



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Generación y evaluación de Modelos Digitales de Superficie utilizando sensores SAR (INSAR) en zonas de alta nubosidad en el Ecuador Continental.**

Saavedra Vaca, Ana Elizabeth.

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniera Geógrafa y del Medio Ambiente

Ing. Kirby Powney, Eduardo Patricio, MSc.

06 de septiembre del 2021

# Curiginal

## Document Information

---

Analyzed document	1.TESIS_SAAVEDRA_ANA.docx (D111481845)
Submitted	8/20/2021 1:28:00 AM
Submitted by	
Submitter email	epkirby@espe.edu.ec
Similarity	3%
Analysis address	epkirby.espe@analysis.orkund.com

EDUARDO  
PATRICIO  
KIRBY  
POWNEY

Firmado digitalmente por  
EDUARDO  
PATRICIO KIRBY  
POWNEY.  
Fecha: 2021.09.07  
12:07:19 -05'00'

---

Ing. Kirby Powney, Eduardo Patricio, MSc.

C. C. 0102611811



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN  
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “Generación y evaluación de Modelos Digitales de superficie utilizando sensores SAR (INSAR) en zonas de alta nubosidad en el Ecuador Continental” fue realizado por la señorita **Saavedra Vaca, Ana Elizabeth** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 06 de septiembre del 2021

Firma:

EDUARDO  
PATRICIO  
KIRBY POWNEY

Firmado digitalmente  
por EDUARDO  
PATRICIO KIRBY  
POWNEY  
Fecha: 2021.09.06  
09:44:19 -0500

.....  
Ing. Kirby Powney, Eduardo Patricio, MSc.

C. C. 0102611811



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN  
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Saavedra Vaca, Ana Elizabeth**, con cédula de ciudadanía 1723471577, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Generación y evaluación de Modelos Digitales de superficie utilizando sensores SAR (INSAR) en zonas de alta nubosidad en el Ecuador Continental”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 06 de septiembre del 2021

Firma

.....  
**Saavedra Vaca, Ana Elizabeth**

C.C.: 1723471577



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN  
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo **Saavedra Vaca, Ana Elizabeth**, con cédula de ciudadanía 1723471577, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Generación y evaluación de Modelos Digitales de superficie utilizando sensores SAR (INSAR) en zonas de alta nubosidad en el Ecuador Continental”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 06 de septiembre del 2021

Firma

.....  
**Saavedra Vaca, Ana Elizabeth**

C.C.: 1723471577

## Dedicatoria

*A mi madre Elizabeth, que me ha guiado con su amor y confianza.*

*A mi abuelita Hortensia, por sus oraciones y por el amor que me ha brindado.*

## Agradecimientos

A mi madre, mi padre, mi hermano y toda mi familia por su apoyo incondicional y sus oraciones en el transcurso de mi carrera universitaria.

Al Ing. Eduardo Kirby Mgs. director de tesis, por su apoyo incondicional, guía, paciencia, conocimiento y confianza que me permitió desarrollar este proyecto contribuyendo a mi formación profesional, fue un pilar fundamental con sus enseñanzas y consejos.

Al PhD. Oswaldo Padilla por su guía, entereza y colaboración con su conocimiento en el desarrollo de este proyecto.

Al PhD. Marco Luna y al Ing. César Leiva, por sus indicaciones, paciencia y conocimiento que me brindaron en momentos de duda e incertidumbre.

Al Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, por su brindar los insumos requeridos para el procesamiento del proyecto realizado, y a Santiago por su amable colaboración en el proceso.

A mis amigas Verito, Joss y Chris que me ayudaron a solventar dudas en el proceso, con risas y alegría, me animaron en cada obstáculo que se presentaba en cada momento.

A mis amigos Ale, Les, Karen, Jazz, Meli, Nico, Samy y todos quienes me faltan por nombrar, les agradezco infinitamente por todo el apoyo que me brindaron en esta época. Su presencia en este último par de años formó parte de mi construcción personal y profesional.

A mis amigos Michu, Andrés, Dani, Michu, y todos los chicos del recorrido que formaron parte de extensos viajes de regreso, siempre me mostraron su apoyo incondicional y ánimo.

A todos quienes conformaron parte de mis experiencias, anécdotas y aventuras, gracias por hacer de la vida universitaria una época inolvidable.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

Urkund .....	2
Certificación .....	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de Publicación .....	5
Dedicatoria .....	6
Agradecimientos.....	7
Resumen .....	23
Abstract.....	24
CAPÍTULO I .....	25
ASPECTOS GENERALES .....	25
Antecedentes.....	25
Planteamiento del Problema .....	28
Justificación e Importancia .....	29
Área de Intervención.....	30
Área de Intervención Propuesta .....	30
Área de Intervención Definida .....	31
Objetivos .....	32
Objetivo General.....	32
Objetivos Específicos .....	32



<b>Metas .....</b>	<b>33</b>
<b>Hipótesis de Investigación .....</b>	<b>34</b>
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>35</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>35</b>
<b>Teledetección.....</b>	<b>35</b>
<b>Frecuencia .....</b>	<b>36</b>
<b>Longitud de Onda.....</b>	<b>37</b>
<b>Energía electromagnética .....</b>	<b>37</b>
<b>Espectro electromagnético .....</b>	<b>37</b>
<b>Espectro visible .....</b>	<b>38</b>
<b>Banda Microonda.....</b>	<b>38</b>
<b>Sensor activo.....</b>	<b>39</b>
<b>Resolución espacial .....</b>	<b>39</b>
<b>Resolución temporal .....</b>	<b>40</b>
<b>Sistemas RADAR.....</b>	<b>40</b>
Bandas de los sistemas RADAR .....	41
Potencia del sistema RADAR.....	42
Ecuación del sistema RADAR .....	43
<b>Radars de Apertura Sintética (SAR).....</b>	<b>44</b>
Amplitud .....	44

	10
Fase .....	45
Ángulo de Incidencia.....	45
Polarización.....	46
Retrodispersión.....	47
Coeficiente de Retrodispersión ( $\sigma_0$ ) .....	48
Mecanismos de Retrodispersión.....	48
Reflexión Difusa .....	48
Reflexión Especular .....	49
Retrodispersión en volumen.....	50
Dispersión doble rebote.....	50
Geometría de la adquisición SAR.....	51
Geometría en Rango Inclinado (Slant Range) .....	52
Geometría en Rango Terrestre (Ground Range).....	52
Geometría en azimut .....	53
Distorsiones por el terreno .....	54
Escorzo ( <i>Foreshortening</i> ) .....	54
Inversión por relieve ( <i>Layover</i> ) .....	54
Sombras ( <i>Shadow</i> ) .....	55
Moteado ( <i>Speckle</i> ) .....	56
Resoluciones de las imágenes SAR .....	56

	11
Resolución en azimut.....	57
Resolución en rango.....	57
<b>Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) .....</b>	<b>57</b>
Fase Interferométrica .....	58
Base line .....	59
Temporal base line.....	59
Corregistro .....	60
Multilooking.....	60
Interferograma.....	61
Coherencia .....	63
Desenrollo de la fase interferométrica .....	64
Cambio de fase a elevación .....	65
Corrección del terreno.....	66
<b>Satélites SAR para Interferometría.....</b>	<b>67</b>
<b>Satélite Sentinel-1 .....</b>	<b>69</b>
Modo de adquisición de Sentinel-1 .....	69
Stripmap Mode (SM).....	70
Interferometric Wide Swath Mode (IW).....	70
Extra-Wide Swath Mode (EW) .....	71
Wave Mode (WV).....	71

	12
Nivel de procesamiento de Sentinel-1.....	72
Nivel 0. ....	72
Nivel 1 .....	72
Single Look Complex (SLC) .....	72
Ground Range Detected (GRD) .....	72
Nivel 2 .....	73
<b>Satélite Cosmo SkyMED.....</b>	<b>73</b>
Modo de adquisición de Cosmo SkyMED .....	74
Spotlight.....	74
Stripmap Himage .....	74
Stripmap Ping-Pong.....	75
Scansar Wide Region.....	75
Scansar Huge Region.....	75
Nivel de procesamiento de Cosmo SkyMED.....	75
Nivel 0 .....	75
Nivel 1A .....	75
Nivel 1B .....	76
Nivel 1C / 1D .....	76
<b>Plataformas informáticas .....</b>	<b>76</b>
Software SNAP Desktop.....	77

	13
SNAPHU.....	77
Software ENVI.....	77
SARscape Analytics.....	78
Software ERDAS Imagine .....	78
Radar Toolbox .....	78
<b>Modelo digital de superficies.....</b>	<b>79</b>
<b>Modelo digital SRTM.....</b>	<b>79</b>
<b>Modelo digital ALOS.....</b>	<b>80</b>
<b>Nubosidad .....</b>	<b>81</b>
<b>Red de Control Vertical IGM .....</b>	<b>81</b>
<b>Estadísticos .....</b>	<b>81</b>
Media .....	81
Desviación estándar.....	82
Intervalo de confianza .....	82
<b>Normativa para evaluación altimétrica .....</b>	<b>83</b>
Precisión vertical IGM.....	83
Root Mean Square (RMS) .....	83
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>85</b>
<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>85</b>
<b>Generalidades.....</b>	<b>85</b>

<b>Recopilación y estandarización de información .....</b>	<b>88</b>
<b>Generación MDS en software ENVI .....</b>	<b>92</b>
<b>Generación MDS con imágenes Cosmo SkyMED en software ERDAS IMAGINE .....</b>	<b>95</b>
Importación de imágenes Cosmo SkyMED en software ERDAS IMAGINE.....	96
Corregistro de imágenes en software ERDAS IMAGINE .....	98
DEM Referencia en software ERDAS IMAGINE .....	99
Formación de interferograma en software ERDAS IMAGINE .....	99
Desenrollo de fase en software ERDAS IMAGINE.....	100
Refinamiento de Línea Base en software ERDAS IMAGINE .....	101
<b>Generación MDS con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop .....</b>	<b>103</b>
Corregistro con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop.....	104
Formación del interferograma con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop.....	105
Aplicación de filtrado de Goldstein con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop.....	106
Desenrollo de fase con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop.....	107
Cambio de fase a elevación con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop.....	110
Corrección del terreno con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop .....	111
<b>Generación MDS con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop.....</b>	<b>112</b>
Corregistro con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop.....	113
S1 TOPS Split .....	113

Aplicación de información de órbita.....	113
S1 Back Geocoding.....	114
Formación de interferograma con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop .....	115
S1 TOPS Deburst .....	116
Aplicación de filtrado de Goldstein con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop .	117
Desenrollo de fase con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop.....	117
Cambio de fase a elevación con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop.....	120
Corrección del terreno con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop .....	120
<b>Análisis estadístico del control de calidad en MDS generados .....</b>	<b>121</b>
Metodología utilizada en la valuación estadística de los MDS generados .....	124
Metodología de evaluación con la normativa internacional de los MDS generados .....	125
Metodología de evaluación con la normativa IGM de los MDS generados.....	127
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>128</b>
<b>RESULTADOS .....</b>	<b>128</b>
<b>Resultado de corregistro de imágenes en software SNAP Desktop .....</b>	<b>128</b>
<b>Resultados de interferogramas de imágenes SAR .....</b>	<b>129</b>
<b>Resultados de interferograma con filtro S1 TOPS Deburst en software SNAP Desktop .....</b>	<b>131</b>
<b>Resultados de interferogramas con Filtro de Goldstein.....</b>	<b>132</b>
<b>Resultados de coherencia de imágenes SAR .....</b>	<b>135</b>
<b>Resultados de desenrollo de interferograma .....</b>	<b>137</b>

<b>Resultados de modelos digitales de superficie.....</b>	<b>140</b>
<b>Distribución de vértices del Instituto Geográfico Militar (IGM) en MDS generados .....</b>	<b>144</b>
<b>Resultados de evaluaciones de MDS generados .....</b>	<b>146</b>
Evaluación de modelos de referencia mundial en función de los vértices del Instituto Geográfico Militar (IGM).....	146
Evaluación de MSD generados en función de los modelos de referencia mundial.....	148
Evaluación de MDS generados en función de los vértices del Instituto Geográfico Militar (IGM) .....	151
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>157</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>157</b>
<b>Conclusiones .....</b>	<b>157</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>159</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>161</b>

#### ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Satélites SAR para Interferometría .....	68
<b>Tabla 2.</b> Requerimientos para instalación de programas .....	89
<b>Tabla 3.</b> Características de imágenes Sentinel-1 .....	90
<b>Tabla 4.</b> Características de imágenes Cosmo SkyMED .....	91
<b>Tabla 5.</b> Tiempo empleado por programa y almacenamiento de resultados .....	144
<b>Tabla 6.</b> Evaluación de MDS Globales en función de vértices IGM .....	147



<b>Tabla 7.</b> Evaluación de MDS con imágenes SAR en función de MDS Globales.....	148
<b>Tabla 8.</b> Evaluación de MDS con imágenes SAR en zona de alta coherencia en función de MDS Globales .....	150
<b>Tabla 9.</b> <i>Evaluación de MDS INSAR en función de vértices IGM</i> .....	151
<b>Tabla 10.</b> Evaluación de MDS con imágenes SAR en zona de alta coherencia en función de vértices IGM.....	153
<b>Tabla 11.</b> Escala aproximada en función de resultados obtenidos en función de RMS .....	154
<b>Tabla 12.</b> Escala aproximada en función de resultados obtenidos en función de media aritmética .....	155

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Área de Intervención Propuesta .....	31
<b>Figura 2.</b> <i>Área de Intervención Definida</i> .....	32
<b>Figura 3.</b> Teledetección pasiva y activa. ....	36
<b>Figura 4.</b> Longitud de Onda y Frecuencia .....	36
<b>Figura 5.</b> Espectro electromagnético .....	38
<b>Figura 6.</b> Bandas Radar .....	41
<b>Figura 7.</b> Ángulo de incidencia.....	46
<b>Figura 8.</b> Polarización.....	46
<b>Figura 9.</b> Retrodispersión de superficies .....	47
<b>Figura 10.</b> Reflexión difusa.....	49

<b>Figura 11.</b> Reflexión Especular .....	49
<b>Figura 12.</b> Retrodispersión en volumen.....	50
<b>Figura 13.</b> Double Bounce.....	50
<b>Figura 14.</b> Geometría de adquisición de sistemas SAR.....	51
<b>Figura 15.</b> Geometría Slant Range .....	52
<b>Figura 16.</b> Slant Range y Ground Range .....	53
<b>Figura 17.</b> Geometría de Azimut.....	53
<b>Figura 18.</b> Foreshortening.....	54
<b>Figura 19.</b> Layover.....	55
<b>Figura 20.</b> Shadows .....	55
<b>Figura 21.</b> Ejemplo efecto Speckle .....	56
<b>Figura 22.</b> Modo de adquisición para InSAR.....	58
<b>Figura 23.</b> Línea base interferométrica.....	59
<b>Figura 24.</b> Temporal Baseline .....	60
<b>Figura 25.</b> Representación de fase $2\pi$ .....	62
<b>Figura 26.</b> Interferograma.....	62
<b>Figura 27.</b> Coherencia de imágenes SAR.....	63
<b>Figura 28.</b> Desenrollo de fase .....	64
<b>Figura 29.</b> Desenrollo de interferograma .....	65
<b>Figura 30.</b> Cambio de fase a elevación .....	66

<b>Figura 31.</b> Corrección de terreno.....	67
<b>Figura 32.</b> Modos de adquisición Sentinel-1.....	70
<b>Figura 33.</b> Modo de captura TOPSAR Sentinel-1 .....	71
<b>Figura 34.</b> Modos de adquisición Cosmo SkyMED.....	74
<b>Figura 35.</b> Ejemplo de Modelo Digital de Superficies.....	79
<b>Figura 36.</b> Metodología General para la Generación de MDS con Interferometría.....	87
<b>Figura 37.</b> Imágenes Sentinel-1 .....	90
<b>Figura 38.</b> Imágenes Cosmo SkyMED.....	92
<b>Figura 39.</b> Procesamiento software ENVI .....	92
<b>Figura 40.</b> Ingreso de parámetros software ENVI.....	93
<b>Figura 41.</b> Procesamiento software ERDAS IMAGINE.....	96
<b>Figura 42.</b> Importación de imágenes SAR en software ERDAS IMAGINE .....	97
<b>Figura 43.</b> Ingreso de imágenes Cosmo SkyMED en software ERDAS IMAGINE .....	97
<b>Figura 44.</b> Corregistro de imágenes en software ERDAS IMAGINE .....	98
<b>Figura 45.</b> Aplicación multilooking en software ERDAS IMAGINE .....	99
<b>Figura 46.</b> Generación del interferograma software ERDAS IMAGINE.....	100
<b>Figura 47.</b> Desenrollo de fase en software ERDAS IMAGINE.....	101
<b>Figura 48.</b> Ingreso de GCP en software ERDAS IMAGINE .....	102
<b>Figura 49.</b> MDS de salida con software ERDAS IMAGINE .....	103
<b>Figura 50.</b> Procesamiento software SNAP Desktop con imágenes Cosmo SkyMED.....	104

<b>Figura 51.</b> Corregistro de imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop.....	105
<b>Figura 52.</b> Generación de interferograma con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop .....	106
<b>Figura 53.</b> Filtrado de Goldstein con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop ....	107
<b>Figura 54.</b> Instalación plugin SNAPHU .....	107
<b>Figura 55.</b> Desenrollo del interferograma con imágenes Cosmo SkyMED en SNAPHU .....	108
<b>Figura 56.</b> Exportación del desenrollo de fase con imágenes Cosmo SkyMED en SNAPHU Export .....	109
<b>Figura 57.</b> Desenrollo de fase con imágenes Cosmo SkyMED en SNAPHU .....	109
<b>Figura 58.</b> Importación del desenrollo de fase con imágenes Cosmo SkyMED en SNAPHU Import .....	110
<b>Figura 59.</b> Cambio de fase a elevación con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop .....	111
<b>Figura 60.</b> Corrección del terreno con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop .	111
<b>Figura 61.</b> Procesamiento software SNAP Desktop con imágenes Sentinel-1 .....	112
<b>Figura 62.</b> Delimitación del área de imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop .....	113
<b>Figura 63.</b> Aplicación de información de órbita con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop .....	114
<b>Figura 64.</b> Corregistro de imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop .....	114
<b>Figura 65.</b> Generación de interferograma con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop .....	115

<b>Figura 66.</b> S1 TOPS Deburst con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop.....	116
<b>Figura 67.</b> Aplicación del Filtro de Goldstein con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop .....	117
<b>Figura 68.</b> Desenrollo del interferograma con imágenes Sentinel-1 en SNAPHU .....	118
<b>Figura 69.</b> Exportación del desenrollo de fase con imágenes Sentinel-1 en SNAPHU Export....	118
<b>Figura 70.</b> Desenrollo de fase con imágenes Sentinel-1 en SNAPHU .....	119
<b>Figura 71.</b> Importación del desenrollo de fase con imágenes Sentinel-1 en SNAPHU Import...	119
<b>Figura 72.</b> Cambio de fase a elevación con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop...	120
<b>Figura 73.</b> Corrección del terreno con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop .....	121
<b>Figura 74.</b> Muestra de datos vértices de control vertical - IGM .....	122
<b>Figura 75.</b> Vértices de control vertical distribuidos sobre el área de estudio de las imágenes SAR .....	123
<b>Figura 76.</b> Extracción de valores de altura de MDS generados .....	124
<b>Figura 77.</b> Corregistro de imágenes SAR.....	128
<b>Figura 78.</b> Interferogramas obtenidos.....	130
<b>Figura 79.</b> Filtro TOPS Deburst imágenes Sentinel-1 .....	132
<b>Figura 80.</b> Interferogramas aplicado Filtro Goldstein.....	133
<b>Figura 81.</b> Mapas de coherencia obtenidos.....	135
<b>Figura 82.</b> Desenrollo del Interferogramas obtenidos.....	138
<b>Figura 83.</b> MDS obtenidos .....	141

<b>Figura 84.</b> MDS mundiales .....	143
<b>Figura 85.</b> Distribución de vértices sobre MDS obtenidos .....	145
<b>Figura 86.</b> Distribución de puntos en zonas de alta coherencia.....	150

## Resumen

El uso de imágenes SAR ha sido de gran utilidad para diversos fines, debido a su capacidad de capturar información independientemente de las condiciones climáticas presentes en una zona delimitada. En la ciudad de Quito, que se encuentra dentro de la cordillera andina con la presencia constante de nubosidad, se limita la captura de imágenes satelitales de sensores pasivos, por lo cual, el presente estudio tiene como finalidad la obtención de modelos digitales de superficie (MDS) a partir de imágenes radar de sensores activos. A partir de ello, se generaron MDS con Interferometría SAR (InSAR) con imágenes Sentinel-1 y Cosmo SkyMED, que poseen temporalidad de 6 y 4 días y banda C y X, respectivamente; aplicando un proceso general que consiste en: generar el correregistro, para la obtención del interferograma y la aplicación del filtrado de Goldstein, posteriormente, se realiza el desenrollado del fase, y finalmente transformar a valores de altura y de esa manera obtener los MDS; los cuales se evaluaron en función de los modelos mundiales SRTM de 1 arco de segundo y ALOS World 3D, además con 385 vértices de altura emitidos por el Instituto Geográfico Militar (IGM). La evaluación obtenida presentó mejores resultados en zonas de infraestructura que corresponde a áreas de alta coherencia, mientras que en zonas de alta vegetación y cambio de relieve se presenta menor exactitud vertical, esto debido a la baja coherencia presente entre las imágenes. Por lo que, los resultados conseguidos con el análisis del RMS se obtuvieron valores mayores a 80 m con el 95% de confiabilidad. Otro factor que altera los resultados es la distancia de la línea base existente, ya que se encuentran menores a lo emitido por varios autores que afirman el uso de una línea base mínima de 150 m entre satélites. Sin embargo, el presente estudio da paso al inicio de varias aplicaciones de imágenes SAR para diversos usos y en diferentes regiones del país, sin la afectación de condiciones climáticas.

Palabras clave:

- **INSAR**
- **MDS**
- **SENTINEL-1**
- **COSMO SKYMED**
- **NUBOSIDAD**

## Abstract

The use of SAR images has been very useful for a variety of purposes, due to its ability to capture information regardless of the climatic conditions present in a delimited area. In the city of Quito, which is within the Andean mountain range with the constant presence of cloudiness, the capture of satellite images of passive sensors is limited, which is why this study objective to obtain digital surface models (MDS) from radar images of active sensors. From this, MDS were generated with SAR Interferometry (InSAR) with images Sentinel-1 and Cosmo SkyMED, which have temporality of 6 and 4 days and band C and X, respectively; applying a general process consisting of: generating the co-register, for obtaining the interferogram and applying the Goldstein filtering, then performing the unwrap of the phase, and finally transform to height values and thus obtaining the MDS; which were evaluated according to the world models SRTM of 1 arc of second and ALOS World 3D, in addition with 385 vertices of height emitted by the Instituto Geográfico Militar (IGM). The evaluation obtained presented better results in areas of infrastructure that correspond to areas of high coherence, while in areas of high vegetation and change of relief less vertical accuracy is presented, this due to the low coherence present between the images. Therefore, the results acquired with the RMS analysis were obtained values greater than 80 m with 95% reliability. Another factor that alters the results is the distance of the baseline, as they are smaller than what is emitted by several authors who claim the use of a minimum baseline of 150 m between satellites. However, this study gives way to the beginning of several applications of SAR images for different uses and in different regions of the country, without affecting climatic conditions.

Keywords:

- **INSAR**
- **MDS**
- **SENTINEL-1**
- **COSMO SKYMED**
- **CLOUDINESS.**



## CAPÍTULO I

### ASPECTOS GENERALES

En el presente capítulo, se describe una breve introducción en la que se detalla la problemática a solucionar con el proyecto ejecutado, la misma que engloba los antecedentes a nivel nacional e internacional y la importancia tras la obtención de los productos para el beneficio de diversos proyectos en el ámbito geoespacial.

#### **Antecedentes**

Un modelo puede definirse como una simplificación de la realidad plasmada en una representación física o digital, en la cual se presentan ciertas propiedades (Joly, 1979). En función de este concepto, el uso de modelos beneficia al proceso de replicar algunas propiedades de un objeto con la finalidad de disminuir su complejidad, por lo cual, se establecen los modelos en función de la superficie terrestre. El modelo digital del terreno (MDT), se define como el conjunto de información numérica la cual representa una de las características del territorio (Doyle, 1978). A su vez, un modelo digital de elevaciones (MDE) se identifica como un conjunto numérico que describe la altitud en la superficie del terreno (Felicísimo, 1994). Por otro lado, el modelo digital de superficie (MDS), como su nombre lo indica, es una representación de la elevación de aquellos elementos presentes sobre el terreno como: vegetación, infraestructura, entre otros (Fuentes et al., 2012).

Según Wang et al., (2018) los modelos digitales de terreno, elevación y superficie se generan con múltiples metodologías como: fotogrametría, sistemas de posicionamiento global, altimetría, teledetección, imágenes ópticas, técnica de Interferometría radar (InSAR), entre otras. Una de estas metodologías es a partir de imágenes satelitales ópticas, sin embargo, pese a la alta resolución de varios sensores pasivos, la presencia de factores externos como condiciones

atmosféricas, obstruye la generación de los modelos mediante estos insumos (Fuentes et al., 2012). En ese sentido, en el Ecuador, se presenta un alto contenido de nubosidad debido a su ubicación geográfica en la zona ecuatorial. La región Sierra se encuentra constantemente cubierta por la presencia de nubes, principalmente, en zonas de baja temperatura; la región Costa posee una menor cantidad de nubosidad debido a la influencia de corrientes oceánicas; a su vez, la región Amazónica varía en su contenido de nubosidad, sin embargo, se ocasionan constantes precipitaciones durante todo el año (Guerero et al., 2017)

Debido a las condiciones atmosféricas del país, se dificulta la obtención de imágenes ópticas en ciertas regiones con gran cantidad de nubosidad, ya que, al obtener estos insumos no se logra identificar la cubierta terrestre en su totalidad, lo que genera ausencia de información tanto en áreas urbanas, rurales y zonas montañosas, por ello, se requiere utilizar imágenes radar para la obtención de estos productos (Duque, 2015).

En función de este requerimiento, existen sistemas satelitales que facilitan la adquisición de datos topográficos con disponibilidad a nivel mundial, entre ellos se encuentra el sistema radar *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) y el satélite *ALOS PALSAR*, sin embargo, algunos autores señalan que la calidad de estos modelos dependerá de las situaciones topográficas locales presentes en las zonas de requerimiento (Cango, 2017).

Con la finalidad de incorporar metodologías alternativas para la obtención de un MDS, principalmente, para zonas que poseen afectaciones atmosféricas como es el caso de la nubosidad, se da uso a sensores activos, ya que estos producen su propia energía electromagnética para capturar información, independientemente de las condiciones atmosféricas presentes. Por lo cual, la interferometría radar de apertura sintética (InSAR), es una técnica de teledetección que tiene como insumos a imágenes SAR, que consiste en

determinar la topografía terrestre mediante la medición de las diferencias de camino óptico entre el satélite y la tierra, en dos o más visitas de los satélites por una misma área, cubriendo de esa manera grandes extensiones del terreno (Geymen, 2014).

En función de esta técnica interferométrica, se hace uso de satélites activos como es el caso de Sentinel-1, el cual pertenece a la Agencia Espacial Europea (ESA) y vinculado al programa Copérnico. Se encuentra compuesto por una constelación de dos satélites con órbita polar: Sentinel-1A y Sentinel-1B (Guerrero & Hernandez, 2017), y del satélite Cosmo SkyMED que corresponde al Ministerio de Investigación y el Ministerio de Defensa (MOD) italiano y operado por la Agencia Espacial Italiana (ASI), se encuentra compuesto por una constelación de cuatro satélites SAR (Agrawal et al., 2018).

Según Guerrero & Hernandez (2017), los estudios en Colombia son reducidos en el ámbito de implementar la metodología de interferometría radar para la generación de modelos digitales de superficie. A su vez, al generar esta representación del terreno con otras técnicas, aumenta el costo económico y humano, por lo cual la ejecución de esta metodología reduce presupuesto con el uso del satélite Sentinel-1, el cual es de descarga libre a nivel mundial, y abarca una mayor extensión de superficie.

Según Vidal et al., (2019), quienes evaluaron un modelo digital de elevaciones generado por interferometría radar con el satélite Sentinel-1, en relación a un DEM de referencia de la cámara DMC (*Digital Mapping Camera*) en una zona urbana y montañosa de la región Metropolitana de Chile, mediante un análisis estadístico con el uso del método *Root Mean Square* (RMS) concluyen que la generación de modelos digitales de elevación en zonas urbanas presenta mayor precisión que en zonas vegetativas o montañosas.

## Planteamiento del Problema

En las zonas andinas del continente latinoamericano, se evidencia una misma problemática derivada de las condiciones atmosféricas, como es el caso de la constante presencia de nubosidad, la cual perjudica la obtención de modelos digitales de elevaciones y superficie con el uso de técnicas tradicionales (Duque, 2015).

Los modelos digitales del terreno, tanto los modelos digitales de elevación (MDE) y modelos digitales de superficie (MDS) son necesarios para varias investigaciones o proyectos geoespaciales, sin embargo, la obtención de estos productos se ve afectada debido a condiciones atmosféricas en zonas con alta presencia de nubosidad (Burgos & Salcedo, 2016).

La mayor parte de los MDS generados en el Ecuador son realizados a partir de sensores pasivos (cámaras aerotransportadas), también existen instituciones gubernamentales que generan modelos digitales, una de estas instituciones es el SIGTIERRAS (Mancero et al., 2015), que involucran una alta inversión en tiempo y personal; sin embargo, estos procedimientos generan conflictos en zonas de mayor nubosidad, lo que dificulta la obtención de los mismos, y la periodicidad de captura (resolución temporal), ocasionando zonas sin información altimétrica. Adicionalmente, por la alta capacidad de penetración a las condiciones atmosféricas, la mayoría de los MDS a nivel mundial han sido generados a partir de imágenes de sensores activos.

Por lo cual, este proyecto pretende desarrollar una metodología para la generación de MDS con el uso de imágenes SAR, de al menos dos sensores activos diferentes, aplicando la técnica de interferometría RADAR (INSAR), que permitan analizar las diferencias de retrodispersión y de fase entre ambas medidas, con el objetivo de presentar una alternativa para la generación de MDS en zonas de alta nubosidad.

## **Justificación e Importancia**

La información altimétrica representada en modelos digitales de terreno, elevación o superficie es indispensable para la llevar a cabo varios proyectos, en especial el enfoque hacia proyectos hidrográficos, inundaciones, procesos ambientales, entre otros (Schumann et al., 2008). Adicionalmente, los MDS poseen varias aplicaciones en el ámbito geoespacial, como: planes de manejo de recursos y desastres naturales, proyectos de planificación territorial, topográficos, cartográficos, toma de decisiones, entre otros estudios (Makineci & Karabörk, 2016); por lo cual, su uso es de gran relevancia para la generación de información aplicativa en varias áreas.

Debido a esto, la obtención de valores de altitud con metodologías alternativas son un aporte rentable para la generación de modelos digitales de superficies, los mismos que a su vez reducen el uso de recursos económicos y humanos que representan varias tecnologías como LIDAR, fotogrametría, nivelación geométrica, entre otros. Por lo que, el uso de la interferometría radar para generar un modelo digital se considera un método eficiente para obtener datos de grandes extensiones (Geymen, 2014).

Existen varias ventajas de la obtención de modelos digitales de elevaciones o superficies a partir de InSAR en relación a otras técnicas, una de ellas es su capacidad para tomar datos en condiciones climatológicas variadas, principalmente, al requerir información de zonas con gran cantidad de nubosidad (Burgos et al., 2017). Por lo que la importancia de esta técnica se presenta en las altas resoluciones espaciales y la capacidad de generar múltiples modelos de manera automatizada (Crosetto & Crippa, 2000).

En Ecuador, así como en varios países de Latinoamérica, se evidencia claramente la presencia constante de nubosidad, debido a su ubicación geográfica, por lo que establecer un

proceso diferente para la obtención de modelos digitales de superficies beneficia a la generación de proyectos prácticos, que requiere el uso de modelos digitales de superficies. Adicionalmente, genera un presupuesto reducido en el uso de imágenes de libre descarga, ya que las técnicas tradicionales invierten más recursos para grandes extensiones, dando uso de equipos, procesamientos extensos y altos costos para la generación de varios modelos (Geymen, 2014).

La generación de un modelo digital de superficies con sensores SAR, tiene una importancia muy relevante en el país, ya que esto brindará una tecnología alternativa para generar información cartográfica y su posterior aplicación en proyectos de requerimiento, reduciendo insumos, recursos y personal para la obtención de modelos digitales de superficie, beneficiando a entidades públicas como privadas y gobiernos autónomos.

A su vez, será de utilidad para la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, ya que se presenta como una primera aproximación al uso de la tecnología SAR para la elaboración de modelos digitales de superficie con una metodología alternativa, y a su vez, abre una nueva ventana de aplicaciones con imágenes SAR en varios ámbitos como: detección de cambios, inundaciones y análisis multitemporales sin afectaciones climáticas. A su vez, genera una apertura hacia la aplicación de DInSAR, lo que abarca la identificación de zonas en subsidencia, deformaciones, movimientos terrestres, entre otros.

### **Área de Intervención**

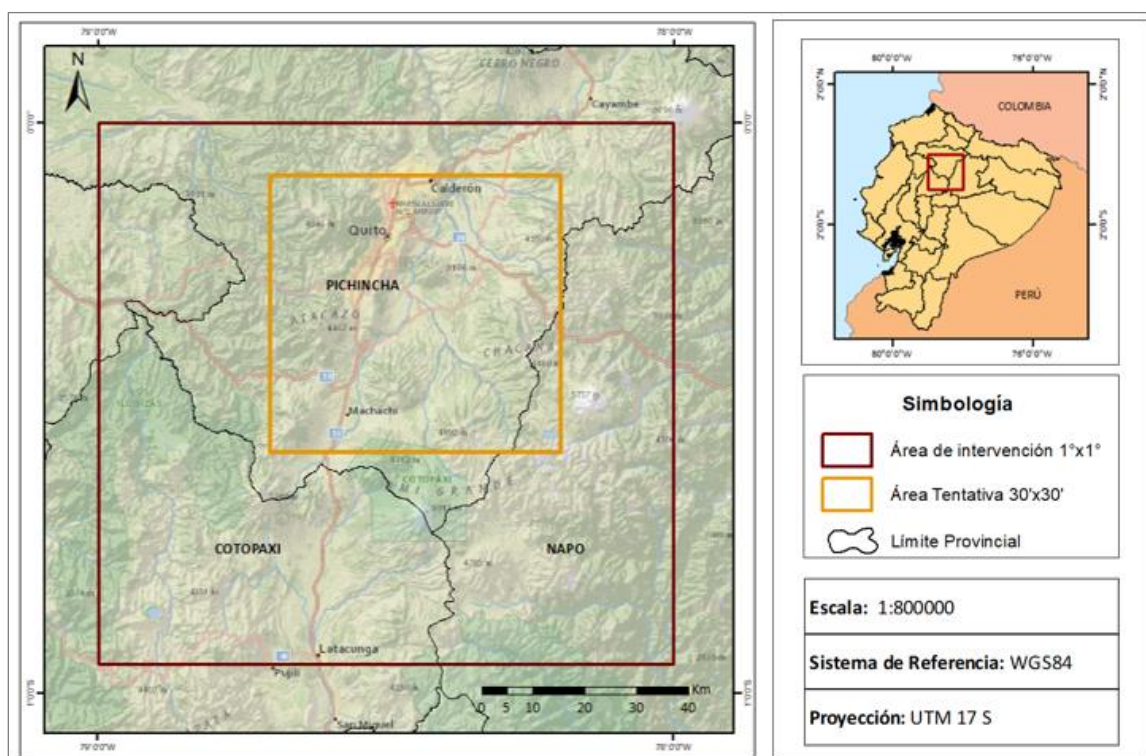
#### ***Área de Intervención Propuesta***

La zona de estudio propuesta en el perfil del presente proyecto tiene una extensión aproximada de 30' x 30', dentro de un área de 1° x 1° que cubre parte de las provincias de

Pichincha, Cotopaxi y Napo, como se presenta en la figura 1. Las coordenadas geográficas del área de  $1^\circ \times 1^\circ$  corresponde a  $(-79^\circ 0' 0'', 0^\circ 0' 0''; -78^\circ 0' 0'', 1^\circ 0' 0'')$ .

