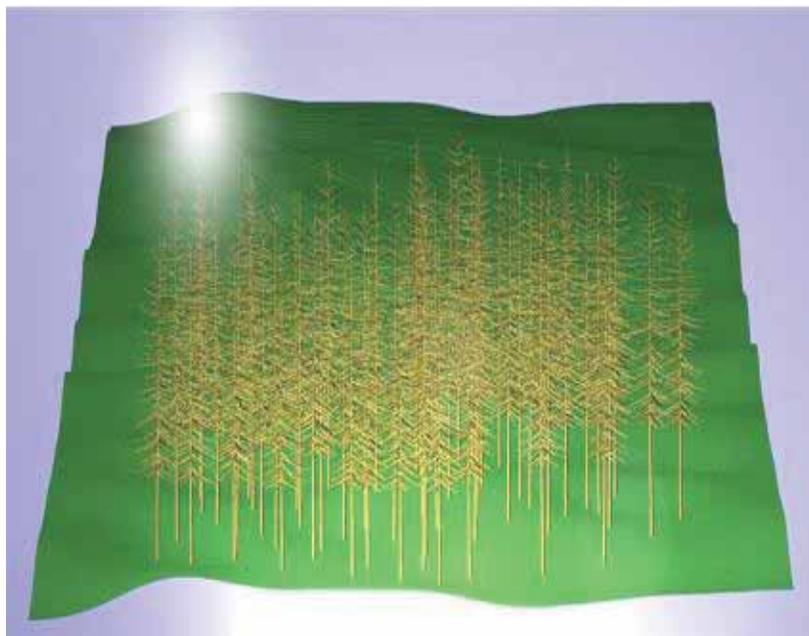


Figura 50: Imagen forestal (PolSARproSim)

Fuente: (Kumar, Rao, & Reddy, 2014)

En la figura 51, se observa las imágenes SAR maestra y esclava para polarizaciones HH, HV, VH y VV siendo $S_{HV} = S_{VH}$, es decir, las imágenes con polarizaciones cruzadas son iguales por tratarse de imágenes SAR obtenidas por un sistema SAR mono estático. Las imágenes maestra y esclava son obtenidas con un ángulo de elevación diferente, debido a la línea de base, siendo esta una característica de la interferometría SAR. Se utiliza la técnica de la interferometría SAR procesando exclusivamente dos imágenes SAR, maestra y esclava, de una misma polarización ya sea cruzada o igual, debido a que; si se usa diferentes polarizaciones, es decir una imagen con una polarización cruzada con una lineal o viceversa se producen resultados erróneos.

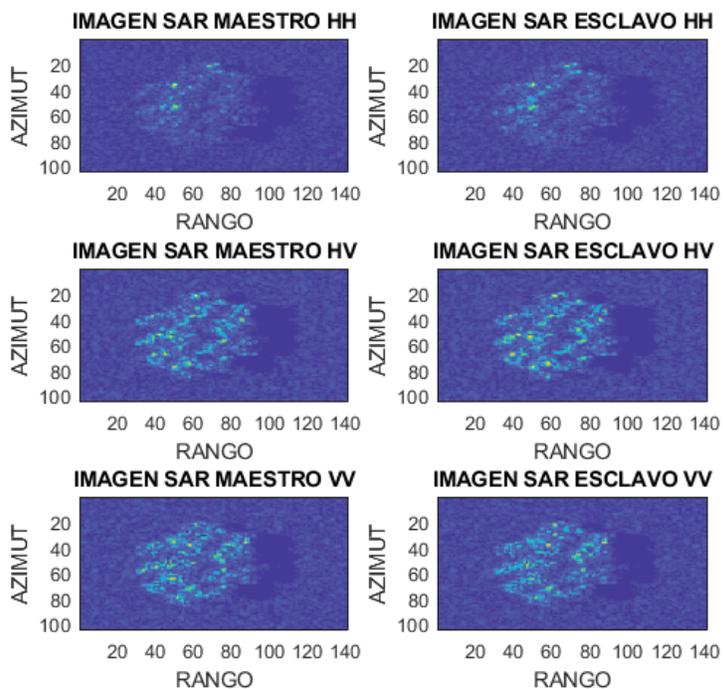


Figura 51: Imagen SAR de bosques

Fuente: Elaboración propia

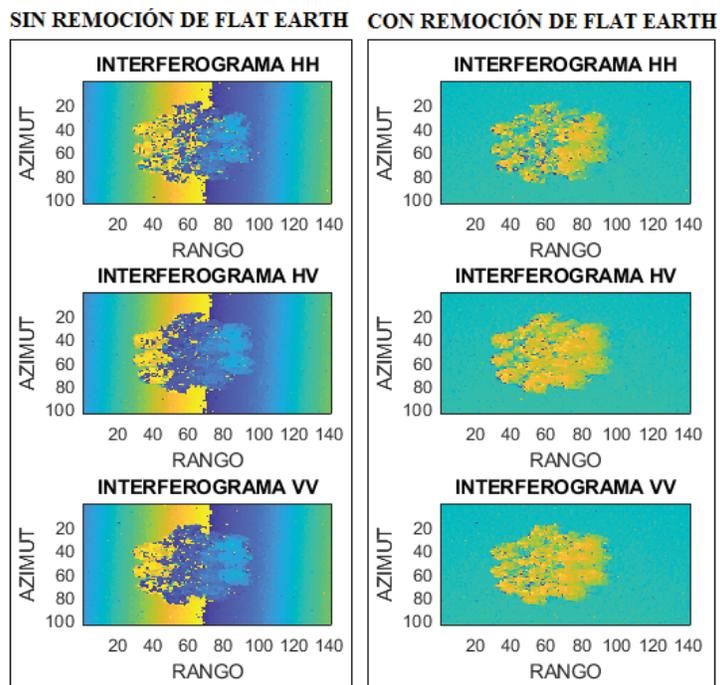


Figura 52: Procesamiento de imágenes SAR

Fuente: Elaboración propia

En la figura 52, se muestran las interferogramas con remoción de la curvatura de la tierra denominado también como fase flat earth. Las interferogramas son obtenidas a través de la ecuación (3.63), y para la remoción de la fase flat earth se utiliza la ecuación (3.65) quedando solamente la información de la diferencia de alturas, la cual, es útil para realizar mapeo topográfico y determinar la altura forestal.

4.3.2. Altura forestal

Finalmente, la interferograma con remoción de la curvatura de la tierra se convierte a altura utilizando la ecuación (3.63) y aplicando el filtro de la mediana con una ventana [7 7] se obtiene el modelamiento de elevación digital con una barra de colores para cada polarización que representa el valor de las alturas forestales, como se muestra en la figura 54. En la figura 53, se muestra el resultado del procesamiento digital de señales SAR a partir de datos crudos InSAR pasando por el procesamiento de imágenes SAR de 14805 blancos puntuales (Cilindro).