**Figura 1.**

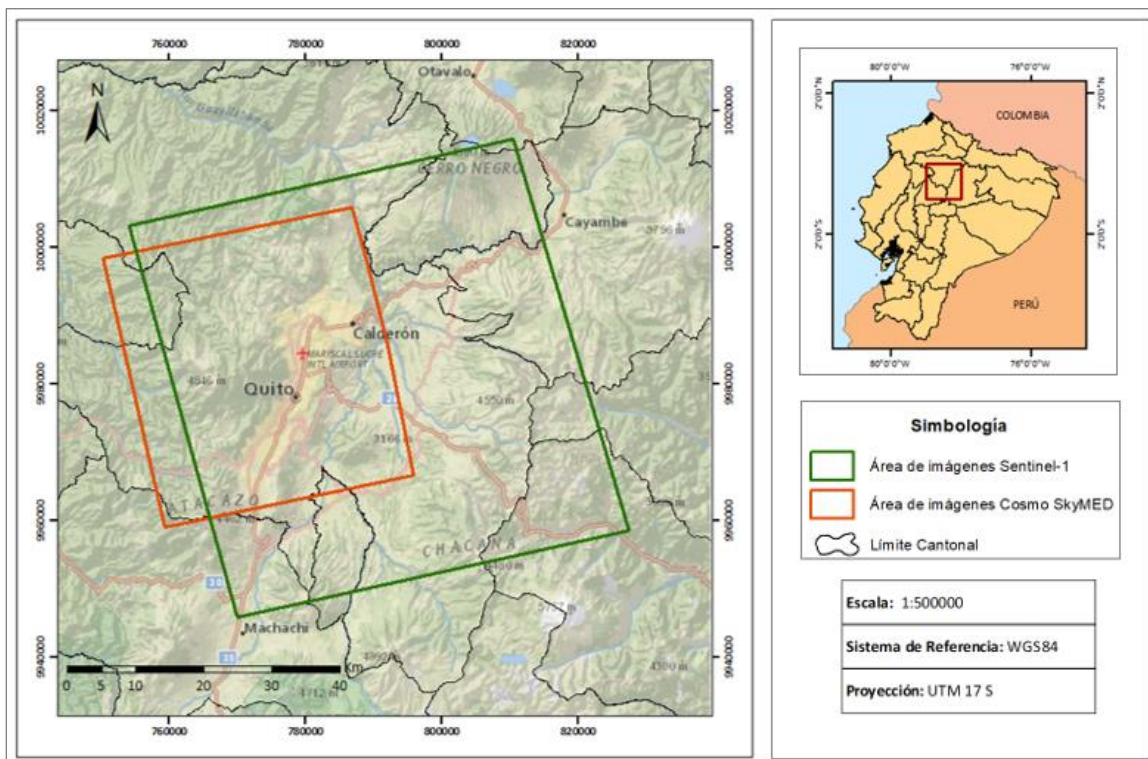
*Área de Intervención Propuesta*



*Área de Intervención Definida*

La zona de estudio definida en este proyecto se sitúa en la provincia de Pichincha, cantón Quito. La zona de estudio fue escogida en función de la disponibilidad de información satelital y varía debido a los *path and row* de las imágenes Sentinel-1 y Cosmo SkyMED, como se identifica en la figura 2. El área correspondiente a las imágenes SAR se encuentran dentro de la zona propuesta en la figura 1, con una extensión de las imágenes Sentinel-1 de 60 km x 58 km en largo y ancho respectivamente, siendo mayor al área propuesta de 30', y la extensión de las imágenes Cosmo SkyMED corresponde a 40 km x 38 km, equivalente al área propuesta de 30'.

Figura 2.

*Área de Intervención Definida***Objetivos****Objetivo General**

Generar y evaluar los modelos digitales de superficies obtenidos utilizando sensores SAR (INSAR) en zonas de alta nubosidad en el Ecuador Continental a través del uso de imágenes de libre adquisición y comerciales, para la obtención de valores de altura en la zona de estudio.

**Objetivos Específicos**

- Recopilar información teórica, secundaria y satelital con la finalidad de estandarizar y definir el área exacta de intervención del proyecto, aplicado para al menos dos sensores activos.



- Generar los corregristos y los interferogramas a partir de las diferencias de retrodispersión y fase existentes en las imágenes recopiladas, con la finalidad de generar los diferentes modelos digitales de superficie.
- Elaborar modelos digitales de superficie a partir de imágenes Single Look Complex (SLC) de al menos dos sensores activos SAR, mediante la aplicación de software copyright y copyleft en la zona de estudio.
- Evaluar los modelos digitales de superficie generados por interferometría RADAR con un modelo global que utilice la misma tecnología y con puntos de altura de la red de control vertical del Ecuador, distribuidos dentro de la zona de estudio, con la finalidad de verificar su exactitud posicional altimétrica.

### **Metas**

- Un elenco de coordenadas con valores de altura de la zona de estudio.
- Dos juegos de imágenes SLC de libre descarga y comerciales para la generación de los MDS.
- Un manual para la obtención de los corregristos, interferogramas, desenrollo de fase, con la finalidad de elaborar los MDS, con software Copyleft (SNAP Desktop).
- Un manual para la obtención de los corregristos, interferogramas, desenrollo de fase, con la finalidad de elaborar los MDS, con software Copyright (ENVI y ERDAS).
- Elaborar al menos cuatro modelos digitales de superficie aplicando la tecnología INSAR.

- Una tabla comparativa y análisis estadístico de los modelos generados en el proyecto vs. un modelo digital de interferometría RADAR global (SRTM, ALOS World 3D) en la zona de estudio.
- Una tabla comparativa y análisis estadístico de los modelos generados en el proyecto vs. los puntos de la red de control vertical del Ecuador en la zona de estudio.

### **Hipótesis de Investigación**

Se puede generar MDS mediante interferometría RADAR, con una resolución temporal mayor a 5 días entre toma y que sirvan para escalas 1:25000.

Los errores altimétricos obtenidos aplicando software Copyleft y Copyright utilizando los mismos insumos de entrada para la generación de los MDS mediante interferometría radar son los mismos.

## CAPÍTULO II

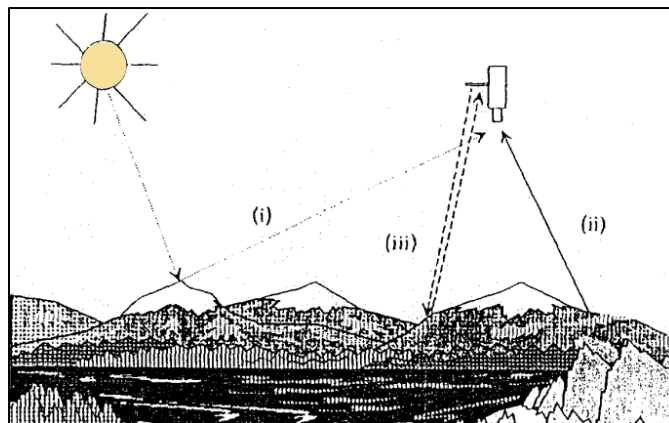
### MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se detalla la base teórica fundamental para el desarrollo del proyecto generado, la cual aborda desde la temática inicial para el entendimiento del contexto básico de los sistemas RADAR, así como su aplicación, procesamiento y nomenclatura a tratar en los procesos posteriores. Adicionalmente se detalla con claridad los distintos satélites con sus respectivos requerimientos para la aplicación de interferometría.

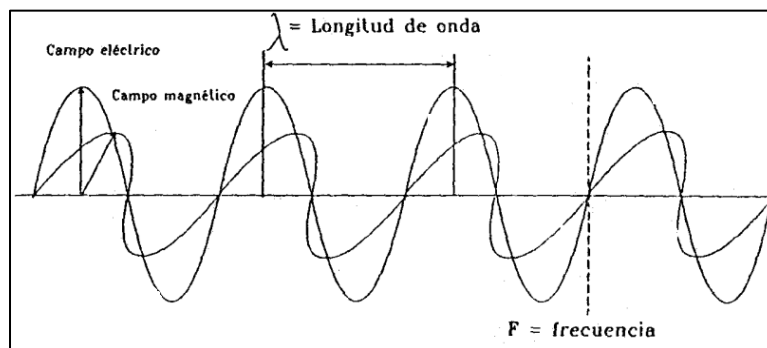
#### **Teledetección**

La teledetección es una técnica mediante la cual se realiza la observación de la superficie terrestre sin tener contacto directo con la misma. A lo largo del tiempo esta técnica ha evolucionado desde la instalación de sensores en plataformas aéreas (aviones, helicópteros o vehículos aéreos no tripulados), hasta el uso de plataformas satelitales. El resultado de esta observación se representa con imágenes en las cuales se identifican ciertas características de la superficie (Chuvieco, 1995).

La teledetección mediante el uso de sensores mide el flujo energético emitido por la superficie terrestre. La fuente de energía puede ser emitida por un factor externo, como el sol, como se presenta en la figura 3, identificándose como teledetección pasiva, por el contrario, el sensor es capaz de emitir su propia fuente de energía, entonces se lo conoce como teledetección activa (Chuvieco, 1995).

**Figura 3.***Teledetección pasiva y activa.**Nota.* Recuperado de (Chuvieco, 1995)**Frecuencia**

La frecuencia es el número de ciclos que cumple al pasar por un mismo punto, como se presenta en la figura 4. Posee unidades de tiempo conocidas como *Hz*, este valor se altera en función del tamaño de la longitud de onda, a mayor frecuencia menor longitud de onda (Chuvieco, 1995).

**Figura 4.***Longitud de Onda y Frecuencia**Nota.* Recuperado de (Chuvieco, 1995).

## Longitud de Onda

La longitud de onda se identifica como la distancia existente entre dos picos de una onda, expresa sus valores en unidades métricas (Chuvieco, 1995), como se presenta en la figura 4. La longitud de onda de las ondas de radio se encuentra en el espectro electromagnético como las más largas en función del espectro electromagnético visible, ya que se encuentra en valores de centímetros. Para las ondas de radio, se caracterizan por la penetración de objetos o superficies, por lo cual, mientras más larga sea la longitud de onda, menor será la frecuencia, y mayor será la penetración en una cobertura (SARMAP, 2009).

Según Chuvieco, (1995), la frecuencia y la longitud de onda se encuentran inversamente relacionados, siguiendo la ecuación 1:

$$c = \lambda \cdot F \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$\lambda$ : Longitud de Onda

$F$ : Frecuencia

## Energía electromagnética

La energía electromagnética se conoce como una energía que tiene la capacidad de transmitirse por el espacio mediante ondas dispersas en un campo eléctrico y magnético de un lugar a otro, tomando como flujo la velocidad de la luz (Chuvieco, 1995).

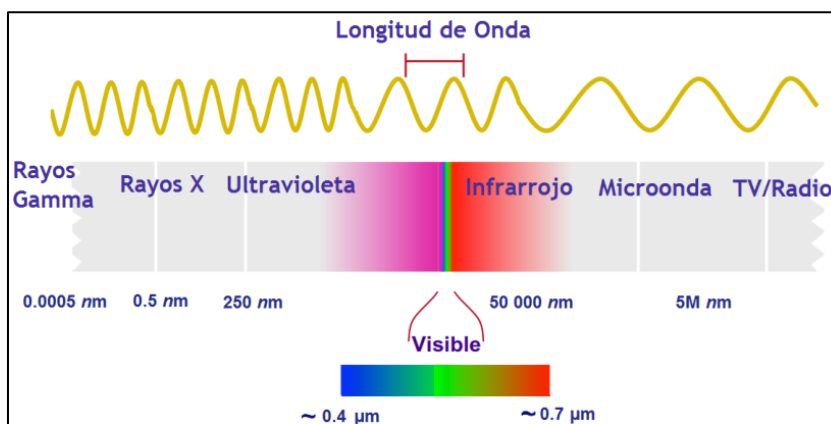
## Espectro electromagnético

Se denomina espectro electromagnético a las ondas electromagnéticas en función de la longitud de onda o frecuencia; se conoce como una división de la energía electromagnética, que comprende un rango de nanómetros hasta kilómetros en longitud de onda (Chuvieco, 1995). Estas se pueden clasificar a partir de una longitud de onda menor (Rayos Gamma, Rayos X) a

mayor (Telecomunicaciones, TV/Radio), los rangos del espectro electromagnético se caracterizan como bandas, como se observa en la figura 4.

**Figura 5.**

*Espectro electromagnético*



*Nota.* Recuperado de (Cango, 2017)

### **Espectro visible**

El espectro visible, comprende las bandas elementales que son identificables ante la visión humana, en función de una longitud de onda en un rango de 0.4 a 0.7 micras, partiendo de los colores azul, verde y rojo; el espectro visible coincide la máxima radiación solar con las longitudes de onda presentes en este rango (Chuvieco, 1995).

### **Banda Microonda**

La banda microonda se encuentra entre longitudes de onda de 1 milímetro y 100 centímetros. Tiene la capacidad de penetrar nubes y niebla, por lo cual es la base fundamental para los sensores activos, como es el caso de radar (Reuter, 2009). El uso de esta banda se amplía a usos civiles, militares y en teledetección, ya que su aplicación es apta para la

generación de cartografía en zonas con alto contenido de nubosidad ya que prácticamente la atmosfera es transparente para esta longitud de onda (Chuvieco, 1995).

### **Sensor activo**

Un sensor activo, es aquel que posee una fuente interna que genera artificialmente energía o radiación. Los sensores activos no requieren de la energía de factores externos como el sol o las propiedades térmicas de la tierra, por el contrario, generan su fuente de energía la cual es transmitida por el sensor hacia la superficie terrestre, independientemente de la presencia de condiciones atmosféricas, como la nubosidad y a su vez, captura información tanto en el día como la noche (Di Bella et al., 2008).

### **Resolución espacial**

La resolución espacial es el objeto más pequeño que puede identificarse en una imagen. A su vez puede definirse como la mínima separación para que dos objetos se visualicen distintos entre ellos, se encuentra relacionado con la distancia del satélite hacia el punto de observación y el área que abarca en su captura (Reuter, 2009).

Adicionalmente, se identifican conceptos derivados de la definición de resolución espacial, como: el IGFOV (*Instantaneous Geometric Field of View*, según sus siglas en inglés) que representa el tamaño que posee la imagen proyectada sobre la superficie terrestre; y el GSD (*Ground Sampling Distance*, según sus siglas en inglés) el cual identifica la distancia de dos pixeles continuos en la imagen, expresando el GSD como un ángulo del sensor se obtiene el IFOV (*Instantaneous Field of View*, según sus siglas en inglés) o campo instantáneo de visión, el mismo que representa la sección angular de observación a una superficie (Calle & Salvador, 2012).

## Resolución temporal

La resolución temporal es el intervalo mínimo de tiempo en el cual un satélite pasa por la misma zona de estudio en su órbita, también conocido como tiempo de revisita, por lo cual, es la periodicidad con la que se adquieren las imágenes. Se encuentra relacionado con las características orbitales de la plataforma como: altura y velocidad del satélite (Chuvieco, 1995).

## Sistemas RADAR

*“Radio Detection and Ranging”*, es un sistema activo, electromagnético para la detección de objetos, el cual transmite señales electromagnéticas, recibe ecos de objetos de la superficie terrestre y extrae su ubicación (IEEE, 2017). Algunos radares, se conocen con el nombre RAR (Radar de Apertura Real), la resolución espacial RAR se obtiene en función del tamaño de la antena utilizada, más grande la antena mejor resolución espacial (SARMAP, 2009). Por ello, la resolución espacial RAR es baja ya que no es factible mantener en órbita una antena de gran tamaño. En función de este conflicto, se encontró un método para simular un tamaño grande de antena, para el aprovechamiento de las cualidades que poseen los sistemas RADAR, como es el caso de los sistemas SAR (Radar de Apertura Sintética) (Edrosa, 2011).

El sistema radar posee ventajas sobre los sistemas pasivos, las principales son: la operación independiente de día o noche, ya que no requiere de la presencia de fuente de energía externa para su funcionamiento, a su vez, minimiza efectos atmosféricos, principalmente la presencia de nubes. Por lo que, según Olmsted (1993), los sistemas radar se basan en cuatro principios para la detección de la superficie:

1. La capacidad de una antena que emite un pulso electromagnético hacia una dirección precisa.
2. La capacidad de detección de un eco disperso a partir de un objetivo.



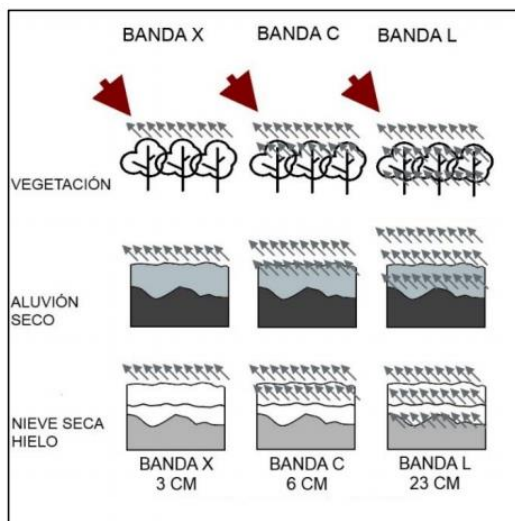
3. La capacidad de medir el retraso en el tiempo entre la emisión, la detección y el alcance del objetivo.
4. La capacidad de escanear con el haz direccional para examinar un área específica.

### ***Bandas de los sistemas RADAR***

Las diferentes bandas del sistema RADAR tienen la capacidad de penetrar ciertas coberturas de la superficie terrestre, como vegetación, suelo o hielo, como se presenta en la figura 6. Esto varía en función de la longitud de onda que posea, al ser más larga la onda será mayor el grado de penetración de la cobertura (SARMAP, 2009).

**Figura 6.**

*Bandas Radar*



*Nota.* Recuperado de (Guerrero & Hernandez, 2017).

Las bandas que comprende el sistema RADAR son las siguientes:

- Banda-X: de 2.4 a 3.75 cm (12.5 a 8 GHz)

- Banda-C: de 3.75 a 7.5 cm (14 a 8 GHz)
- Banda-S: de 7.5 a 15 cm (4 a 2 GHz)
- Banda-L: de 15 a 30 cm (2 a 1 GHz)
- Banda-P: de 30 a 100 cm (1 a 0.3 GHz)

### **Potencia del sistema RADAR**

La potencia del sistema RADAR se define como la propagación de ondas que se emiten a partir del sensor hacia un objeto, y el retorno de la misma, la ecuación de la potencia según Skolnik, (1990), se define como:

$$P_r = \frac{P_t G_t \sigma A_e}{(4\pi)^2 R^4} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

$P_t$ , irradiación de potencia

$G_t$ , antena de ganancia

$R$ , distancia de radar

$\sigma$ , coeficiente de retrodispersión

$A_e$ , antena de apertura

Sin embargo, la ecuación 2 puede separarse en diferentes factores que permiten la estimación y cálculo de la potencia de la señal recibida ( $P_r$ ), según Skolnik, (1990) la cual se define como:

$$P_r = \underbrace{\frac{P_t G_t}{4\pi R^2}}_{\text{Factor 1}} \times \underbrace{\frac{\sigma}{4\pi R^2}}_{\text{Factor 2}} \times \underbrace{A_e}_{\text{Factor 3}} \quad \text{Ec. 3}$$

Acorde a la ecuación 3, el primer factor representa la densidad de potencia a una determinada distancia del radar; el segundo factor, hace referencia a la sección transversal del

objetivo y la divergencia de la radiación electromagnética en la ruta de retorno. El producto de estos dos factores representa la potencia que regresa al radar. El tercer factor, representa la antena de apertura, la misma que intercepta parte de esta potencia (Skolnik, 1990).

### ***Ecuación del sistema RADAR***

La ecuación del sistema Radar, es una expresión matemática la cual describe la señal recibida en función del nivel de ruido en términos de los parámetros del sistema radar. Los parámetros de esta expresión son: la potencia transmitida, ganancia de antena, potencia del ruido y el alcance del radar. En algunas expresiones se denomina como factor de dispersión al efecto de rango, por lo que la potencia disminuye de manera significativa al aumentar el rango (Skolnik, 1990).

El rango de radar máximo ( $R_{Max}$ ) representa la igualdad entre la potencia recibida ( $P_t$ ), presentada en la ecuación 4, con la señal mínima detectable ( $S_{Min}$ ), según Skolnik, (1990) la ecuación de los sistemas radar puede representarse:

$$R^4_{Max} = \frac{P_t G_t A_e \sigma}{(4\pi)^2 S_{Min}} \quad \text{Ec. 4}$$

Al dar uso de una misma antena para transmitir y recibir, los factores  $G_t$  y  $A_e$ , se relacionan y unifican, según Skolnik, (1990) se obtiene la siguiente relación:

$$G_t = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad \text{Ec. 5}$$

Por lo cual, tras este análisis, la ecuación básica de los sistemas radar se puede definir de dos formas adicionales según Skolnik, (1990), como se presenta en la ecuación 6 y 7:

$$R^4_{Max} = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{Min}} \quad \text{Ec. 6}$$

$$R^4_{Max} = \frac{P_t A_e^2 \sigma}{4\pi \lambda^2 S_{Min}} \quad \text{Ec. 7}$$

Existen múltiples representaciones de la ecuación de los sistemas radar, sin embargo, las ecuaciones presentadas se aplican generalmente para cálculos aproximados del rendimiento, al estar simplificadas no presentan resultados de mayor precisión. Las formas simplificadas de las ecuaciones radar no representan con precisión el alcance de los sistemas radar, ya que no incluyen las pérdidas que se pueden presentar, y a su vez, la sección transversal del objetivo y la señal mínima detectable deben obtenerse en términos estadísticos (Skolnik, 1990).

### **Radar de Apertura Sintética (SAR)**

El Radar de Apertura Sintética (SAR) se caracteriza por ser un sensor activo, ubicado sobre una plataforma aérea o satelital, el cual adquiere imágenes con un barrido lateral sobre la superficie, independiente de la luz solar, condiciones atmosféricas y permite atravesar ciertas coberturas dependiendo de la longitud de onda. Los sistemas SAR son coherentes, ya que registran valores de fase y amplitud, por lo que una imagen SAR posee información de valores complejos. La amplitud representa la reflectividad de la superficie observada, mientras que la fase se encuentra en función de la distancia del sensor al objetivo (Colesanti & Wasowski, 2006).

Los sistemas SAR cumplen con el objetivo de mejorar la captura de información basados en los conflictos y limitaciones presentados por los sistemas RAR, por lo cual, la capacidad de recepción de los sistemas SAR se caracteriza por poseer una antena de menor tamaño, que a su vez simula y funciona como una de mayor tamaño al real, debido a ello se conoce como apertura sintética, las imágenes que se obtienen de los sistemas SAR brindan una mayor resolución en azimut (Navarro, 2014).

#### ***Amplitud***

La amplitud de las imágenes SAR hace referencia a la reflectividad de la superficie observada (Colesanti & Wasowski, 2006). La amplitud se caracteriza por identificar el brillo de la

superficie y al intensidad del mismo, representando la energía reflejada, lo que se encuentra relacionado con la potencia de retorno y las características del terreno u objeto, como: topografía, elevaciones, rugosidad, entre otros (González, 2010).

### **Fase**

La fase de las imágenes SAR se encuentra relacionada con la distancia existente entre el objeto y el sensor (Colesanti & Wasowski, 2006). La fase de las imágenes SAR se determina por la distancia existente entre la antena del sensor y la superficie terrestre u objeto capturado. Para el procesamiento de las imágenes y su información se realiza el corregistro, con la finalidad de combinar la fase de dos imágenes SAR, generando un interferograma en el cual la fase se encuentra correlacionada con la topografía de la superficie capturada (Braun, 2020).

Según González, (2010), se define la fase en la ecuación 8, en la cual, se usa el factor 2 para representar viaje de ida y regreso de la onda:

$$\phi = \frac{2 \times 2\pi}{\lambda} R_1 + \phi_{Scat} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

$\lambda$ : Longitud de onda

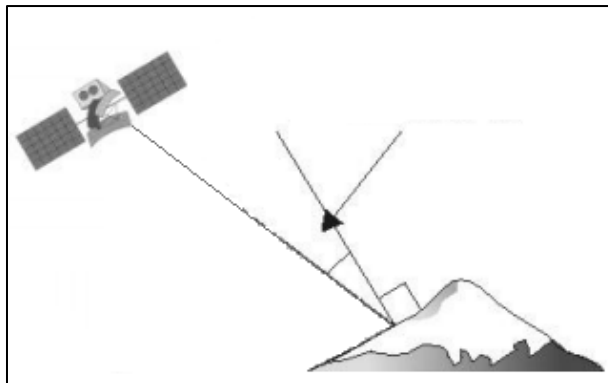
$\phi_{Scat}$ : contribución de fase por interacción con la superficie terrestre

### **Ángulo de Incidencia**

El ángulo de incidencia es el ángulo que se encuentra comprendido entre la dirección de la señal emitida por el sensor radar y la normal de la superficie terrestre, como se presenta en la figura 7, a su vez posee una variabilidad en función de la topografía del terreno y la altura del sensor. Por lo cual, la geometría de la imagen SAR será diferente en función de la dirección de alcance (IGN, 2018).

**Figura 7.**

*Ángulo de incidencia*



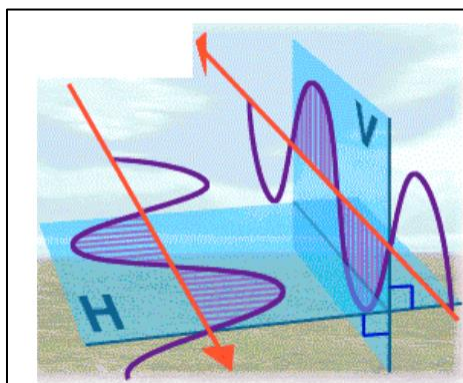
*Nota.* Recuperado de (Marchionni & Cavayas, 2014), modificado por el autor.

### ***Polarización***

La polarización, hace referencia a la orientación de una onda electromagnética que emite el sensor, puede tener una dirección horizontal (H) o vertical (V), al incidir sobre un objeto o superficie genera una onda de retorno que puede poseer la misma o diferentes direcciones (vertical u horizontal), como se presenta en la figura 8.

**Figura 8.**

*Polarización*



*Nota.* Recuperado de (SARMAP, 2009).

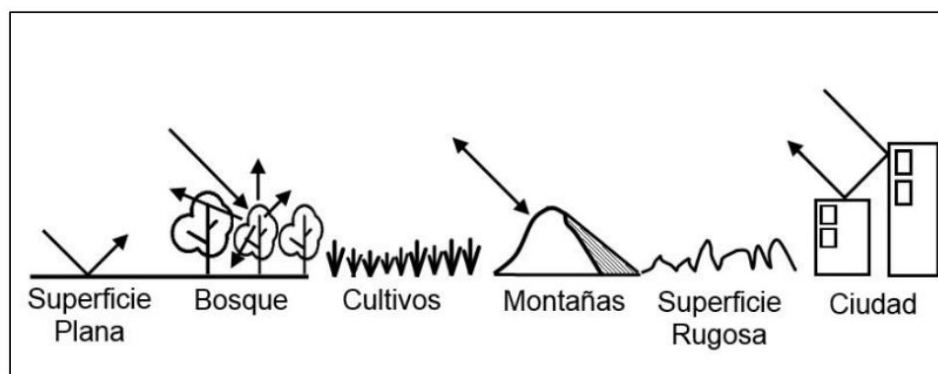
Las polarizaciones más utilizadas son lineales como HH, VV, HV Y VH, siendo el primer término la radiación emitida y el segundo la señal recibida (Fernandez & Soria, 2015). Por lo cual, HH y VV se definen como polarizaciones simples y, HV y VH polarizaciones cruzadas (SARMAP, 2009).

### ***Retrodispersión***

La retrodispersión o *backscatter*, es la señal que capta el sistema radar, siendo el reflejo de la señal emitida, conocida como eco, el mismo que se dispersa a varias direcciones diferentes a la señal incidente. Todas las superficies emiten reflejos, sin embargo, hay diferentes objetos que no reflejan la señal, por el contrario, funcionan como espejos lo que genera una superficie especular, ya que no regresa el eco emitido al sensor, en la figura 9 se identifican los diferentes retornos de la señal, los cuales dependerán de factores de la superficie (Fernandez & Soria, 2015).

### **Figura 9.**

#### *Retrodispersión de superficies*



*Nota.* Recuperado de (Guerrero & Hernandez, 2017).

Al emitir una señal hacia un objeto, puede dispersarse en varias direcciones o al interior de las superficies, dependiendo de la polarización del sensor. Las superficies rugosas influyen en

la reflexión de la energía emitida, lo que denota un color brillante en las imágenes, por otro lado, las superficies planas o especulares, no retornan al sensor, por lo que se identifican en colores negros como es el caso del agua o vías (IGN, 2015).

**Coefficiente de Retrodispersión ( $\sigma^0$ ).** *Sigma cero* o coeficiente de retrodispersión, es una medida de fuerza reflectante de un objetivo, la cual se expresa en unidades de decibeles *dB* comúnmente, sin embargo, a su vez se define como unidad de área en la superficie (SARMAP, 2009).

Según Lanfri, (2011), su el coeficiente de retrodispersión se calcula como:

$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{A} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

$\sigma$  = Coeficiente de retrodispersión

$A$  = Área

Los valores de  $\sigma^0$  se encuentran afectados directamente por características del sensor como: longitud de onda, polarización y ángulo de incidencia, y a su vez por el tipo de superficie u objeto de captura (Lanfri, 2011).

**Mecanismos de Retrodispersión.** La retrodispersión puede ser estimada al presentarse en las imágenes SAR, ya que en zonas oscuras se puede interpretar baja retrodispersión, lo que indica poca energía reflejada, contrario a zonas brillantes que corresponde a alta retrodispersión, con un nivel alto de energía reflejada hacia el sensor (Lanfri, 2011). Existen ciertos mecanismos de retrodispersión como:

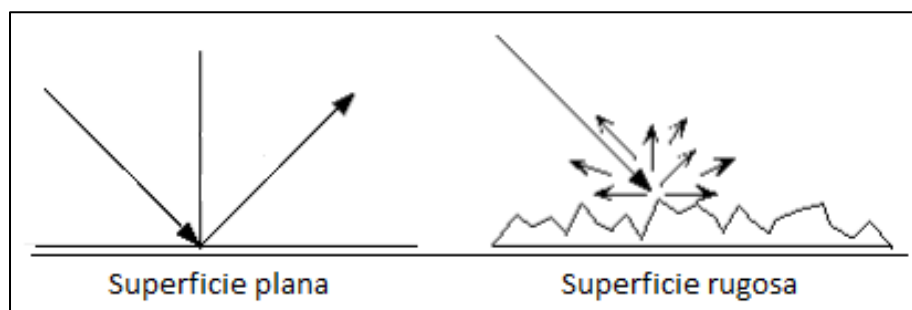
**Reflexión Difusa.** La reflexión difusa se genera comúnmente sobre superficies rugosas, este factor influye en la intensidad de la señal de retorno al sensor (Lanfri, 2011). Mientras mayor sea el brillo de la imagen, la superficie será más rugosa, por el contrario, en zonas planas



no se refleja energía al sensor y se identifican como coberturas oscuras en las imágenes SAR (SARMAP, 2009), como se presenta en la figura 10.

**Figura 10.**

*Reflexión difusa*

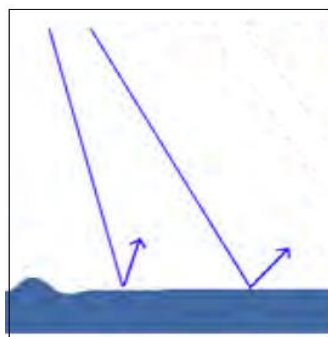


*Nota.* Recuperado de (SARMAP, 2009), modificado por el autor.

**Reflexión Especular.** La reflexión especular se encuentra directamente relacionado con las superficies planas o lisas, que poseen un efecto espejo, ya que poseen direcciones opuestas la señal emitida y la retro dispersada, como se visualiza en la figura 11, por lo cual, la superficie capturada se presenta con colores oscuros en la imagen SAR (Lanfri, 2011).

**Figura 11.**

*Reflexión Especular*

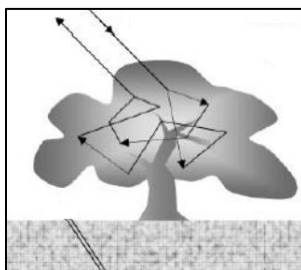


*Nota.* Recuperado de (Lanfri, 2011), modificado por el autor.

**Retrodispersión en volumen.** La retrodispersión en volumen se encuentra relacionado con superficies con alta densidad, como es el caso de copa de árboles, vegetación, cultivos, entre otros (Lanfri, 2011), presentada en la figura 12.

**Figura 12.**

*Retrodispersión en volumen*



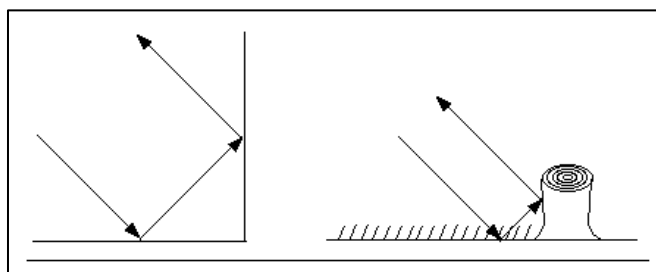
*Nota.* Recuperado de (IGN, 2018), modificado por el autor.

Se produce al interactuar múltiples veces la señal del sensor con un objeto, estas superficies se identifican con niveles de brillo intermedios en la imagen SAR (Lanfri, 2011).

**Dispersión doble rebote.** La dispersión de doble rebote o *Double bounce*, se da por la interacción de la señal emitida por el sensor hacia dos superficies perpendiculares entre sí, (Lanfri, 2011), como se visualiza en la figura 13.

**Figura 13.**

*Double Bounce*



*Nota.* Recuperado de (SARMAP, 2009).

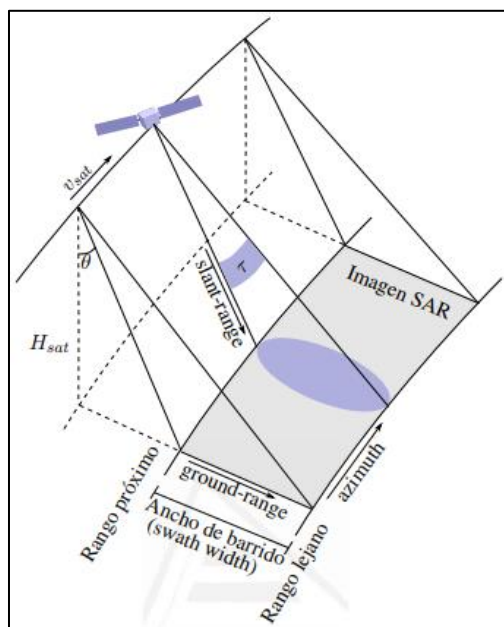
Las imágenes SAR con este mecanismo de retrodispersión, se presentan en tonalidades muy brillantes, esto ocurre frecuentemente en zonas urbanas, inundaciones e incluso embarcaciones en el agua (Lanfri, 2011).

### **Geometría de la adquisición SAR**

Los sistemas SAR se encuentran comúnmente sobre plataformas aéreas o satelitales, lo que interviene como un factor que categoriza con diferentes propiedades a los datos SAR en alcance y dirección de azimut (SARMAP, 2009). La adquisición de imágenes SAR se basa en una observación lateral conocida como *Side-Looking (SL)*; en la figura 14 se puede observar el modo de adquisición básico convencional de los sistemas SAR, con el modo *stripmap*, con una dirección fija a lo largo de la captura y una franja que abarca la superficie conocida como *swath* (Navarro, 2014).

**Figura 14.**

*Geometría de adquisición de sistemas SAR*



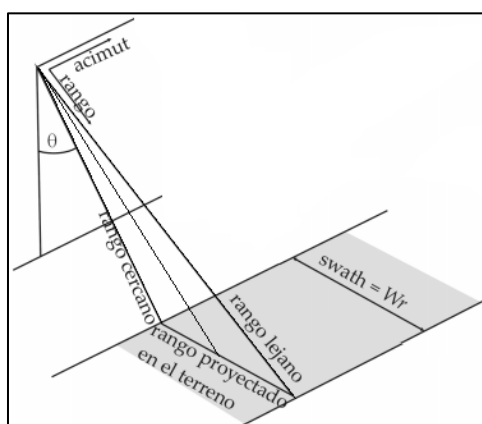
*Nota.* Recuperado de (Navarro, 2014).

**Geometría en Rango Inclinado (Slant Range).** Es la geometría original del sistema SAR.

El plano de captura de las imágenes radar es toda la trayectoria que posea el vuelo del sensor en cualquier plataforma (aérea o satelital), teniendo la proyección de objetos individuales sobre este plano, se conoce como rango inclinado o *slant range*, siendo proporcional a la distancia del sensor, como se visualiza en la figura 15. Se pueden presentar distorsiones como inversión por relieve (*layover*), escorzo (*foreshortening*) y sombras (*shadow*), en función a la superficie debido al relieve o a la topografía de la zona (SARMAP, 2009).

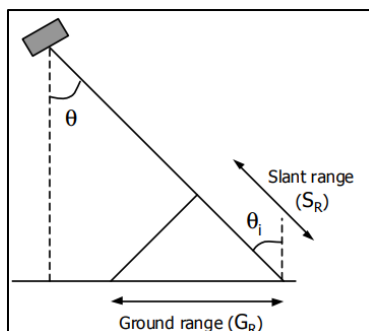
**Figura 15.**

*Geometría Slant Range*



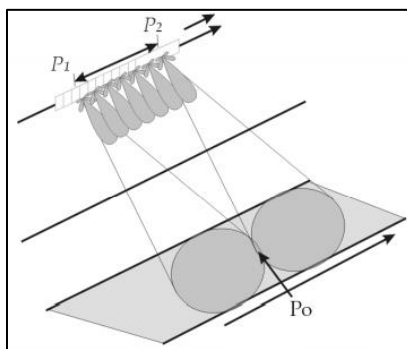
*Nota.* Recuperado de (González, 2010), modificado por el autor.

**Geometría en Rango Terrestre (Ground Range).** Dado el requerimiento, los datos SAR que se encuentran en *Slant Range* pueden proyectarse en *Ground Range*, como se presenta en la figura 16, sin embargo, no siempre se encuentran referenciados a un sistema cartográfico, por lo que la obtención de esta información se logra con la aplicación de *Range Doppler* en función de los datos originales obtenidos en *Slant Range* (SARMAP, 2009).

**Figura 16.***Slant Range y Ground Range*

*Nota.* Recuperado de (SARMAP, 2009), modificado por el autor.

**Geometría en azimut.** La señal de retrodispersión se encuentra en función de la trayectoria y velocidad entre el sensor y la superficie, como se presenta en la figura 17, por lo que, si el objeto se encuentra frente al sensor la frecuencia emitida será mayor, ya que el movimiento de la antena es hacia el objeto de captura, a su vez, si el objeto se encuentra en la parte trasera del sensor será menor la frecuencia emitida (SARMAP, 2009). En la captura del objeto ( $P_o$ ), recibirá diversos pulsos a lo largo de la trayectoria orbital desde un punto a otro, en el transcurso del *along track* (González, 2010).

**Figura 17.***Geometría de Azimut*

*Nota.* Recuperado de (González, 2010), modificado por el autor.

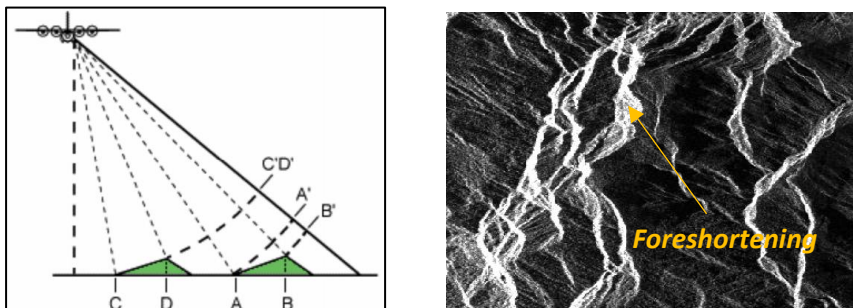
### ***Distorsiones por el terreno***

La geometría de los sistemas SAR puede generar distorsiones considerables en la captura de información, en función de la topografía y relieve de la superficie, como es el caso de inversión por relieve (*layover*), escorzo (*foreshortening*) y sombras (*shadow*), todas estas se encuentran en función del plano del rango inclinado (*Slant Range*) (SARMAP, 2009).

**Escorzo (*Foreshortening*).** También conocido como acortamiento, provoca la presencia de pendientes del terreno que se encuentran frente al sensor con una apariencia acortada e inclinada hacia el mismo (Navarro, 2014), en la figura 18 se puede visualizar un ejemplo de la distorsión.

**Figura 18.**

*Foreshortening*



*Nota.* Recuperado de (IGN, 2015) (izquierda). Elaboración propia a partir de imágenes Cosmo SkyMED (derecha).

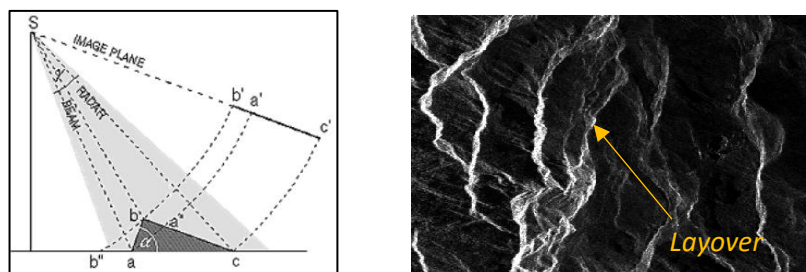
Estas distorsiones pueden disminuir al aumentar el ángulo de incidencia, se visualizan como superficies más brillantes, pero requieren una interpretación minuciosa para su identificación (Navarro, 2014).

**Inversión por relieve (*Layover*).** Es un caso de distorsión más extremo que el escorzo, ya que la pendiente es mayor que el ángulo de incidencia de la superficie capturada, lo que quiere

decir un ángulo de incidencia corto. Se representa como una superficie invertida entre la parte superior e inferior de la pendiente de una elevación (SARMAP, 2009), como se presenta en la figura 19.

**Figura 19.**

*Layover*

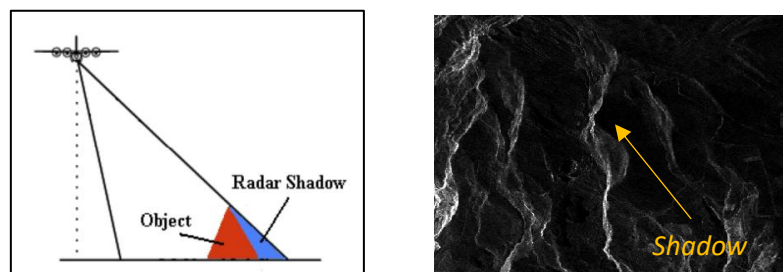


*Nota.* Recuperado de (SARMAP, 2009) (izquierda). Elaboración propia a partir de imágenes Cosmo SkyMED (derecha).

**Sombras (*Shadow*).** Se debe a la presencia de pendientes o superficies que se encuentran opuestas a la iluminación del sensor ya que no registran el eco de regreso para su identificación, en la figura 20 se observa un ejemplo visual.

**Figura 20.**

*Shadows*



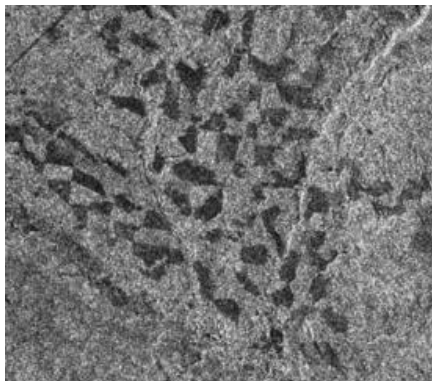
*Nota.* Recuperado de (IGN, 2015) (izquierda). Elaboración propia a partir de imágenes Cosmo SkyMED (derecha).

A su vez se puede caracterizar como la dirección de iluminación de radar, por lo que en la imagen SAR se presenta como zonas oscuras, pero benefician al análisis de imágenes para interpretación del terreno (Navarro, 2014).

**Moteado (*Speckle*).** Es un efecto relacionado a las imágenes SAR, conocido como moteado o *speckle*, es un producto derivado de la interferencia coherente por los múltiples retornos de la retrodispersión de un objeto o superficie capturada, se visualiza en la imagen SAR similar al ruido, como se presenta en la figura 21, denominado como efecto “sal y pimienta” (Navarro, 2014).

**Figura 21.**

*Ejemplo efecto Speckle*



*Nota.* Recuperado de (IGN, 2015).

***Resoluciones de las imágenes SAR***

Las resoluciones de los sistemas SAR, se encuentran en función de dos direcciones, en alcance o rango y en azimut, por lo cual intervienen diferentes parámetros, como el tamaño de antena y el ancho del haz. Los sistemas SAR se caracterizan por poseer buenas resoluciones debido a la simulación de la antena para la captura de información (Fernandez & Soria, 2015).



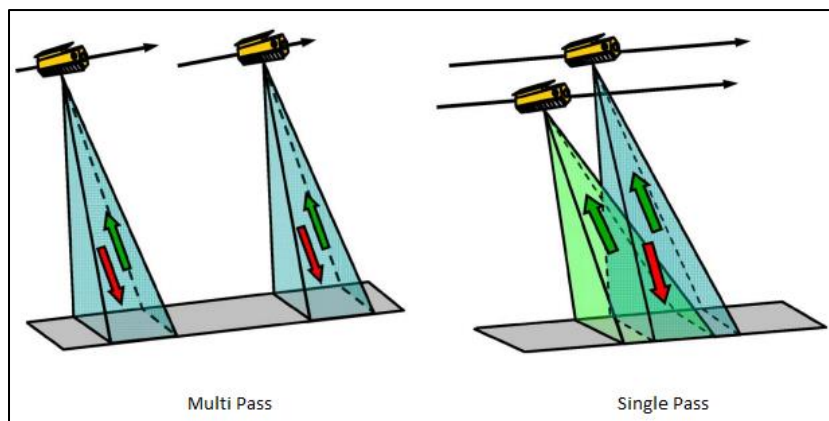
**Resolución en azimut.** Se determina por el ancho del haz, sin embargo, los sistemas SAR al sintetizar la antena virtual se obtiene una antena de mayor tamaño que beneficia a la resolución en azimut, ya que es inversamente proporcional el ancho del haz al tamaño de la antena, por lo cual, a mayor antena, más reducido el ancho del haz y genera una mejor resolución (Fernandez & Soria, 2015).

**Resolución en rango.** También conocida como resolución de alcance, se determina por la señal existente en el transcurso de la trayectoria entre el sensor y el objeto. Esta resolución se encuentra en función de la longitud de onda del pulso transmitido, siendo un pulso corto lo que brinda una mejor resolución (Fernandez & Soria, 2015).

### **Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR)**

La Interferometría de Radar de Apertura Sintética o *Interferometric Synthetic Aperture RADAR*, mejor conocida como InSAR, es una técnica de teledetección activa que extrae información de la superficie terrestre con el uso de diferencia de fase entre dos o más observaciones de los sistemas SAR (Navarro, 2014). La técnica de interferometría SAR, es una de las aplicaciones más completas de teledetección, ya que permite la medición cuantitativa de diversos parámetros físicos, geofísicos, naturales y antrópicos que se encuentran sobre la superficie terrestre (Krieger et al., 2010).

Existen diferentes modos de adquisición que permiten realizar interferometría, dentro de los sensores radar, *single-pass* que realizan una sola pasada, que poseen una antena dual, como el satélite SRTM o dos satélites funcionales paralelos, y *repeat-pass* que realiza múltiples pasadas sobre la superficie, ya que posee una antena única como los satélites Cosmo SkyMED, Sentinel-1, Alos-Palsar, entre otros (Navarro, 2014), como se presenta en la figura 22.

**Figura 22.***Modo de adquisición para InSAR*

*Nota.* Recuperado de (Krieger et al., 2010), modificado por el autor.

Por lo cual, la técnica de InSAR se aplica para obtener información de elevaciones del terreno, variación en las alturas de una superficie, análisis de desplazamientos (DinSAR), cartografía temática y topográfica, inundaciones, deformaciones terrestres o detección de cambios, para lo que se requiere el uso de mínimo dos imágenes SAR correspondientes a un área similar entre ellas (Burgos et al., 2017).

### ***Fase Interferométrica***

La fase interferométrica se define como la mezcla de fases, que incluyen factores topográficos, sin embargo, esta fase posee ambigüedad en los ciclos de la fase, por lo cual, su valor se encuentra en un intervalo de  $-\pi$  a  $\pi$ , lo que visualmente se identifica como franjas en el interferograma (Navarro, 2014). Según González, (2010), se define la fase en la ecuación 10 como la diferencia de fase entre las imágenes maste y esclava:

$$\psi = \phi_2 - \phi_1$$

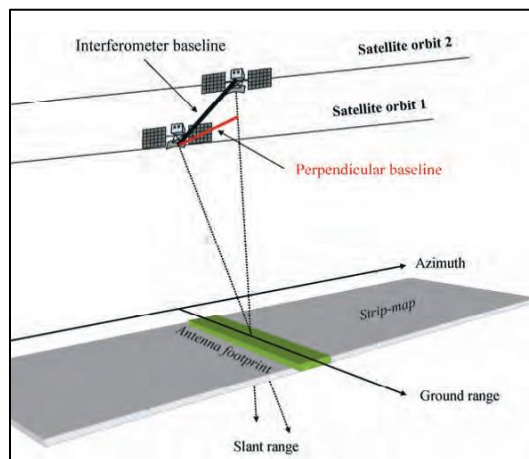
Ec. 10

### **Base line**

La línea base o *base line* se define como la distancia entre dos satélites u órbitas en un plano perpendicular, como se visualiza en la figura 23, la proyección perpendicular al rango inclinado (*slant range*) se conoce como base perpendicular o *perpendicular baseline*, siendo los parámetros fundamentales para el procesamiento de la interferometría SAR InSAR (Ferretti et al., 2007a).

### **Figura 23.**

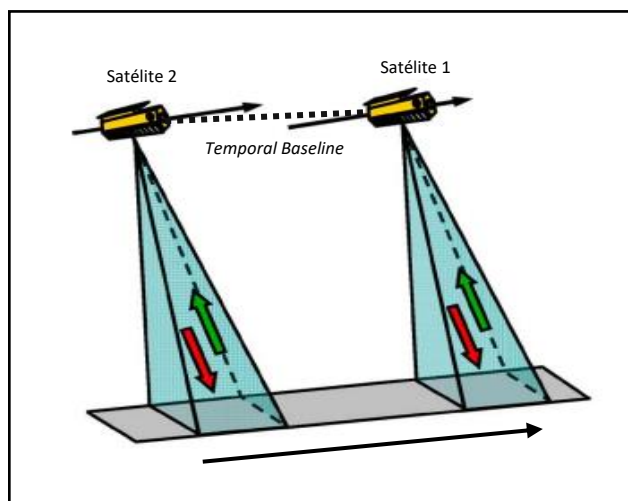
#### *Línea base interferométrica*



*Nota.* Recuperado de (Ferretti et al., 2007a).

### **Temporal base line**

Se conoce como línea base temporal o *temporal baseline*, a la resolución temporal existente en el *repeat-pass* entre dos satélites de una antena para la captura de información, como se presenta en la figura 24, el tiempo entre la primera y segunda imagen SAR debe ser lo más corto posible con la finalidad de reducir los riesgos de descorrelación temporal de la fase, teniendo como consecuencia la pérdida de coherencia, estos eventos ocurren principalmente en zonas vegetativas o cuerpos de agua (Braun, 2020).

**Figura 24.***Temporal Baseline*

*Nota.* Recuperado de (Krieger et al., 2010), modificado por el autor.

### **Corregistro**

El corregistro es el proceso inicial para la generación del interferograma, ya que se obtiene un apilamiento o *stack* de imágenes SAR que pertenecen a una misma zona, por lo cual, se realiza una superposición de las imágenes SAR designando a una imagen máster (*master*) y esclava (*slave*) en función de la fecha de captura de cada una, pertenecientes a una misma órbita y en un modo de adquisición similar; para la formación del interferograma, se requiere la unión de las imágenes máster con la esclava, como resultado se obtiene un insumo que posee información de amplitud que se multiplica de las dos imágenes y de fase que corresponde a la diferencia de fase entre las dos imágenes (Ferretti et al., 2007b).

### **Multilooking**

La aplicación de un filtrado *multilook* es un procesamiento opcional que se aplica para alterar el tamaño del píxel de una imagen inicial. Tiene la finalidad de mejorar la resolución

radiométrica, lo que implica la disminución de ruido. Sin embargo, degrada la resolución espacial de las imágenes iniciales, generando un espaciado entre píxeles (Braun & Veci, 2021).

### ***Interferograma***

Un interferograma se forma con el correregistro de dos imágenes SAR, se define como un patrón de franjas que se encuentran en una escala de color de cian a magenta, representando los ciclos de la fase interferométrica, para ello interfiere las posiciones de la antena de los sensores, ya que permite observar una diferencia de fase en la escena capturada (SARMAP, 2009).

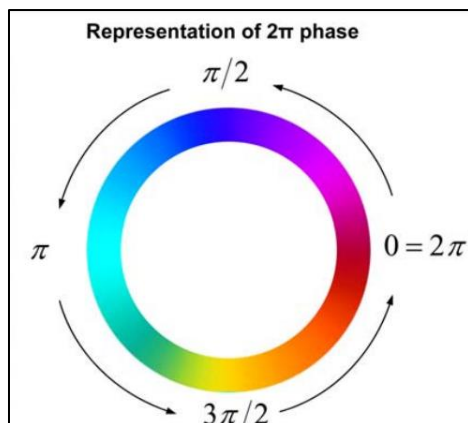
El interferograma posee información de fase ( $\phi$ ) de varios factores que contribuyen a esta variación, como la fase de tierra plana ( $\phi_{flat}$ ) que corresponde a la curvatura de la tierra, la fase topográfica ( $\phi_{DEM}$ ) que representa la topografía terrestre, las condiciones atmosféricas ( $\phi_{atm}$ ) como la humedad, temperatura, entre otros, el ruido ( $\phi_{ruido}$ ), y la deformación de la superficie ( $\phi_{disp}$ ) que se produce entre la adquisición de las imágenes (Ferretti et al., 2007b), como se presenta en la ecuación 11:

$$\phi = \phi_{DEM} + \phi_{flat} + \phi_{disp} + \phi_{atm} + \phi_{ruido} \quad \text{Ec. 11}$$

Los valores de fase pueden ser positivos lo que indica movimientos alejados al sensor, o negativos que representa a movimientos hacia el sensor; se representa en un ciclo de fase de  $2\pi$  como se presenta en la figura 25. En el interferograma una franja corresponde a una línea de igual fase, el número de franjas de un interferograma se obtiene al anular la deformación o desplazamiento de la superficie; cada ciclo de color representa una franja (Mouratidis, 2010).

**Figura 25.**

*Representación de fase  $2\pi$*

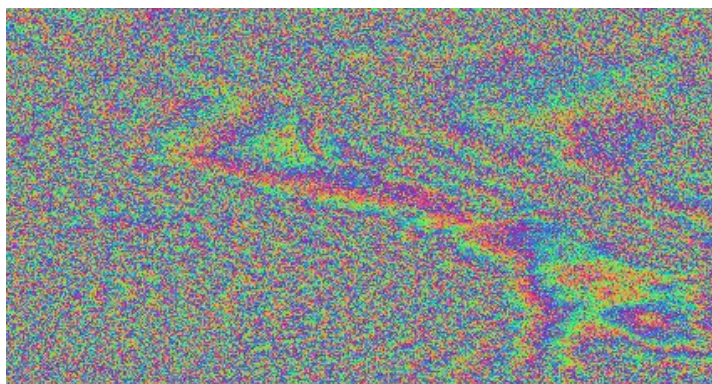


*Nota.* Recuperado de (Mouratidis, 2010).

Las franjas de un interferograma representan el cambio de topografía en la zona, según la dirección y formación de las franjas, se identifican las variaciones de la superficie capturada en la imagen SAR, como se presenta en la figura 26, por otro lado, la ausencia de estas representan presencia de ruido y baja coherencia (Guerrero & Hernandez, 2017).

**Figura 26.**

*Interferograma*



*Nota.* Elaboración propia. Ejemplo de interferograma obtenido con imágenes Sentinel-1.

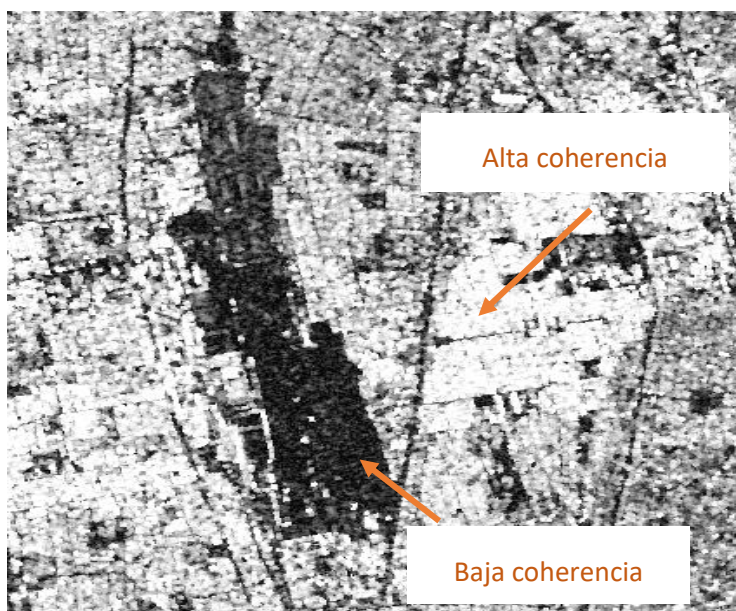
## **Coherencia**

La coherencia es una medida de correlación del interferograma que se encuentra en una escala de 0 a 1, siendo 0 el índice más bajo sin información coherente, y 1 el valor ideal que refleja en un interferograma sin ruido, la coherencia puede ser afectada por pendientes pronunciadas, zonas de vegetación, en movimiento y factores temporales (ESA, 2014).

La coherencia se establece como un indicador de calidad en un interferograma, ya que la alta coherencia se refleja en la ausencia de ruido, similitud entre las imágenes SAR y se visualiza en colores blancos y brillantes, como se presenta en la figura 27, por otro lado, la baja coherencia representa ruido y se visualizan colores negros, siendo este un factor fundamental para los posteriores procesos en el tratamiento de imágenes SAR (Braun, 2020).

### **Figura 27.**

*Coherencia de imágenes SAR*



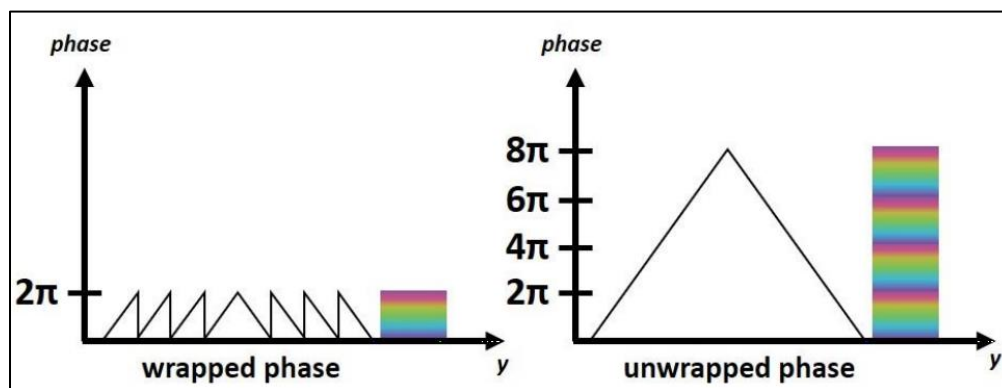
*Nota.* Elaboración propia. Ejemplo de coherencia obtenido con imágenes Cosmo SkyMED.

### ***Desenrollo de la fase interferométrica***

Posterior a la obtención del interferograma, la fase interferométrica se encuentra relacionada con valores de altura superficial, tomando como indicador las franjas de fase ya que se puede identificar el pronunciamiento del relieve. Con el interferograma no se tiene información de fase absoluta, por ello, se aplica el proceso de desenrollo de fase con la finalidad de resolver esta ambigüedad que consiste en transformar los valores de ciclo de fase  $2\pi$  a valores de fase continuos para posteriormente obtener valores altimétricos (Navarro, 2014). En el proceso de desenrollo de fase, se suma el múltiplo entero de  $2\pi$  a las franjas interferométricas, como se presenta en la figura 28.

**Figura 28.**

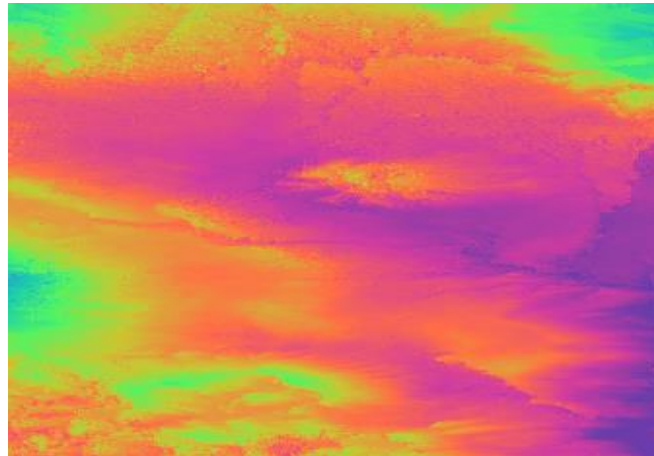
*Desenrollo de fase*



*Nota.* Recuperado de (Braun, 2020).

Los resultados obtenidos en el desenrollo de fase se interpretan como valores de altura relativa, pese a su similitud con información altimétrica, como se presenta en la figura 29, sin embargo, la calidad de los resultados tras el desenrollo se encuentra fuertemente relacionado a la coherencia entre las imágenes SAR, por lo que los resultados óptimos se encuentran zonas de mayor coherencia (Braun, 2020).



**Figura 29.***Desenrollo de interferograma*

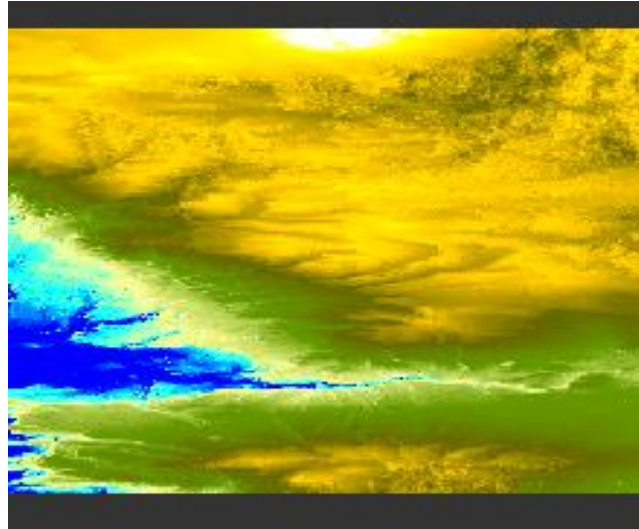
*Nota.* Elaboración propia. Ejemplo de desenrollo de interferograma, obtenido con imágenes Sentinel-1.

***Cambio de fase a elevación***

La información obtenida tras el desenrollo de fase se presenta como un ráster continuo, sin embargo, no es una medida métrica, por lo cual se transforman los valores de fase desenrollada a alturas absolutas; tomando como referencia a un modelo digital de elevaciones o superficies que cubra el área de las imágenes SAR, con la finalidad de tomar la información altimétrica como referencia; este proceso es aplicable para el uso de la metodología InSAR en generación de modelos digitales de elevación con el uso de imágenes SAR; sin embargo, este producto no posee la posición real sobre la superficie terrestre (Ferretti et al., 2007b), como se presenta en la figura 30.

**Figura 30.**

*Cambio de fase a elevación*



*Nota.* Elaboración propia. Ejemplo de cambio de fase a elevación, obtenido con imágenes Sentinel-1.

***Corrección del terreno***

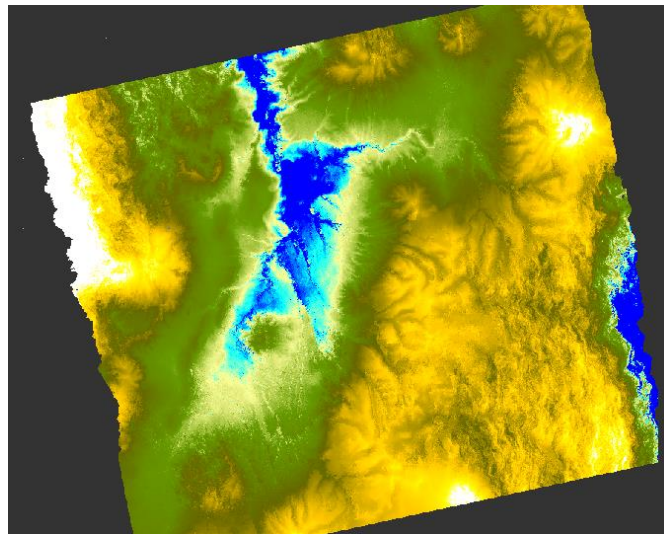
La imagen SAR poseen distorsiones geométricas por factores como el *layover*, *foreshortening*, *shadowing*, relacionados la topografía de la superficie o por inclinaciones en el sensor al momento de capturar información (Braun, 2020). Las distancias se alteran, así como la información altimétrica y su ubicación sobre la superficie terrestre, por lo cual la aplicación de correcciones de terreno compensan errores o distorsiones presentados sobre las imágenes, con la finalidad de acercar a la realidad de la superficie terrestre (Olmsted, 1993), como se presenta en la figura 31.

El uso de modelos digitales de elevación, se convierte en la herramienta principal para la georreferenciación de las imágenes SAR, así como correcciones de distorsiones por la topografía

del terreno, ajustando la información en función de una proyección cartográfica definida (Braun, 2020).

**Figura 31.**

*Corrección de terreno*



*Nota.* Elaboración propia. Ejemplo de corrección del terreno, obtenido con imágenes Sentinel-1, ubicada en la ciudad de Quito y zonas aledañas.

**Satélites SAR para Interferometría**

A lo largo del tiempo, se han presentado diversos usos para el uso de la técnica de interferometría para múltiples campos de investigación, por lo cual, existen varios satélites que poseen sensores SAR, los mismos que brindan imágenes RADAR con diferentes características, en la tabla 1 se presentan los principales satélites SAR (González, 2010).

**Tabla 1.***Satélites SAR para Interferometría*

Misión satelital	Agencia	Tiempo operativo	Frecuencia (GHz)	Longitud de Onda (cm)	Resolución temporal (días)	Resolución espacial (m)
ERS – 1	ESA	1991 – 2000	5.3	5.6	35	25
ERS – 2	ESA	1995 – act.	5.3	5.6	35	25
JERS – 1	JAXA	1992 – 1998	1.27	23.5	44	20
RADARSAT – 1	CSA	1995 – act.	5.3	5.6	24	8 – 100
RADARSAT – 2	CSA	2007 – act.	5.3	5.6	24	3 – 100
ENVISAT	ESA	2003 – act.	5.3	5.6	35	25 – 150
ALOS	JAXA	2006 – act.	1.2	23.5	43	10 – 100
SRTM	NASA	2000 – act.	9.6	3.1	11	30 – 90
TerraSAR – X	DLR	2007 – act.	9.6	3.1	11	3 – 18
Cosmo SkyMED – 1	ASI	2007 – act.	9.6	3.1	16	3 – 100
Cosmo SkyMED – 2	ASI	2007 – act.	9.6	3.1	16	3 – 100
Cosmo SkyMED – 3	ASI	2008 – act.	9.6	3.1	16	3 – 100
Cosmo SkyMED – 4	ASI	2010 – act.	9.6	3.1	16	3 – 100
Sentinel – 1	ESA	2014 – act.	5.3	5.6	12	5 – 100
Sentinel – 2	ESA	2016 – act.	5.3	5.6	12	5 – 100

*Nota.* Recuperado de (González, 2010), modificado por el autor.

Dentro de las plataformas presentadas, existe información que se encuentra en rangos como la resolución espacial de las imágenes SAR, esto en función del modo de adquisición de las imágenes, varios de las constelaciones siguen en funcionamiento emitiendo imágenes.

Adicionalmente, no se presentan en la tabla satélites de uso militar de distintos países y lanzados en los últimos años (González, 2010).

## **Satélite Sentinel-1**

Sentinel-1 es una misión perteneciente a la Agencia Espacial Europea (ESA) y vinculado al programa Copérnico. Se encuentra compuesto por una constelación de dos satélites en órbita polar, capturando información en el día y noche, sin interferencias por condiciones atmosféricas. Se caracterizan por ser sensores radar de apertura sintética (SAR), opera con banda C, con polarizaciones verticales y horizontales, ya que posee una antena con módulos de transmisión y recepción, y una resolución temporal de 12 días con Sentinel-1A y de 6 días con Sentinel-1B. Tiene la facilidad de modificar el haz de azimut y elevación, lo cual permite capturar información en diferentes modos de adquisición, en función del requerimiento de imágenes satelitales (Bourbigot et al., 2016).

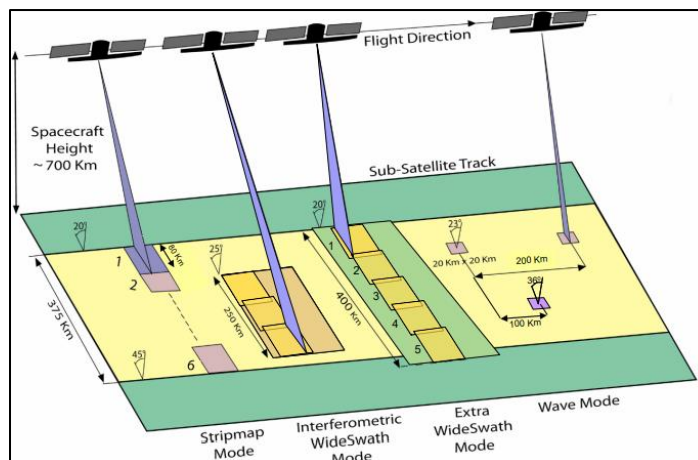
Los productos de polarización simple transmiten y reciben en la misma polarización, sea vertical (V) u horizontal (H). Al contrario, los productos de polarización dual se obtienen con una polarización V o H en la transmisión, y en la recepción los dos tipos simultáneamente. Para los modos de adquisición *Stripmap* (SM), *Interferometric Wide Swath Mode* (IW) y *Extra-Wide Swath Mode* (EW) se pueden obtener con polarización simple (HH o VV) o dual (HH+HV o VV+VH), sin embargo, para el modo *Wave Mode* (WV), solamente se admite polarización simple (HH o VV) (Bourbigot et al., 2016).

### ***Modo de adquisición de Sentinel-1***

Sentinel-1 puede operar en cuatro diferentes modos de adquisición, como se presenta en la figura 32 *Stripmap* (SM), *Interferometric Wide Swath Mode* (IW), *Extra-Wide Swath Mode* (EW) y *Wave Mode* (WV).

**Figura 32.**

*Modos de adquisición Sentinel-1*



*Nota.* Recuperado de (Bourbigot et al., 2016).

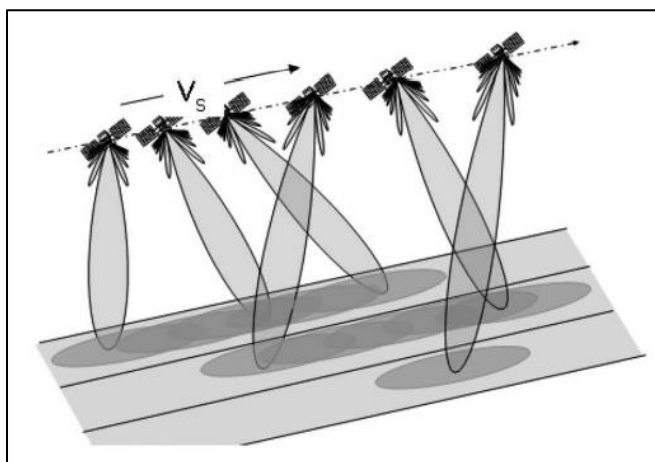
**Stripmap Mode (SM).** El modo SM es un modo de adquisición de imágenes SAR estándar, se caracteriza por un ancho de barrido o franja que equivale a 80 km, con una resolución de rango y azimut de 5 m x 5 m respectivamente. La franja ilumina el terreno con una secuencia continua, con un ángulo de azimut fijo y un ángulo fuera del nadir. Por lo que se obtiene una imagen de calidad continua a lo largo de la captura del sensor. Sus principales aplicaciones se centran en monitoreos de seguridad (Bourbigot et al., 2016).

**Interferometric Wide Swath Mode (IW).** El modo IW adquiere las imágenes en franjas anchas de 250 km, compuesta de 3 sub-franjas internas, posee una resolución de rango y azimut de 5 m x 20 m respectivamente. Implementa un nuevo tipo de ScanSAR llamado TOPSAR (Terrain Observation with Progressive Scan SAR). TOPSAR escanea la imagen mediante ráfagas largas, girando la antena a lo largo de toda la trayectoria de atrás hacia adelante, como se presenta en la figura 33. En este modo de adquisición, las ráfagas se sincronizan entre captura

para garantizar la alineación de los pares interferométricos, por lo cual, su principal uso es para la aplicación de interferometría (Bourbigot et al., 2016).

**Figura 33.**

*Modo de captura TOPSAR Sentinel-1*



*Nota.* Recuperado de (Bourbigot et al., 2016).

**Extra-Wide Swath Mode (EW).** El modo EW, utiliza de igual manera la técnica TOPSAR, tiene una captura de una franja más grande de 400 km, comprendida de 5 sub-franjas, posee una resolución de rango y azimut de 20 m x 40 m respectivamente. Los productos obtenidos con el modo EW de igual manera se pueden aplicar para interferometría (Bourbigot et al., 2016).

**Wave Mode (WV).** El modo WV tiene una adquisición en “viñetas” como una sola imagen, en polarización simple VV o HH, tiene un ancho de 20 km x 20 km y una resolución de rango y azimut de 5m x 5 m respectivamente. Se adquieren en un modo “salto de rana”, ya que la captura de información inicial es en un ángulo de incidencia de rango cercano y la siguiente con un ángulo de incidencia de rango lejano; el ancho de barrido varía entre ángulos de incidencia con rango cercano y rango lejano. Su finalidad es servir para aplicaciones oceánicas (Bourbigot et al., 2016).

### ***Nivel de procesamiento de Sentinel-1***

**Nivel 0.** Los productos de nivel 0 son datos crudos SAR sin procesar. Son la base fundamental para la generación de otro producto con algún procesamiento más elaborado. Dentro de los datos crudos se incluye ruido, calibración interna, información de eco e información orbital. Los datos crudos de nivel 0 se encuentran disponibles para los modos de adquisición SM, IW y EW (ESA, 2021a).

**Nivel 1.** Los productos de nivel 1, son datos de nivel 0 transformados mediante ciertos procesamientos de instrumentos con el uso de algoritmos y calibración de datos, que da como resultado la formación de base line. Los productos de nivel 1 se generan con un pre – procesamiento, la estimación de centroide Doppler, un enfoque *Single Look Complex* y un post – procesamiento para la generación de productos *Single Look Complex (SLC)* y *Ground Range Detected (GRD)* (ESA, 2021a).

***Single Look Complex (SLC)*.** Los productos de nivel 1 – SLC, son datos georreferenciados con el uso de información de órbita. Los productos poseen una sola mirada (single look) en cada dimensión con el uso del ancho de banda y muestras complejas, en el campo real e imaginario, preservando la información de fase. Cada píxel de la imagen contiene información de valores de magnitud compleja (I – Q) y proyección Doppler cero, por lo cual los productos SLC poseen información de amplitud y fase (ESA, 2021a).

***Ground Range Detected (GRD)*.** Los productos de nivel 1 – GRD son datos SAR proyectados a la superficie terrestre con la referencia del modelo elipsoidal WGS-84. Los valores de píxel representan la amplitud, sin embargo, se pierde la información de fase, obteniendo píxeles de resolución cuadrada aproximadamente, poseen un efecto moteado reducido para la visualización de las imágenes (ESA, 2021a).



**Nivel 2.** En el nivel 2 o nivel OCN, se encuentran productos geofísicos georreferenciados, que fueron obtenidos en función del nivel 1. Las aplicaciones directas se centran en corrientes de viento o del mar, se pueden derivar en ciertos componentes (ESA, 2021<sup>a</sup>), que se encuentran afectados por el modo de adquisición:

- *Ocean Wind field (OWI)*: Es una estimación de la velocidad y dirección del viento a 10 m sobre la superficie oceánica, se encuentra con los modos de adquisición SM, IW o EW.
- *Ocean Swell Spectral (OSW)*: Es un espectro de oleaje de la superficie del océano, se obtiene en función de los modos de adquisición SM y WV.
- *Surface Radial Velocity (RVL)*: Estos productos se encuentran con los modos de adquisición SM y WV.

### **Satélite Cosmo SkyMED**

COSMO-SkyMED es una constelación satelital de observación de la Tierra, pertenece al Ministerio de Investigación y Ministerio de Defensa (MOD) italiano y es operado por la Agencia Espacial Italiana (ASI). La constelación se encuentra compuesto por cuatro satélites SAR de alta resolución, con banda X (Fiorentino & Virelli, 2016).