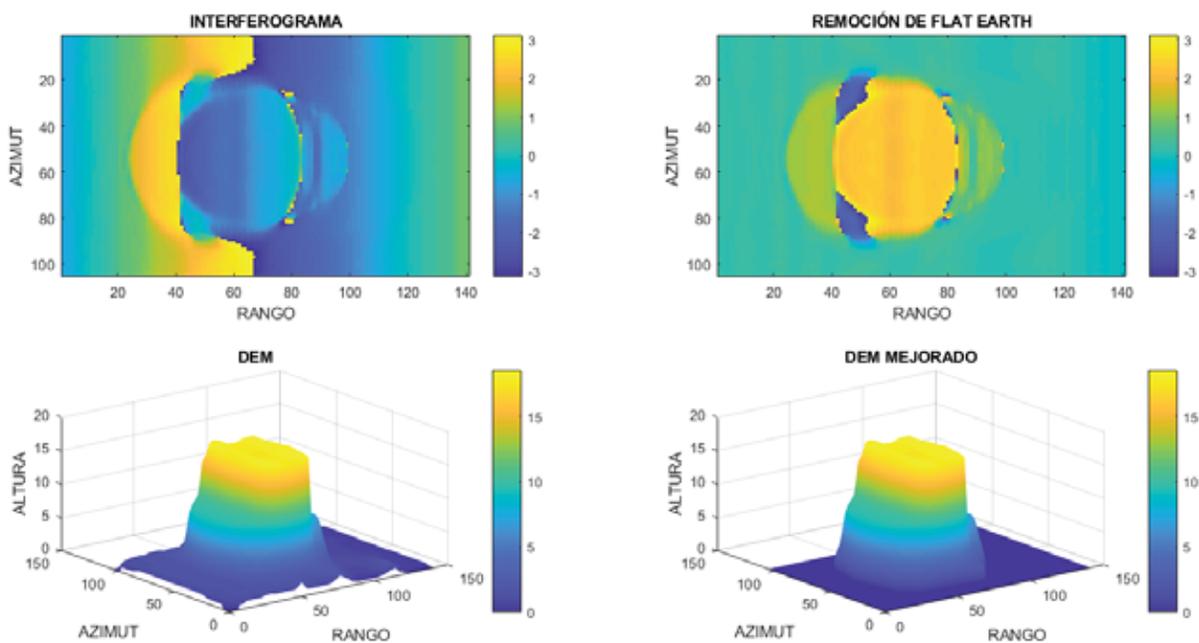


Figura 53: Verificación del procesamiento de señales SAR completo

Fuente: Elaboración propia

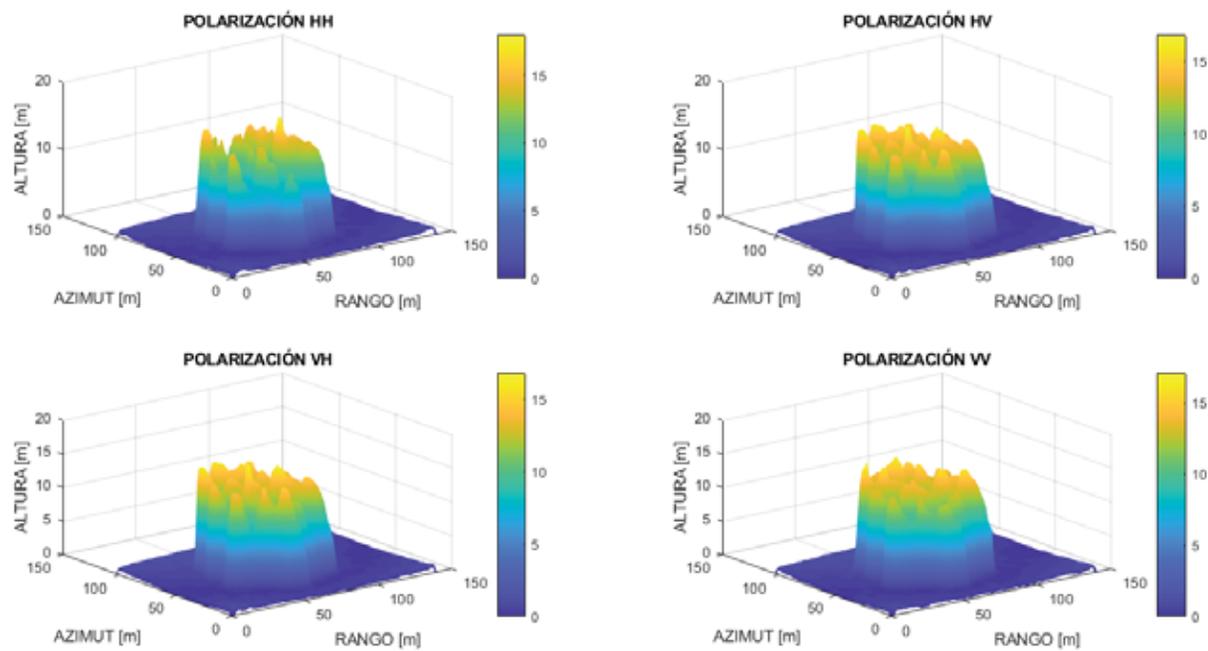


Figura 54: Modelamiento de elevación digital (Altura de árboles)

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

- Para determinar los parámetros de calidad del algoritmo Omega-k tales como: la resolución espacial, PSLR y ISLR se implementó un simulador de datos crudos SAR de un blanco puntual aislado e isotrópico.
- Se determinó que las diferencias entre la implementación del algoritmo Omega-k para sistemas SAR y sistemas SAR LFM-CW son la interpolación de stolt y la transformada inversa de Fourier en rango, debido a que la transformada de Fourier bidimensional afecta negativamente en la calidad de una imagen obtenida por un radar de apertura sintética de onda continua.
- Mediante la respuesta al impulso, se determinó que el algoritmo Omega-k mejora la calidad de enfoque de datos crudos SAR a medida que se incrementa el ángulo de squint.
- El algoritmo Omega-k implementado se validó mediante el enfoque de los datos crudos SAR simulados, datos crudos SAR obtenidos por el satélite ERS-2 y una muestra de datos crudos MicroASAR adquiridos por UAV generando imágenes SAR. Adicionalmente, el sistema MicroASAR utiliza el algoritmo range-Doppler para generar una imagen SAR, siendo esta comparado con la imagen SAR obtenida por el algoritmo Omega-k.
- PolSARporSim genera datos complejos PolInSAR que no se importa directamente a Matlab, por consiguiente, se elaboró un algoritmo de lectura en Matlab para validar la implementación del procesamiento de imágenes SAR, obteniendo como resultado el modelamiento de elevación digital de bosques.
- Se desarrolló el simulador de datos crudos InSAR utilizando 14805 blancos puntuales isotrópicos organizados en forma de cilindro para la validación del procesamiento de señales SAR completo, por lo tanto, a la salida del procesamiento se obtuvo el modelamiento de elevación digital de un cilindro.

RECOMENDACIONES

- Considerando que Cusco es una ciudad sísmica donde hay montañas y nevados, se recomienda diseñar e implementar un radar de apertura sintética interferométrica para el estudio de terremotos, deslizamientos, deshielo y la estimación de la biomasa vegetal.
- El desarrollo del procesamiento de señales SAR para el estudio de terremotos y deshielo requieren ser testeados, por consiguiente, se recomienda desarrollar el simulador de datos crudos polarimétrico interferométrico SAR realizando el modelamiento de la interacción electromagnética entre el radar y la superficie.
- La UNSAAC no tiene estudios previos sobre algoritmos de enfoque, por lo tanto, se recomienda el estudio comparativo entre dos o más algoritmos de enfoque para radares de apertura sintética de onda continua incluyendo la compensación del movimiento de la plataforma SAR.
- El principal problema de las imágenes SAR es el ruido speckle, por lo tanto, se recomienda el estudio comparativo entre dos o más filtros, y el desarrollo de nuevos filtros basados en algoritmos genéticos y redes neuronales pulsantes.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bi, H., Bi, G., & Wang, J. (2019, October). Wavenumber Domain Algorithm-Based FMCW SAR Sparse Imaging. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(10), 7466-7475.
- Cafforio, C., Prati, C., & Rocca, F. (1991). *SAR data focusing using seismic migration techniques*. IEEE transactions on Aerospace and Electronic Systems.
- Cloude, S. R. (n.d.). *Pol-InSAR Training Course*. Scotland, UK: AEL Consultants.
- Cumming, I. G., & Wong, F. H. (2005). *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*. Norwood: Artech House.
- Cumming, I., Neo, Y., & Wong, F. (2003, July 1). *Interpretations of the Omega-K Algorithm and Comparisons with other Algorithms*. Paper, The University of British Columbia, Dept. of Electrical and Computer Engineering, Vancouver.
- Edwards, M., Madsen, D., Stringham, C., Margulis, A., Wicks, B., & Long, D. (2008, July). MicroASAR: A small, robust LFM-CW SAR for operation on UAVs and small aircraft. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 5.
- ESA. (s.f.). Dataset: ESA 2009 Retrieved from ASF DAAC October 2019.
- Fielding, E. J. (2018). *SAR Interferométrico para el Estudio de Terremotos*. Jet Propulsion Laboratory y California Institute of Technology.
- Hein, A. (2004). *Processing of SAR Data: fundamentals, signal processing, interferometry*. Berlin: Springer.
- Jiao, X., & McNairn, H. (2018). *SAR para el Mapeo de Suelos y Cultivos*. NASA.
- Khwaja, S. (2008). *Fast Raw Data Generation of Realistic Environments for a SAR System Simulator*. Institut d'électronique et de télécommunications de Rennes, Paris.

- Kumar, J. T., Rao, D. P., & Reddy, D. M. (2014). *Polarimetric analysis of synthetic aperture radar image using polsarpro data processing and education tool*. International journal of science, engineering and technology.
- Long, D. G., & Stringham, C. (2011). *The Sample BYU CASIE-09 MICROASAR Dataset*. Center for Remote Sensing Brigham Young University.
- Long, D. G., Zaugg, E., Edwards, M., & Maslanik, J. (2010). The MicroASAR Experiment on CASIE-09. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society*, 3466-3469.
- Long, D., & Stringham, C. (2011, July). Improved processing of the CASIE SAR data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*.
- Mahafza, B. R. (2000). *Radar Systems Analysis and Design using Matlab*. Alabama, EEUU: CRC.
- Oliver, C., & Quegan, S. (2004). *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*. The SciTech radar and defense series . ScitTech Publications.
- Parashar, A. (2015, June). *A Study on Range Cell Migration Correction in SAR Imagery and MATLAB Implementation of Algorithms*. Thesis for the degree of Master of Technology in Signal and Image Processing, National Institute of Technology, Department of Electronics and Communication Engineering, Odisha.
- Robertson, A. E. (1998). *Multi-baseline Interferometric SAR for Iterative Height Estimation*. Brigham Young University.
- Sun, H., & Lu, X. (2007). Parameter Assesment for sar image quality evaluation system. *1st Asian and Pacific Conference Synthetic Aperture Radar APSAR 2007*, 58-60. doi:10.1109/AP-SAR.2007.44188554
- Thuy Le Toan, CESBIO, Toulouse, France & The Biomass Mission Advisory Group;. (2015). *The Biomass mission How it works, what it measures?* European Space Agency.