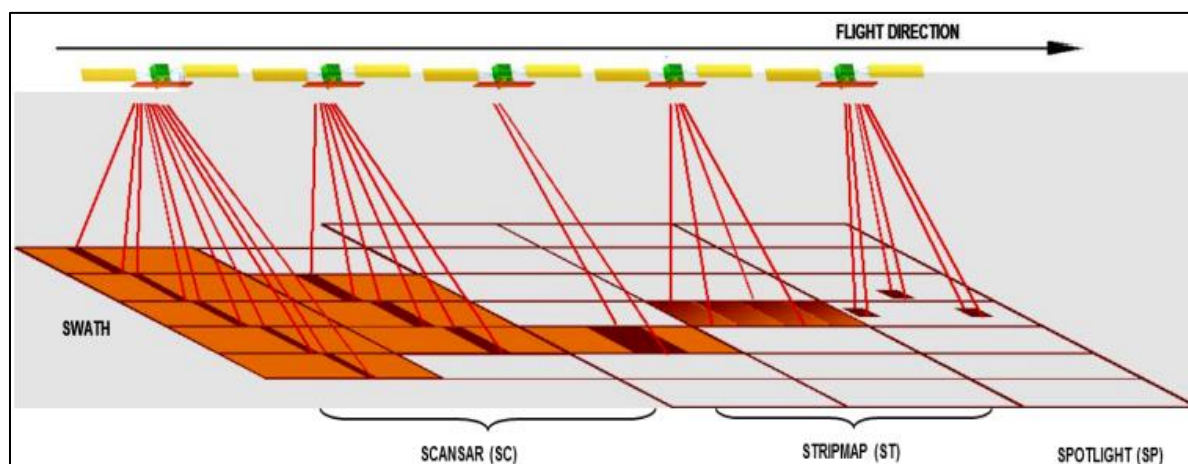
Brinda información a nivel mundial para varias aplicaciones de defensa y civiles, como cartografía, planificación, agricultura, hidrología, geología, entre otros. En función de sus múltiples usos busca satisfacer los requerimientos del cliente, bajo restricciones económicas, ya que sus imágenes no son de libre descarga (Fiorentino & Virelli, 2016).

### **Modo de adquisición de Cosmo SkyMED**

Con la finalidad de proporcionar información satelital variada, se diseñó diferentes modos de adquisición, como se presenta en la figura 34:

**Figura 34.**

*Modos de adquisición Cosmo SkyMED*



*Nota.* Recuperado de (Fiorentino & Virelli, 2016).

**Spotlight.** En este modo de adquisición, ilumina la escena requerida en un período largo de tiempo, aumentando la longitud de la antena sintética y la resolución del azimut. Se caracteriza por tener alta resolución espacial equivalente a 1 m y un área de 10 km<sup>2</sup>, posee una polarización simple HH o VV. La adquisición se realiza en tramos, se encuentra limitada por la dirección del azimut (Fiorentino & Virelli, 2016).

**Stripmap Himage.** El modo de adquisición Stripmap Himage es el más común para varios procesamientos, se obtienen a lo largo de una dirección fija, en función de la trayectoria de la plataforma. Cubre una extensión aproximada de 40 km<sup>2</sup> en la imagen, con una resolución espacial de 3 m, posee una adquisición de diferentes polarizaciones simples como: HH, VV, HV o VH (Fiorentino & Virelli, 2016).

**Stripmap Ping-Pong.** El modo Ping-Pong, tiene la similitud de adquisición de Himage capturando información en una dirección fija, sin embargo, varía al alternar la polarización de la señal entre dos posibles, es decir con polarización cruzada: HH/VV, HH/HV o VV/VH. Por lo cual, se reduce la resolución del azimut, posee una extensión de 30 km<sup>2</sup> (Fiorentino & Virelli, 2016).

**Scansar Wide Region.** Este modo de adquisición posee una franja mayor con respecto al modo *Stripmap*, que se obtiene al pasar el haz de la antena a las sub – franjas contiguas, sin embargo, posee una resolución espacial menor. En el modo *Wide Region*, se agrupan 3 sub – franjas adyacentes logrando tener una cobertura de 100 km, se puede obtener diferentes polarizaciones simples como: HH, VV, HV o VH (Fiorentino & Virelli, 2016).

**Scansar Huge Region.** Este modo de adquisición es similar al modo *Wide Region*, con la variación de agrupar hasta seis sub – franjas contiguas, lo cual permite poseer una cobertura de 200 km aproximadamente, reduciendo su resolución espacial, se puede obtener diferentes polarizaciones simples como: HH, VV, HV o VH (Fiorentino & Virelli, 2016).

#### ***Nivel de procesamiento de Cosmo SkyMED***

Los productos SAR estándar son los productos de imagen básicos del sistema, son adecuados para muchas aplicaciones de teledetección basadas en el uso directo de productos de bajo nivel y se subdividen en 4 tipologías, codificadas como:

**Nivel 0.** Los productos de nivel 0 son datos sin procesamiento. Contienen información de eco obtenidos posteriormente al descifrado, descompresión y aplicación de calibración interna. En estos datos se incluyen los datos auxiliares como la trayectoria, velocidad, carga, datos de calibración, entre otros (Fiorentino & Virelli, 2016).

**Nivel 1A.** Los productos del nivel 1A son *Single-look Complex Slant (SCS)*, son datos RAW enfocados en la proyección inclinada de rango-azimut, siendo esta la proyección de adquisición

natural del sensor. El producto 1A contiene información de fase, datos enfocados, ponderados y ecualizados radiométricamente. El producto SCS contiene datos en formato complejo (I – Q), en rango inclinado y proyección Doppler cero (Fiorentino & Virelli, 2016).

Los productos de nivel 1A están disponibles como equilibrados (SCS\_B) o no equilibrados (SCS\_U). El producto SCS\_U se encuentra en formato complejo, inclinado y con proyección Doppler cero, pero requiere la aplicación de una compensación en la ganancia del transmisor de antena y la atenuación del receptor. El producto SCS\_B es aplicable para los diferentes modos de adquisición de sensor, con datos en formato complejo, en rango inclinado y proyección Doppler cero (Fiorentino & Virelli, 2016).

**Nivel 1B.** Los productos de nivel 1B se denominan DGM (*Detected Ground Multilook*), se generan con múltiples miradas (*multi – looking*) de la superficie terrestre, obteniendo datos satelitales enfocados, detectados y ecualizados radiométricamente (Fiorentino & Virelli, 2016).

**Nivel 1C / 1D.** Los productos de nivel 1C se denomina GEC (Geocoded Ellipsoid Corrected) tiene como finalidad generar productos geocodificados con corrección elipsoidal, con datos representados sobre un elipsoide de referencia. Por otro lado, los productos de nivel 1D se denomina GTC (Geocoded Terrain Corrected) tiene como finalidad generar productos geocodificados de terreno corregido con datos proyectados sobre un modelo digital de elevación de referencia (DEM), con la ayuda de puntos de control terrestre (GCP) (Fiorentino & Virelli, 2016).

### **Plataformas informáticas**

Para el procesamiento de imágenes SAR se requiere de programas que cuenten con las características necesarias para la visualización, tratamiento y análisis de las mismas, por lo cual, se presentan las plataformas informáticas aplicadas en el presente proyecto.

### ***Software SNAP Desktop***

SNAP Desktop es un software libre de código abierto, perteneciente a la Agencia Espacial Europea (ESA), en la cual se puede visualizar, procesar y analizar imágenes satelitales de varias misiones, como Sentinel 1-2-3, TerraSAR, RADARSAT, ENVISAT, MODIS, Landsat, SPOT, ALOS, entre otros (ESA, 2021b).

Dentro de este software, se presenta el módulo Sentinel-1 Toolbox (S1TBX), el mismo que se enfoca en el procesamiento y visualización de datos radar, con procesos como: calibración, corrección, filtros, mosaicos, polarimetría e interferometría, entre otros. En esta plataforma se pueden ingresar insumos SAR de distintas misiones como ERS 1-2, Envisat, ALOS PALSAR, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed y RADARSAT-2 (ESA, 2021b).

**SNAPHU.** SNAPHU es una extensión del software SNAP Desktop para el uso y tratamiento de imágenes satelitales, específicamente de datos radar. Es un algoritmo de flujo estadístico para el desarrollo de la fase interferométrica, para el proceso requiere como insumo a un interferograma, permitiendo la estimación de valores a partir de una matriz de información de  $0$  a  $2\pi$ . Dentro de este algoritmo se incorporan diferentes enfoques, con la finalidad de brindar mayor aplicabilidad como topografía, deformaciones, entre otros (Chen & Zebker, 2002).

### ***Software ENVI***

ENVI es un software comercial bajo contrato de licencia de la empresa *L3Harris Geospatial Solutions*, que tiene como fin visualizar, procesar y analizar imágenes geoespaciales de diferentes formatos, tamaños y plataformas, obtenidas mediante satélites o sensores aerotransportados. El software simplifica el procesamiento interactivo, brindando varias aplicaciones para cubrir las necesidades del usuario, proporciona al usuario varias herramientas

para el procesamiento de imágenes multi e hiperespectral, datos lidar, radar, entre otros (ENVI, 2004).

**SARscape Analytics.** *SARscape Analytics* es una caja de herramientas dentro del software ENVI, la misma que fue diseñada para el procesamiento de imágenes RADAR. A su vez posee múltiples aplicaciones y tratamientos de las mismas como: interferometría, detección de cambios, mapeo de desplazamientos, mapeo de inundaciones, geocodificación de imágenes, deformación de la superficie, series de tiempo, entre otras (HARRIS, 2019). A su vez es compatible con formatos de diferentes plataformas satelitales, como Sentinel-1 en su formato de archivo .zip, y en Cosmo SkyMED con su extensión .h5.

#### **Software ERDAS Imagine**

ERDAS IMAGINE, es un software de la empresa *Hexagon Geospatial*, en el cual se puede visualizar, procesar y analizar información geográfica y datos geoespaciales, en sus diferentes formatos de vector o ráster, crudos o procesados. Se puede aplicar en diferentes usos, como en procesos de fotogrametría, análisis de puntos LiDAR, análisis vectorial o ráster, y teledetección de diversas plataformas aéreas, afín con el procesamiento de imágenes pancromáticas, multiespectrales, hiper espectrales y radar con interferometría (Hexagon, 2020).

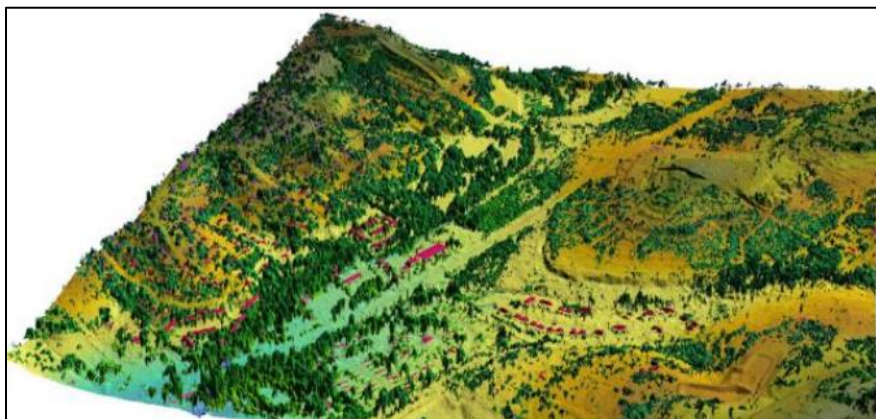
**Radar Toolbox.** *Radar Toolbox* es una caja de herramientas del software ERDAS IMAGINE, la cual se usa para el procesamiento de imágenes RADAR, con múltiples aplicaciones como: interferometría para la generación de modelos digitales de elevación, detección de cambios de coherencia, correregistro de imágenes SAR, identificación de desplazamientos, entre otros, facilitando el procesamiento de imágenes SAR (Hexagon, 2014).

### Modelo digital de superficies

El Modelo Digital de Superficie (MDS) es un modelo de elevación que incluye los elementos presentes sobre el suelo desnudo, como se presenta en la figura 35, representando así las elevaciones de elementos que se encuentran presentes sobre la superficie terrestre, como vegetación, copas de árboles, edificaciones, vías, suelo desnudo, entre otros (Fuentes et al., 2012).

#### Figura 35.

*Ejemplo de Modelo Digital de Superficies*



*Nota.* Recuperado de (Cango, 2017)

### Modelo digital SRTM

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) es un proyecto conjunto de *National Geospatial-Intelligence Agency (NGA)* y *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* para mapear el mundo en tres dimensiones, fue lanzado en febrero del 2000. Usando sensores radar con banda C (SIR-C) y banda X (X-SAR), actualmente posee una cobertura de la superficie del 80%, con la finalidad de brindar datos de alta resolución a nivel global (NASA, 1998).

El objetivo de la misión es la obtención de datos altimétricos del 80% de la superficie terrestre aproximadamente. SRTM usó antenas de radar dual para la adquisición de información interferométrica, teniendo como resultado resoluciones de 1 y 3 arcos de segundo, lo que aproximadamente equivale a 30 m y 90 m respectivamente. Inicialmente la resolución de 1 arco de segundo solo era aplicable en Estados Unidos, sin embargo, en la actualidad esa información se presenta a nivel mundial, la resolución varía en función de la latitud, tomando como geoide de referencia a EGM96 (Farr et al., 2007).

### **Modelo digital ALOS**

El satélite ALOS fue lanzado por la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA - *Japan Aerospace Exploration Agency*), desde el Centro Espacial Tanegashima el 24 de enero de 2006. ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) tiene como objetivo contribuir a la cartografía mediante el uso de tres sensores para la observación de la tierra: PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument Stereo Mapping*) mide la elevación precisa del terreno, AVNIR-2 (*Advanced Visible and Near Infrared Radiometer - 2*) observa la cobertura en la superficie terrestre, PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*) permite observaciones terrestres frente a cualquier condición atmosférica y captura de información en el día y noche (JAXA, 2008).

A partir del 2014, la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) emprende su proyecto "ALOS World 3D" (AW3D) que tiene una cobertura a nivel mundial mediante el uso de múltiples escenas del sensor PRISM. El mapa digital 3D consiste en un modelo digital de elevación (MDE) o un modelo digital de superficie (MDS) que representa la cobertura terrestre con aproximadamente 30 m en resolución espacial (JAXA & EORC, 2021).

ALOS World 3D captura imágenes que poseen altura sobre el nivel del mar, con una resolución de 1 arco de segundo, equivalente a 30 m dependiendo de la latitud, poseen valores



de elevación en metros, convertidos a partir de la altura elipsoidal en un marco de referencia ITRF97 y GRS80, y utilizando el modelo del geoide EGM96 (JAXA & EORC, 2021).

### **Nubosidad**

La nubosidad es la sección del cielo que presenta nubes las cuales se encuentran constituidas de agua o hielo en función de la temperatura. Existen ciertos factores que influyen en la presencia de nubes, como la topografía de la zona (montañoso o plano) y la distancia en la que se encuentra de la línea costera (altitud) (Guerero et al., 2017).

### **Red de Control Vertical IGM**

Dentro del Ecuador, rige el Sistema de Referencia Geodésico Nacional, el mismo que conforma la normativa oficial de información georreferenciada del país, abarcando tanto al aspecto horizontal como vertical (IGM, 2016).

La red de control vertical del IGM o componente vertical, se encuentra materializado dentro de la red de nivelación a nivel nacional, partiendo desde el nivel medio del mar ubicado en la provincia de Santa Elena, en La Libertad, hacia diversas zonas del país, tomando como referencia la infraestructura vial que constituye 7500 km del territorio nacional (IGM, 2016).

### **Estadísticos**

#### ***Media***

La media es un valor utilizado que permite la representación de las características de un conjunto de datos cuantitativos. Se define como la sumatoria de los datos cuantitativos dividido para el número total de datos (Martínez, 2012), es decir, se denomina a la media aritmética mediante un el símbolo:  $\bar{x}$ , según Martínez, (2012), la ecuación para obtener la media es:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Ec. 12

Donde  $n$  es el número total de datos, y  $x_i$  representa los valores de las observaciones obtenidos.

### ***Desviación estándar***

La desviación típica o estándar, es una medida de tendencia central, la cual se define como la raíz cuadrada del valor obtenido con la media aritmética del cuadrado de la diferencia entre los valores obtenidos y la media (Martínez, 2012), es decir, según Martínez, (2012), la ecuación para obtener la desviación estándar es:

Ec. 13

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n}}$$

Donde  $X_i$  representa los valores obtenidos,  $\bar{X}$  corresponde a la media aritmética y  $n$  es el número de observaciones totales.

### ***Intervalo de confianza***

Los intervalos de confianza o límites de probabilidad son los valores que establecen un rango en el cual se encuentra el valor real o verdadero, que se encuentra relacionado directamente con el nivel de confianza. Según Martínez, (2012), la ecuación para identificar el intervalo de confianza es:

$$\text{Intervalo de confianza} = \bar{x} \pm Z \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde  $\bar{x}$  corresponde a la media aritmética  $Z$  es el nivel de confianza,  $\sigma$  representa la desviación estándar y  $n$  es el número de observaciones totales.

## Normativa para evaluación altimétrica

### ***Precisión vertical IGM***

La precisión de información altimétrica se denota según la ecuación 12, según lo indica IGM, (2016):

$$PV = \frac{1}{4} \times IC \quad \text{Ec. 15}$$

Siendo IC el intervalo de curva en función de la escala de los datos geográficos.

### ***Root Mean Square (RMS)***

El Estándar Nacional de Precisión de Datos Espaciales (NSSDA según sus siglas en inglés), establece el uso de una metodología estadística para estimar la exactitud posicional de puntos geoespaciales en función de posiciones terrestres georreferenciadas de mayor exactitud. Para lo cual se da uso del error medio cuadrático (RMS) (FGDC, 1998).

La media cuadrática o RMS (*Root Mean Square*) de un conjunto de valores ( $Z_1, Z_2, \dots, Z_N$ ) es una medida estadística de posición central. Esta se define como la raíz cuadrada del promedio de un conjunto de datos, resultado de las diferencias entre dos valores de elevación (FGDC, 1998), mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum (Z_R - Z_N)^2}{n}} \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

$Z_R$ = Valor vertical del punto de control en la fuente independiente de mayor exactitud

$Z_N$ = Valor vertical del punto de control en el conjunto de datos.

$n$ = Número de puntos evaluados, es un valor entero.

Derivado del resultado, se aplica el factor 1.96 para calcular el error lineal con un nivel de confianza del 95%, por lo tanto, según la FGDC, (1998), la exactitud vertical de acuerdo con la norma NSSDA se calcula con la siguiente ecuación:

$$\textit{Exactitud vertical} = 1.96 \times \textit{RMS} \quad \text{Ec. 17}$$

Según lo que indica la ASPRS, (2014), se identifica la exactitud vertical de áreas con presencia y ausencia de vegetación, las zonas sin vegetación (NVA) se determinan con un nivel de confianza del 95% al multiplicar el valor obtenido de RMS por 1.96. La norma internacional utiliza el RMS para la estimación de la exactitud posicional vertical y horizontal con un nivel de confianza al 95%, que tiene como finalidad expresar que el 95% de las posiciones en función de la población de datos, poseen un error con respecto a los valores reales tomados de referencia, los mismos que pueden ser mayores o menores que el valor determinado (ASPRS, 2014).

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA

#### Generalidades

En este capítulo se describe el proceso realizado para identificar, recopilar y desarrollar la técnica de interferometría SAR, en una zona delimitada del Ecuador continental, con el propósito de representar y analizar la variabilidad de valores altimétricos existentes en los distintos modelos generados.

Con el fin de desarrollar el presente proyecto, se detalla la metodología aplicada para la generación de modelos digitales de superficie con imágenes SAR Sentinel-1 y Cosmo SkyMED, mediante el uso de software libre SNAP Desktop y software comercial ENVI y ERDAS IMAGINE.

Posteriormente, en la evaluación de los modelos generados se aplica un análisis estadístico con los puntos de control vertical emitidos por el Instituto Geográfico Militar (IGM) y con los modelos mundiales SRTM y ALOS World 3D.

En función de ello, se utilizaron imágenes radar de una zona en común, las mismas que se encuentran en un nivel de adquisición SLC (*Single Look Complex*) y que posean una temporalidad baja entre las mismas, 6 y 4 días de resolución temporal para las imágenes Sentinel-1 y Cosmo SkyMED, respectivamente. El desarrollo de la metodología se establece en tres fases:

Fase 1: Descarga y obtención de información satelital y software correspondiente

Fase 2: Generación de modelos digitales de superficie

Fase 3: Evaluación de modelos digitales de superficie

Para el desarrollo exitoso de esta metodología se usaron imágenes Sentinel-1 (A – B) y Cosmo SkyMED (2 – 3); adicionalmente, se utilizaron los programas *ENVI* con su caja de herramientas *SARscape Analytics*, *ERDAS IMAGINE* con su caja de herramientas *Radar Toolbox* y *SNAP Desktop* con su extensión *SNAPHU*, los mismos que se encuentran con mayor detalle en:

Anexo 1: Procesamiento con el software comercial *ENVI*.

Anexo 2: Procesamiento con el software comercial *ERDAS IMAGINE*.

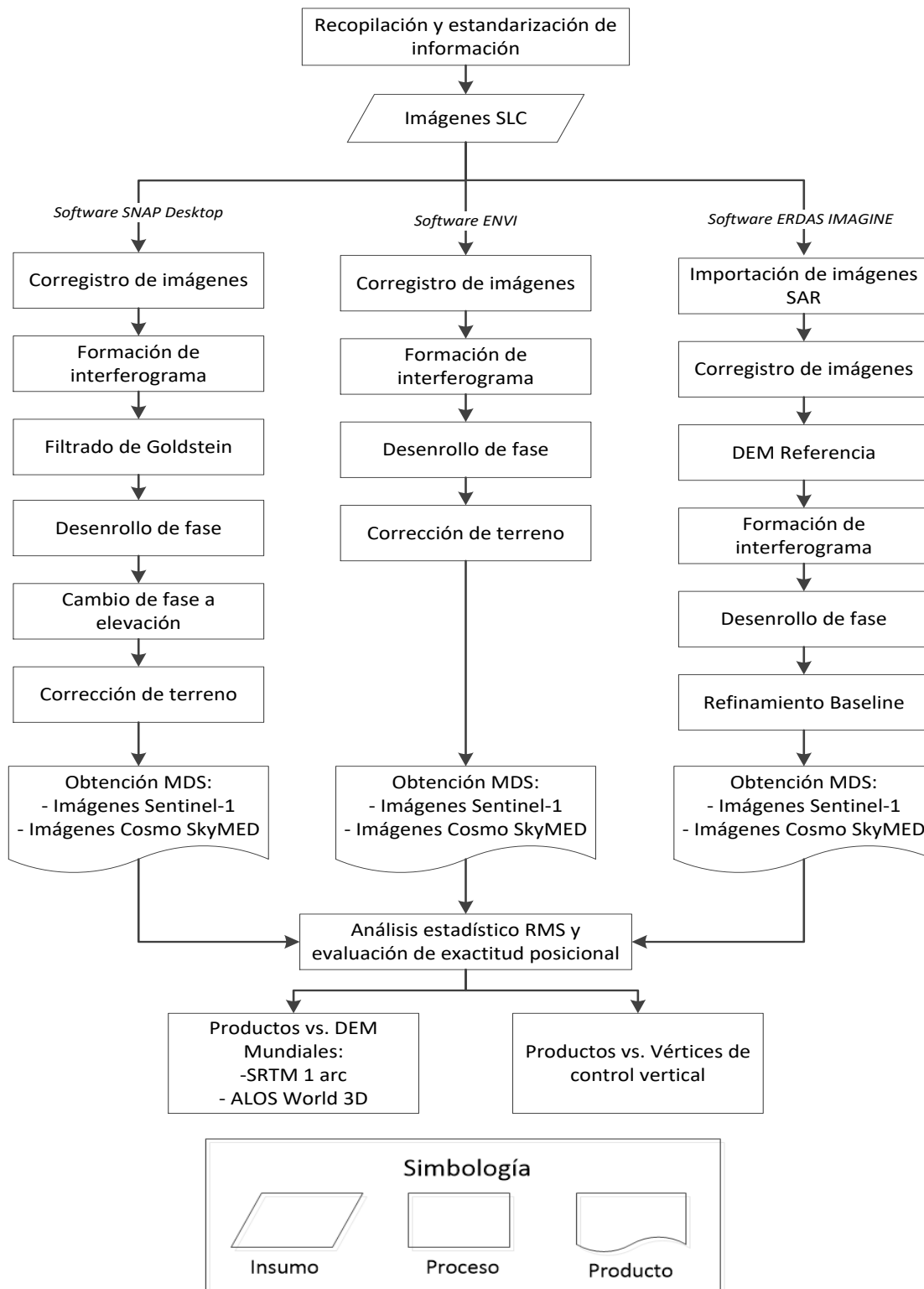
Anexo 3: Procesamiento con el software libre *SNAP Desktop* con imágenes Sentinel-1.

Anexo 4: Procesamiento con el software libre *SNAP Desktop* con imágenes Cosmo SkyMED.

El desarrollo del estudio realizado parte del método inductivo para la generación de los MDS, se utilizan los métodos experimentales en la aplicación de los diferentes programas y comparativos en la evaluación del control de calidad. En la figura 36 se puede observar una breve descripción de la metodología a seguir.

Figura 36.

Metodología General para la Generación de MDS con Interferometría



## **Recopilación y estandarización de información**

La recopilación de información teórica es base fundamental del desarrollo del presente proyecto, ya que mediante la misma se identificaron los conceptos primordiales, nomenclatura, aplicaciones y usos de imágenes SAR y los diversos tratamientos o procesamientos que se aplican en las mismas.

En función de la revisión de información teórica, se determinó el uso de la metodología que se aplicaría para el análisis y procesamiento de los productos, correspondiente a: la adquisición de imágenes SAR, especificaciones requeridas del modo y nivel de adquisición de las mismas, además de conocer la aplicación de diferentes plataformas de procesamiento de datos satelitales requeridos en el procesamiento para obtener modelos digitales de superficie.

Con la finalidad de alcanzar los objetivos planteados, se generaron convenios con entidades como: Instituto Geográfico Militar (IGM) e Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN); y acuerdos de colaboración con la entidad L3Harris, que facilitaron el uso de los diferentes programas, así como la capacitación para el conocimiento y uso de estas plataformas e imágenes satelitales y su respectivo tratamiento, tomando en cuenta los requerimientos mínimos de la estación de trabajo para el procesamiento de la información satelital.

Adicionalmente, al recopilar la información satelital correspondiente, es indispensable el uso de una estación de trabajo de alto rendimiento para la instalación de los diferentes programas requeridos, por lo cual, el equipo utilizado posee un sistema operativo Windows 10, en la tabla 2 se puede observar los requerimientos y características recomendadas por cada software y el equipo utilizado para el procesamiento.



**Tabla 2.***Requerimientos para instalación de programas*

	<b>Software ERDAS IMAGINE</b>	<b>Software ENVI</b>	<b>Software SNAP Desktop</b>	<b>Equipo utilizado</b>
Procesador	Intel Pentium 4 HT, Xeon	Intel i5-8400 – Ryzen 5 1600X	--	Intel Xeon 3.50 GHz
Memoria RAM	Mínimo 2 GB	16 GB	--	48 GB
Almacenamiento	8 GB	30 GB	100 MB	1 TB
Tarjeta gráfica	NVIDIA Quadro 6000 - 600	--	--	NVIDIA Quadro K2200

La descarga y estandarización de la información satelital está compuesta por dos fases: la primera, corresponde a la adquisición de imágenes SAR Sentinel-1; y la segunda, la obtención de imágenes SAR Cosmo SkyMED.

La obtención de imágenes satelitales Sentinel-1, se realizó mediante la plataforma *Alaska Facility* (<https://search.asf.alaska.edu/>) perteneciente a la Agencia Espacial Europea (ESA), esta información es de libre acceso para el usuario; al respecto, para la descarga de las imágenes, se debe cumplir con los parámetros requeridos de interferometría, como: el nivel de adquisición de las imágenes SLC (*Single Look Complex*), modo de adquisición IW (*Interferometric Wide Swath Mode*). En la tabla 3 se puede visualizar las características correspondientes a las imágenes Sentinel-1.

**Tabla 3.**

Características de imágenes Sentinel-1

	Imagen 1	Imagen 2
<b>Tipo</b>	SAR	
<b>Sistema</b>	Sentinel-1 A	Sentinel-1 B
<b>Fecha de captura</b>	18 – 01 – 2017	24 – 01 – 2017
<b>Banda</b>	C	
<b>Modo de adquisición</b>	IW TOPSAR	
<b>Nivel de Procesamiento</b>	Nivel 1 – SLC	
<b>Polarización</b>	VV	
<b>Dirección</b>	Ascendente	
<b>Resolución Geométrica</b>	5 x 20 m	
<b>Resolución Temporal</b>	6 días	
<b>Fuente</b>	Agencia Espacial Europea (ESA)	

Las imágenes Sentinel-1 comprenden una extensión de 250 km x 250 km, posteriormente serán recortadas para el uso exclusivo del área de la ciudad de Quito; en la figura 37 se visualizan como las dos imágenes cubren la misma área, para realizar el procesamiento con interferometría.

**Figura 37.***Imágenes Sentinel-1*

Las imágenes satelitales Cosmo SkyMED, fueron obtenidas a través de un convenio establecido con el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN). La zona de estudio se determinó en función de la disponibilidad de información satelital de la entidad, las imágenes poseen un modo y nivel de adquisición: *HIMAGE* y *SLC (Single Look Complex)*, respectivamente. En la tabla 4 se presenta las características correspondientes a las imágenes Cosmo SkyMED.

**Tabla 4.**

*Características de imágenes Cosmo SkyMED*

	<b>Imagen 1</b>	<b>Imagen 2</b>
<b>Tipo</b>	SAR	
<b>Sistema</b>	CSK – 3	CSK – 2
<b>Fecha de captura</b>	18 – 08 – 2020	22 – 08 – 2020
<b>Banda</b>	X	
<b>Modo de adquisición</b>	HIMAGE	
<b>Nivel de Procesamiento</b>	Nivel 1 A – SCS_B	
<b>Polarización</b>	HH	
<b>Dirección</b>	Ascendente	
<b>Resolución Geométrica</b>	3 x 3 m	
<b>Resolución Temporal</b>	4 días	
<b>Fuente</b>	Instituto Geofísico – Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN)	

Las imágenes Cosmo SkyMED poseen una extensión aproximada de 40 km x 40 km, abarcando la ciudad de Quito; en la figura 38 se visualiza como las dos imágenes cubren la misma área para el procesamiento con interferometría SAR.

**Figura 38.**

*Imágenes Cosmo SkyMED*

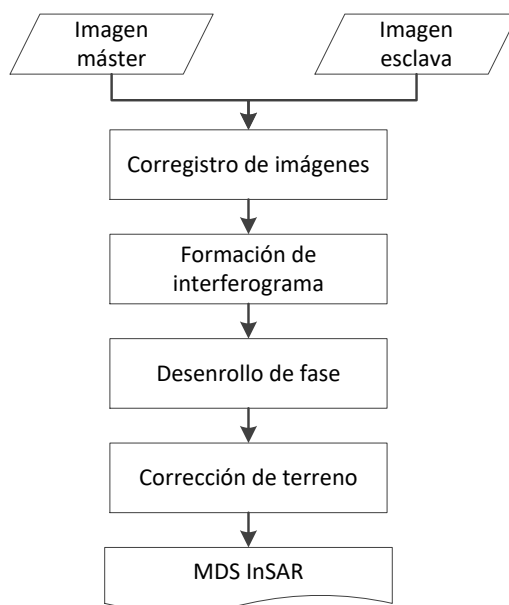


### **Generación MDS en software ENVI**

En el procesamiento con el software ENVI, se usaron dos pares de imágenes satelitales, Sentinel-1 y Cosmo SkyMED; de forma independiente el proceso con cada par es idéntico, siguiendo el flujograma establecido en la figura 39.

**Figura 39.**

*Procesamiento software ENVI*



El procesamiento realizado en el software ENVI es automatizado, por lo cual, el usuario no puede interactuar con cada fase. Sin embargo, el flujo de trabajo cumple con lo establecido en la figura 39. El ingreso de la información es primordial, debido a que en función de estos parámetros se genera el MDS de cada par de imágenes, en la figura 40 se observa la ventana de trabajo del software ENVI, en el Anexo 1 se presenta con mayor detalle el proceso.

**Figura 40.**

*Ingreso de parámetros software ENVI*

The screenshot shows the 'SAR DEM Extraction' dialog box with the following parameters:

- Primary Image: Imagen SLC – Fecha inicial
- Secondary Image: Imagen SLC – Fecha consecutiva
- AOI (optional): Área de recorte de imágenes
- DEM option: Extract SRTM-3 V4 DEM
- Output Cartographic System (optional):
  - State: GEO-GLOBAL
  - Hemisphere: [dropdown]
  - Projection: GEO
  - Zone: [dropdown]
  - Ellipsoid: WGS84
  - Datum\_Shift: [dropdown]
  - Reference\_Height: 0.00
- Input DEM (optional): [empty field]
- DEM TIFF (optional): [empty field]
- Subtract Geoid: Subtract geoid
- Geoid Type: EGM96
- Dummy Value for DEM TIFF: NaN
- Grid size (m) (optional): [empty field]
- Minimum Quality Threshold (optional): 0.2
- Decomposition (optional): 1

Annotations:

- Red arrow pointing to 'Extract SRTM-3 V4 DEM' with text: 'Selección DEM de referencia'
- Red arrow pointing to 'Minimum Quality Threshold' with text: 'Establece el límite mínimo del valor de coherencia. En un rango de 0 a 1.'

El correregistro se realiza a partir del ingreso de las imágenes *Primary Image* y *Secondary Image* que corresponden a la fecha inicial o máster (*master*) y final o esclava (*slave*) respectivamente. En el caso del proceso realizado con las imágenes Cosmo SkyMED las fechas corresponden a: 18 – 08 – 2020 y 22 – 08 – 2020, mientras que con las imágenes Sentinel-1 las fechas de captura son: 18 – 01 – 2017 y 24 – 01 – 2017, respectivamente.

Para el procesamiento con imágenes Sentinel-1 se requiere ingresar el área de recorte para delimitar la zona de estudio conocida como *AOI*, y para las imágenes Cosmo SkyMED se utilizó el área completa debido a su extensión. Adicionalmente, se selecciona un DEM mundial para el uso de una referencia con las imágenes ingresadas; por lo tanto, en los dos pares de imágenes se ingresó el DEM ALOS World 3D.

Al respecto, se realizaron pruebas con el DEM SRTM-1, pero no se realizó el procesamiento debido a problemas con la descarga automática del mismo. Por otro lado, se ingresaron DEM externos en formato .TIF, y de igual manera no se obtuvieron resultados tras el procesamiento. Es por ello, que se optó por elegir un modelo mundial de similares características que corresponde al DEM ALOS World 3D.

En la formación del interferograma, se obtiene un producto que contiene información de intensidad, fase y coherencia entre las imágenes previamente correregistradas dentro del proceso automatizado. El software ENVI parte de la diferencia de fase entre imágenes que poseen una relación con los valores de elevación, en función de la ecuación 11. En este proceso se obtiene la coherencia existente entre las imágenes SAR ingresadas, los resultados se presentan en el capítulo 4, en los apartados: “Resultados de interferogramas de imágenes SAR” y “Resultados de coherencia de imágenes SAR”.

Para la reducción del ruido en la fase interferométrica se aplica el filtrado de Goldstein, el cual es un algoritmo adaptativo no lineal establecido por Goldstein & Werner en el año 1998. Debido a este filtrado del interferograma, se acentúa con mayor claridad las formas y variaciones que se encuentran presentes en el mismo; la aplicación de este filtro mejora la precisión del desenvolvimiento de fase. El resultado alcanzado se presenta en el capítulo 4 en el apartado: “Resultados de interferogramas con Filtro de Goldstein”.

Posteriormente, se realiza el desenrollo de fase, que consiste en la relación entre la fase interferométrica y la información altimétrica, lo cual no se identifica como un modelo digital de superficie, pero visualmente son similares. El resultado correspondiente se presenta en el capítulo 4, en el apartado: “Resultados de desenrollo de interferograma”.

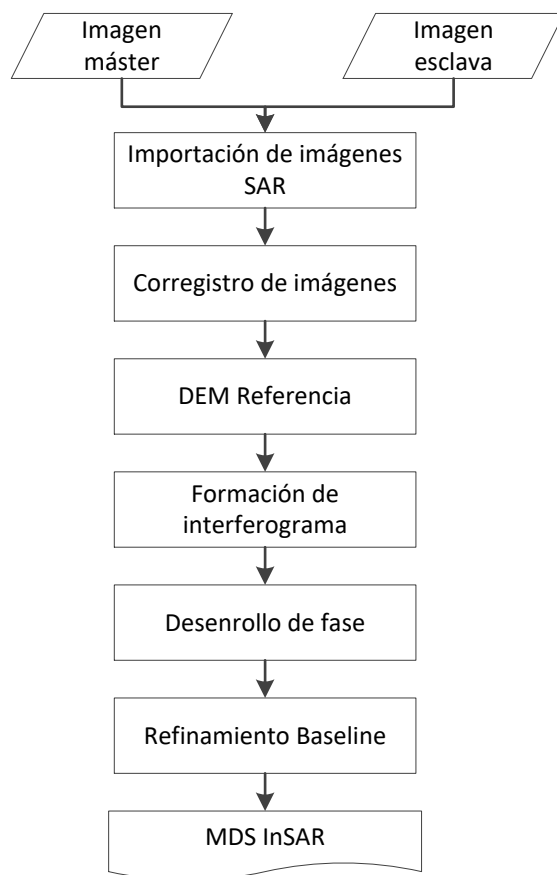
Finalmente, se realiza la corrección de terreno y georreferenciación, que geocodificará la imagen, corrigiendo y compensando las distorsiones de la imagen SAR a partir de un modelo digital de que permite proyectar el modelo generado lo más cercano a la realidad; en el software ENVI se aplica el modelo ALOS World View 3D para las correcciones geométricas correspondientes. El resultado del modelo digital de superficie obtenido se presenta en el capítulo 4, en el apartado: “Resultados de modelos digitales de superficie”.

#### **Generación MDS con imágenes Cosmo SkyMED en software ERDAS IMAGINE**

En el procesamiento con el software ERDAS IMAGINE, solamente se utilizó el par de imágenes Cosmo SkyMED, debido a que no se realizó la importación de imágenes Sentinel-1 por ausencia de interoperabilidad con este formato de imágenes. Para las imágenes Cosmo SkyMED se aplica el proceso establecido en la figura 41.

**Figura 41.**

*Procesamiento software ERDAS IMAGINE*



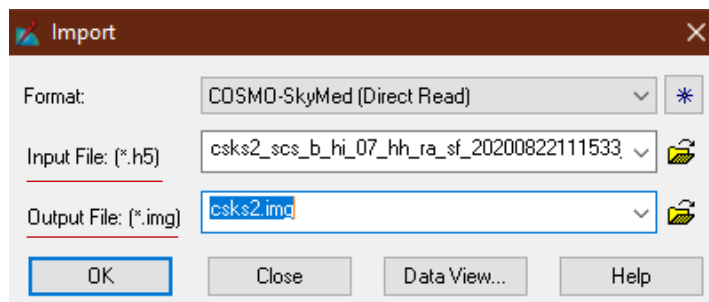
#### ***Importación de imágenes Cosmo SkyMED en software ERDAS IMAGINE***

Para el procesamiento de imágenes SAR en el programa ERDAS IMAGINE se requiere que las imágenes se encuentren en el formato ráster nativo del software que corresponde a la extensión **.img**. Al respecto, en el caso de los datos de Cosmo SkyMED corresponde a la extensión **.h5**, el cual no es compatible para el procesamiento del software ERDAS IMAGINE, en la figura 42 se presenta el proceso generado, obteniendo como resultado imágenes con una extensión **.img**; en el Anexo 2 se detalla el proceso correspondiente.



Figura 42.

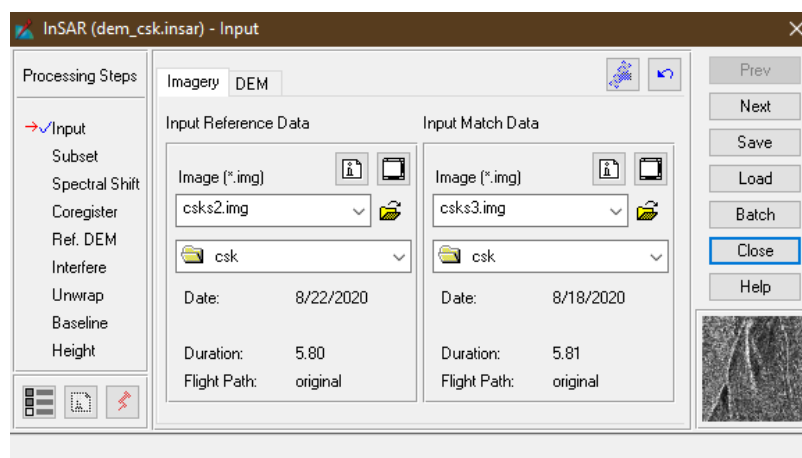
*Importación de imágenes SAR en software ERDAS IMAGINE*



Al obtener los datos SAR en formato **.img** se ingresan en el interfaz Radar Toolbox, en el cual, como primer paso, se realiza el ingreso de las imágenes importadas; en la figura 43 se visualiza el ingreso correspondiente del par de imágenes, tomando en cuenta que para ejecutar el corregistro se requiere identificar cuál es la *máster (Match Data)* y la esclava (*Reference Data*); el software identifica automáticamente en función de los metadatos de las imágenes, partiendo de captura de la fecha inicial y final, entre las mismas.

Figura 43.

*Ingreso de imágenes Cosmo SkyMED en software ERDAS IMAGINE*



Los procesos posteriores que corresponden a *Subset* y *Spectral Shift* no se realizan, debido a que no se requiere generar un recorte en las imágenes Cosmo SkyMED debido a su extensión; por otro lado, la herramienta *Spectral Shift* no requiere modificación del usuario, como se detalla en el Anexo 2.

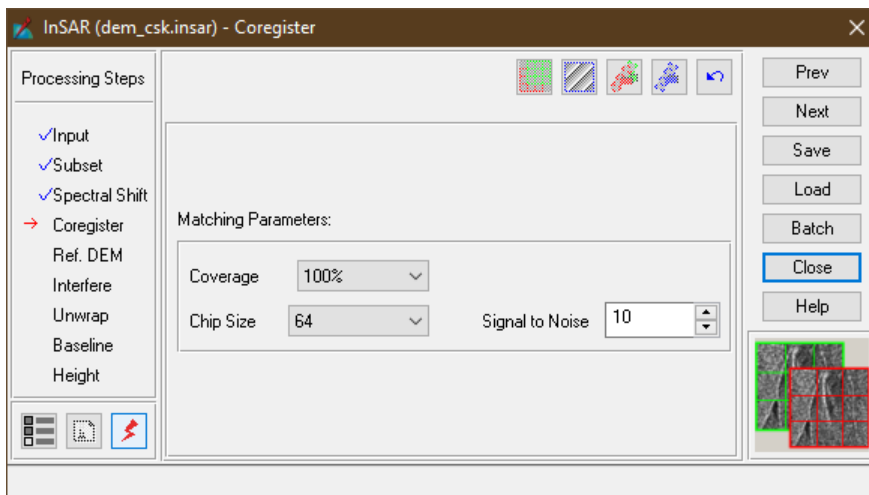
### **Corregistro de imágenes en software ERDAS IMAGINE**

El corregistro de las imágenes es la base fundamental para realizar el proceso interferométrico. Consiste en seleccionar dos imágenes tomando como *master* a la fecha de la primera captura y *slave* a la fecha consecutiva. La imagen *master* y *slave* de Cosmo SkyMED corresponden a las fechas 18 – 08 – 2020 y 22 – 08 – 2020, respectivamente.

Para llevar a cabo el corregistro, se selecciona el porcentaje que se desea cubrir de las imágenes para la correlación; en este caso, el 100% de los píxeles de las imágenes se aplicaron en el corregistro, tal como se visualiza en la figura 44; el proceso se encuentra con mayor detalle en el Anexo 2.

**Figura 44.**

*Corregistro de imágenes en software ERDAS IMAGINE*

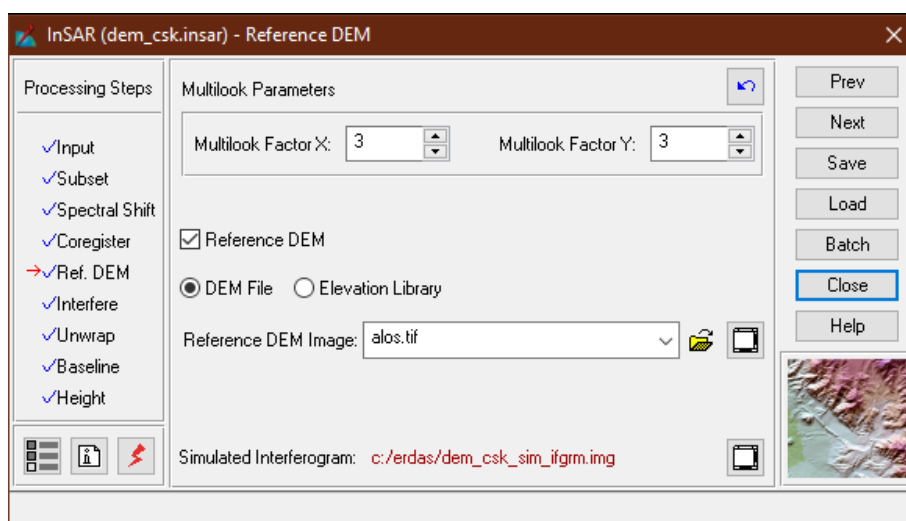


### ***DEM Referencia en software ERDAS IMAGINE***

Previo a la obtención del interferograma en el software ERDAS IMAGINE se realiza un preprocesamiento de las imágenes SAR, aplicando un filtro *multilooking* el cual reduce el ruido en la imagen; sin embargo, altera la resolución espacial de las mismas, en la figura 45 se presenta la aplicación del filtrado *multilooking*, la cual altera 3 m a su resolución espacial. Este proceso se aplica únicamente en el software ERDAS IMAGINE, debido a que el peso de la imagen limita el correcto desarrollo de los procesos posteriores. Adicionalmente, se ingresa el DEM ALOS World 3D de referencia en formato *.TIF*, con la finalidad de simular un interferograma temporal para identificar zonas de cambios en la topografía del área de las imágenes SAR.

**Figura 45.**

*Aplicación multilooking en software ERDAS IMAGINE*



### ***Formación de interferograma en software ERDAS IMAGINE***

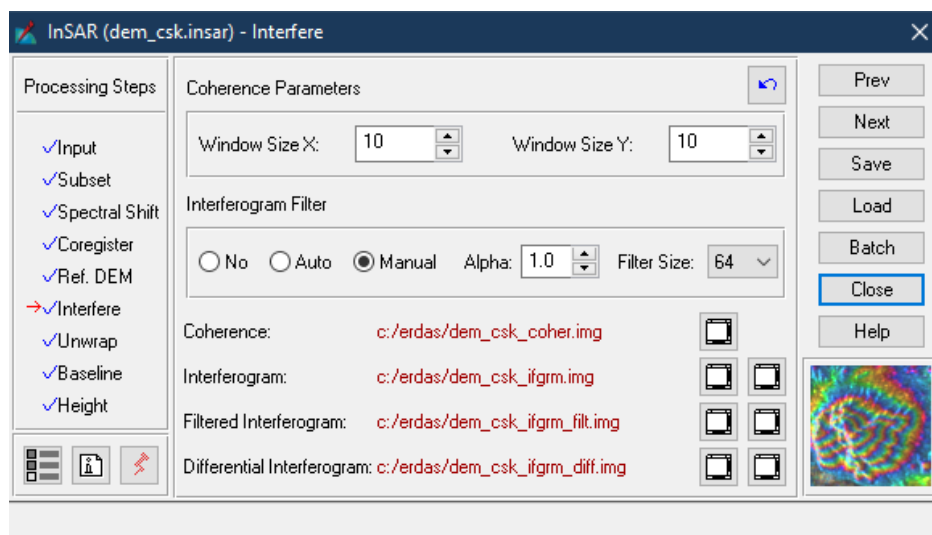
El software ERDAS IMAGINE parte de la ecuación 11 para la diferencia de fase entre las imágenes SAR; este producto posee información de intensidad, fase y coherencia.

Posteriormente, a la aplicación de un filtrado multilooking, en el programa, se genera el

interferograma en la ventana *Interfere*; se aplica directamente el filtrado de Goldstein, en el cual se ingresa el factor 1, siendo la mayor aplicación de este filtro, el cual acentúa las franjas del interferograma para mayor identificación; se obtiene adicionalmente una nueva imagen de coherencia, en la figura 46 se observa el flujo de trabajo y los archivos resultantes con su nomenclatura correspondiente, como: coherencia (*coherence*), interfeograma (*interferogram*), interferograma con filtro de Goldstein (*Ffiltered Interferogram*). El procesamiento se encuentra con mayor detalle en el Anexo 2, los resultados se presentan en el capítulo 4, en los apartados: “Resultados de interferogramas de imágenes SAR”, “Resultados de interferogramas con Filtro de Goldstein” y “Resultados de coherencia de imágenes SAR”.

**Figura 46.**

*Generación del interferograma software ERDAS IMAGINE*



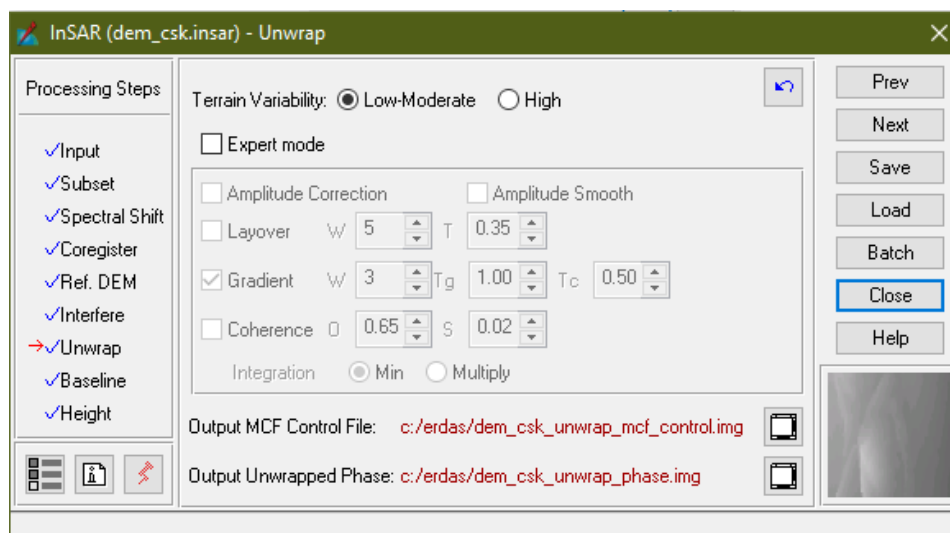
### ***Desenrollo de fase en software ERDAS IMAGINE***

Para el desenrollo de fase, con el software ERDAS IMAGINE, se selecciona el tipo de terreno que caracteriza la zona, correspondiente a relieve moderado, ya que el área que cubre las imágenes Cosmo SkyMED se encuentra en la ciudad de Quito y zonas aledañas montañosas;

el proceso es automatizado para el usuario, ya que solo requiere la especificación del terreno característico de la zona de estudio, como se presenta en la figura 47, el resultado de desenrollo del interferograma se presentan en el capítulo 4, en el apartado: “Resultados de desenrollo de interferograma”.

**Figura 47.**

*Desenrollo de fase en software ERDAS IMAGINE*

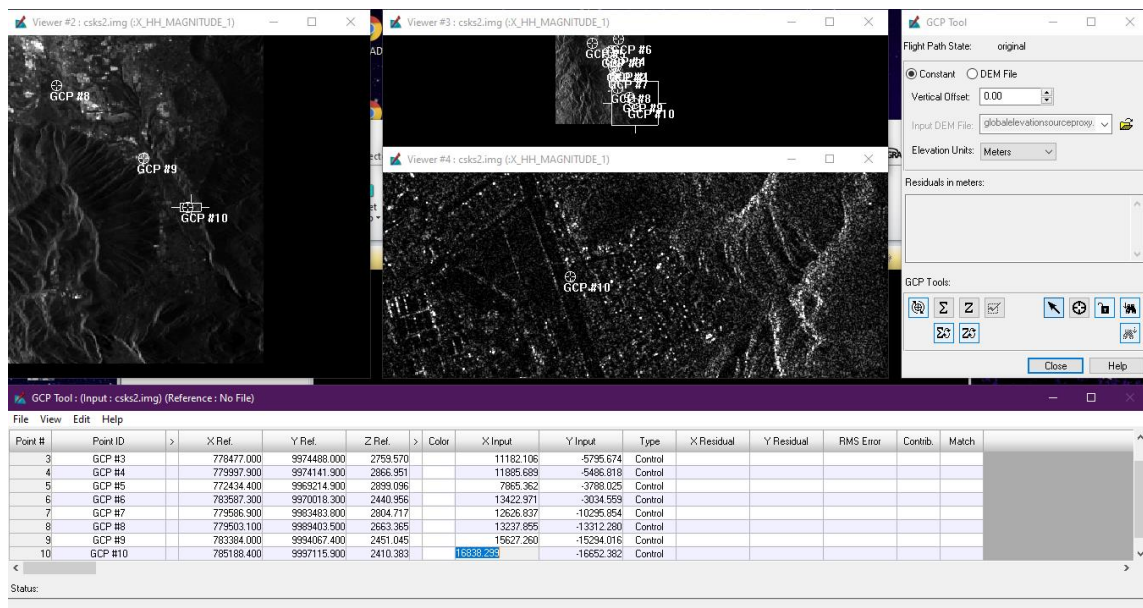


### ***Refinamiento de Línea Base en software ERDAS IMAGINE***

Dentro del software ERDAS IMAGINE, se presenta un proceso que no es aplicable en los otros programas utilizados para el desarrollo del presente proyecto, correspondiente a la modificación o refinamiento de la línea base; lo cual se puede alterar el valor establecido existente entre los satélites para la captura de las imágenes. Esta modificación se encuentra relacionada con el ingreso de información posicional y altimétrica a partir de puntos de control GCP referenciales, tal como se presenta en la figura 48.

Figura 48.

## Ingreso de GCP en software ERDAS IMAGINE

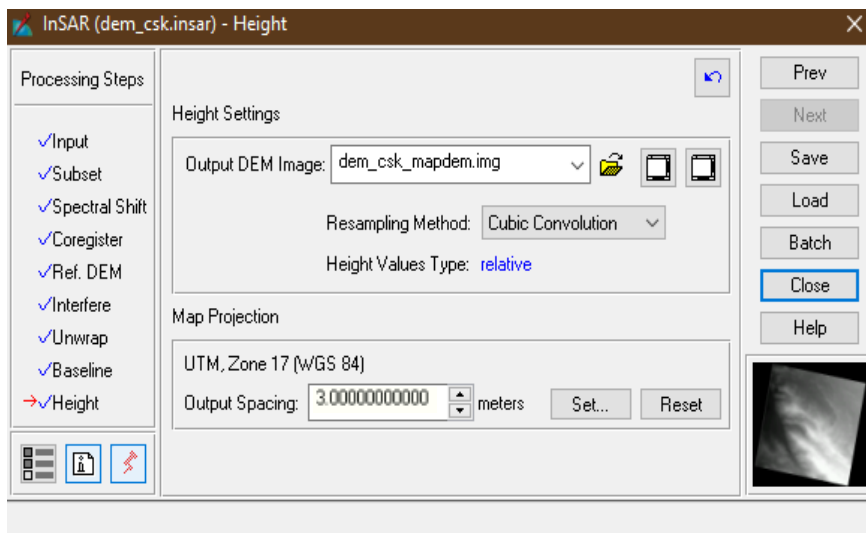


Con el ingreso de puntos de control se ajusta el modelo generado en función de alturas referenciales, realizando el cambio de valores a altura y posicionando en su ubicación real sobre la superficie terrestre, con la finalidad de que posea mayor coincidencia con la altura topográfica de la zona de estudio. Sin embargo, para mejorar la precisión de los valores de altura del modelo, se ingresa un modelo digital de superficie global que genere la referencia altitudinal y posicional, para lo cual se da uso al modelo mundial ALOS World View 3D.

Finalmente, se obtiene el modelo digital de superficies, tras identificar la carpeta de destino, el tamaño de píxel deseado y el método de resamplado a aplicar en caso de alterar la resolución espacial de salida, como se presenta en la figura 49. El resultado del modelo digital de superficie obtenido se presenta en el capítulo 4 en el apartado: “Resultados de modelos digitales de superficie”.

**Figura 49.**

*MDS de salida con software ERDAS IMAGINE*

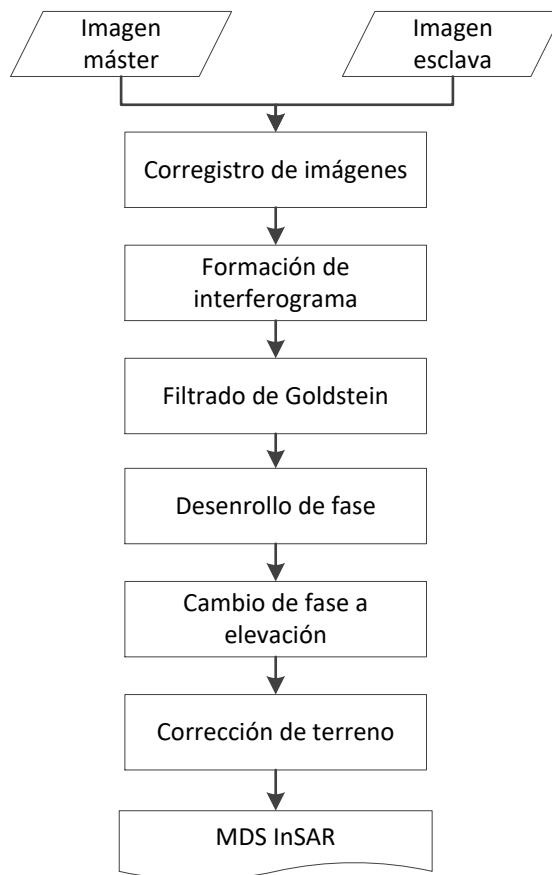


### **Generación MDS con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop**

Al realizar el procesamiento en el software SNAP Desktop, se aplican similares procesos en cada fase con las imágenes Sentinel-1 y Cosmo SkyMED; sin embargo, ciertos subprocesos varían debido a que SNAP Desktop es un programa diseñado para el procesamiento de las misiones Sentinel; por lo cual, existe mayor detalle en las herramientas utilizadas en las imágenes de esta misión; mientras que para otras imágenes SAR, como el caso de Cosmo SkyMED, se generaliza el proceso, tal como se presenta en la figura 50.

**Figura 50.**

*Procesamiento software SNAP Desktop con imágenes Cosmo SkyMED*



### ***Corregistro con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop***

El corregistro de las imágenes unifica a dos imágenes de la misma área para obtener un solo producto de correlación entre las mismas; en las escenas de Cosmo SkyMED las imágenes *master* y *slave* corresponden a las fechas 18 – 08 – 2020 y 22 – 08 – 2020, respectivamente.

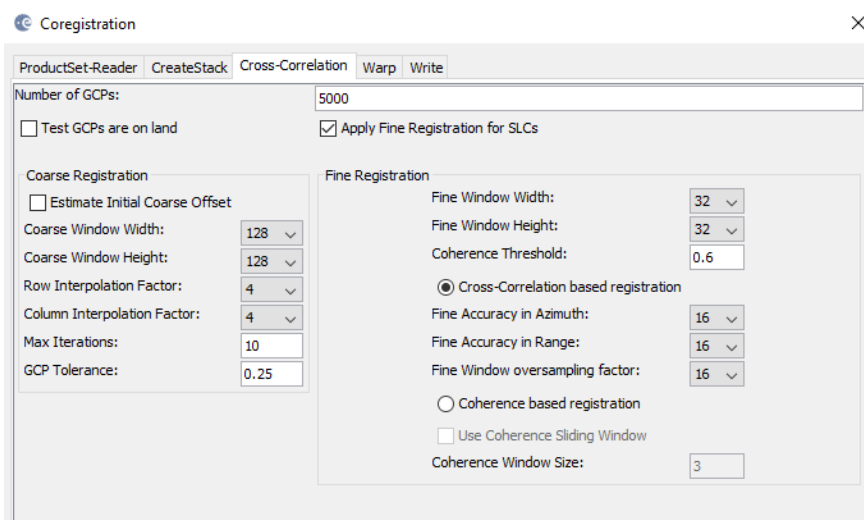
En el uso de los datos Cosmo SkyMED, se utiliza la extensión completa de las imágenes; en ese sentido, no se realiza un corte. En tal virtud, en el proceso del corregistro se aplica la herramienta *Corregistration*, tal como se presenta en la figura 51; se cargan las imágenes SAR y dentro de esta ventana se identifica cuál es la imagen máster; adicionalmente, se ingresa un



total de 5000 GCP (puntos de amarre) automáticos para generar una correlación entre las imágenes, los cuales se distribuyen en cada pixel, con homogeneidad en toda la extensión; como se detalla dentro del Anexo 4. El resultado correspondiente se presenta en el capítulo 4, en el apartado: “Resultado de correregistro de imágenes”.

**Figura 51.**

*Corregistro de imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop*

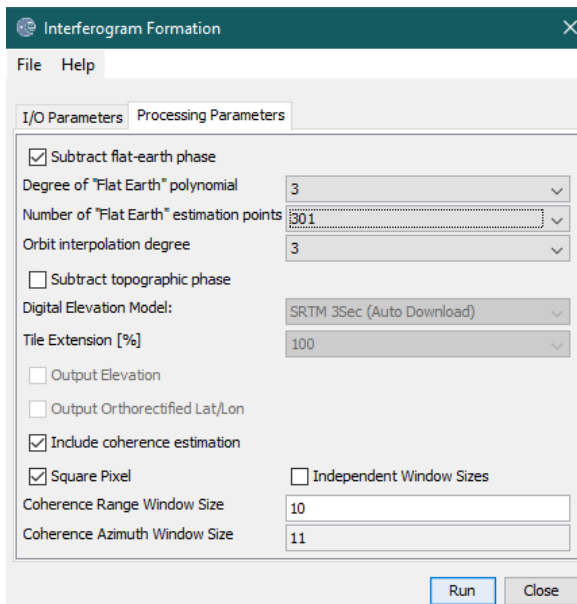


***Formación del interferograma con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop***

En la obtención del interferograma dentro del software SNAP Desktop, se aplica la ecuación 11 para identificar la diferencia de fase entre imágenes SAR. En este proceso se ingresa la imagen previamente correregistrada, y se selecciona el grado polinomial de la estimación de la tierra plana con la finalidad de substraerla del interferograma a generar. Los valores establecidos en la estimación de puntos de la tierra plana pueden ser modificados en función de la extensión de las imágenes SAR, por lo cual en función del área de las imágenes Cosmo SkyMED correspondiente a 40 km x 40 km, se selecciona un valor de 301; dentro del Anexo 4 se detalla el procesamiento aplicado. Tal como se visualiza en la figura 52.

**Figura 52.**

*Generación de interferograma con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop*



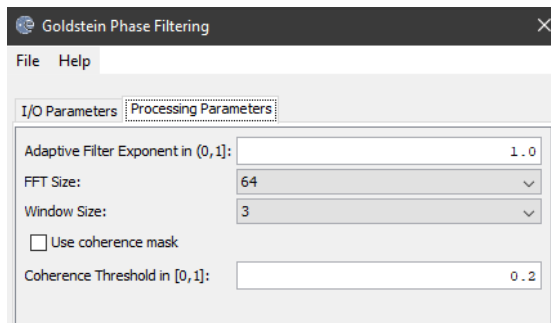
Adicionalmente, al proceso descrito se genera una nueva banda dentro de la imagen del interferograma, conocida como coherencia, la cual identifica las zonas con similitudes entre las dos imágenes SAR; los resultados se detallan dentro del capítulo 4 en los apartados: “Resultados de interferogramas de imágenes SAR”, “Resultados de coherencia de imágenes SAR”.

#### ***Aplicación de filtrado de Goldstein con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop***

Posterior a la generación del interferograma, se requiere la aplicación del filtro de Goldstein, el cual beneficia a los siguientes procesos, ya que acentúa las franjas de color de cada zona del interferograma; en la aplicación del filtro de Goldstein se selecciona el valor 1 con la finalidad de obtener una mayor adaptación al filtrado; como se visualiza en la figura 53. El resultado se ilustra en el capítulo 4 en el apartado: “Resultados de interferogramas con Filtro de Goldstein”.

**Figura 53.**

*Filtrado de Goldstein con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop*

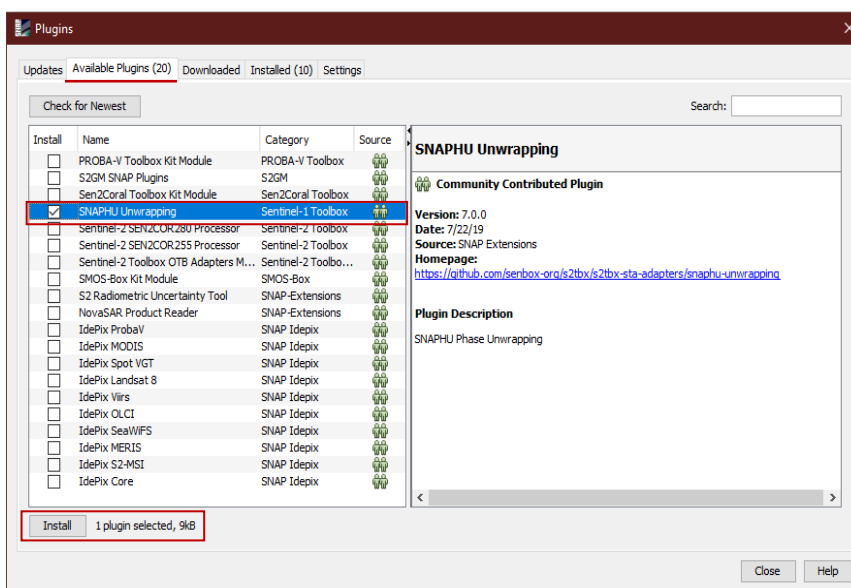


**Desenrollo de fase con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop**

El desenrollo de fase en el software SNAP Desktop, requiere el uso de una extensión conocida como SNAPHU; a partir del programa, se identifica el *plugin* disponible para instalación, como se visualiza en la figura 54. La instalación de la extensión SNAPHU se encuentra detallada en los Anexo 3 y 4.

**Figura 54.**

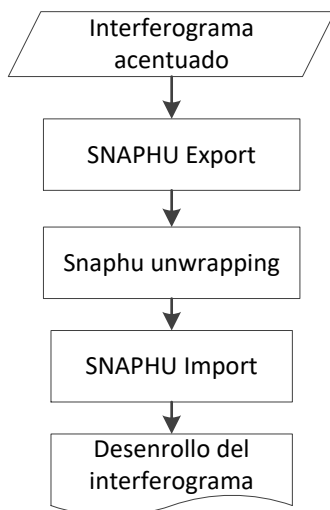
*Instalación plugin SNAPHU*



Con la instalación de la extensión SNAPHU, se realiza el proceso de desenrollo de fase, el cual se divide en tres etapas, como se detalla en la figura 55.

**Figura 55.**

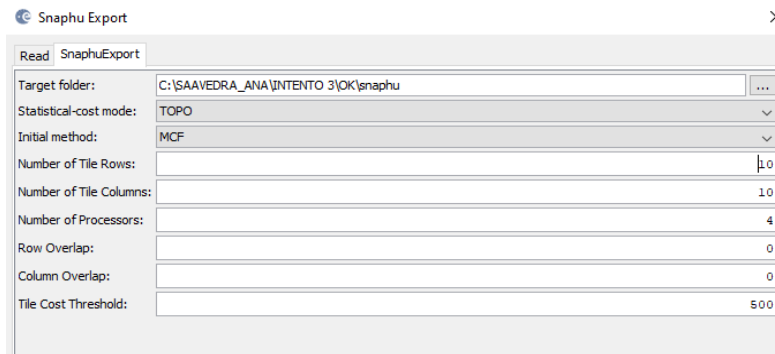
*Desenrollo del interferograma con imágenes Cosmo SkyMED en SNAPHU*



El proceso para el desenrollo de fase en el software SNAP Desktop, es idéntico para imágenes Sentinel-1 y Cosmo SkyMED. Inicialmente se realiza la exportación, como se visualiza en la figura 56, la cual convierte al interferograma que posee la fase envuelta en un formato que sea sincrónico con SNAPHU. Dentro del mismo, se puede seleccionar los parámetros para el procesamiento; debido al peso de las imágenes, se divide en mosaicos para facilidad de la capacidad del equipo.

**Figura 56.**

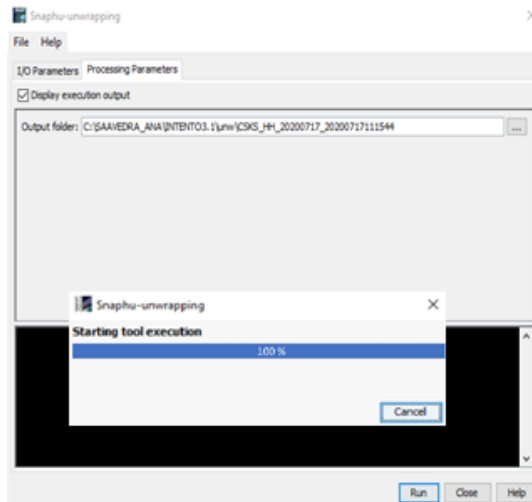
*Exportación del desarrollo de fase con imágenes Cosmo SkyMED en SNAPHU Export*



Una vez exportado el archivo, se puede iniciar el desarrollo de fase; tal como se presenta en la figura 57.

**Figura 57.**

Desenrollo de fase con imágenes Cosmo SkyMED en SNAPHU

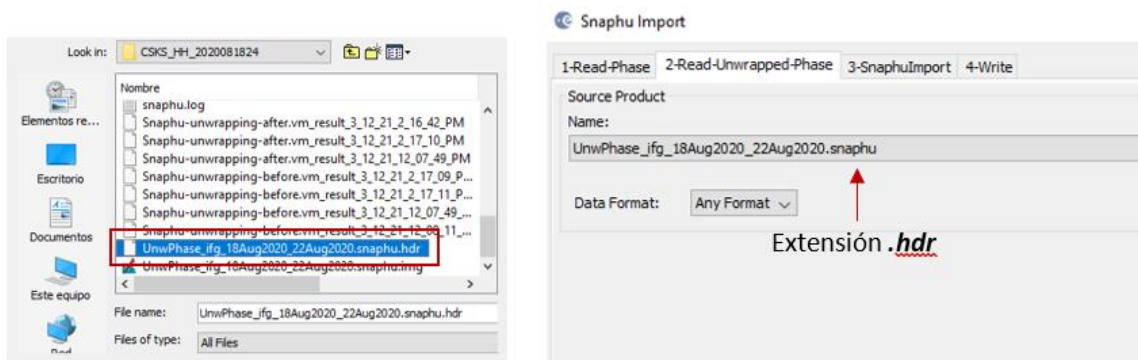


Al finalizar el desarrollo de fase se presenta una ventana con el porcentaje completo del proceso correspondiente al 100%. Sin embargo, genera un archivo sin metadatos ni codificación; por lo cual, se recurre a la importación, en la figura 58 se visualiza el ingreso del archivo obtenido con extensión **.hdr**, convirtiendo a este, en un archivo digital, el mismo que posee la

información de fase, coherencia y el desarrollo de fase. El procesamiento se encuentra con mayor detalle en el Anexo 4.

**Figura 58.**

*Importación del desarrollo de fase con imágenes Cosmo SkyMED en SNAPHU Import*



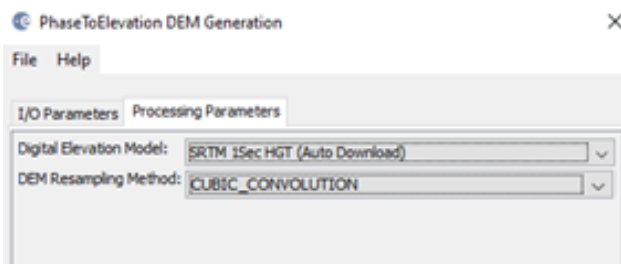
Este producto se representa como un ráster, con variaciones poco significativas en las áreas donde existen deformaciones marcadas, se pueden identificar errores en el desenvolvimiento en función de la baja coherencia y zonas de ruido. Los resultados obtenidos se presentan en el capítulo 4 en el apartado: “Resultados de desarrollo de interferograma”.

### ***Cambio de fase a elevación con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop***

En el desarrollo de la fase no se presentan valores métricos, por ello se requiere convertir esa información en valores de altura. Se toma como referencia a un modelo mundial; en este caso, para el software SNAP Desktop se usa el modelo SRTM de 1 arco de segundo, tal como se observa en la figura 59. El uso de estos modelos son la base para adquirir los valores de elevación; el producto se caracteriza por poseer valores métricos que indican su altura sobre el nivel del mar.

Figura 59.

*Cambio de fase a elevación con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop*

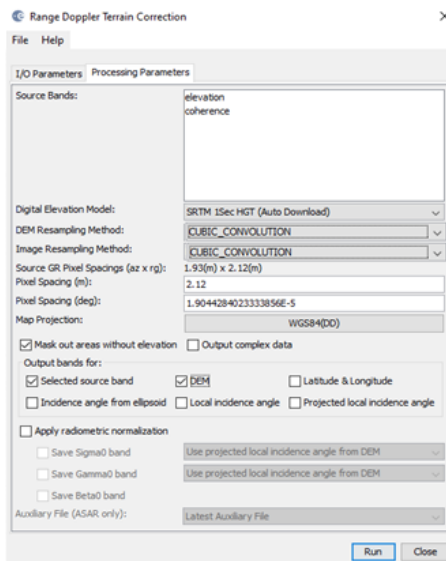


### ***Corrección del terreno con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop***

Finalmente, se realiza la corrección de terreno, en la cual se geocodificará la imagen, corrigiendo y compensando las distorsiones de la imagen SAR, tomando un modelo digital de referencia con la finalidad de proyectar el modelo generado lo más cercano a la realidad, como se visualiza en la figura 60. El resultado del modelo digital de superficie obtenido se encuentra en el capítulo 4 en el apartado: “Resultados de modelos digitales de superficie”.

Figura 60.