- Vasquez, L., & Alvarado, O. (2018). *Estudio comparativo del algoritmo range-Doppler y el algoritmo w-k para el enfoque de imagenes SAR*. Tesis para optar al titulo de Ingeniero de Telecomunicaciones, Universidad de Carabobo, Departamento de Señales y Sistemas, Bárbula.
- Wang, B.-C. (2008). *Digital Signal Processing Techniques and Applications in Radar Image Processing*. John Wiley Sons.
- Wang, R., Loffeld, O., Nies, H., Knedlik, S., Hagelen, M., & Essen, H. (2010). Focus FMCW SAR data using the wavenumber domain algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2109–2118.
- Williams, D. L. (2006). *A Coherent, Polarimetric SAR Simulation of Forests for PolSARPro*.
- Yang, W., Jintong, Z., Jialong, G., Kai, J., & Lihai, Y. (2009). Design and Simulation Analysis of Polarimetric Interferometric Synthetic Aperture Radar. *38th Research Institute, China Electronic Technology Corporation, Hefei, Anhui 230031, China*.
- Yong, P., Zengyuan, L., sun, G., Erxue, C., & Xuejian, C. (2003). Comparison of Tree Height Estimations from C and L-band InSAR Data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2586-2588.
- Zaugg, E. C. (2010). *Generalized Image Formation for Pulsed and LFM-CW Synthetic Aperture Radar*. Brigham Young University, Provo.
- Zaugg, E., Long, D., Edwards, M., Fladeland, M., Kolyer, R., Crocker, I., . . . Wallin, B. (2009). *Using the MicroASAR on the NASA SIERRA UAS in the Characterization of Arctic Sea Ice Experiment*. Brigham Young University-459 CB Provo, ARTEMIS, NASA Ames Research Center-MS 245-4 Moffett Field, and University of Colorado - CIRES Boulder.

- Zaugg, E., Long, D., Fladeland, M., M. E., Kolyer, R., Crocker, I., . . . Herzfeld, U. (2009). *Environmental Science Combining Data from a Small SAR on an Unmanned Aircraft with Satellite Observations: The microASAR on the NASA SIERRA UAS for the Characterization of Arctic Sea Ice Experiment (CASIE)*. Brigham Young University, ARTEMIS, Inc., NASA Ames, and University of Colorado.
- Zeng, T., Hu, C., Sun, H., & Chen, E. (2014). A Novel Rapid SAR Simulator Based on Equivalent Scatterers for three-Dimensional Forest Canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 5243-5255.
- Zozaya, A. (2016). *Radares de apertura sintética. Método de Fase estacionaria*. Laboratorio de electromagnetismo aplicado (Labema).
- Zozaya, A. (2017). *Enfoque de los datos crudos del radar de apertura sintética LFM-CW. Manual*. Instituto Espacial Ecuatoriano, Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la República del Ecuador. Quito: Proyecto Prometeo.
- Zozaya, A. J. (2012). *Simulador básico de un radar de apertura sintética*. Instituto Espacial Ecuatoriano.
- Zozaya, A. J. (2015). *Diseño de radares de apertura sintética*. Instituto Espacial Ecuatoriano, Proyecto Prometeo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de la República de Ecuador.
- Zozaya, A. J. (Abril de 2015). Modelos de interacción electromagnética para la caracterización de blancos en escenas SAR; revisión preliminar de la literatura. *Revista Ingeniería UC*, 26-63.

ANEXOS

Anexo 1: Funciones para el procesamiento digital de señales SAR

```

%% Función para lectura de imágenes SAR
function JSXX=LecturaSAR(M,N,Dir,SXX)
fileID = fopen(fullfile(Dir,SXX));
dato1 = fread(fileID,[M 2*N], 'float');
fclose(fileID);
dato=reshape(dato1,[1 2*N*M]);
pReal=dato(1:2:end);
pImag=dato(2:2:end);
complejo=complex(pReal,pImag);
aux=reshape(complejo,[N M]);
JSXX=aux.';
end

%% Lectura para datos geométricos
function JX=LecturaDato(M,N,Dir,DXX)
fileID = fopen(fullfile(Dir,DXX));
dato1 = fread(fileID,[N M], 'float');
fclose(fileID);
JX=dato1';
End

%% Descarte de alturas negativas
function hf=Ndescarte(h)
[M,N]=size(h);
h1=reshape(h,[M*N 1]);
for i=1:(M*N)
    if (h1(i,1)<2.3)
        h1(i,1)=0;
    else
        h1(i,1);
    end
end
hf=reshape(h1,[M N]);
end

%% Calibracion de imágenes SAR
function Image_cal=ImagenPol_SAR(IHH,IHV,IVV,alfa,beta,e,u)
w1=[cos(alfa) sin(alfa)*cos(beta)*exp(1j*e) sin(alfa)*sin(beta)*exp(1j*u)];
Image_cal=w1(:,1)*((IHH+IVV)/sqrt(2))+w1(:,2)*((IHH-IVV)./sqrt(2))+....
w1(:,3)*IHV*sqrt(2);
end

%% Desenvolvimiento de fase
function phaUnwrapping=SARunwrapping1(dato)
[M,N]=size(dato);
angRadMatriz = atan2(sin(dato),cos(dato));
angRad = angRadMatriz;
for i=2:M
diferencial = angRadMatriz(i,:)-angRadMatriz(i-1,:);
if diferencial > pi
angRad(i,:) = angRad(i,:) - 2*pi;
elseif diferencial < -pi
angRad(i,:) = angRad(i,:) + 2*pi;
end
end
for k=2:N

```

```
diferencial = angRadMatriz(:,k)-angRadMatriz(:,k-1);  
if diferencial > pi  
angRad(:,k) = angRad(:,k) - 2*pi;  
elseif diferencial < -pi  
angRad(:,k) = angRad(:,k) + 2*pi;  
end  
end  
phaUnwrapping=angRad;  
end  
end
```

Anexo 2: Lectura de datos PolInSAR

```

%% ***** LECTURA DE IMÁGENES SAR SIMULADOS EN PolSARproSim ***** %%
M=105;
N=141;
Dm='G:\finalTesis\maestro';
Ds='G:\finalTesis\esclavo';
D11='S11.bin';
D12='S12.bin';
D21='S21.bin';
D22='S22.bin';
Df1='flat_earth.bin';
Dk1='kz.bin';
%% ***** Lectura de Imágenes SAR maestro ***** %%
MS11=LecturaSAR(M,N,Dm,D11);
save M_S11.mat MS11
MS12=LecturaSAR(M,N,Dm,D12);
save M_S12.mat MS12
MS21=LecturaSAR(M,N,Dm,D21);
save M_S21.mat MS21
MS22=LecturaSAR(M,N,Dm,D22);
save M_S22.mat MS22
%% ***** Lectura de Imágenes SAR esclavo ***** %%
SS11=LecturaSAR(M,N,Ds,D11);
save S_S11.mat SS11
SS12=LecturaSAR(M,N,Ds,D12);
save S_S12.mat SS12
SS21=LecturaSAR(M,N,Ds,D21);
save S_S21.mat SS21
SS22=LecturaSAR(M,N,Ds,D22);
save S_S22.mat SS22
%% ***** Lectura de flat_earth y Kz ***** %%
flat_earth=LecturaDato(M,N,Ds,Df1);
save flat_earth.mat flat_earth
kz=LecturaDato(M,N,Ds,Dk1);
save kz.mat kz

```

Anexo 3: Organización de 14805 blancos puntuales (Cilindro)

```

clear all
close all
clc
load('M_S12.mat')
[M,N]=size(MS12);
r=30;% Radio mayor del tronco
h=18;% Altura del tronco
Lx=104.760740;% Longitud en azimuth
Ly=140.760740;% Longitud en range
xx=zeros(M,N);% Inicializando en el eje x
yy=zeros(M,N);% Inicializando en el eje y
x=linspace(0,Lx,M);% Intervalo en azimuth
for i=1:N
    xx(:,i)=x;
end
y=linspace(0,Ly,N);% Intervalo en Range
for j=1:M
    yy(j,:)=y;
end
x1=reshape(xx,[M*N 1]);% Reordenando la matriz
y1=reshape(yy,[M*N 1]);% Reordenando la matriz
z=zeros([M*N 1]);% Inicializando la matriz del eje Z
sigma0=zeros([M*N 1]);%
for k=1:M*N
    z(k,:)=sqrt((x1(k,:)-Lx/2).^2+(y1(k,:)-Ly/2).^2);
    if (z(k,:)<=r)
        z(k,:)=h;
        sigma0(k,:)=1;
        if(h<=z(k,:))
            z(k,:)=h;
            sigma0(k,:)=1;
        end
    else
        z(k,:)=0;
        sigma0(k,:)=1;
    end
end
z2=reshape(z,[M N]);
z1=z;
x1=x1-Lx/2;
y1=y1-Ly/2;
figure,subplot(1,2,1),surf(z2),shading interp
title('Cilindro'),xlabel('Azimuth'),ylabel('Range'),zlabel('Altura')
grid on
blancos0=cat(2,x1,y1,z1);
subplot(1,2,2),plot3(blancos0(:,2),blancos0(:,1),blancos0(:,3),'g*'),...
title('Cilindro'),xlabel('Azimuth'),ylabel('Range'),zlabel('Altura'),...
grid on
save blancos_isotropico.mat blancos0
save sigma_isotropico.mat sigma0