*Corrección del terreno con imágenes Cosmo SkyMED en software SNAP Desktop*

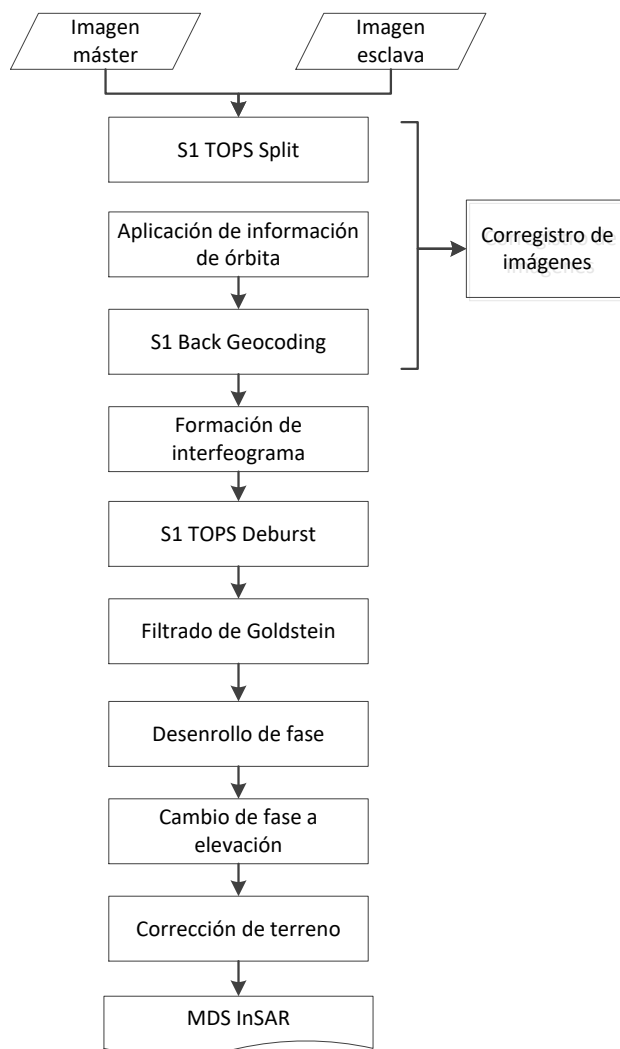


## Generación MDS con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop

El procesamiento de imágenes Sentinel-1 con el software SNAP Desktop es más detallado, ya que posee una caja de herramientas diseñada especialmente para la misión Sentinel, a continuación, en la figura 61 se detalla la metodología aplicada con imágenes Sentinel-1.

**Figura 61.**

*Procesamiento software SNAP Desktop con imágenes Sentinel-1*





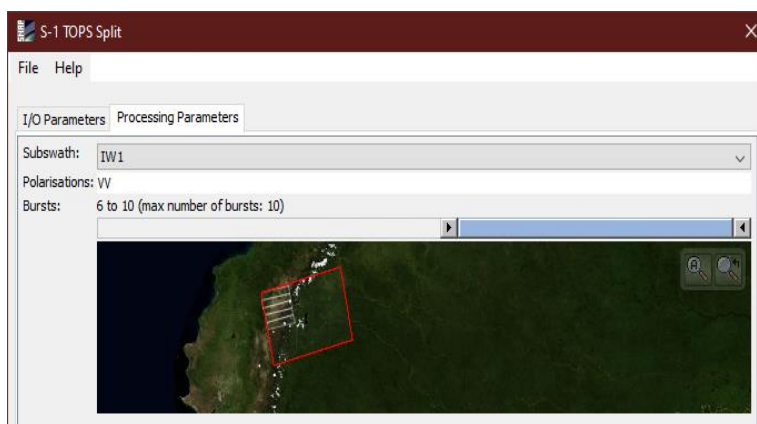
### ***Corregistro con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop***

El corregistro genera un *stack* de imágenes SAR en un solo insumo, en el caso de Sentinel-1 la imagen *master* y *slave* corresponden a las fechas 18 – 01 – 2017 y 24 – 01 – 2017, respectivamente.

**S1 TOPS Split.** S1 corresponde a las siglas representativas de Sentinel-1, dentro de la plataforma SNAP Desktop se mantiene el uso de esta nomenclatura para referirse a las herramientas diseñadas específicamente para la misión Sentinel. El software libre SNAP Desktop brinda al usuario la capacidad de generar paso a paso cada subproceso, por lo tanto, en el corregistro en imágenes Sentinel-1 se requiere inicialmente extraer la zona de estudio; en el caso de los datos Sentinel-1 corresponden a la franja IW1, y 3 *burst* (sub – franjas) para las dos imágenes, como se visualiza en la figura 62, ya que esta zona corresponde a la ciudad de Quito.

**Figura 62.**

*Delimitación del área de imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop*

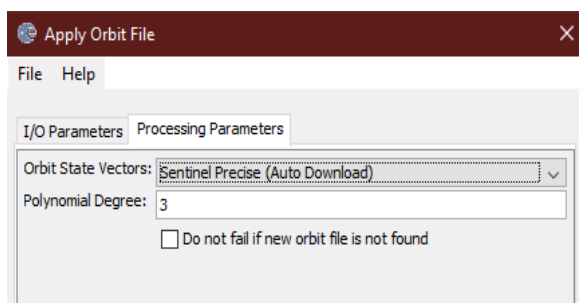


**Aplicación de información de órbita.** Se realiza la aplicación de información de órbita, que proporciona datos precisos de la posición y velocidad del satélite; este paso es aplicable únicamente para imágenes Sentinel-1, ya que el software se encuentra diseñado para el uso de

imágenes de dicha misión, como se observa en la figura 63. Dentro del Anexo 3 se encuentra detallado el proceso correspondiente.

**Figura 63.**

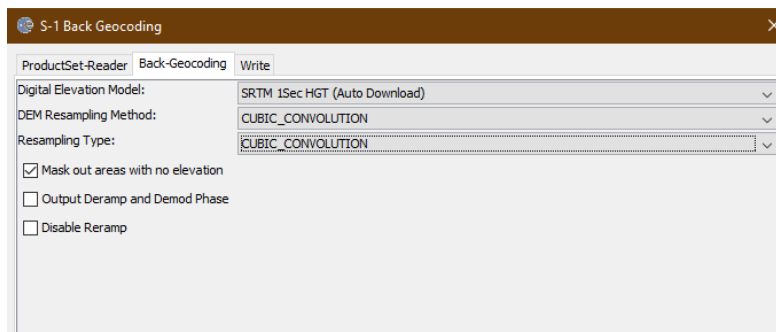
*Aplicación de información de órbita con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop*



**S1 Back Geocoding.** En este subproceso se obtiene el corregistro de las imágenes Sentinel-1, dentro de la herramienta *S1-Back Geocoding*, en la cual se ingresan las dos imágenes SAR previamente procesadas y se toma como referencia un DEM al modelo global SRTM de 1 arco de segundo, como se ilustra en la figura 64. El resultado correspondiente se presenta en el capítulo 4, en el apartado: “Resultado de corregistro de imágenes”.

**Figura 64.**

*Corregistro de imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop*

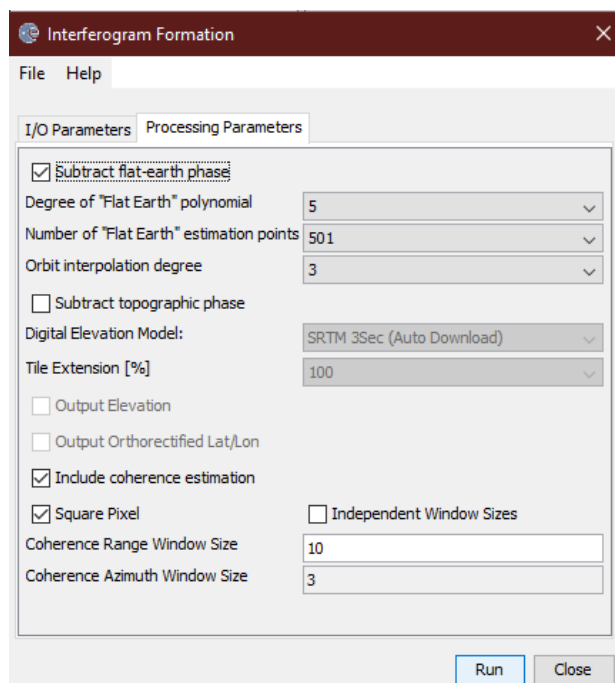


### ***Formación de interferograma con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop***

De manera similar al proceso aplicado con imágenes Cosmo SkyMED, el software SNAP Desktop se basa en la ecuación 11, aplicando la diferencia de fase existente entre imágenes SAR. En la obtención del interferograma se substrahe la fase de tierra plana, la cual está presente en la señal interferométrica debido a la curvatura terrestre. Dentro de la figura 65, se visualiza que se escogen los valores 501 en la estimación de puntos de la tierra plana, debido a que en extensiones grandes de 100 km x 100 km es el valor ideal. Se presenta el proceso a mayor detalle en el Anexo 3. El resultado se ilustra en el capítulo 4, en el apartado: “Resultados de interferogramas de imágenes SAR”.

**Figura 65.**

*Generación de interferograma con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop*



En este proceso se genera una banda adicional de coherencia, siendo ésta la similitud existente entre las imágenes corregistradas. Los valores de coherencia se visualizan en

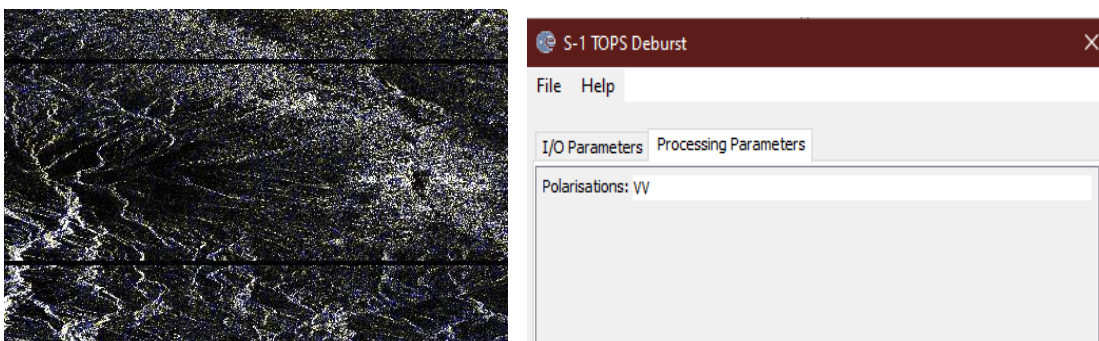
tonalidades de negro a blanco, en un rango de 0 a 1, respectivamente, donde el valor de mayor coherencia corresponde a 1 con tono blanco y el más oscuro se caracteriza por mayor presencia de ruido y menor correlación entre las imágenes SAR. El resultado se encuentra dentro del capítulo 4, en el apartado: “Resultados de coherencia de imágenes SAR”.

### ***S1 TOPS Deburst***

Previo a la aplicación del filtrado de Goldstein, se aplica el filtro Deburst, debido a que al seleccionar las imágenes Sentinel-1 iniciales para su recorte, se identifican líneas transversales a lo ancho de toda la imagen, las cuales se requieren eliminar. En la figura 66 se observa la herramienta S1 TOPS Deburst, mediante la cual no se altera la resolución espacial de la imagen, y solo se aplica con la misma polarización de la imagen original. El resultado se detalla en el capítulo 4, en el apartado: “Resultados de Filtro S1 TOPS Deburst”.

**Figura 66.**

*S1 TOPS Deburst con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop*



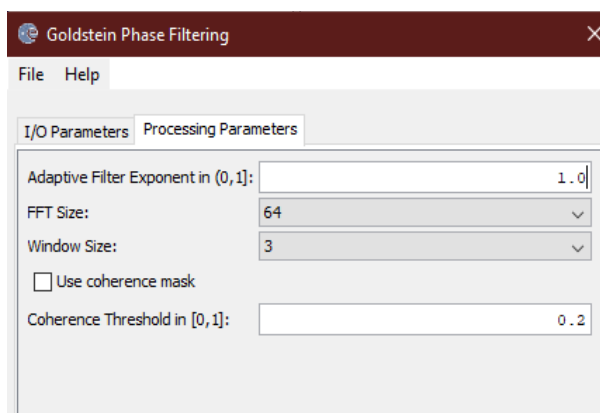
*Nota:* Ejemplificación de líneas presentes en imágenes Sentinel-1 (izquierda), aplicación de la herramienta filtrado Deburst (derecha).

### ***Aplicación de filtrado de Goldstein con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop***

Con la aplicación del filtrado TOPS Deburst, la imagen se encuentra uniforme en toda la superficie; sin embargo, se requiere aplicar un filtro adicional con la finalidad de reducir el ruido de la fase interferométrica y acentuar las franjas del interferograma con mayor intensidad, que a su vez este proceso beneficia al desarrollo de fase; por lo cual, se aplica el Filtro de Goldstein. Se ajusta los parámetros a 1, que corresponde a la máxima aplicación de este filtro; tal como se observa en la figura 67. El resultado se ilustra en el capítulo 4 en el apartado: “Resultados de interferogramas con Filtro de Goldstein”.

**Figura 67.**

*Aplicación del Filtro de Goldstein con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop*

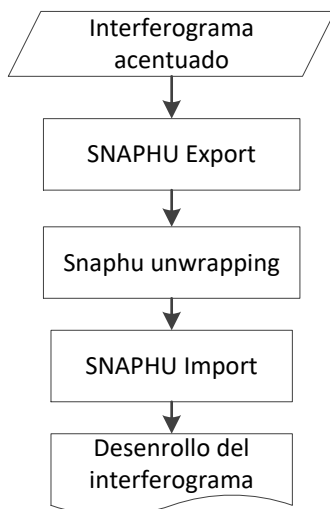


### ***Desarrollo de fase con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop***

De forma similar al proceso realizado en el software SNAP Desktop con imágenes Cosmo SkyMED, para el desarrollo de fase, se requiere instalar el plugin SNAPHU, como se menciona en la sección del proceso realizado con imágenes Cosmo SkyMED en el software SNAP Desktop, adicionalmente, se requiere aplicar el flujo de trabajo detallado en la figura 68.

**Figura 68.**

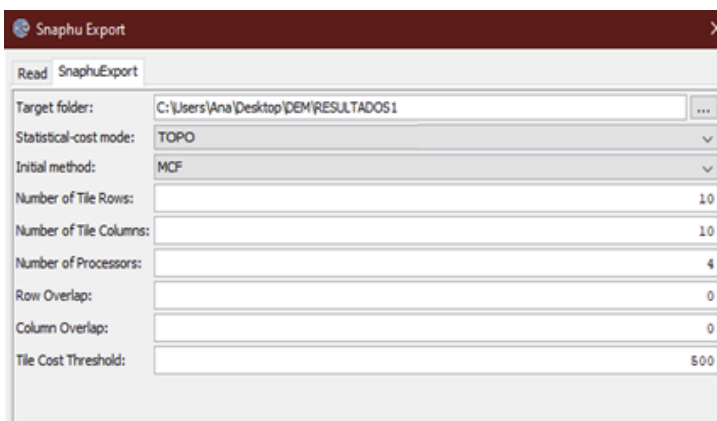
*Desenrollo del interferograma con imágenes Sentinel-1 en SNAPHU*



Por lo cual, al igual que con las imágenes Cosmo SkyMED, se requiere exportar al interferograma, con la finalidad de generar un formato que se identifique con la extensión SNAPHU, como se visualiza en la figura 69; dentro de la cual, se seleccionan los parámetros que faciliten el desenrollo de fase; adicionalmente se realiza una división en mosaicos para mejorar el rendimiento del equipo.

**Figura 69.**

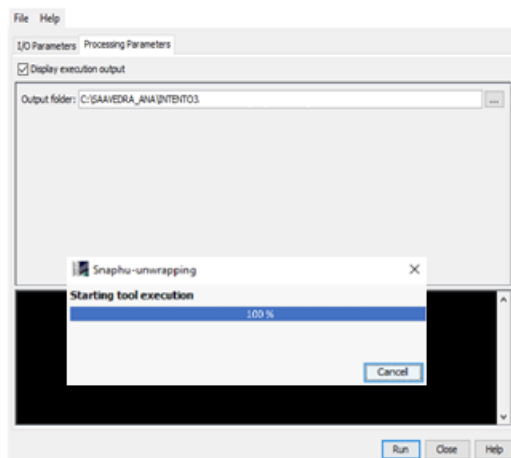
*Exportación del desenrollo de fase con imágenes Sentinel-1 en SNAPHU Export*



Con el proceso de exportación finalizado, se realiza el desenrollo de fase, en la figura 70 se identifica la ejecución del proceso al cumplir el 100%.

**Figura 70.**

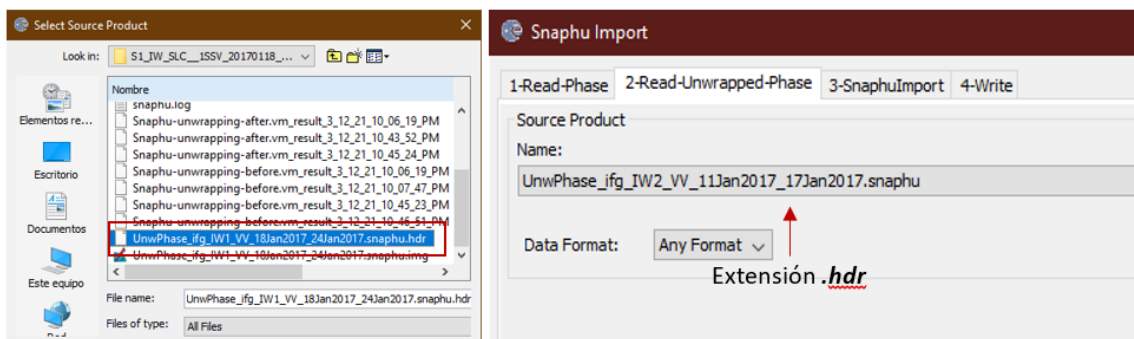
*Desenrollo de fase con imágenes Sentinel-1 en SNAPHU*



Al finalizar el proceso de desenrollo, se requiere importar a un formato compatible con el software, por lo cual, se ingresa el archivo generado con extensión **.hdr** como se visualiza en la figura 71. El procesamiento se encuentra con mayor detalle en el Anexo 3. El resultado correspondiente se ilustra en el capítulo 4, en el apartado: “Resultados de desenrollo de interferograma”.

**Figura 71.**

*Importación del desenrollo de fase con imágenes Sentinel-1 en SNAPHU Import*

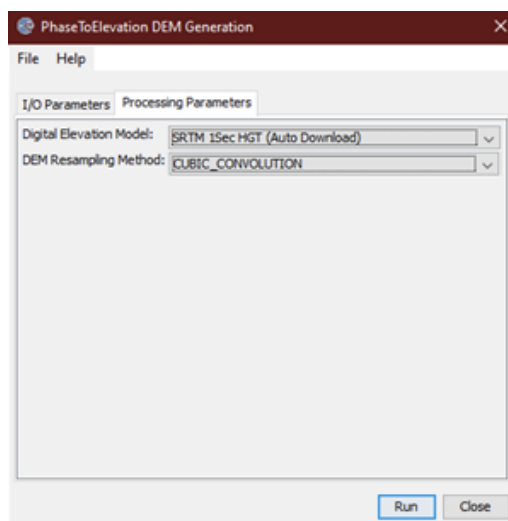


### ***Cambio de fase a elevación con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop***

Al igual que el proceso generado con imágenes Cosmo SkyMED, en el software SNAP Desktop, el cambio de fase a elevación transforma la información del desenrollo del interferograma a valores reales de altura, tomando como referencia al modelo mundial SRTM de 1 arco de segundo, como se observa en la figura 72.

#### **Figura 72.**

*Cambio de fase a elevación con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop*



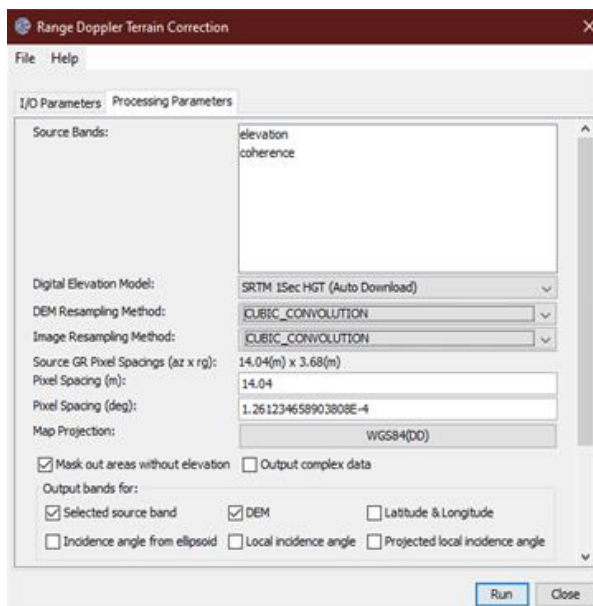
### ***Corrección del terreno con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop***

Finalmente, se realiza la corrección de terreno, que al igual que al proceso con imágenes Cosmo SkyMED, corrige las distorsiones y georreferencia al modelo en su posición real sobre el terreno, presente en la figura 73; tomando como referencia al DEM SRTM de 1 arco de segundo. El resultado del modelo digital de superficie obtenido se detalla en el capítulo 4, en el apartado: “Resultados de modelos digitales de superficie”.



Figura 73.

*Corrección del terreno con imágenes Sentinel-1 en software SNAP Desktop*



### **Análisis estadístico del control de calidad en MDS generados**

Posterior a la obtención de los modelos digitales de superficie en los diferentes programas, se realizó una evaluación de control vertical en los modelos generados considerando: los vértices de altura que se encuentran distribuidos aleatoriamente en la zona de estudio, y los modelos digitales ALOS World 3D y SRTM de 1 arco de segundo.

Los 385 vértices recopilados del IGM con todos sus decimales, fueron utilizados en la evaluación de los MDS generados, sin embargo, debido a la confidencialidad, los nombres y coordenadas se encuentran modificadas en los resultados de esta investigación. A continuación, se observa una muestra en la figura 74.

**Figura 74.**

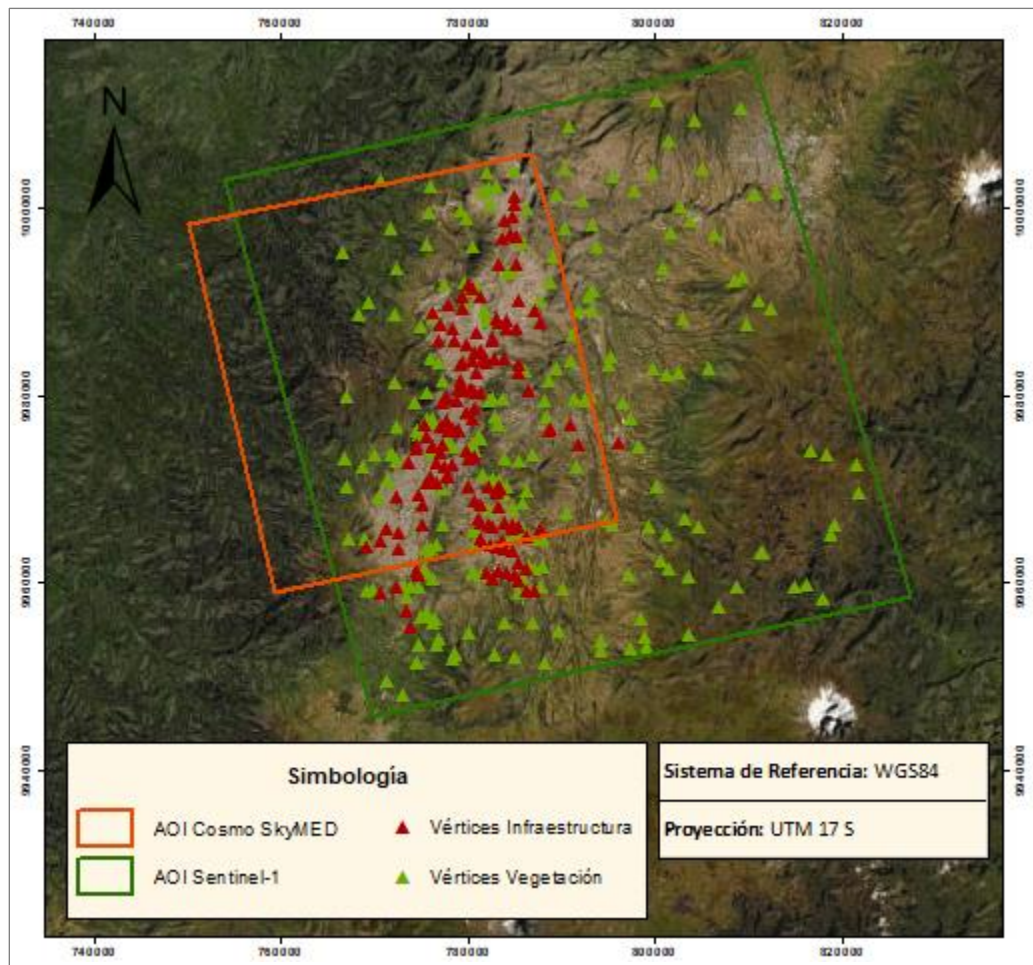
*Muestra de datos vértices de control vertical - IGM*

VERTICES DE CONTROL VERTICAL IGM				
N°	X	Y	ALT_NMM	PROVINCIA
1	-78.415000	-0.308000	2590.000	PICHINCHA
2	-78.471000	-0.286000	2538.000	PICHINCHA
3	-78.512000	-0.127000	3110.000	PICHINCHA
4	-78.436000	-0.359000	2616.000	PICHINCHA
5	-78.428000	-0.369000	2720.000	PICHINCHA
6	-78.385000	-0.208000	2389.000	PICHINCHA
7	-78.414000	-0.110000	2622.000	PICHINCHA
8	-78.507000	-0.250000	2991.000	PICHINCHA
9	-78.525000	-0.209000	3151.000	PICHINCHA
10	-78.435000	-0.088000	2724.000	PICHINCHA

En el análisis comparativo del control de calidad, se realizó una clasificación a los vértices de altura, generando así dos clases: infraestructura y vegetación; con esta división, existirán dos grupos de resultados; al respecto, dentro del área correspondiente al modelo obtenido con las imágenes Cosmo SkyMED, se distribuyen aleatoriamente 243 vértices de control vertical, de los cuales 129 corresponden al área de infraestructura, mientras que 114 se encuentran en zonas de vegetación. En el caso del área que abarca el modelo obtenido con imágenes Sentinel-1, se presentan 382 vértices de control vertical, de los cuales 150 corresponden al área de infraestructura, mientras que 232 se encuentran en zonas de vegetación. La variabilidad de esta información se encuentra en función del *path and row* de cada satélite. En la figura 75 se visualiza la distribución de la información altimétrica de toda el área de estudio; mientras que en el capítulo 4 se presenta la distribución de puntos en función de cada modelo.

Figura 75.

*Vértices de control vertical distribuidos sobre el área de estudio de las imágenes SAR*

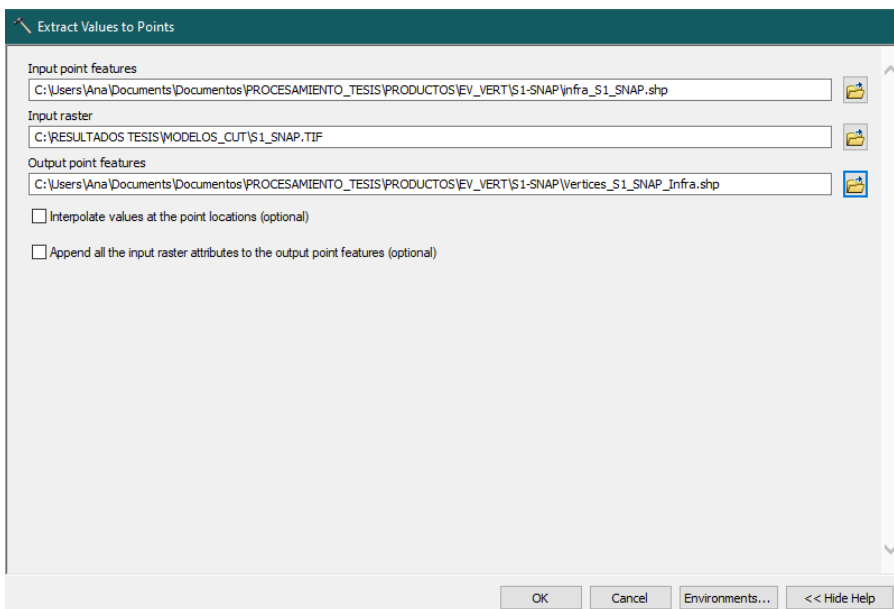


Para cada modelo se obtuvieron los puntos de altura en las dos categorías mencionadas; adicionalmente, se extrajeron los valores de altura de los modelos mundiales de referencia ALOS World 3D y SRTM de 1 arco de segundo.

Para obtener la información altimétrica en cada punto se utilizó la plataforma ArcGIS, en la cual, con la herramienta *Extract Values to Point* se ingresaron los puntos de referencia del IGM, y el modelo que se desea extraer la información altimétrica, en la figura 76 se observa el proceso realizado.

**Figura 76.**

*Extracción de valores de altura de MDS generados*



Con la herramienta *Extract Values to Point*, se extraen los valores de cada píxel que coincide con la posición de los puntos de altura emitidos por el IGM; a partir de esta información altimétrica, se realizó la evaluación de los modelos obtenidos con dos diferentes estadísticos. La primera fase se analizó con los valores máximos, mínimos, media y desviación estándar; mientras que la segunda fase, se evaluó con la normativa internacional de la ASPRS y la norma nacional del IGM.

### ***Metodología utilizada en la evaluación estadística de los MDS generados***

En la evaluación estadística de los MDS generados, se utilizaron los valores máximos, mínimos, media y desviación estándar, se aplicaron las ecuaciones 12 y 13 respectivamente, que se encuentran dentro del capítulo 2. Para lo cual, siguiendo la ecuación 12 mencionada en el apartado anterior, se obtuvo la media de la diferencia de altura existente entre los modelos

obtenidos con la metodología InSAR en función de los vértices del IGM y los modelos mundiales, como se presenta a continuación:

$$\bar{x} = \frac{1966.12}{129}$$

$$\bar{x} = 15.24$$

Con el fin de ejemplificar el proceso aplicado en los diferentes análisis, se presenta un caso puntual de la media aritmética, donde el valor 1966.12 representa la sumatoria de la diferencia de altura entre los valores de infraestructura del modelo obtenido con imágenes Cosmo SkyMED en función de los vértices emitidos por el IGM, y el valor 129 corresponde al número de puntos totales.

De igual manera, para el análisis mediante la desviación estándar, se aplica la ecuación 13, como se presenta a continuación:

$$\sigma = \sqrt{\frac{185980.02}{129}}$$

$$\sigma = 37.97$$

Para la ejemplificación de la fórmula aplicada, se visualiza el caso puntual de la desviación estándar, donde el valor de 185980.02 representa el cuadrado de la sumatoria de la diferencia existente entre el valor de diferencia de altura entre los valores de infraestructura del modelo obtenido con imágenes Cosmo SkyMED en función de los vértices emitidos por el IGM, con la media aritmética, y el valor 129 corresponde al número de puntos totales.

### ***Metodología de evaluación con la normativa internacional de los MDS generados***

El uso de la normativa internacional correspondiente a la ASPRS, se aplica mediante el uso del RMS, la cual se obtiene con la diferencia existente entre los valores de altura

referenciales; para validar los resultados se utilizó la ecuación 16 del apartado anterior, aplicando los lineamientos de la normativa ASPRS, (2014), como se presenta a continuación:

$$RMS = \sqrt{\frac{215946.12}{129}}$$

$$RMS = 40.91$$

En el caso de ejemplo, al aplicar la ecuación 16 se tiene como valor de 215946.12 a la sumatoria del cuadrado de la diferencia entre el valor de diferencia de altura entre los valores de infraestructura del modelo obtenido con imágenes Cosmo SkyMED en función de los vértices emitidos por el IGM y el valor 129 corresponde al número de puntos totales.

Posteriormente, para obtener la información con un nivel de confiabilidad del 95% se aplica la ecuación 17, como se presenta a continuación:

$$Exactitud\ vertical = 1.96 \times 40.91$$

$$Exactitud\ vertical = 80.19$$

Se ejemplifica en función de los datos anteriores la aplicación del RMS y la exactitud vertical, por lo cual, siguiendo el uso de las ecuaciones mencionadas, se realiza el proceso para todos los MDS obtenidos con imágenes SAR Sentinel-1 y Cosmo SkyMED en los diferentes programas.

Tomando como referencia al ejemplo mencionado, se aplica el intervalo de confianza al reemplazar el valor obtenido en la exactitud vertical en la ecuación 14, obteniendo el rango de valores en los que se encuentra el valor real, como se presenta a continuación:

$$Intervalo\ de\ confianza = 15.24 \pm (1.96 \times 40.91)$$

$$Intervalo\ de\ confianza = 15.24 \begin{matrix} < + 80.19 \\ < - 80.19 \end{matrix}$$

$$Intervalo\ de\ confianza: \begin{matrix} < 95.43 \\ < -64.95 \end{matrix}$$

Se realizaron dos evaluaciones de la información obtenida, ya que se presentaron datos atípicos, los mismos que fueron objeto de análisis para su eliminación, posteriormente, se realizó nuevamente otra evaluación, cuyos resultados se encuentran en el capítulo 4.

***Metodología de evaluación con la normativa IGM de los MDS generados***

Con el uso de la normativa nacional emitida por el IGM, se puede determinar la escala en la que se encuentra la exactitud vertical de los MDS generados, por lo cual, se aplicó el proceso inverso a la ecuación 14, como se presenta a continuación:

$$IC = 80.19 \times 4$$

$$IC = 320.76$$

Donde el valor de 80.19 corresponde a la exactitud vertical obtenida mediante la aplicación de ecuación 17 según lo indica la FGDC, (1998), de esa manera se obtiene el intervalo de curva (IC) con la cual, se puede determinar la escala en la que se encuentra la información altimétrica de los MDS obtenidos.

Los resultados obtenidos de la evaluación, tanto de los estadísticos como de la normativa internacional y nacional, se presentan en el capítulo 4, en el apartado “Resultados de evaluaciones de MDS generados”.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

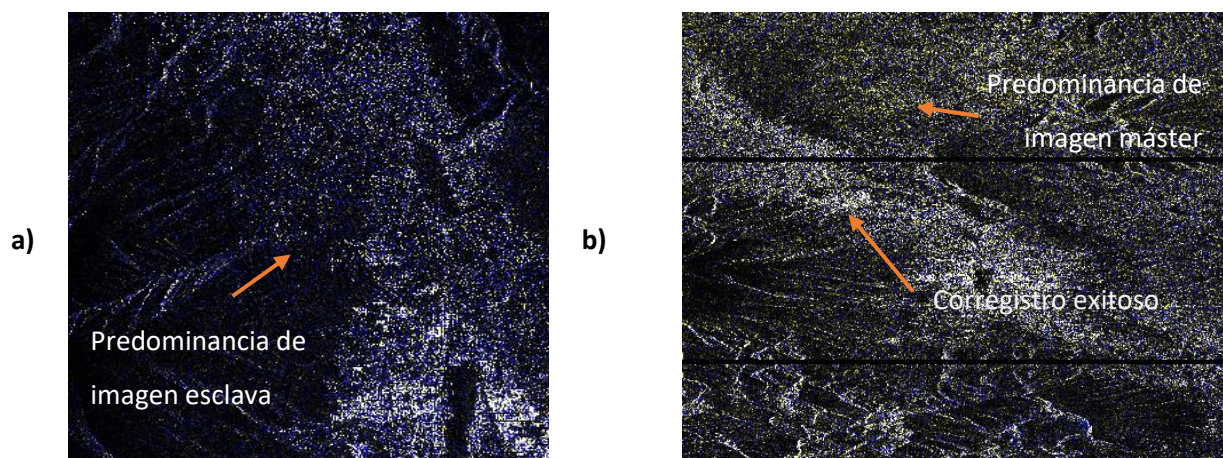
En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en los diversos programas utilizados en el presente proyecto. Se detalla y analiza los resultados previos a la generación de los MDS con interferometría, así como la evaluación de los modelos obtenidos en función de datos altimétricos referenciales tanto a nivel nacional como internacional.

#### Resultado de correregistro de imágenes en software SNAP Desktop

El correregistro de imágenes SAR representa la correlación existente entre las imágenes ingresadas. En la figura 77 se observa un ejemplo del correregistro de imágenes SAR; no se visualizan los correregistros obtenidos en cada software, ya que se presenta como un resultado referencial.

#### Figura 77.

*Corregistro de imágenes SAR*





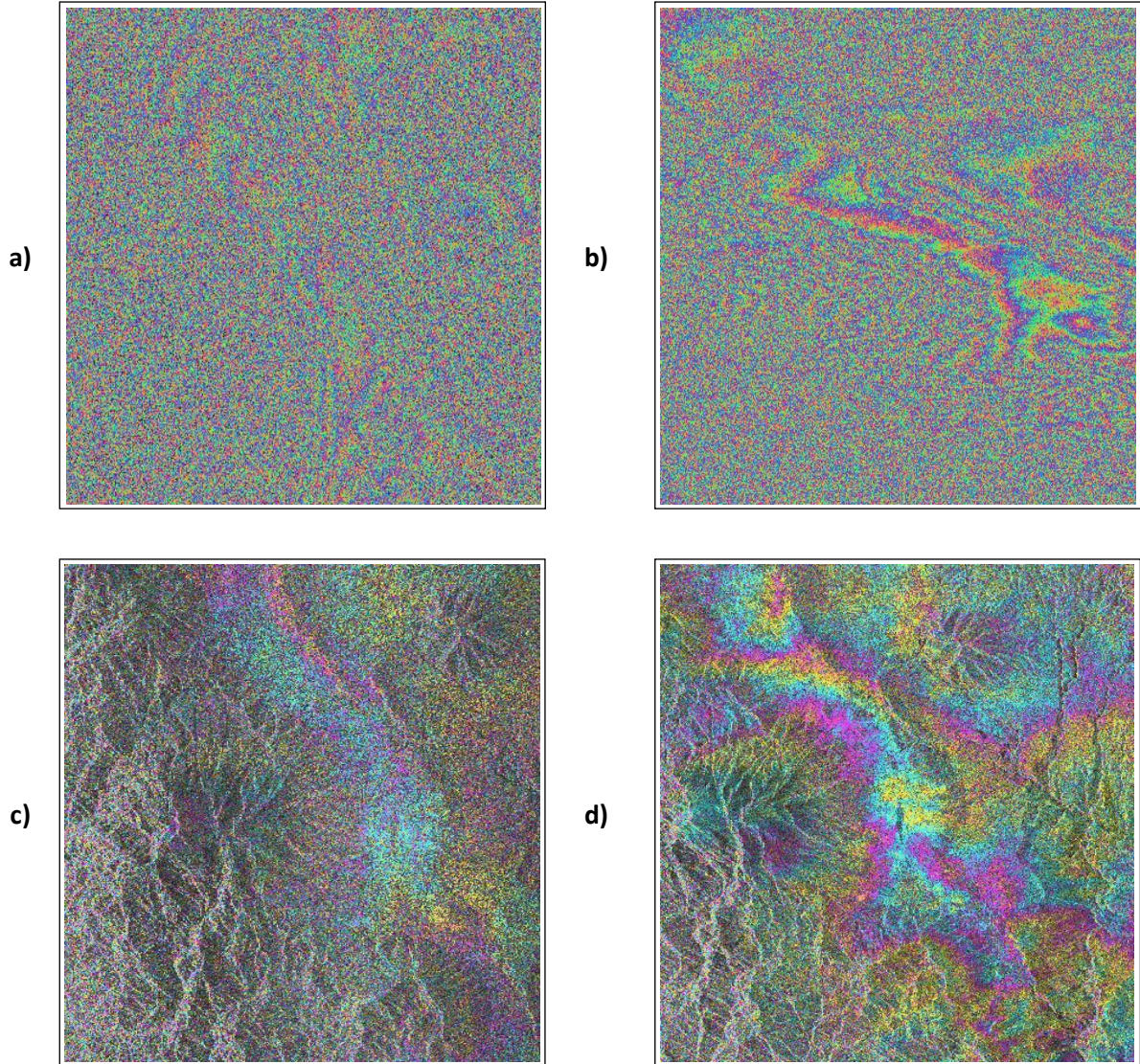
*Nota.* Corregistro de imágenes: a) Cosmo SkyMED con software SNAP Desktop. b) Sentinel-1 software SNAP Desktop.