```

Anexo 4: Enfoque de datos crudos SAR

```

clear all
close all
clc
%% ***** Procesamiento en sistemas SAR ***** %%
%% ***** Parametros principales SAR ***** %%
f0=1.3e9;% Frecuencia de la portadora [Hz]
B=150e6;% Ancho de banda [Hz]
PRF=100;% Frecuencia repeticion de pulso [Hz]
Tp=5e-6;% Ancho de pulso [s]
phiH=deg2rad(7);% Ancho de haz horizontal [rad]
Vs=15;% Velocidad de la plataforma del sensor SAR [m/s]
c=3e8;% Velocidad de la luz [m/s]
H=200;
%% ***** Parametros secundarios ***** %%
ym=20;
yM=450;
yc=(yM+ym)/2;
tgh=tan(phiH/2);
xm=ym*phiH/2;
xM=yM*phiH/2;
lambda=c/f0;
La=lambda/phiH;
xi=-50;
xf=50;
kr=-B/Tp;
% kr=+B/Tp;
fs=1.4*B;
Ts=1/fs;
Ka=-(2*Vs.^2)./(lambda.*yc);
PRI=1/PRF;
N=round((2*(yM+ym)/c+Tp)*fs);
t_az=(xf-xi)/Vs;
M=round(t_az/PRI);
pBlanco=[0,235,0];
% pBlanco=[0,235,0;-10,235,0;10,235,0];%[x,y,sigma]
sigma1=1;
[Nb,p]=size(pBlanco);
ti=(-N/2:(N/2-1))*Ts;
t=(2*yc/c)+ti;
Rng=c/(2*B);
Raz=La/2;
fprintf('La resolucioen en rango es: %d\n',Rng);
fprintf('La resolucioen en azimut es: %d\n',Raz);
%% ***** Generaci3n de datos crudos SAR *****
sr1=zeros(M,N);
um=zeros(M,N);
r=zeros(M,N);
tD=zeros(M,N);
Dr=zeros(M,N);
zi=0;
zf=H;
xu=xi;
for m=1:M
for n=1:Nb

```

```

        x0=pBlanco(n,1);
y0=pBlanco(n,2);
sigma0=sigma1;
if (y0>yM)&&(y0<yM)&&(x0>xu-tgh*y0)&&(x0<xu+tgh*y0)
um(m,:)=xu+(t)*Vs;
r(m,:)=sqrt(y0.^2+(x0-um(m,:)).^2);
tD(m,:)=2*r(m,:)./c;
Dr(m,:)=t-tD(m,:);
sr1(m,:)=sigma0*rect(Dr(m,:)/Tp).*exp(1j*pi*kr.*Dr(m,:).^2).*exp(-4j*pi*...
r(m,:)/lambda)+sr1(m,:);
end
end
%% ***** Sistema SAR durante la adquisición de los ecos ***** %%
figure(2),subplot(1,2,1),...
plot3([yM yM],[xi xi],[zi zi],'g',[yM yM],[xi xf],[zi zi],'g',[yM yM],...
[xf xf],[zi zi],'g',[yM yM],[xf xi],[zi zi],'g',0,xu,zf,'bd',[yM yM],[xu-xm...
xu-xM],[zi zi],'b',[yM yM],[xu+xm xu+xM],[zi zi],'b',[yM yM],[xu-xm xu+...
xm],[zi zi],'b',[yM yM],[xu-xM xu+xM],[zi zi],'b',pBlanco(:,2),...
pBlanco(:,1),pBlanco(:,3),'g*'),grid on
axis([-20 yM+20 xi-50 xf+50 zi zf]);
xlabel('RANGO [m]');
ylabel('AZIMUT [m]');
zlabel('ALTURA [m]');
title('SISTEMA SAR');
subplot(1,2,2)
plot((0:N-1)*Ts,real(sr1(m,:)))
axis([0 (N-1)*Ts -3 3])
xlabel('TIEMPO [s]')
ylabel('sr(t)')
title('SEÑAL CHIRP LFM');
% pause(0.00001);
xu=xu+PRI*Vs;
end
figure,imagesc(abs(sr1)),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'),title('MAGNITUD')
figure, imagesc(angle(sr1)),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'),title('FASE')
%% ***** Procesamiento SAR usando el algoritmo Omega-k ***** %%
Nrg=2^nextpow2(N);
Maz=2^nextpow2(M);
sr1 = sr1.*(taylorwin(M).*ones(1,N));
sar=fft2(sr1,Maz,Nrg);
sar=fftshift(sar,2);
sar=fftshift(sar,1);
fn=(-Maz/2:(Maz/2-1))*PRF/Maz;
ft=(-Nrg/2:(Nrg/2-1))*fs/Nrg;
ref=(ym+yM)/2;
r=ones(Maz,Nrg)*ref;
ft1=f0+ft;
fn1=c*fn/(2*Vs);
Ft=ones(Maz,1).*ft1;
Fn=fn1'.*ones(1,Nrg);
F=sqrt((Ft).^2-Fn.^2);
Fref1=exp(+1j*(4*pi*F.*r/c+pi*ones(Maz,1).*ft.^2/kr));
sar1=sar.*Fref1;
figure, imagesc(abs(sar1)),title('Focalización general')
D=sqrt(1-(lambda*fn/(2*Vs*f0)).^2);
ftp=f0*(D'-1)+ft./D';
% ftb2=(f0+ft).^2;

```

```

% fp2=((c/(2*Vs)).^2)*fn;
% [Ftb2,Fn2]=meshgrid(ftb2,fp2);
% ftp=sqrt(Ftb2+Fn2)-f0;
isar1=zeros(Maz,Nrg);
for ii=1:Maz
isar1(ii,:)=interp1(ft(:),sar1(ii,:),ftp(ii,:), 'spline', 'extrap');
end
sar1=ifft2(isar1);
figure, imagesc(abs(sar1)), xlabel('Rango'), ylabel('Azimut'), ...
title('Focalizacion diferencial')
Imagen=sar1;
Dpr=c/(2*fs);
Lrg=yM-ym;
Nprg=Lrg/Dpr;
Msar=abs(Imagen);
punto=max(max(Msar));
[~,Nc]=find(Msar==punto);
N1=round(Nc-Nprg/2);
N2=round(Nc+Nprg/2);
Imagen=Imagen(:,N1:N2);
[Maz,Nrg]=size(Imagen);
xu=linspace(xi,xf,M);
pasx=xu(2)-xu(1);
xfn=xi+(Maz-1)*pasx;
clear xu
xu=linspace(xi,xfn,Maz);
ry=linspace(ym,yM,Nrg);
figure, imagesc(ry,xu,abs(Imagen)), xlabel('RANGO[m]'), ylabel('AZIMUT[m]'), ...
title('IMAGEN SAR')
xlim([ym yM])
ylim([xi xf])
eva=20*log10(abs(Imagen));
valor=max(max(eva));
[Mc,Nc]=find(eva==valor);
%% ***** ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE LAS IMAGENES SAR ***** %%
%% ***** ISLR en rango ***** %%
fila=abs(Imagen(Mc,:));
[~,pc]=size(fila);
af=min(ry);
bf=max(ry);
Drg=linspace(af,bf,100*pc);
filal=interp1(ry,fila,Drg, 'spline');
figure, plot(Drg,filal), xlim([ym yM]), xlabel('RANGO[m]'), ylabel('MAGNITUD')...
,title('ANÁLISIS EN RANGO')
grid on;
crg_3dB=max(filal).*(1/sqrt(2));
Xaz = sprintf('Punto de media potencia rango: %d',crg_3dB);
disp(Xaz);
mc1=find(filal>=crg_3dB);
Drng=sum(filal(:,min(mc1):max(mc1)).^2);
Nrng=sum(filal(:,1:(min(mc1)-1)).^2)+sum(filal(:,(max(mc1)+1):end).^2);
ISLR_rg=10*log10(Nrng/Drng);
%% ***** ISLR en azimut ***** %%
colum=abs(Imagen(:,Nc));
[mc,~]=size(colum);
ac=min(xu);
bc=max(xu);

```

```
Daz=linspace(ac,bc,100*mc);
colum1=interp1(xu,colum,Daz,'spline');
figure,plot(Daz,colum1),xlim([xi xf]),xlabel('AZIMUT[m]'), ...
ylabel('MAGNITUD'),title('ANÁLISIS EN AZIMUT')
grid on;
caz_3dB=max(colum1).*(1/sqrt(2));
Xrg = sprintf('Punto de media potencia azimuth: %d',caz_3dB);
disp(Xrg);
mc2=find(colum1>=caz_3dB);
Dazm=sum(colum1(:,min(mc2):max(mc2)).^2);
Nazm=sum(colum1(:,1:(min(mc2)-1)).^2)+sum(colum1(:,(max(mc2)+1):end).^2);
ISLR_az=10*log10(Nazm/Dazm);
```

Anexo 5: Enfoque de datos crudos SAR LFM-CW

```

clear all
close all
clc
%% ***** Procesamiento en sistemas SAR LFM-CW ***** %%
%% ***** Parametros principales ***** %%
f0=5.42876e9; % Frecuencia central de la señal chirp [Hz]
B=170e6; % Ancho de banda de la señal chirp [Hz]
PRF=307.292; % Frecuencia repeticion de pulso [Hz]
phiH=deg2rad(11); % Angulo de haz horizontal [rad]
Vs=30.1938; % Velocidad de la plataforma del radar
c=3e8; % Velocidad de la luz [m/s]
H=200;
%% ***** Parametros derivados ***** %%
ym=20;
yM=450;
PRI=1/PRF;
kr=B/PRI;
fsB=2*kr*yM/c;
osf=3;
fs=osf*fsB;
Ts=1/fs;
xi=-50;
xf=50;
tng=tan(phiH/2);
xm=ym*phiH/2;
xM=yM*phiH/2;
N=round(PRI/Ts);
tv=(xf-xi)/Vs;
M=round(tv/PRI);
Rng=c/(2*B);
lambda=c/f0;
Raz=lambda/(2*phiH);
fprintf('La resolucion en rango es: %d\n',Rng);
fprintf('La resolucion en azimut es: %d\n',Raz);
% pBlanco=[0,235,0;-10,235,1;10,235,0];%[x,y,z]
sigma0=1;
pBlanco=[0,235,0];
[Nb,p] = size(pBlanco);
t=(-N/2:(N/2-1))*Ts;
st=exp(-1j*(2*pi*f0*t+pi*kr*t.^2));
figure, plot(t,real(st)),xlabel('Tiempo (s)'),ylabel('st(t)'),...
title('Señal chirp del sistema SAR')
%% ***** Generación de datos crudos SAR *****
sr2=zeros(M,N);
um=zeros(M,N);
r=zeros(M,N);
fase=zeros(M,N);
tx=zeros(M,N);
zi=0;
xu=xi;
zf=H;
for m=1:M
for n=1:Nb