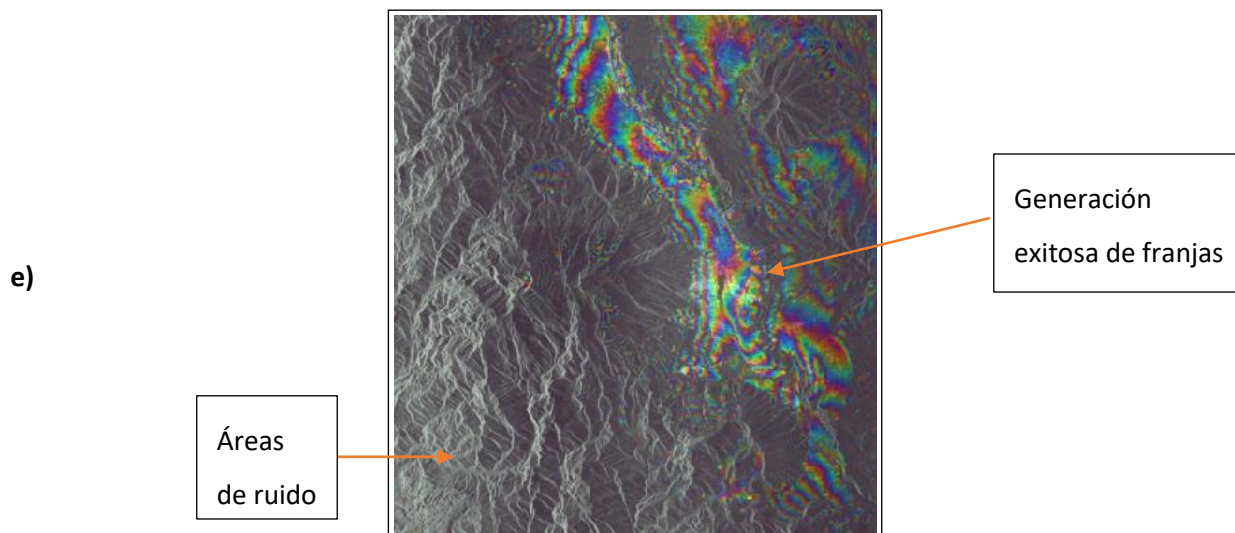
Según Braun, (2020), un corregistro adecuado se observa en tonalidades blancas, ya que si se visualizan los colores amarillos representa el predominio de la imagen máster, o azul de la imagen esclava, identificándose como un corregistro fallido. Puede que sea afectado por cambios en la topografía o mecanismos de retrodispersión entre la captura de imágenes.

En función de ello, se visualiza el corregistro de imágenes Cosmo SkyMED en tonalidades azules, lo que refleja la predominancia de la imagen esclava por encima de la máster, por otro lado, el resultado con imágenes Sentinel-1 indica tonalidades blancas en la mayoría de la extensión, correspondiendo a un corregistro adecuado.

### **Resultados de interferogramas de imágenes SAR**

Para la generación de modelos digitales de superficie con la metodología InSAR, se obtuvieron los interferogramas de las imágenes SAR, en la figura 78 se visualizan los interferogramas generados con los programas SNAP Desktop, ENVI y ERDAS IMAGINE.

**Figura 78.***Interferogramas obtenidos*



*Nota.* a) Interferograma obtenido con imágenes Cosmo SkyMED software SNAP Desktop. b) Interferograma obtenido con imágenes Sentinel-1 software SNAP Desktop. c) Interferograma obtenido con imágenes Cosmo SkyMED software ENVI. d) Interferograma obtenido con imágenes Sentinel-1 software ENVI. e) Interferograma obtenido con imágenes Cosmo SkyMED software ERDAS IMAGINE.

Los interferogramas obtenidos en los diferentes programas se encuentran directamente relacionados con la coherencia entre las imágenes SAR y con la topografía del terreno en la zona de estudio, en los resultados visualizados no se encuentra aplicado el filtrado de Goldstein.

En las figuras presentadas se observa en las esquinas inferiores izquierdas, la presencia del ruido, ya que no se presentan franjas, lo que se vincula con la baja o nula coherencia entre la captura de las imágenes; adicionalmente, en ciertas zonas no se identifican con claridad las franjas del interferograma, por lo cual se requiere de la aplicación del filtro de Golstein.

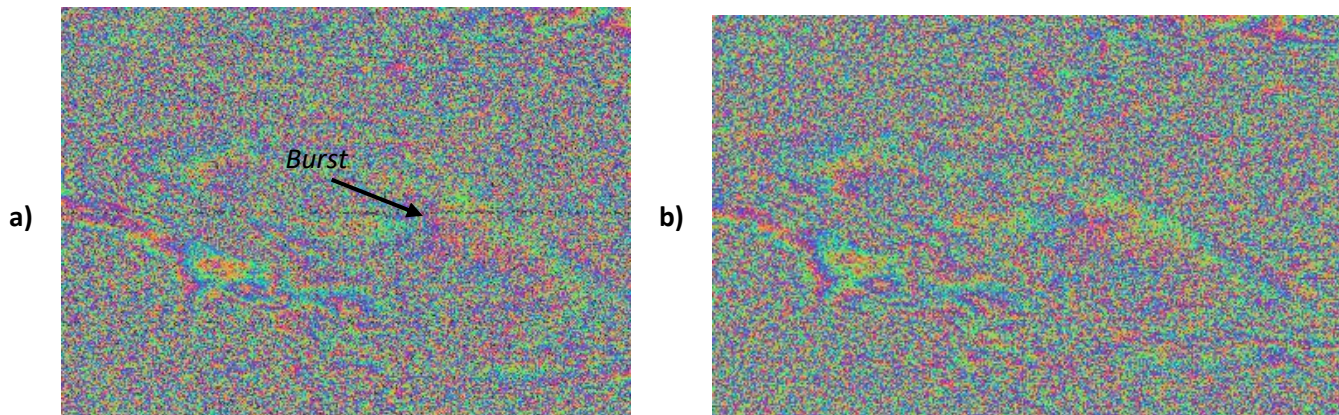
#### **Resultados de interferograma con filtro S1 TOPS Deburst en software SNAP Desktop**

El filtrado TOPS Deburst solamente se realiza en el software SNAP Desktop con imágenes Sentinel-1, ya que al poseer franjas conocidas como *burst* las mismas que dividen a lo

ancho de las imágenes SAR; en la figura 79 se ilustra la diferencia de la imagen con el filtro aplicado.

**Figura 79.**

*Filtro TOPS Deburst imágenes Sentinel-1*

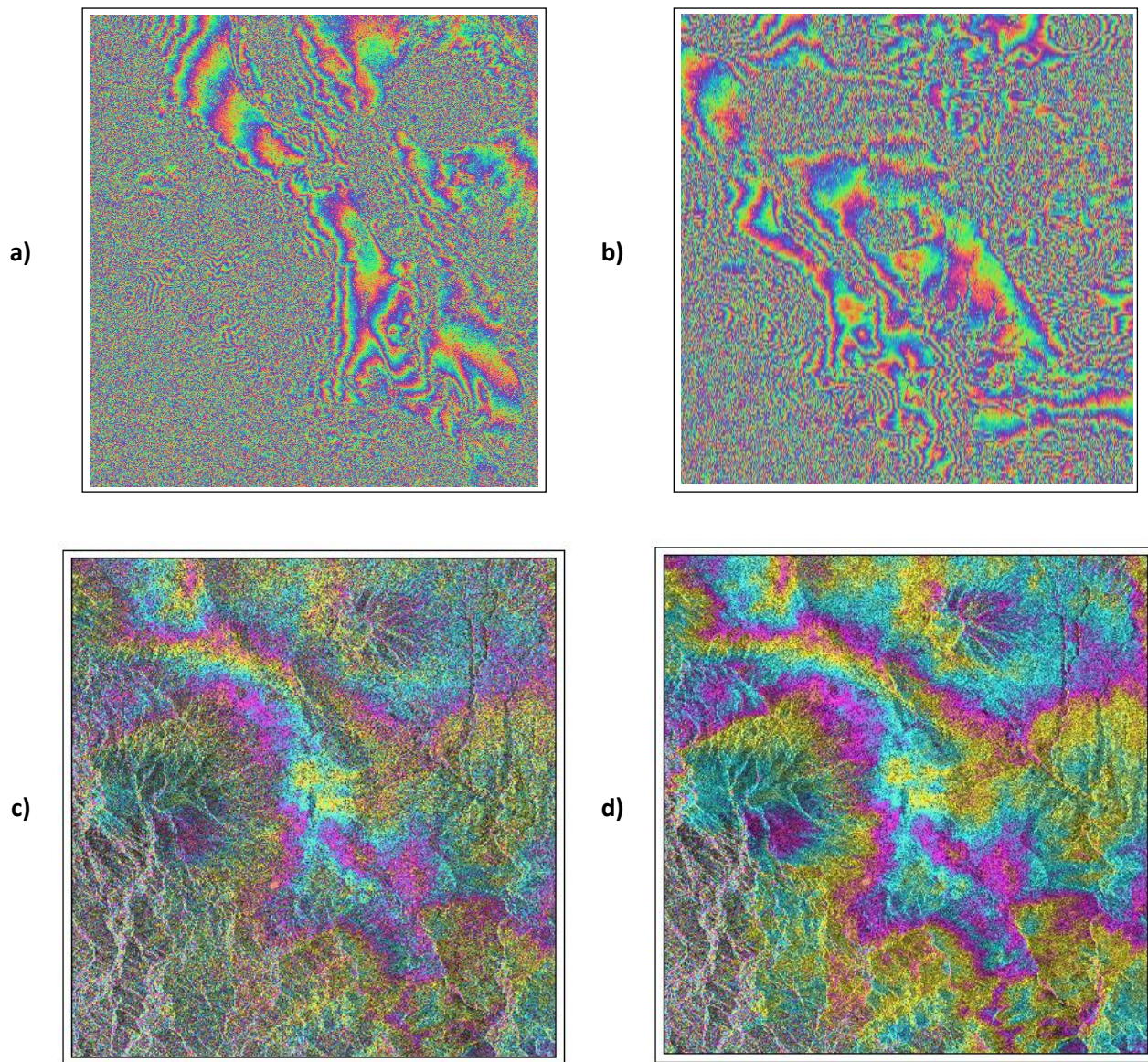


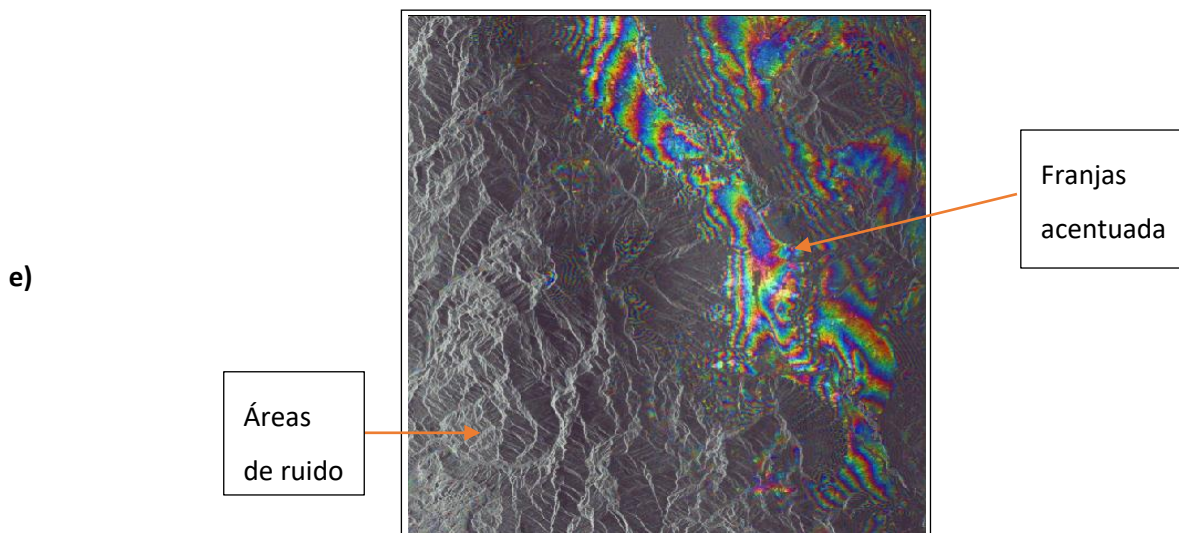
*Nota.* a) Interferograma obtenido con imágenes Sentinel-1 software SNAP Desktop. b) Interferograma con filtro TOPS Deburst obtenido con imágenes Sentinel-1 software SNAP Desktop.

Se visualiza el interferograma a) con una línea recta que atraviesa la imagen SAR, mientras que en la imagen b) se presenta el área de la imagen sin líneas transversales a lo largo de la superficie, lo cual genera un paso beneficioso para los procesos posteriores.

### **Resultados de interferogramas con Filtro de Goldstein**

En la figura 80 se presentan los interferogramas con el filtro de Goldstein generados con los programas SNAP Desktop, ENVI y ERDAS IMAGINE. La aplicación del filtrado de Goldstein permite acentuar las franjas existentes en el interferograma, por lo cual, se identifican con mayor claridad y beneficia a los procesos posteriores.

**Figura 80.***Interferogramas aplicado Filtro Goldstein*



*Nota.* Interferogramas filtrados con Filtro de Goldstein: a) Obtenido con imágenes Cosmo SkyMED software SNAP Desktop. b) Obtenido con imágenes Sentinel-1 software SNAP Desktop. c) Obtenido con imágenes Cosmo SkyMED software ENVI. d) Obtenido con imágenes Sentinel-1 software ENVI. e) Obtenido con imágenes Cosmo SkyMED software ERDAS IMAGINE.

Se observa las diferencias entre los interferogramas antes y después de la aplicación del filtro de Goldstein, ya que se visualizan con mayor intensidad los colores y formas de las franjas existentes en las zonas de mayor coherencia.

Como se ha mencionado, la información del interferograma se encuentra relacionada con la coherencia y la topografía de la zona; adicional a estos parámetros, también se encuentra vinculada con el tipo de superficie presente en la zona de captura de información.

Dentro de los interferogramas se observan franjas en una rampa de colores de cian a amarillo, las cuales se relacionan en función a los cambios en la topografía de la zona de estudio; las franjas más claras y relevantes se encuentran en zonas de infraestructura representado por la ciudad de Quito. Los resultados del software ENVI y ERDAS IMAGINE se visualizan con un mapa base de relieve, mediante el cual se identifica claramente la relación de las franjas con la

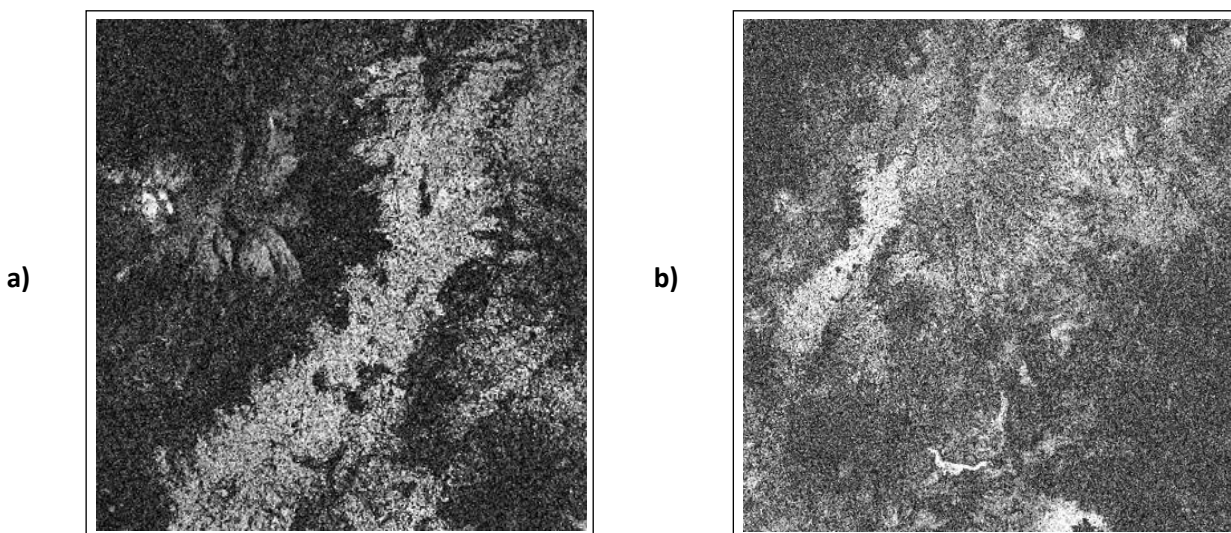
variación de la topografía, presentando mayores franjas alrededor del relieve. Derivado de este mapa topográfico de base, se identifica con claridad como las zonas montañosas y vegetativas que corresponden a las zonas de la esquina inferior izquierda, presentan la mayor cantidad de ruido, razón por la cual no se identifican franjas representativas del interferograma.

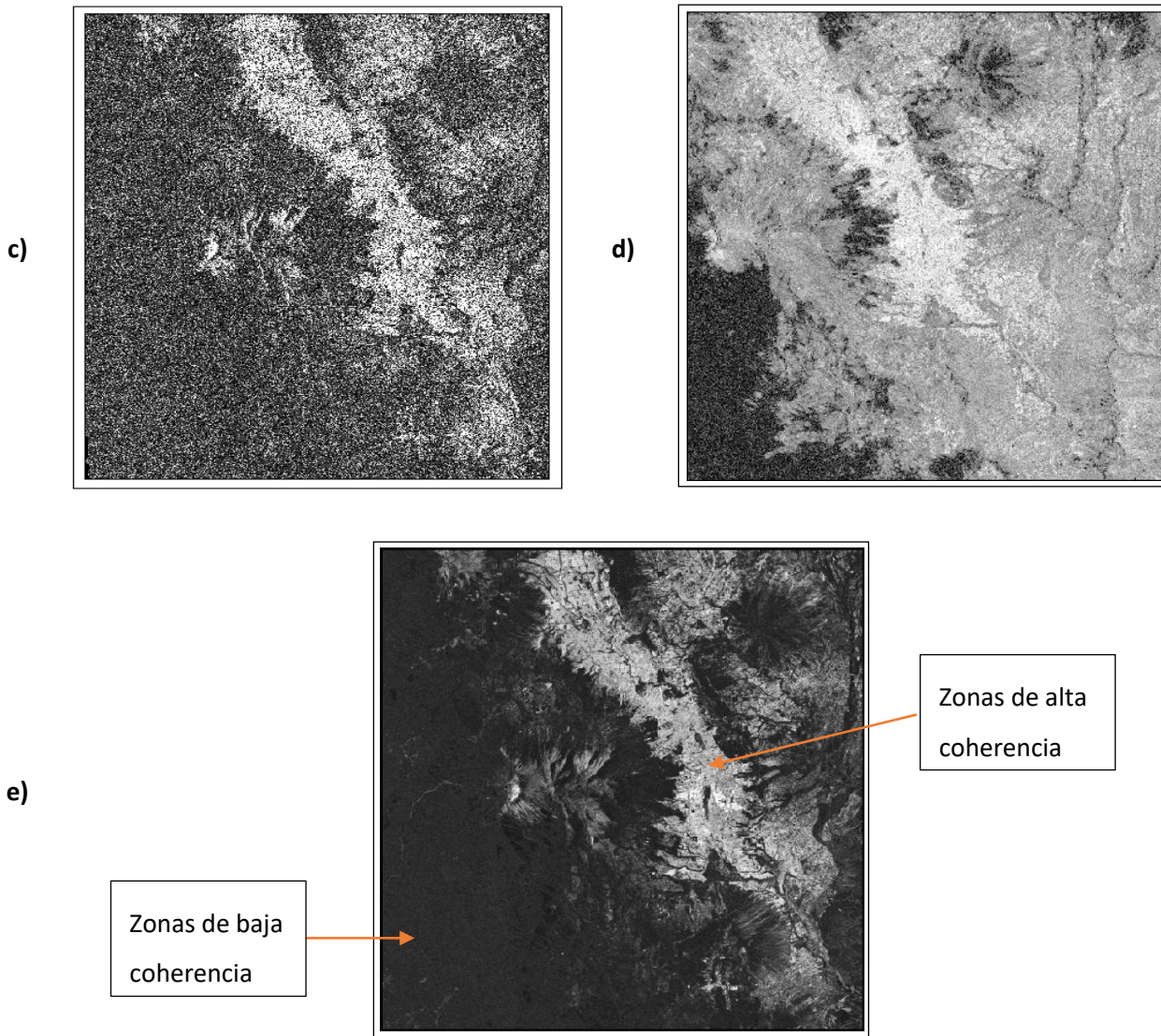
### **Resultados de coherencia de imágenes SAR**

Los mapas de coherencia presentan las zonas en las que existe mayor similitud entre las imágenes SAR, se caracterizan como un indicador de calidad del interferograma, debido a que las zonas de baja coherencia se relacionan con el ruido y ausencia de información; mientras que áreas con valores de coherencia altos están vinculados con la presencia de franjas en el interferograma; en la figura 81 se visualizan los mapas de coherencia generados con los programas SNAP Desktop, ENVI y ERDAS IMAGINE.

#### **Figura 81.**

*Mapas de coherencia obtenidos*





*Nota.* a) Coherencia obtenida con imágenes Cosmo SkyMED software SNAP Desktop. b) Coherencia obtenida con imágenes Sentinel-1 software SNAP Desktop. c) Coherencia obtenida con imágenes Cosmo SkyMED software ENVI. d) Coherencia obtenida con imágenes Sentinel-1 software ENVI. e) Coherencia obtenida con imágenes Cosmo SkyMED software ERDAS IMAGINE.

La coherencia se encuentra en una escala del 0 a 1, siendo 1 el valor ideal. En los resultados obtenidos del software SNAP Desktop, se presenta claramente la alta coherencia en la ciudad de Quito visualizándose con un color claro y un valor de coherencia superior a 0.7;



mientras que, en las áreas montañosas o vegetativas se presenta un color oscuro hasta negro, con valores de coherencia entre 0.2.

Las coherencias obtenidas en los resultados del software ENVI y ERDAS IMAGINE presentan similitud con los valores resultantes con el software SNAP Desktop; al respecto, se visualiza con claridad la ciudad de Quito, con un color más blanco, teniendo valores de coherencia mayores a 0.7; por el contrario, en zonas montañosas y de vegetación, se visualiza un color más oscuro hasta negro, con valores hasta 0.1.

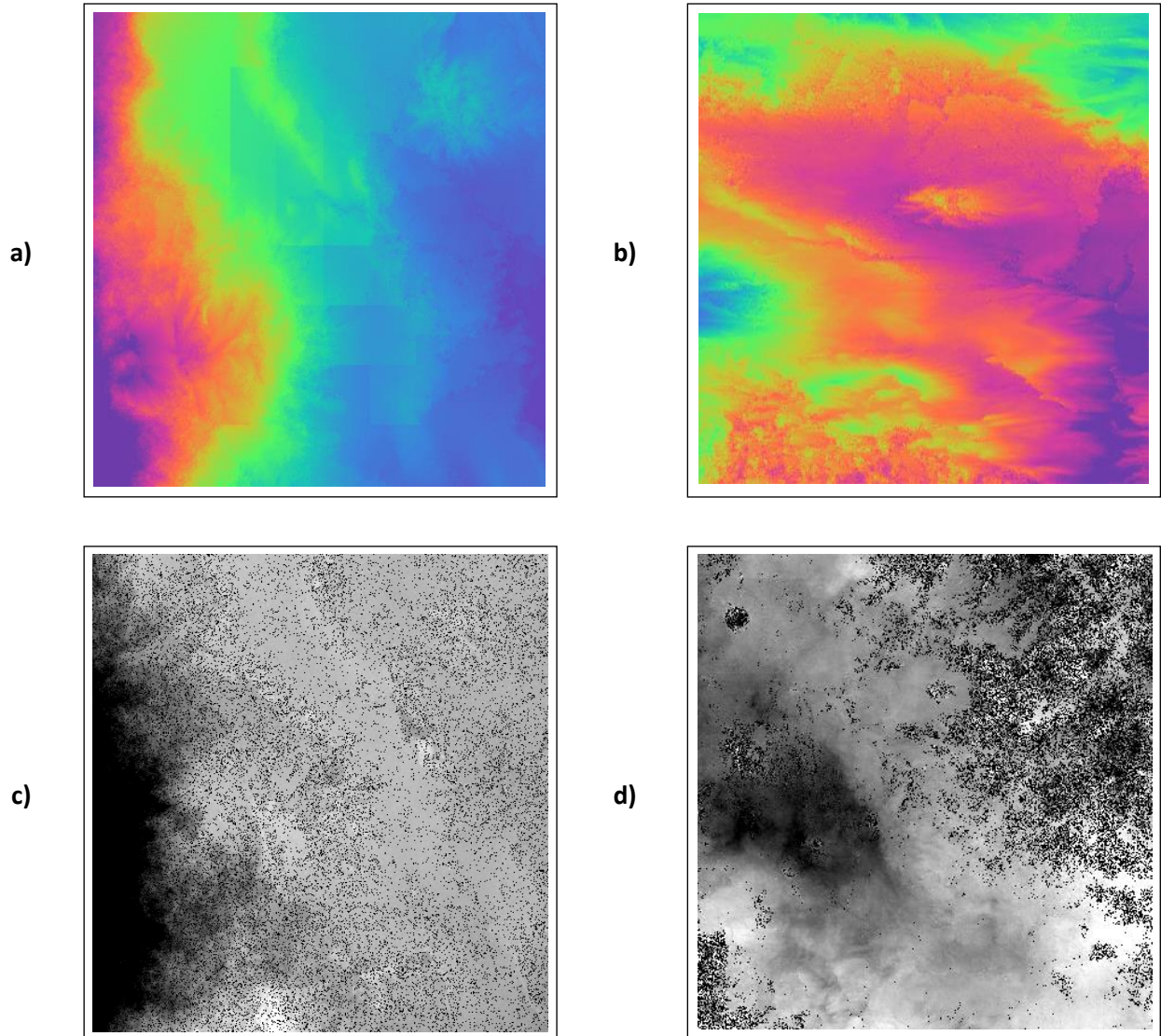
Los mapas de coherencia obtenidos en el software ENVI y ERDAS IMAGINE se encuentran desfasados y no en su posición real sobre el terreno, ya que es un subproducto del interferograma, lo que refleja que no se encuentra aplicada la corrección de terreno o georreferenciación; por otro lado, en el software SNAP Desktop los mapas de coherencia se encuentran en su posición real sobre el terreno, ya que se obtiene la coherencia como una banda adicional en el modelo digital de superficie.

### **Resultados de desarrollo de interferograma**

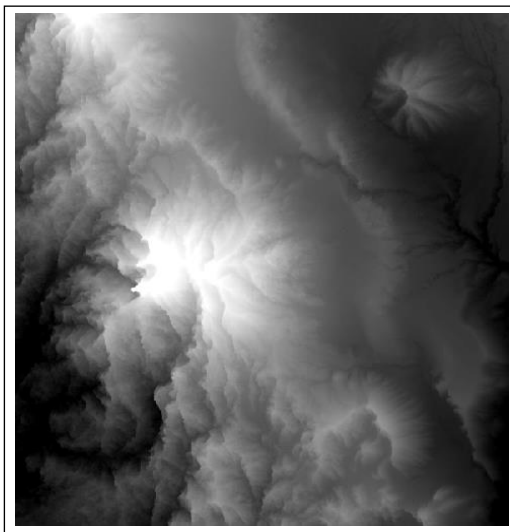
El desarrollo de fase no se interpreta como un modelo digital, ya que no posee valores de altura real, sin embargo, es el paso final para la transformación de valores a información altimétrica; en la figura 82 se observan el desarrollo de fase obtenido con los programas SNAP Desktop, ENVI y ERDAS IMAGINE.

**Figura 82.**

*Desenrollo del Interferogramas obtenidos*



e)



*Nota.* Desenrollo de interferogramas: a) Obtenido con imágenes Cosmo SkyMED software SNAP Desktop. b) Obtenido con imágenes Sentinel-1 software SNAP Desktop. c) Obtenido con imágenes Cosmo SkyMED software ENVI. d) Obtenido con imágenes Sentinel-1 software ENVI. e) Obtenido con imágenes Cosmo SkyMED software ERDAS IMAGINE.

Se observa la variación de la información de fase interferométrica a diferencia de altura entre pixeles. Este producto no se identifica como un modelo digital de superficie, ya que la fase desenvuelta solamente representa información de diferencia de alturas, pero no la altura absoluta de los puntos.

Los resultados obtenidos en los diferentes programas indican al desenrollo de fase como formas similares a un modelo digital, manteniendo una gama de colores derivada del interferograma. En el resultado obtenido del software ENVI y ERDAS IMAGINE, no se presenta en una escala de colores similar al interferograma, sin embargo, la semejanza a un modelo digital es más notoria.

En el caso de los resultados obtenidos con el software ENVI, se visualiza con claridad en la sección inferior izquierda, como existen huecos de información, ya que en esas zonas no se

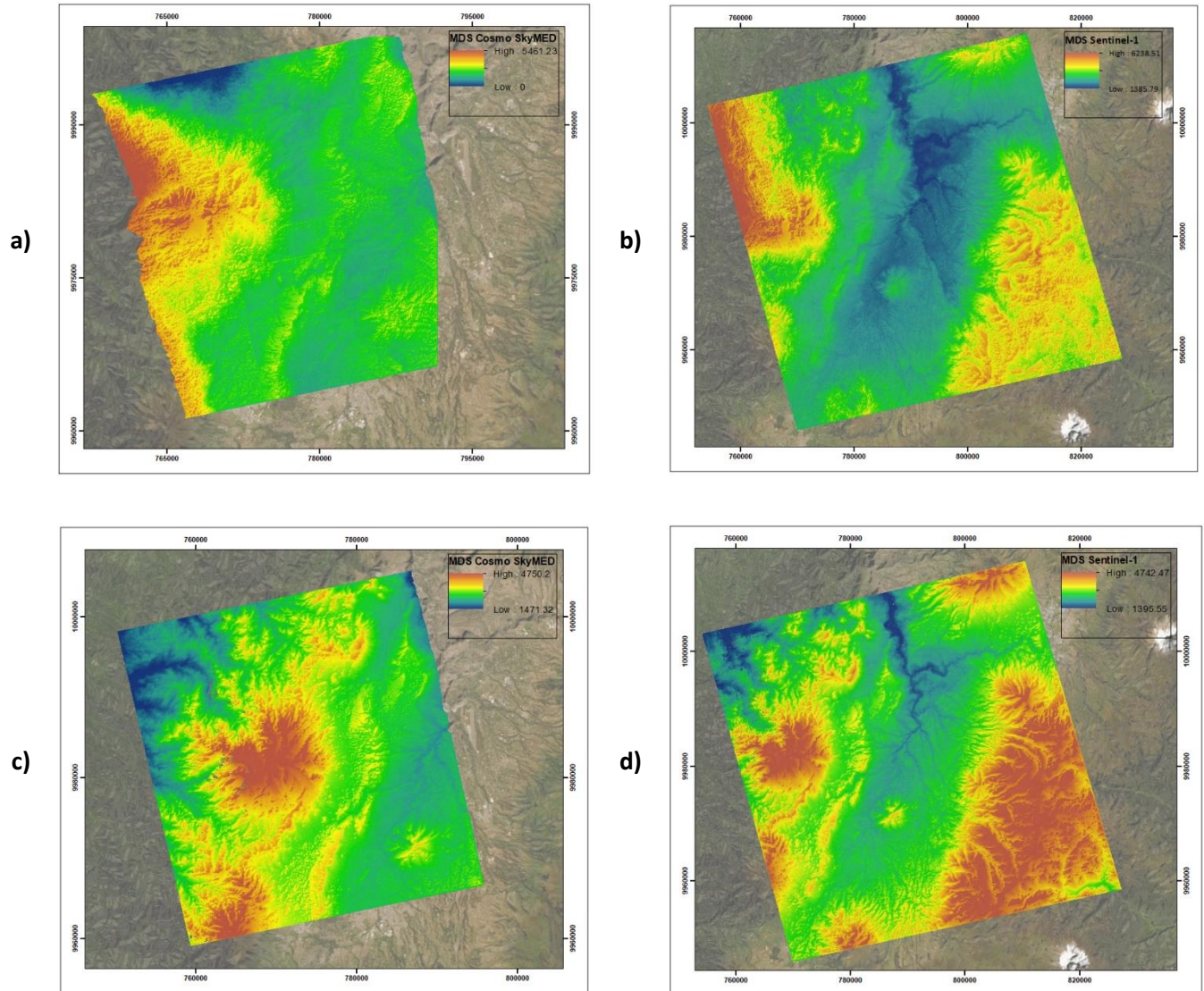
identifican formas o franjas características. Esto se encuentra relacionado directamente con la coherencia existente, ya que en esa área los valores de coherencia son bajos debido a la presencia de mayor ruido.

### **Resultados de modelos digitales de superficie**

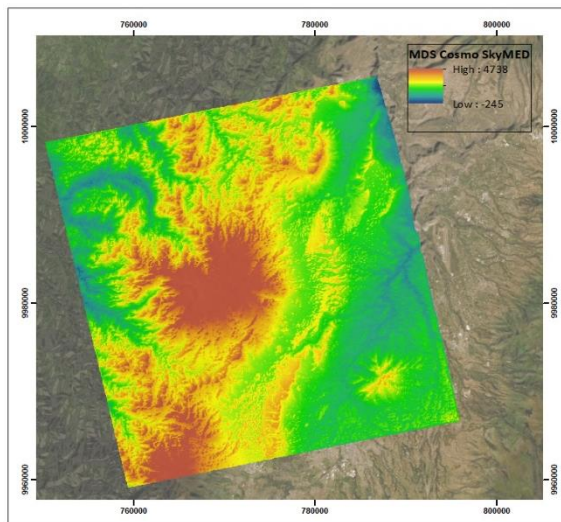
Como resultado se obtuvieron cinco Modelos Digitales de Superficie (MDS), dos de ellos a partir de un par de imágenes Sentinel-1 en orientación ascendente con polarización VV con una resolución espacial de 15 m y temporal de 6 días, y tres generados con el uso de un par de imágenes Cosmo-SkyMED en orientación ascendente con polarización HH con una resolución espacial de 3 m y temporal de 4 días.

Los modelos digitales de superficie obtenidos se visualizan en una rampa de color azul a rojo, presentándose en azul las zonas más bajas y en rojo las más altas en cada modelo. El área que cubren los modelos generados con las imágenes Sentinel-1 es de 60 km x 58 km, en largo y ancho, respectivamente; el área de los modelos generados con las imágenes Cosmo SkyMED en los software ENVI y ERDAS IMAGINE corresponde a 40 km x 38 km; mientras que el modelo obtenido en el software SNAP Desktop, con las mismas imágenes tiene una extensión de 32 km x 28 km; esto se debe a que en el procesamiento se presentaron conflictos con toda el área de la imagen; por lo cual se recortó el modelo en zonas de baja coherencia para no perder información representativa, los MDS generados se presentan en la figura 83.

Figura 83.

*MDS obtenidos*

e)



*Nota.* a) MDS obtenido con imágenes Cosmo SkyMED software SNAP Desktop. b) MDS obtenido con imágenes Sentinel-1 software SNAP Desktop. c) MDS obtenido con imágenes Cosmo SkyMED software ENVI. d) MDS obtenido con imágenes Sentinel-1 software ENVI. e) MDS obtenido con imágenes Cosmo SkyMED software ERDAS IMAGINE.

Los modelos presentan variaciones en los rangos de altura en cada simbología, las cuales serán objeto de análisis. Los modelos generados en el software SNAP Desktop se encuentran en función del modelo mundial SRTM de 1 arco de segundo, mientras que los modelos procesados en los programas ENVI y ERDAS IMAGINE tomaron como referencia al modelo ALOS World 3D, los dos modelos mundiales tienen una resolución de 30 m.