```

```

x0=pBlanco(n,1);
y0=pBlanco(n,2);
sigma1=sigma0;
if (y0>yM)&&(y0<yM)&&(x0>xu-tng*y0)&&(x0<xu+tng*y0)
um(m,:)=xu+(t)*Vs;
r(m,:)=sqrt(y0^2+(x0-um(m,:)).^2);
tx(m,:)=2*r(m,:)./c;
fase(m,:)=2*pi*kr*tx(m,:).*t-pi*kr*tx(m,:).^2+2*pi*f0*tx(m,:);
sr2(m,:)=sigma1*exp(1j*fase(m,:))+sr2(m,:);
end
end
figure(2),subplot(1,2,1),
plot3([ym yM],[xi xil],[zi zil,'g',[yM yM],[xi xf],[zi zil,'g',[yM yM],...
[xf xf],[zi zil,'g',[ym yM],[xf xil],[zi zil,'g',0,xu,zf,'bd',[ym yM],[xu-xm...
xu-xM],[zi zil,'b',[ym yM],[xu+xm xu+xM],[zi zil,'b',[ym yM],[xu-xm xu+...
xm],[zi zil,'b',[yM yM],[xu-xM xu+xM],[zi zil,'b',pBlanco(:,2),...
pBlanco(:,1),pBlanco(:,3),'g*'),grid on
axis([-20 yM+20 xi-50 xf+50 zi zf]);
xlabel('Rango [m]');
ylabel('Azimut [m]');
zlabel('altura [m]');
title('Sistema SAR');
subplot(1,2,2)
plot((0:N-1)*Ts,real(sr2(m,:)))
axis([0 (N-1)*Ts -3 3])
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('s(t)')
title('Señal Chirp LFM-CW');
pause(0.00001);
xu=xu+PRI*Vs;
end
figure,imagesc(abs(sr2)),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'),title('MAGNITUD')
figure,imagesc(angle(sr2)),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'),title('FASE')
%% ***** Procesamiento SAR usando el algoritmo Omega-k ***** %%
Nrg=2^nextpow2(N);
Maz=2^nextpow2(M);
sr2 = sr2.*(taylorwin(M).*ones(1,N));
sar=fft2(sr2,Maz,Nrg);
sar=fftshift(sar,1);
fn=(-Maz/2:(Maz/2-1))*PRF/Maz;
ft=(0:(Nrg-1))*fs/Nrg;
r=(c/(2*kr))*ft;
ft1=f0+ft;
fn1=c*fn/(2*Vs);
Ft=ones(Maz,1).*ft1;
Fn=fn1'.*ones(1,Nrg);
F=sqrt((Ft).^2-Fn.^2);
D=sqrt(1-(lambda*fn/(2*Vs*f0)).^2);
Fref1=exp(-1j*(4*pi*F.*(ones(Maz,1).*r)/c));
sar=sar.*Fref1;
figure, imagesc(abs(sar)), title('Focalización general')
%% Interpolación de stolt
% af=c^2/(c^2-Vs^2);
af=1;
fn2=fn'.*ones(1,Nrg);
ftp=F-f0*sqrt(1-(lambda*fn2/(2*af*Vs)).^2);
isar=zeros(Maz,Nrg);

```

```

for ii=1:Maz
isar(ii,:)=interp1(ft(:),sar(ii,:),ftp(ii,:),'linear','extrap');
end
sar1=ifft(isar,[],1);
figure, imagesc(abs(sar1)),title('Focalización diferencial')
%% ***** ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE LAS IMAGENES SAR ***** %%
Imagen=sar1;
xu=linspace(xi,xf,M);
paso=xu(2)-xu(1);
xfn=xi+(Maz-1)*paso;
clear xu
xu=linspace(xi,xfn,Maz);
figure, imagesc(r,xu,abs(sar1)),xlabel('RANGO[m]'),ylabel('AZIMUT[m]'),...
title('IMAGEN SAR')% sar1 sar2
xlim([ym yM])
ylim([xi xf])
eva=20*log10(abs(Imagen));
valor=max(max(eva));
[Mc,Nc]=find(eva==valor);
%% ***** ISLR en rango ***** %%
fila=abs(Imagen(Mc,:));
[~,pc]=size(fila);
af=min(r);
bf=max(r);
Drg=linspace(af,bf,100*pc);
filal=interp1(r,fila,Drg,'spline');
figure, plot(Drg,filal),xlim([ym yM]),xlabel('RANGO[m]'),...
ylabel('MAGNITUD'),title('ANÁLISIS EN RANGO'),grid on;
crg_3dB=max(filal).*(1/sqrt(2));
Xaz = sprintf('Punto de media potencia rango: %d',crg_3dB);
disp(Xaz);
mc1=find(filal>=crg_3dB);
Drng=sum(filal(:,min(mc1):max(mc1)).^2);
Nrng=sum(filal(:,1:(min(mc1)-1)).^2)+sum(filal(:,(max(mc1)+1):end).^2);
ISLR_rg=10*log10(Nrng/Drng);
%% ***** ISLR en azimut ***** %%
colum=abs(Imagen(:,Nc));
[mc,~]=size(colum);
ac=min(xu);
bc=max(xu);
Daz=linspace(ac,bc,100*mc);
colum1=interp1(xu,colum,Daz,'spline');
figure,plot(Daz,colum1),xlim([xi xf]),xlabel('AZIMUT[m]'),...
ylabel('MAGNITUD'),title('ANÁLISIS EN AZIMUT'),grid on;
caz_3dB=max(colum1).*(1/sqrt(2));
Xrg = sprintf('Punto de media potencia azimut: %d',caz_3dB);
disp(Xrg);
mc2=find(colum1>=caz_3dB);
Dazm=sum(colum1(:,min(mc2):max(mc2)).^2);
Nazm=sum(colum1(:,1:(min(mc2)-1)).^2)+sum(colum1(:,(max(mc2)+1):end).^2);
ISLR_az=10*log10(Nazm/Dazm);

```

Anexo 6: Enfoque de datos crudos SAR reales

```

%% ***** PROCESAMIENTO DE DATOS CRUDOS SAR ERS-2 ***** %%
clear all
close all
clc
%% ***** Parametros principales ***** %%
f0=5.3e9;
PRF=1679.9023438;
Vp=7543.41;
Vh=6679.044434;
Vs=sqrt(Vp*Vh);
c=3e8;
fs = 1.896e+07;
ref=829924.366;
dr=3.e08/(2.*fs);
kr=4.17788e+11;
N=4800;
M=4096;
%% ***** Procesamiento de señales utilizando el algoritmo Omega-k ***** %%
load('ERS2_DatosCrudosSAR.mat')
figure,imagesc(abs(raw)),xlabel('RANGE'),ylabel('AZIMUTH'),...
title('SAR RAW SIGNAL [ERS-2]')
figure,imagesc(angle(raw)),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'),...
title('fase de los datos crudos')
Nrg=2^nextpow2(N);
Maz=2^nextpow2(M);
sdc = raw;
sar=fft2(sdc,Maz,Nrg);
sar=fftshift(sar,2);
sar=fftshift(sar,1);
figure, imagesc(abs(sar)), title('2d wk')
lambda=c/f0;
fa=(-Maz/2:(Maz/2-1))*PRF/Maz;
xt=round((2*ref/c)*fs/Nrg);
% fr=((-Nrg/2+3.1*xt):(Nrg/2-1+3.1*xt))*fs/Nrg;
fr=(-Nrg/2:(Nrg/2-1))*fs/Nrg;
r=ones(Maz,Nrg)*ref;
fr1=f0+fr;
fa1=c*fa/(2*Vs);
[Fr,Fa]=meshgrid(fr1,fa1);
F=sqrt((Fr).^2-Fa.^2);
D=sqrt(1-(lambda*fa/(2*Vs*f0)).^2);
Fref1=exp(+1j*(4*pi*F.*r/c+pi*ones(Maz,1).*fr.^2/kr));
sar1=sar.*Fref1;
figure, imagesc(abs(sar1)),title('fref')
ft2=(f0+fr).^2;
fp2=((c/(2*Vs)).^2)*fa;
[Ft2,Fn2]=meshgrid(ft2,fp2);
ftp2=sqrt(Ft2+Fn2)-f0;
% D=sqrt(1-(lambda*fa/(2*Vs*f0)).^2);
% ftp2=f0*(D'-1)+fr./D';
isar=zeros(Maz,Nrg);
for ii=1:Maz
isar(ii,:)=interp1(fr(:),sar1(ii,:),ftp2(ii,:), 'spline', 'extrap');
end

```

```

figure, imagesc(abs(isar))
sar1=ifft2(isar);
figure, imagesc(abs(sar1)),title('Imagen SAR'),colorbar
%% filtro
% sarc=sar1(:,7*Nrg/32:(Nrg-7*Nrg/32));
ni=Nrg/2-N/2;
nf=Nrg/2+N/2;
sarc=sar1(:,ni:nf);
figure,imagesc(abs(sarc)),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'),...
title('Imagen SAR')
inicio=4;
fImg=zeros([size(sarc,1) floor(size(sarc,2)/inicio)]);
for k=1:inicio:size(sarc,2)-inicio
kk=(k-1)/inicio+1;
fImg(:,kk)=sum(abs(sarc(:,k:k+inicio-1)).^2,2)/inicio;
end
rmbajo=prctile(fImg(:,4.5);
rmalto=prctile(fImg(:,96.5);
figure,imagesc(fImg,[rmbajo rmalto]),xlabel('RANGE'),ylabel('AZIMUTH'),
colormap('gray'),title(sprintf('SAR IMAGE [OMEGA-K ALGORITHM]'))

```

Anexo 7: Procesamiento de señales SAR completo

```

%% ***** PROCESAMIENTO DE SEÑALES SAR ***** %%
clear all
close all
clc
load('blancos_isotropico.mat')
load('sigma_isotropico.mat')
%% ***** Parametros iniciales ***** %%
f0=1.3e9;% Frecuencia de la portadora [Hz]
B=150e6;% Ancho de banda [Hz]
H=3000;% Altura de la plataforma SAR [m]
theta=45;% Angulo de incidencia [°]
By=10;% Linea de base horizontal [m]
Bz=1;% Linea de base vertical [m]
Tp=0.5e-6;% Ancho de pulso [s]
phiH=1.5;% Ancho de haz horizontal [rad]
Vs=90;% Velocidad de la plataforma del sensor SAR [m/s]
c=3e8;% Velocidad de la luz [m/s]
Lx=104.760740;% Longitud de la escena en azimut [m]
Ly=140.760740;% Longitud de la escena en rango [m]
M=105;
N=141;
%% ***** Parametros secundarios ***** %%
M = 2^nextpow2(M);
N = 2^nextpow2(N);
ym=H*tan(deg2rad(theta))-Ly/2;
yM=H*tan(deg2rad(theta))+Ly/2;
tgh=tan(deg2rad(phiH)/2);
xm=ym*deg2rad(phiH)/2;
xM=yM*deg2rad(phiH)/2;
lambda=c/f0;
La=lambda/deg2rad(phiH);
xi=-Lx/2;
xf=Lx/2;
kr=-B/Tp;
% kr=+B/Tp;
fs=1.4*B;
Ts=1/fs;
tv=(xf-xi)/Vs;
PRI=tv/M;
Yc=H*tan(deg2rad(theta));
%% Multiples blancos puntuales isotropicos (Cilindro)
Blancos=blancos0;
[Nb,p]=size(Blancos);
pEscena = [0,Yc,0];
pBlancos = Blancos+ones(Nb,p).*pEscena; % Desplazamiento de blancos
figure(1),plot3(pBlancos(:,2),pBlancos(:,1),pBlancos(:,3),'g*'),...
title('Representación de los blancos puntuales'),xlabel('Rango [m]'),...
ylabel('Azimut [m]'),grid on
ti=(-N/2:N/2-1)*Ts;
srml=zeros(M,N);
srs2=zeros(M,N);
zi=0;
zf=H;
xu=xi;

```

```

for m=1:M
for n=1:Nb
x0=pBlancos(n,1);
y0=pBlancos(n,2);
z0=pBlancos(n,3);
% if (y0>ym)&&(y0<yM)&&(x0>xu-tgh*y0)&&(x0<xu+tgh*y0)
%% sensor 1
sigma1=sigma0(n,:);
yc1=sqrt(Yc.^2+H.^2);
tml=(2*(yc1)/c)+ti;
uml=xu+tml*Vs;
rml=sqrt(y0.^2+(x0-uml).^2+(H-z0).^2);
tDml=2*rml./c;
tDml=tml-tDml;
srml(m,:)=sigma1*rect(tDml/Tp).*exp(1j*pi*kr.*tDml.^2).*exp(-4j*pi*...
rml/lambda)+srml(m,:);
%% sensor 2
sigma2=sigma0(n,:);
yc2=sqrt(Yc.^2+(H+Bz).^2);
tHH2=(2*(yc2)/c)+ti;
umHH2=xu+tHH2*Vs; %% Posicion variable
rHH2=sqrt((y0+By).^2+(x0-umHH2).^2+(H+Bz-z0).^2);
tDHH2=2*rHH2./c;
DrHH2=tHH2-tDHH2;
srs2(m,:)=sigma2*rect(DrHH2/Tp).*exp(1j*pi*kr.*DrHH2.^2).*exp(-4j*pi*...
rHH2/lambda)+srs2(m,:);
% end
% figure(2),...
% plot3([ym yM],[xi xi],[zi zi],'g',[yM yM],[xi xf],[zi zi],'g',[yM yM],...
% [xf xf],[zi zi],'g',[ym ym],[xf xi],[zi zi],'g',0,xu,zf,'bd',-By,xu,...
% zf+Bz,'rd',[ym yM],[xu-xm xu-xM],[zi zi],'b',[ym yM],[xu+xm xu+xM],[zi...
% zi],'b',[ym yM],[xu-xm xu+xm],[zi zi],'b',[yM yM],[xu-xM xu+xM],[zi zi],...
% 'b',pBlancos(:,2),pBlancos(:,1),pBlancos(:,3),'g*'),grid on
% axis([-20 yM+20 xi-50 xf+50 zi zf]);
% xlabel('Rango [m]');
% ylabel('Azimut [m]');
% zlabel('altura [m]');
% title('Sistema SAR');
% pause(0.00001);
end
xu=xu+PRI*Vs;
end
figure,imagesc(abs(srml)),xlabel('Rango'),ylabel('Azimut'),...
title('DATOS CRUDOS SAR HH maestro')
figure,imagesc(angle(srml)),xlabel('Rango'),ylabel('Azimut'),...
title('DATOS CRUDOS SAR HH maestro')
figure,imagesc(abs(srs2)),xlabel('Rango'),ylabel('Azimut'),...
title('DATOS CRUDOS SAR HH esclavo')
figure,imagesc(angle(srs2)),xlabel('Rango'),ylabel('Azimut'),...
title('DATOS CRUDOS SAR HH esclavo')
%% ***** PROCESAMIENTO DE DATOS CRUDOS SAR ERS-2 ***** %%
Nrg=2^nextpow2(N);
Maz=2^nextpow2(M);
srml = srml.*(taylorwin(M).*ones(1,N));
srs2 = srs2.*(taylorwin(M).*ones(1,N));
sr11 = srml;
sr12 = srs2;

```

```

sar1=fft2(sr11,Maz,Nrg);
sar1=fftshift(sar1,2);
sar1=fftshift(sar1,1);
sar2=fft2(sr12,Maz,Nrg);
sar2=fftshift(sar2,2);
sar2=fftshift(sar2,1);
figure,imagesc(abs(sar1)),title('transformada bidimensional')
figure,imagesc(abs(sar2)),title('transformada bidimensional')
PRF=1/PRI;
fn=(-Maz/2:(Maz/2-1))*PRF/Maz;
xt=round((2*ycl/c)*fs/Nrg);
ft1=(-Nrg/2+3.9*xt):(Nrg/2-1+3.9*xt))*fs/Nrg;
ft2=(-Nrg/2+3.15*xt):(Nrg/2-1+3.15*xt))*fs/Nrg;
r=ycl;
ft01=f0+ft1;
ft02=f0+ft2;
fn1=c*fn/(2*Vs);
[Ft1,Fn1]=meshgrid(ft01,fn1);
[Ft2,Fn2]=meshgrid(ft02,fn1);
F1=sqrt((Ft1).^2-Fn1.^2);
F2=sqrt((Ft2).^2-Fn2.^2);
Fref1=exp(+1j*(4*pi*F1.*r/c+pi*ones(Maz,1).*ft1.^2/kr));
Fref2=exp(+1j*(4*pi*F2.*r/c+pi*ones(Maz,1).*ft2.^2/kr));
sar1=sar1.*Fref1;
sar2=sar2.*Fref2;
figure,imagesc(abs(sar1)),title('Focalización general')
figure,imagesc(abs(sar2)),title('Focalización general')
ftb1=(f0+ft1).^2;
ftb2=(f0+ft2).^2;
fp2=((c/(2*Vs)).^2)*fn;
[Ftb1,Fn2]=meshgrid(ftb1,fp2);
ftp1=sqrt(Ftb1+Fn2)-f0;
[Ftb2,Fn2]=meshgrid(ftb2,fp2);
ftp2=sqrt(Ftb2+Fn2)-f0;
% D=sqrt(1-(lambda*fn/(2*Vs*f0)).^2);
% ftp1=f0*(D'-1)+ft1./D';
% ftp2=f0*(D'-1)+ft2./D'
isarl=zeros(Maz,Nrg);
isar2=zeros(Maz,Nrg);
for ii=1:Maz
isarl(ii,:)=interp1(ft1(:),sar1(ii,:),ftp1(ii,:), 'spline', 'extrap');
isar2(ii,:)=interp1(ft2(:),sar2(ii,:),ftp2(ii,:), 'spline', 'extrap');
end
sar1=ifft2(isarl);
sar2=ifft2(isar2);
%% ***** PROCESAMIENTO DE DATOS CRUDOS SAR ***** %%
clear M
clear N
M=105;
N=141;
ni=ceil(Nrg/2-N/2);
nf=ceil(Nrg/2+N/2);
mi=ceil(Maz/2-M/2);
mf=ceil(Maz/2+M/2);
maestra=sar1(mi:(mf-1),(ni+1):nf);
esclava=sar2(mi:(mf-1),(ni+1):nf);
figure('name','Interferometria SAR','NumberTitle','off'),...

```

```

subplot(2,2,1),imagesc(abs(srm1)),xlabel('Rango'),ylabel('Azimut'),...
title('DATOS CRUDOS SAR MAESTRA')
subplot(2,2,2),imagesc(abs(maestra)),xlabel('Rango'),...
ylabel('Azimut'),title('IMAGEN SAR MAESTRA')
subplot(2,2,3),imagesc(abs(srs2)),xlabel('Rango'),ylabel('Azimut'),...
title('DATOS CRUDOS SAR ESCLAVA')
subplot(2,2,4),imagesc(abs(esclava)),xlabel('Rango'),...
ylabel('Azimut'),title('IMAGEN SAR ESCLAVA')
save esclava.mat esclava
save maestra.mat maestra
intSAR=maestra.*conj(esclava);
IntSAR=angle(intSAR);
%% ***** Estimación de numero de onda vertical ***** %%
lambda=c/f0;
B=sqrt(By.^2+Bz.^2);
D_theta=atan(tan(deg2rad(theta))+B/H)-deg2rad(theta);
kzt=(4*pi*D_theta)./(lambda.*sin(deg2rad(theta)));
%% ***** Estimación de la fase flat earth ***** %%
y1=H*tan(deg2rad(theta));
alfa11=deg2rad(theta)-atan((y1-Ly/2)/H);
alfa12=atan((y1+Ly/2)/H)-deg2rad(theta);
r1=sqrt(y1.^2+H.^2);
r11=r1*(linspace((deg2rad(theta)), (deg2rad(theta)+alfa11+alfa12),N));
phi1=atan(Bz/By);
r2=sqrt((By+y1).^2+(Bz+H).^2);
beta=atan((y1+By)/(H+Bz));
alfa21=beta-atan((y1+By-Ly/2)/(H+Bz));
alfa22=atan((y1+By+Ly/2)/(H+Bz))-beta;
r22=r2*(linspace(beta, (beta+alfa21+alfa22),N));
rr=r22-r11;
kk1=(4*pi/lambda);
flat_earth1=kk1*(rr);
fIntSAR=intSAR.*exp(1j*flat_earth1);
rIntSAR=angle(fIntSAR);
hHH=rIntSAR./kzt;
hHH=medfilt2(hHH,[10 10]);
%% ***** INTERFEROMETRÍA SAR ***** %%
figure('name','Interferometria SAR','NumberTitle','off'),...
subplot(2,2,1),imagesc(IntSAR),xlabel('Rango'),ylabel('Azimut'),...
title('Interferograma')
subplot(2,2,2),imagesc(rIntSAR),xlabel('Rango'),...
ylabel('Azimut'),title('Remocion de flat earth')
subplot(2,2,3),imagesc(abs(hHH)),xlabel('Rango'),ylabel('Azimut'),...
colorbar,title('DEM')
subplot(2,2,4),surf(abs(hHH)),xlabel('Rango'),colorbar,...
ylabel('Azimut'),zlabel('Altura'),shading interp,xlim([1 141]),ylim([1
105]),title('DEM')

```

Anexo 8: Procesamiento digital de imágenes SAR

```

%% ***** PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES SAR ***** %%
clear all
close all
clc
%% ***** IMÁGENES InSAR ***** %%
load('M_S11.mat')
load('S_S11.mat')
load('M_S12.mat')
load('S_S12.mat')
load('M_S21.mat')
load('S_S21.mat')
load('M_S22.mat')
load('S_S22.mat')
load('maestra.mat')
load('esclava.mat')
%% ***** Parametros iniciales SAR ***** %%
fc=1.3e9;% Frecuencia de la portadora de la señal chirp [Hz]
Bz=1;% Linea de base vertical [m]
Bx=10;% linea de base horizontal [m]
c=3e8;% Velocidad de la luz [m/s]
H=3000;% Altura de la plataforma SAR [m]
Lx=104.760740;% Longitud de la escena en azimut [m]
Ly=140.760740;% Longitud de la escena en rango [m]
M=105;
N=141;
%% Polarización HH
alfa=deg2rad(45);
beta=deg2rad(0);
e=deg2rad(0);
u=deg2rad(0);
MHH=ImagenPol_SAR(MS11,MS12,MS22,alfa,beta,e,u);
SHH=ImagenPol_SAR(SS11,SS12,SS22,alfa,beta,e,u);
%% Polarización HV
alfa=deg2rad(90);
beta=deg2rad(90);
e=deg2rad(0);
u=deg2rad(0);
MHV=ImagenPol_SAR(MS11,MS12,MS22,alfa,beta,e,u);
SHV=ImagenPol_SAR(SS11,SS12,SS22,alfa,beta,e,u);
%% Polarización VV
alfa=deg2rad(45);
beta=deg2rad(180);
e=deg2rad(0);
u=deg2rad(0);
MVV=ImagenPol_SAR(MS11,MS12,MS22,alfa,beta,e,u);
SVV=ImagenPol_SAR(SS11,SS12,SS22,alfa,beta,e,u);
%% Coeficiente de correlacion
gammap=CoherenciaCompleja_SAR(maestra,esclava);
gcp=abs(gammap);
gammaHH=CoherenciaCompleja_SAR(MHH,SHH);
gchH=abs(gammaHH);
gammaHV=CoherenciaCompleja_SAR(MHV,SHV);
gchV=abs(gammaHV);
gammaVV=CoherenciaCompleja_SAR(MVV,SVV);

```

```

gcVV=abs(gammaVV);
%% Imagenes SAR calibrados
figure('name','MASTER SAR IMAGE','NumberTitle','off'),...
subplot(3,2,1),imagesc(abs(MHH)),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'),...
title('IMAGEN SAR MAESTRO HH')
subplot(3,2,2),imagesc(abs(SHH)),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'),...
title('IMAGEN SAR ESCLAVO HH')
subplot(3,2,3),imagesc(abs(MHV)),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'),...
title('IMAGEN SAR MAESTRO HV')
subplot(3,2,4),imagesc(abs(SHV)),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'),...
title('IMAGEN SAR ESCLAVO HV')
subplot(3,2,5),imagesc(abs(MVV)),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'),...
title('IMAGEN SAR MAESTRO VV')
subplot(3,2,6),imagesc(abs(SVV)),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'),...
title('IMAGEN SAR ESCLAVO VV')
%% ***** INTERFEROGRAMA ***** %%
intp=maestra.*conj(esclava);
intHH=MHH.*conj(SHH);
intHV=MHV.*conj(SHV);
intVV=MVV.*conj(SVV);
figure,subplot(1,2,1),imagesc(abs(intp)),xlabel('Rango'),ylabel(...
'Azimut'),title('Magnitud de la interferograma')
subplot(1,2,2),imagesc(angle(intp)),xlabel('Rango'),ylabel('Azimut'),...
title('fase de la interferograma')
%% ***** Estimación de numero de onda vertical ***** %%
lambda=c/fc;
B=sqrt(Bx.^2+Bz.^2);
theta=45*(pi/180);
D_theta=atan(tan(theta)+B/H)-theta;
kzt=(4*pi*D_theta)./(lambda.*sin(theta));
%% ***** Estimacion de la fase flat earth ***** %%
y1=H*tan(theta);
alfa11=theta-atan((y1-Ly/2)/H);
alfa12=atan((y1+Ly/2)/H)-theta;
r1=sqrt((y1).^2+H.^2);
r11=r1*(linspace((theta-2*alfa11/40),(theta+39*2*alfa11/40),N));
r11p=r1*(linspace(theta,(theta+alfa11+alfa12),N));
phi1=atan(Bz/Bx);
r2=sqrt((Bx+y1).^2+(Bz+H).^2);
beta=atan((y1+Bx)/(H+Bz));
alfa21=beta-atan((y1+Bx-Ly/2)/(H+Bz));
alfa22=atan((y1+Bx+Ly/2)/(H+Bz))-beta;
r22p=r2*(linspace(beta,(beta+alfa21+alfa22),N));
r22=r2*(linspace((beta-2*alfa21/40),(beta+39*2*alfa21/40),N));
rrp=r22p-r11p;
rr=r22-r11;
kk1=(4*pi/lambda);
flat_earthp=kk1*(rrp);
flat_earth1=kk1*(rr);
fIntp=intp.*exp(1j*flat_earthp);
fIntHH=intHH.*exp(1j*flat_earth1);
fIntHV=intHV.*exp(1j*flat_earth1);
fIntVV=intVV.*exp(1j*flat_earth1);
rIntp=angle(fIntp);
rIntHH=angle(fIntHH);
rIntHV=angle(fIntHV);
rIntVV=angle(fIntVV);

```

```

figure('name','INTERFEROGRAMAS','NumberTitle','off'),...
subplot(3,2,1),imagesc(angle(intHH)),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'),...
title('INTERFEROGRAMA HH')
subplot(3,2,2),imagesc(rIntHH),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'),...
title('INTERFEROGRAMA HH')
subplot(3,2,3),imagesc(angle(intHV)),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'),...
title('INTERFEROGRAMA HV')
subplot(3,2,4),imagesc(rIntHV),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'),...
title('INTERFEROGRAMA HV')
subplot(3,2,5),imagesc(angle(intVV)),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'),...
title('INTERFEROGRAMA VV')
subplot(3,2,6),imagesc(rIntVV),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'),...
title('INTERFEROGRAMA VV')
rIntp=SARunwrapping1(rIntp);
rIntHH=SARunwrapping1(rIntHH);
rIntHV=SARunwrapping1(rIntHV);
rIntVV=SARunwrapping1(rIntVV);
hp=abs(rIntp./kzt);
hHH=abs(rIntHH./kzt);
hHV=abs(rIntHV./kzt);
hVV=abs(rIntVV./kzt);
hp=medfilt2(hp,[15 15]);
hHH=medfilt2(hHH,[7 7]);
hHV=medfilt2(hHV,[7 7]);
hVV=medfilt2(hVV,[7 7]);
hpc=Ndescarte(hp);
hHHc=Ndescarte(hHH);
hHVc=Ndescarte(hHV);
hVVc=Ndescarte(hVV);
hHHm=max(max(hHH));
hHVm=max(max(hHV));
hVVm=max(max(hVV));
figure('name','MODELAMIENTO DE ELEVACIÓN DIGITAL','NumberTitle','off'),...
subplot(2,2,1),imagesc(angle(intp)),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'...
),title('INTERFEROGRAMA'),colorbar
subplot(2,2,2),imagesc(rIntp),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'...
),title('REMOCIÓN DE FLAT EARTH'),colorbar
subplot(2,2,3),surf(hp),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'...
),zlabel('ALTURA'),title('DEM'),colorbar,shading interp
subplot(2,2,4),surf(hpc),xlabel('RANGO'),ylabel('AZIMUT'...
),zlabel('ALTURA'),title('DEM MEJORADO'),colorbar,shading interp
figure('name','ESTIMACIÓN DE LA ALTURA FORESTAL','NumberTitle','off'),...
subplot(2,2,1),surf(hHH),xlabel('RANGO [m]'),ylabel('AZIMUT [m]'...
),zlabel('ALTURA [m]'),title('POLARIZACIÓN HH'),colorbar,shading interp
subplot(2,2,2),surf(hHV),xlabel('RANGO [m]'),ylabel('AZIMUT [m]'...
),zlabel('ALTURA [m]'),title('POLARIZACIÓN HV'),colorbar,shading interp
subplot(2,2,3),surf(hHV),xlabel('RANGO [m]'),ylabel('AZIMUT [m]'...
),zlabel('ALTURA [m]'),title('POLARIZACIÓN VH'),colorbar,shading interp
subplot(2,2,4),surf(hVV),xlabel('RANGO [m]'),ylabel('AZIMUT [m]'...
),zlabel('ALTURA [m]'),title('POLARIZACIÓN VV'),colorbar,shading interp

```

Anexo 9: Radar de apertura sintética

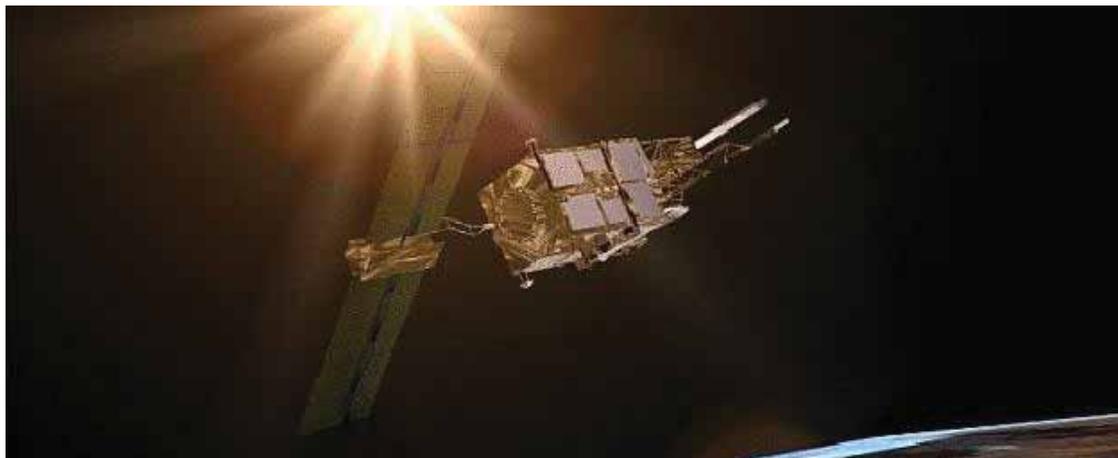


Figura 55: Nave espacial ERS-2 en orbita (ESA)

Fuente: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/e/ers-2>

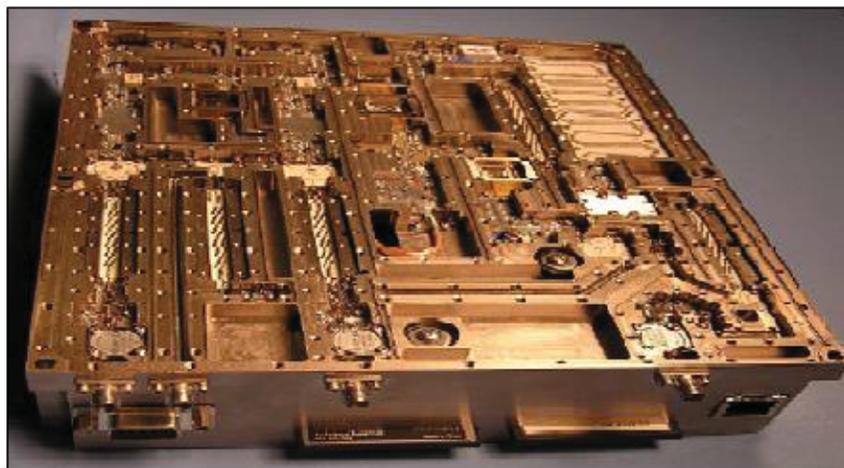
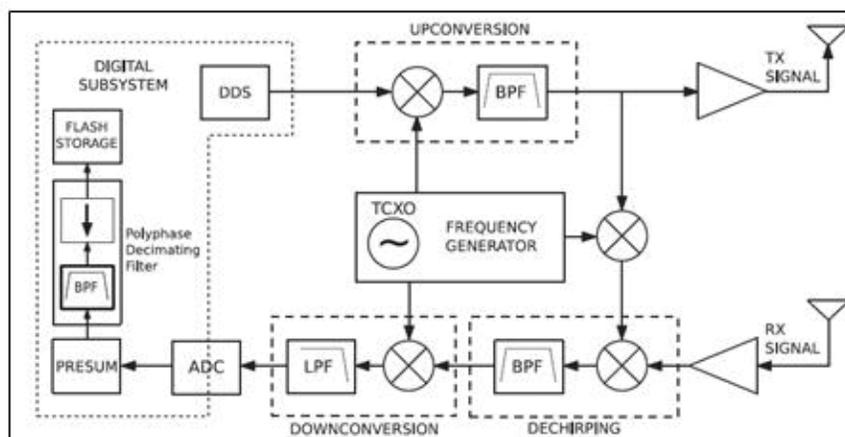


Figura 56: Hardware del sistema MicroASAR

Fuente: (Zaugg, et al., 2009)

Anexo 10: Parámetros iniciales E-SAR (PolSARproSim)

```

Input parameter report ...

2          /* The number of requested tracks      */
4242.640600 /* Slant range (broadside platform to scene centre) in metres */
45.000000  /* Incidence angle in degrees */
4250.423600 /* Slant range (broadside platform to scene centre) in metres */
45.085800  /* Incidence angle in degrees */
1.300000   /* Centre frequency in GHz */
1.500000   /* Azimuth resolution (width at half-height power) in metres */
1.060700   /* Slant range resolution (width at half-height power) in metres */
0          /* Ground model: 0 = smoothest ... 10 = roughest */
0.020000   /* Ground slope in azimuth direction (dimensionless) */
0.010000   /* Ground slope in ground range direction (dimensionless) */
34548     /* Random number generator seed */
4          /* Tree species: 0 = HEDGE, 1,2,3 = PINE, 4 = DECIDUOUS */
18.000000  /* Mean tree height in metres */
2827.450000 /* Area of the forest stand in square metres */
300       /* Desired stand density in stems per hectare */
1         /* Ground moisture content model: 0 = dry ... 10 = wet */

Requested stand density of 300 Trees/Ha is too great.
Resetting stand density to 66 Trees/Ha.

Small-scale RMS height = 0.003114
Small-scale cor length = 0.025773
Large-scale RMS height = 0.004762
Large-scale cor length = 7.690180
Derived parameter values ...

Wavelength           = 0.230610 metres
Wavenumber           = 27.245985 inv. metres
Azimuth resolution   = 1.500000 metres
Ground range resolution[0] = 1.500056 metres
Ground range resolution[1] = 1.497815 metres
Large-scale height stdev = 0.004762 metres
Large-scale length   = 7.690180 metres
Small-scale height stdev = 0.003114 metres
Small-scale length   = 0.025773 metres
Layover distance     = 18.000000 metres
Shadow distance      = 18.000000 metres
Gap distance         = 15.000282 metres
Stand radius         = 30.000088 metres
Lx                   = 104.760740 metres
Ly                   = 140.760740 metres
Area                 = 14746.199166 square metres
Hectares             = 1.474620 Ha
There are 105 pixels in azimuth of width 0.997721 metres
There are 141 pixels in ground range of width 0.998303 metres
Deciduous forest simulation

```

Figura 57: Parámetros por defecto del sistema E-SAR (ESA)

Fuente: PolSARproSim