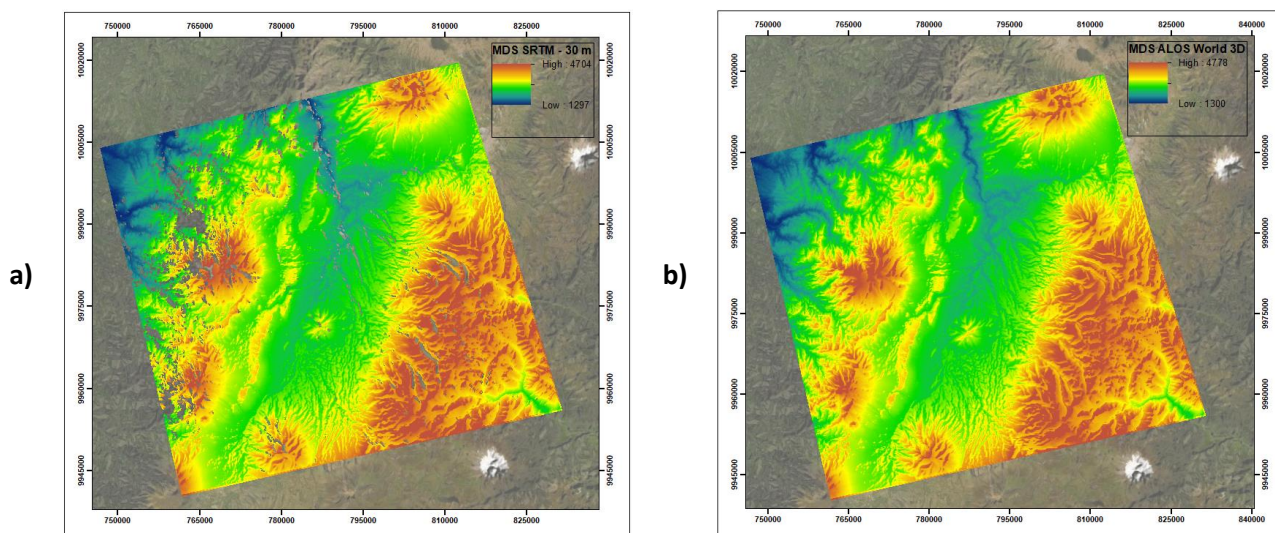
Para la generación óptima de modelos digitales de superficie, Braun, (2020) sugiere que la *base line* se encuentre en un rango de 150 m a 300 m; sin embargo, los satélites Sentinel-1 y Cosmo SkyMED poseen una distancia de línea base de 55 m y 114 m, respectivamente, lo cual afecta en la generación de modelos digitales de superficie.

En la figura 84 se presentan los modelos SRTM y ALOS World 3D, respectivamente, en ambos se visualiza que poseen un intervalo similar de alturas; sin embargo, el modelo SRTM

presenta vacíos (*gaps*) que se identifican como zonas sin información; mientras que el modelo ALOS World 3D, posee uniformidad en toda la superficie de la zona de estudio.

**Figura 84.**

*MDS mundiales*



*Nota.* a) MDE SRTM 1 arco de segundo b) MDE ALOS World 3D

El tiempo empleado en generar los modelos digitales de superficie, dependerá de las capacidades del equipo y las imágenes utilizadas. Por lo cual, la obtención de resultados con la estación de trabajo descrita en el apartado anterior tuvo un diferente tiempo de procesamiento y almacenamiento de información, como se presenta en la tabla 5.

Se debe tomar en cuenta que los flujos de proceso en cada programa son diferentes. En el procesamiento del proyecto se utilizaron alrededor de 205 GB en el almacenamiento de insumos y resultados; tomando en cuenta que el peso de las imágenes Sentinel-1 es 15.9 GB, y de las imágenes Cosmo SkyMED es 3 GB, respectivamente.

**Tabla 5.***Tiempo empleado por programa y almacenamiento de resultados*

	<b>Tiempo aproximado empleado en el procesamiento</b>	<b>Almacenamiento de resultados</b>
<b>Software ENVI imágenes Cosmo SkyMED</b>	10 horas	46.2 GB
<b>Software ENVI imágenes Sentinel-1</b>	3 horas	33.4 GB
<b>Software ERDAS IMAGINE imágenes Cosmo SkyMED</b>	5 horas	20.6 GB
<b>Software SNAP Desktop imágenes Cosmo SkyMED</b>	8 horas	65.4 GB
<b>Software SNAP Desktop imágenes Sentinel-1</b>	4 horas	26.5 GB

**Distribución de vértices del Instituto Geográfico Militar (IGM) en MDS generados**

Los vértices de control vertical emitidos por el Instituto Geográfico Militar se encuentran distribuidos aleatoriamente en la zona de estudio, como se visualiza en la figura 72 del capítulo 3, se clasificaron en dos categorías a la información altimétrica: zonas de infraestructura y zonas de vegetación, con la finalidad de obtener un análisis con mayor coherencia en su exactitud ya que en zonas de vegetación existe escasa correlación.

En la figura 85 se visualiza la distribución de puntos de referencia altimétrica sobre los modelos generados en las diferentes plataformas. Los puntos se distribuyen de la siguiente forma:

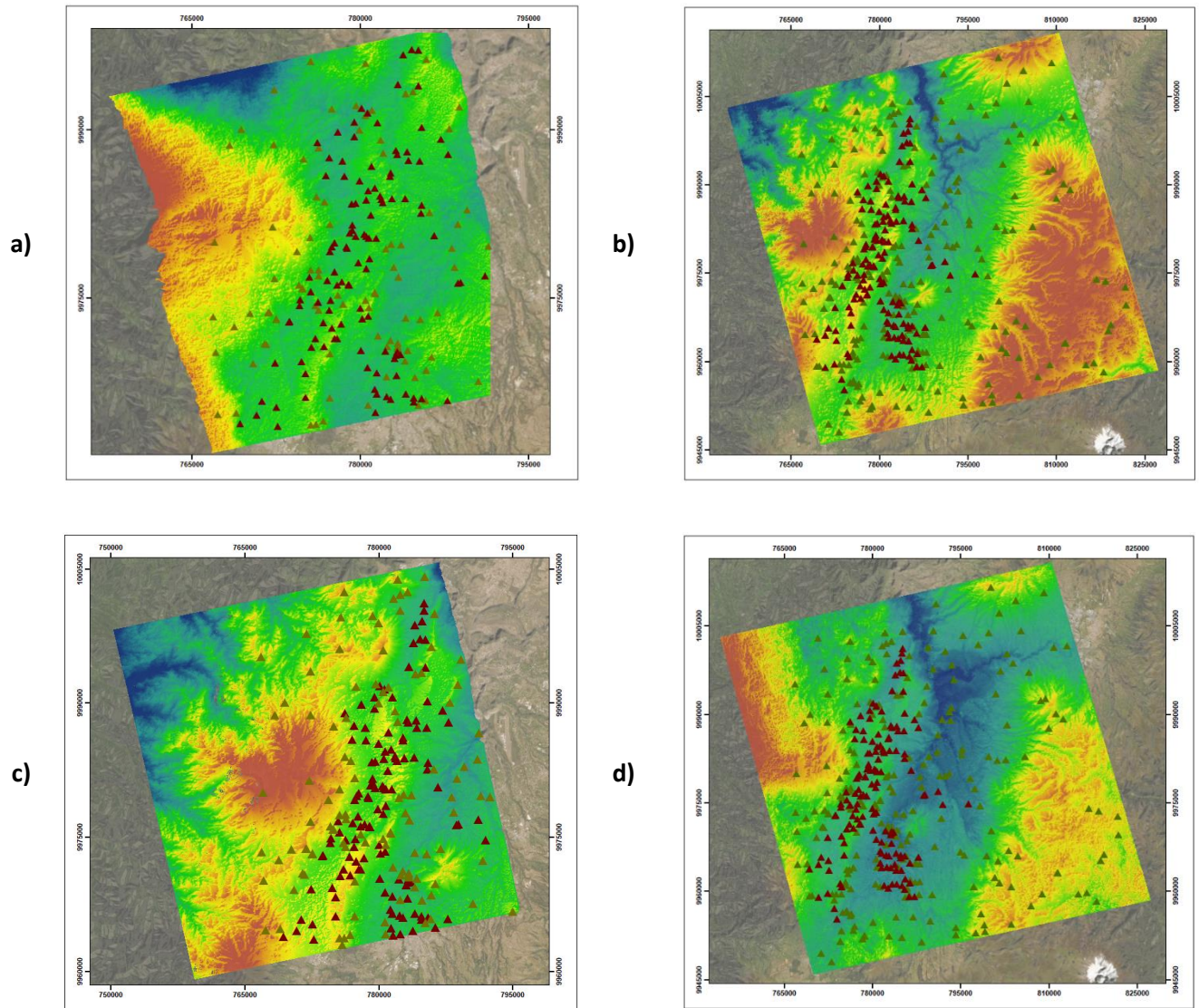
- Área Sentinel-1: 150 puntos de infraestructura y 232 puntos de vegetación.

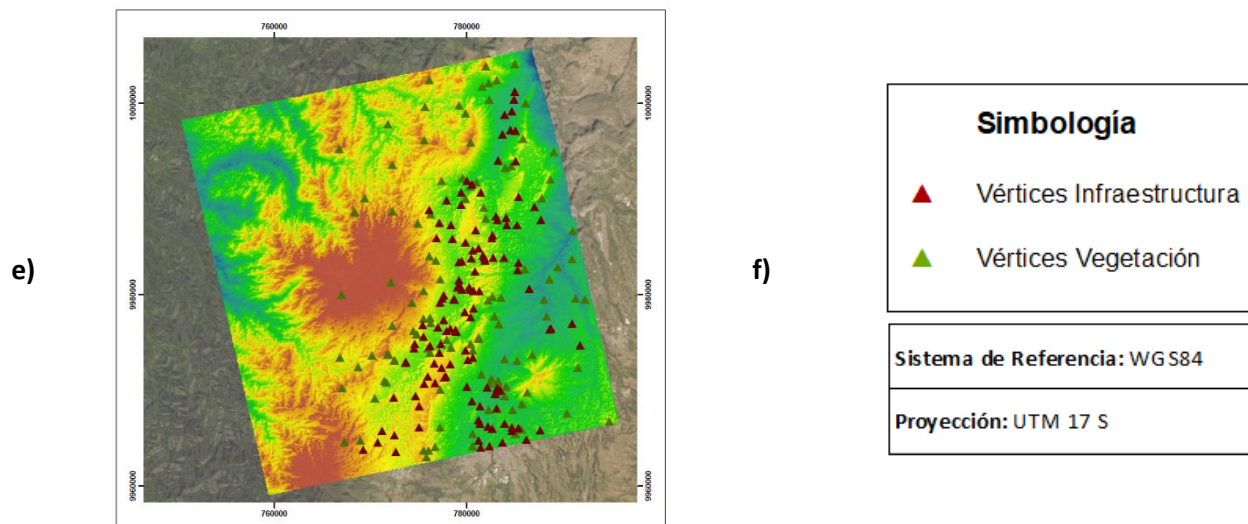


- Área Cosmo SkyMED: 129 puntos de infraestructura y 114 puntos de vegetación.

**Figura 85.**

*Distribución de vértices sobre MDS obtenidos*





*Nota.* Distribución de vértices: a) MDS con imágenes Cosmo SkyMED software SNAP Desktop. b) MDS con imágenes Sentinel-1 software SNAP Desktop. c) MDS con imágenes Cosmo SkyMED software ENVI. d) MDS con imágenes Sentinel-1 software ENVI. e) MDS con imágenes Cosmo SkyMED software ERDAS IMAGINE. f) Simbología y Proyección de mapas presentados.

### Resultados de evaluaciones de MDS generados

#### *Evaluación de modelos de referencia mundial en función de los vértices del Instituto Geográfico Militar (IGM)*

Los modelos digitales de superficies mundiales SRTM y ALOS World 3D se analizan en función de los vértices distribuidos en la zona de estudio, mediante la aplicación del método estadístico RMS se analiza la exactitud que poseen en función de la información nacional, en la tabla 6 se presentan los datos estadísticos con exactitud a un nivel de confianza del 95%, según lo indica la Normativa Internacional ASPRS, (2014).

Tabla 6.

*Evaluación de MDS Globales en función de vértices IGM*

	Min (m)	Máx (m)	Media (m)	Desv. Estándar (m)	RMS (m)	E. V (m)	Intervalo de confianza - 95% de confiabilidad
<b>MDS SRTM - 30 m vs. Vértices IGM</b>							
<b>Infraestructura</b>	-14.36	36.34	3.52	8.47	9.18	17.98	{21.50 -14.46}
<b>Vegetación</b>	-20.84	54.83	3.19	8.58	9.16	17.95	{21.14 -14.76}
<b>MDS ALOS World 3D - 30 m vs. Vértices IGM</b>							
<b>Infraestructura</b>	-15.36	37.34	0.32	7.49	7.5	14.7	{15.02 -14.38}
<b>Vegetación</b>	-20.84	23.42	0.23	5.48	5.12	10.04	{10.27 -9.81}

*Nota:* Min, Max corresponde a la abreviatura de los valores mínimos y máximos;

mientras que E.V representa la exactitud posicional a partir del RMS.

El modelo SRTM de 30 m en resolución, tiene un RMS de 17.98 m en zonas de infraestructura, mientras que en zonas de vegetación posee 17.95 m, al 95% de confiabilidad. El modelo ALOS World 3D con una resolución de 30 m, posee una mejor exactitud en función de la información nacional emitida por el IGM, con un RMS de 14.70 m en zonas de infraestructura y 10.04 m en zonas de vegetación, al 95% de confiabilidad. La mejora de la calidad de puntos sobre las áreas de vegetación se ve relacionado a que se presentan mayor número de vértices distribuidos, ya en el MDS – SRTM existen varios vacíos (*gaps*) los mismos que fueron eliminados ya que no poseen información altimétrica. El intervalo de confianza indica el rango en el que se encuentran los valores reales de la altura en el punto medido, por lo cual, se analiza el amplio campo de variabilidad de datos, lo que representa la exactitud obtenida en los puntos altimétricos.

Adicionalmente, en el análisis realizado, se obtiene una media aritmética del modelo SRTM con los vértices IGM con un valor promedio de 3.5 m en toda el área cubierta. Mientras que con el modelo ALOS World 3D tiene un valor promedio de 0.30 m en la zona de

intervención. Por lo cual los valores altimétricos se encuentran cercanos a la referencia establecida, siendo más próximos los valores obtenidos con el DEM ALOS World 3D.

### ***Evaluación de MSD generados en función de los modelos de referencia mundial***

Los modelos digitales de superficies generados en el software SNAP Desktop tienen como referencia al modelo digital SRTM, mientras que los modelos obtenidos en el software ENVI y ERDAS IMAGINE tienen referencia al modelo ALOS World 3D, en la tabla 7 se presentan los datos estadísticos con exactitud a un nivel de confianza del 95% según lo indica la Normativa Internacional ASPRS, (2014).

**Tabla 7.**

*Evaluación de MDS con imágenes SAR en función de MDS Globales*

	Min (m)	Máx (m)	Media (m)	Desv. Estándar (m)	RMSE (m)	E. V (m)	Intervalo de confianza - 95% de confiabilidad
<b>MDS Sentinel-1 Software SNAP vs. SRTM-30m</b>							
<b>Infraestructura</b>	-95.48	96.07	5.73	52.46	52.78	103.45	{109.18 -97.72}
<b>Vegetación</b>	-105.96	158.00	38.48	78.85	87.72	171.93	{210.41 -133.45}
<b>MDS Cosmo SkyMED Software SNAP vs. SRTM-30m</b>							
<b>Infraestructura</b>	-97.08	96.39	25.96	50.32	56.52	110.78	{136.74 -84.82}
<b>Vegetación</b>	-127.45	161.08	10.27	88.72	88.72	173.89	{184.16 -163.62}
<b>MDS Sentinel-1 Software ENVI vs. ALOS - 30 m</b>							
<b>Infraestructura</b>	-93.99	94.56	-19.56	31.75	37.29	73.09	{53.53 -92.65}
<b>Vegetación</b>	-107.74	157.86	-17.06	36.28	40.1	78.59	{61.53 -95.65}
<b>MDS Cosmo SkyMED Software ENVI vs. ALOS - 30 m</b>							
<b>Infraestructura</b>	-45.14	13.89	-22.32	9.74	24.35	47.73	{25.41 -70.05}
<b>Vegetación</b>	-119.7	169.93	-5.56	43.93	43.93	86.10	{80.54 -91.66}
<b>MDS Cosmo SkyMED Software ERDAS IMAGINE vs. ALOS - 30 m</b>							
<b>Infraestructura</b>	-37.00	53.00	12.14	19.21	22.72	44.54	{56.68 -32.40}
<b>Vegetación</b>	-160.00	183.00	28.27	54.21	61.14	119.83	{148.10 -91.56}

*Nota.* Min, Max corresponde a la abreviatura de los valores mínimos y máximos;

mientras que E.V representa la exactitud posicional a partir del RMS.

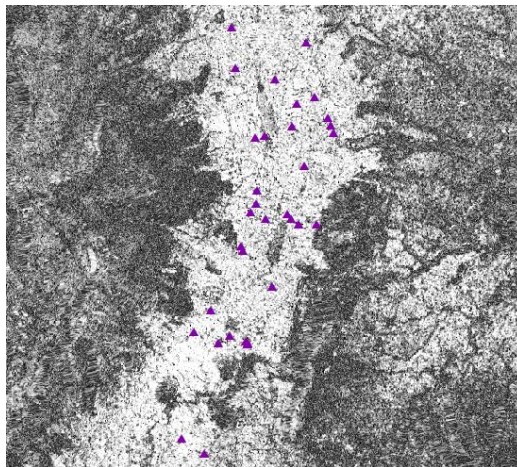
En el caso de los modelos de Sentinel-1 y Cosmo SkyMED obtenidos en el software SNAP Desktop, se eliminaron puntos que se encontraban sobre las zonas sin información del modelo SRTM, por lo cual disminuye la cantidad de puntos a evaluar. Por otro lado, con los productos obtenidos con los programas ENVI y ERDAS IMAGINE no se presentó el requerimiento de eliminar puntos, ya que en el DEM ALOS World 3D tienen una continuidad de información en toda la extensión. Adicionalmente, se estableció un análisis de los resultados obtenidos, por lo cual, se eliminaron los valores atípicos debido a su ubicación marginal y en zonas de baja coherencia.

En base a lo mencionado, posteriormente a la evaluación se presentaron datos muy variables en función de los modelos de referencia utilizados. Por ejemplo, al dividir en clases la evaluación altimétrica, se obtuvo que los RMS con valores mayores corresponden a las zonas de vegetación y montañosas, esto se debe a que dentro de las áreas mencionadas existe menor coherencia entre las imágenes SAR.

Se evidencia en función de la tabla 7 que la media entre los DEM de referencia con los modelos obtenidos con la metodología InSAR no corresponden a valores altos, ya que se mantiene en un valor promedio máximo de 30 m, lo cual se deduce que los valores que alteran la calidad del modelo corresponden a los valores máximos y mínimos. Sin embargo, al analizar el intervalo de confianza obtenido al 95% de confiabilidad, se identifica que existe un rango amplio en el que se encuentran los valores reales de altura, disminuyendo la exactitud posicional de los puntos. Por lo cual, se realizó una zonificación en zonas de alta coherencia para identificar la calidad de la información, como se presenta en la figura 86, se tomaron como referencia 35 puntos distribuidos en el área de la ciudad de Quito.

**Figura 86.**

*Distribución de puntos en zonas de alta coherencia*



Se realizó un análisis para la exactitud vertical dentro de la zona de alta coherencia, en función de los puntos seleccionados y se obtuvo la información en cada modelo generado, como se presenta en la tabla 8.

**Tabla 8.**

*Evaluación de MDS con imágenes SAR en zona de alta coherencia en función de MDS Globales*

Min (m)	Máx (m)	Media (m)	Desv. Estándar (m)	RMS (m)	E. V (m)	Intervalo de confianza - 95% de confiabilidad
<b>MDS Sentinel-1 Software SNAP vs. Vértices IGM</b>						
-75.81	70.48	-3.27	43.42	42.9	84.08	{80.81 -87.35}
<b>MDS Cosmo SkyMED Software SNAP vs. Vértices IGM</b>						
-17.41	171.48	64.33	56.17	83.47	163.60	{227.93 -99.27}
<b>MDS Sentinel-1 Software ENVI vs. Vértices IGM</b>						
-60.55	68.9	-5	17.91	38.37	75.21	{70.21 -80.21}
<b>MDS Cosmo SkyMED Software ENVI vs. Vértices IGM</b>						
-32.24	10.07	-5.1	9.98	23.13	45.33	{40.23 -50.43}
<b>MDS Cosmo SkyMED Software ERDAS IMAGINE vs. Vértices IGM</b>						
0.00	44.00	5.69	11.42	26.35	51.65	{57.34 -45.96}

*Nota:* Min, Max corresponde a la abreviatura de los valores mínimos y máximos;

mientras que E.V representa la exactitud posicional a partir del RMS.

Se presenta un cambio en el RMS al disminuir los valores notablemente en una zona de alta coherencia, obteniendo un rango de valores de RMS desde 45 m a 163 m. El RMS más alto corresponde al modelo obtenido con imágenes Cosmo SkyMED en el software SNAP Desktop, el mismo que presenta los valores más altos de RMS en todas las evaluaciones.

Adicionalmente, en la evaluación se presentan una media que llega hasta los 6 m aproximadamente, afirmando que la mejor exactitud se encuentra en zonas de alta coherencia, sin embargo, el valor medio obtenido con imágenes Cosmo SkyMED en la plataforma SNAP, presenta un valor máximo de 64.33 m, el cual se encuentra alejado de los resultados entre los otros productos.

Se debe tomar en cuenta que el análisis realizado solamente se encuentra centrado en zonas de infraestructura. El intervalo de confianza se encuentra en un rango menor, abarcando en este el valor real de altura del modelo obtenido.

#### ***Evaluación de MDS generados en función de los vértices del Instituto Geográfico Militar (IGM)***

Los modelos generados con la metodología InSAR, al evaluarse con la información altimétrica nacional presenta los siguientes resultados, como se presentan en la tabla 9.

**Tabla 9.**

*Evaluación de MDS INSAR en función de vértices IGM*

	Min (m)	Máx (m)	Media (m)	Desv. Estándar (m)	RMS (m)	E. V (m)	Intervalo de confianza - 95% de confiabilidad
<b>MDS Sentinel-1 Software SNAP vs. Vértices IGM</b>							
<b>Infraestructura</b>	-90.77	203.07	27.4	66.33	71.37	139.89	{167.29 -112.49}
<b>Vegetación</b>	-122.29	152.91	26.69	78.28	83.43	163.52	{190.21 -136.83}
<b>MDS Cosmo SkyMED Software SNAP vs. Vértices IGM</b>							
<b>Infraestructura</b>	-86.25	142.88	47.34	55.09	72.64	142.37	{189.71 -95.03}
<b>Vegetación</b>	-125.9	173.89	26.61	88.61	92.52	181.34	{207.95 -154.73}

	Min (m)	Máx (m)	Media (m)	Desv. Estándar (m)	RMS (m)	E. V (m)	Intervalo de confianza - 95% de confiabilidad
<b>MDS Sentinel-1 Software ENVI vs. Vértices IGM</b>							
<b>Infraestructura</b>	-93.62	382.42	-16.85	44.77	47.84	93.77	{76.92 -110.62}
<b>Vegetación</b>	-123.45	163.31	-16.88	36.05	39.8	78.01	{61.13 -94.89}
<b>MDS Cosmo SkyMED Software ENVI vs. Vértices IGM</b>							
<b>Infraestructura</b>	-51.31	332.34	-19.22	33.59	38.7	75.85	{56.63 -95.07}
<b>Vegetación</b>	-123.04	170.14	-6.3	44.3	44.74	87.69	{81.39 -93.99}
<b>MDS Cosmo SkyMED Software ERDAS IMAGINE vs. Vértices IGM</b>							
<b>Infraestructura</b>	-41.74	360.46	15.24	37.97	40.91	80.19	{95.43 -64.95}
<b>Vegetación</b>	-159.82	189.83	27.52	54.88	61.39	120.32	{147.84 -92.80}

*Nota.* Min, Max corresponde a la abreviatura de los valores mínimos y máximos; mientras que E.V representa la exactitud posicional a partir del RMS.

Se presentan valores de RMS en un rango de 78 m a 139 m en zonas de infraestructura, mientras que en zonas de vegetación existe un rango de 87 m a 180 m aproximadamente, teniendo una exactitud vertical con un nivel de confianza del 95%. Existe una relación directa con la baja coherencia presente en zonas de vegetación, por lo cual presentan un RMS más elevado.

Tomando en cuenta la evaluación de los DEM de referencia, en el caso del DEM ALOS World 3D presenta un RMS menor en función de los vértices IGM, lo que representa una mejor exactitud, y el DEM SRTM posee un RMS mayor, indicando que los resultados obtenidos con el software ENVI y ERDAS IMAGINE los cuales parten del DEM ALOS World 3D poseen una mejor exactitud al contrario de los resultados obtenidos con el software SNAP Desktop, que presentan un RMS mayor.

En función de lo indicado, los resultados con RMS más bajo corresponden a la evaluación con el modelo obtenido en el software ENVI con imágenes Cosmo SkyMED, que posee un RMS 75.85 m y 87.69 m en zonas de infraestructura y vegetación respectivamente.



Los valores máximos y mínimos de todos los modelos obtenidos se presentan debido a las zonas de baja coherencia, por lo cual las áreas de vegetación son las que poseen valores más extremos entre este rango, siendo esta información altimétrica la que altera directamente los resultados obtenidos, ya que se puede visualizar en la tabla 9 que se mantiene una media baja que comprende valores desde 16 m hasta 47 m.

Por tal razón, al analizar el intervalo de confianza obtenido al 95% de confiabilidad, se identifica la amplia variación de valores entre el rango establecido, lo que disminuye la exactitud en los puntos altimétricos; sin embargo, los resultados obtenidos con el software SNAP Desktop, reflejan la mayor diferencia de valores en el rango, por el contrario, el producto del software ENVI posee un rango más reducido en el intervalo de confianza.

Para identificar la calidad de la información se realizó una zonificación, con la misma distribución que se presentó en la figura 82, la misma que se ubica en zonas de alta coherencia perteneciente a la ciudad de Quito, obteniendo los resultados presentes en la tabla 10.

**Tabla 10.**

*Evaluación de MDS con imágenes SAR en zona de alta coherencia en función de vértices IGM*

Min (m)	Máx (m)	Media (m)	Desv. Estándar (m)	RMS (m)	E. V (m)	Intervalo de confianza - 95% de confiabilidad
<b>MDS Sentinel-1 Software SNAP vs. Vértices IGM</b>						
-79.17	69.29	4.32	38.78	38.46	75.38	{79.70 -71.06}
<b>MDS Cosmo SkyMED Software SNAP vs. Vértices IGM</b>						
-12	169.45	69.39	53.6	85.78	168.13	{237.52 -98.74}
<b>MDS Sentinel-1 Software ENVI vs. Vértices IGM</b>						
-63.25	68.92	-4.38	16.39	35.01	68.62	{64.24 -73.00}
<b>MDS Cosmo SkyMED Software ENVI vs. Vértices IGM</b>						
-32.44	10.09	-19.21	10.85	21.98	43.08	{23.87 -62.29}
<b>MDS Cosmo SkyMED Software ERDAS IMAGINE vs. Vértices IGM</b>						
-3.00	60.45	6.31	13.61	30.98	60.72	{67.03 -54.41}

*Nota.* Min, Max corresponde a la abreviatura de los valores mínimos y máximos; mientras que E.V representa la exactitud posicional a partir del RMS.

En una zona determinada de baja coherencia, se visualiza el cambio del RMS obtenido; la media de los valores presentes en la tabla 10, se encuentran en un rango bajo desde 4 m hasta 69 m, siendo el valor más alto el resultado obtenido con el modelo de imágenes Cosmo SkyMED en el software SNAP Desktop; a su vez este coincide con el RMS más alto de las evaluaciones. Dentro de esta área de zonificación, no existen zonas de baja coherencia; sin embargo, hay una variabilidad de valores máximos y mínimos; esto a su vez, se relaciona con la información de base, y la topografía del terreno. De igual manera, disminuye considerablemente el intervalo de confianza obtenido, lo que representa una mejora en la exactitud posicional vertical de los puntos en zonas de alta coherencia, en función de los datos presentados.

En función de los resultados presentados en la tabla 9, se requiere validar la información evaluada a partir de los vértices de control vertical, con la normativa nacional emitida por el Instituto Geográfico Militar IGM, en la cual se establece el valor de la exactitud vertical en función de la ecuación 12 presentada en el capítulo 2. En la tabla 11 se visualiza la exactitud vertical obtenida con el análisis RMS y la escala aproximada en función de los resultados.

**Tabla 11.**

*Escala aproximada en función de resultados obtenidos en función de RMS*

	<b>E. V (m)</b>	<b>PV = 1/4 * IC</b>	<b>IC</b>	<b>Escala Obtenida</b>	<b>Escala Referencial</b>
<b>MDS Sentinel-1 Software SNAP vs. SRTM-30m</b>					
<b>Infraestructura</b>	139.89		559.54	1: 559540.8	1:600 000
<b>Vegetación</b>	163.52		654.09	1: 654091.2	1:700 000
<b>MDS Cosmo SkyMED Software SNAP vs. SRTM-30m</b>					
<b>Infraestructura</b>	142.37		569.50	1: 569497.6	1:600 000
<b>Vegetación</b>	181.34		725.36	1: 725356.8	1:750 000

	E. V (m)	PV = 1/4 * IC	IC	Escala Obtenida	Escala Referencial
<b>MDS Sentinel-1 Software ENVI vs. ALOS - 30 m</b>					
<b>Infraestructura</b>	93.77		375.07	1: 375065.6	1:400 000
<b>Vegetación</b>	78.01		312.03	1: 312032	1:350 000
<b>MDS Cosmo SkyMED Software ENVI vs. ALOS - 30 m</b>					
<b>Infraestructura</b>	75.85		303.41	1: 303408	1:350 000
<b>Vegetación</b>	87.69		350.76	1: 350761.6	1:400 000
<b>MDS Cosmo SkyMED Software ERDAS IMAGINE vs. ALOS - 30 m</b>					
<b>Infraestructura</b>	80.19		320.77	1: 320770.12	1:350 000
<b>Vegetación</b>	120.32		481.30	1: 481297.6	1:500 000

*Nota.* E.V representa la exactitud posicional a partir del RMS, IC corresponde al

intervalo de curva

Se realiza el proceso inverso para la determinación de la escala, partiendo de la exactitud vertical para obtener el intervalo de curva (IC) y con esta información obtener una escala aproximada en la que se encuentren los resultados obtenidos. Por ello, los resultados se encuentran dentro de una escala 1:300000, llegando hasta 1:700000 y a escalas más pequeñas en algunos casos para que abarque todos los resultados. De manera similar, se analiza la escala correspondiente a los valores obtenidos, tomando como objeto de análisis a la media aritmética de los datos, como se visualiza en la tabla 12.

**Tabla 12.**

*Escala aproximada en función de resultados obtenidos en función de media aritmética*

	Media (m)	PV = 1/4 * IC	IC	Escala Obtenida	Escala Referencial
<b>MDS Sentinel-1 Software SNAP vs. SRTM-30m</b>					
<b>Infraestructura</b>	27.40		109.60	1: 109600	1:150 000
<b>Vegetación</b>	26.69		106.76	1: 106760	1:150 000
<b>MDS Cosmo SkyMED Software SNAP vs. SRTM-30m</b>					
<b>Infraestructura</b>	47.34		189.36	1: 189360	1:200 000
<b>Vegetación</b>	26.61		106.44	1: 106440	1:150 000

	Media (m)	PV = 1/4 * IC	IC	Escala Obtenida	Escala Referencial
<b>MDS Sentinel-1 Software ENVI vs. ALOS - 30 m</b>					
<b>Infraestructura</b>	-16.85		67.40	1: 67400	1:70 000
<b>Vegetación</b>	-16.88		67.52	1: 67520	1:70 000
<b>MDS Cosmo SkyMED Software ENVI vs. ALOS - 30 m</b>					
<b>Infraestructura</b>	-19.22		76.88	1: 76880	1:80 000
<b>Vegetación</b>	-6.30		25.20	1: 25200	1:30 000
<b>MDS Cosmo SkyMED Software ERDAS IMAGINE vs. ALOS - 30 m</b>					
<b>Infraestructura</b>	15.24		60.96	1: 60964.96	1:65 000
<b>Vegetación</b>	27.52		110.08	1: 110080	1:150 000

*Nota.* IC corresponde al intervalo de curva

Se presenta una escala referencial más grande en comparación con la tabla anterior, variando desde escala 1:50000 hasta 1:200000, por lo cual, a partir de una escala menor se puede abarcar toda la información obtenida de cada modelo, hasta 1:250000 que se conoce como una escala aceptable para el tratamiento de información.

Por lo cual, en función de los datos presentados, en toda el área de intervención y tomando en cuenta como referencia al valor de la media aritmética, se obtiene resultados en una escala global de 1:250000, mientras que, en zonas de alta coherencia, que corresponde a áreas de infraestructura, la escala que abarca los resultados obtenidos es 1:50000.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### Conclusiones

En este estudio, a más de haber cumplido con los objetivos y metas planteadas, la investigación realizada ha servido para reforzar la información teórica y práctica de utilidad para las presentes y futuras generaciones de estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y usuarios en general, brindando la apertura a distintos usos de imágenes SAR.

Al realizar el procesamiento y análisis de las imágenes SAR, en función de los productos resultantes, se concluye que las imágenes Cosmo SkyMED y Sentinel-1 al poseer una corta línea base de 114 m y 55 m, y una baja resolución temporal de 4 y 6 días respectivamente, presentan resultados de baja coherencia en zonas montañosas o de alta densidad de vegetación en promedio de 0.25 en la escala de 1; lo que repercute en la generación de interferogramas, los cuales presentan ruido en las áreas mencionadas, siendo lo contrario en zonas de alta coherencia, como la ciudad de Quito que poseen un valor promedio de 0.75 en la escala de 1.

Con la metodología y los programas aplicados, en la evaluación respecto a los vértices del IGM, en zonas de infraestructura y vegetación respectivamente, los MDS obtenidos en el software ENVI con imágenes Cosmo SkyMED tienen una media de -19.22 m y -6.3 m, una desviación estándar de 33.59 m y 44.3 m y un RMS de 75.85 m y 87.69 m al 95% de confiabilidad; con imágenes Sentinel-1 se obtuvo una media de -16.85 m y -16.88 m, una desviación estándar de 44.77 m y 36.05 m y un RMS de 93.77 m y 78.01 m al 95% de confiabilidad. El MDS generado en el software ERDAS IMAGINE con imágenes Cosmo SkyMED posee una media de 15.24 m y 27.52 m, una desviación estándar de 37.97 m y 54.88 m y un RMS de 80.19 m y 147.84 m al 95% de confiabilidad. Finalmente, los MDS obtenidos en el

software SNAP Desktop con imágenes Cosmo SkyMED obtuvieron una media de 47.34 m y 26.61 m, una desviación estándar de 55.09 m y 88.61 m y un RMS de 142.37 m y 181.34 m al 95% de confiabilidad; y con imágenes Sentinel-1 tienen una media de 27.40 m y 26.69 m, una desviación estándar de 66.33 m y 78.28 m y un RMS de 139.89 m y 163.52 m al 95% de confiabilidad.

Mientras que, los DEM globales, en función de los vértices del IGM, en zonas de infraestructura y vegetación respectivamente, presentaron mejores resultados como: el DEM SRTM (1 arco segundo) tiene una media de 3.52 m y 3.19 m, una desviación estándar de 8.47 m y 8.58 m y un RMS DE 21.50 m y 21.14 m al 95% de confiabilidad, y el DEM ALOS World 3D obtuvo una media de 0.32 m y 0.23 m, una desviación estándar de 7.49 m y 5.12 m y un RMS DE 15.02 m y 10.27 m al 95% de confiabilidad, lo que concluye que los DEM globales poseen una mejor precisión vertical que los MDS generados; esto se debe distintos factores, uno de ellos es el modo de adquisición, ya que capturan imágenes en modo *single pass*, lo que no afecta la coherencia entre las imágenes.

Con tales antecedentes, los MDS resultantes de las imágenes Cosmo SkyMED y Sentinel-1 con una resolución temporal de 4 y 6 días respectivamente, en forma general sirven para una escala 1:250000 en toda el área del estudio, mientras que, en zonas de alta coherencia pueden llegar hasta escalas 1:50000; sin embargo, no se puede generalizar los resultados, ya que existen sensores activos con menor tiempo de revisita o con modo de adquisición *single pass*, con los cuales se obtiene alta coherencia entre las imágenes SAR, permitiendo obtener interferogramas con menor cantidad de ruido y posiblemente mayor exactitud altimétrica en el modelo generado.

El procesamiento para la generación de modelos digitales de superficie cumple un similar flujo de trabajo general en los diferentes programas: SNAP Desktop, ENVI y ERDAS IMAGINE; sin embargo, cada interfaz es diferente, ya que en las plataformas ERDAS IMAGINE y

SNAP Desktop el usuario tiene una interacción con los parámetros de generación, mientras que en el software ENVI el proceso es automatizado. En ese sentido, respecto al tiempo de procesamiento el programa ENVI posee un resultado más óptimo con imágenes Sentinel-1, mientras que el software ERDAS IMAGINE realiza un procesamiento en menor cantidad de tiempo con imágenes Cosmo SkyMED; en función a la comprensión y uso de las herramientas del software empleado, los programas ERDAS IMAGINE y SNAP Desktop poseen un proceso más didáctico en cada flujo de trabajo correspondiente, dando al usuario la enseñanza en el procesamiento aplicado; en cuanto a los resultados obtenidos, los MDS con mayor exactitud vertical fueron generados con el software ENVI con las imágenes Cosmo SkyMED y Sentinel-1.

### **Recomendaciones**

Derivado del proyecto realizado, se puede poner en práctica diferentes técnicas de interferometría SAR e interferometría diferencial, para la identificación de deformaciones, movimientos de masa o alteraciones en la superficie terrestre a nivel nacional. Por ello, es recomendable la continuación de investigación en el campo del uso y aplicaciones de imágenes SAR.

Para mejorar la calidad de resultados en la generación de MDS, es recomendable el uso de imágenes SAR que posean una línea base más grande, entre 150 m a 300 m, con la finalidad de analizar y comparar la variabilidad de altura entre los modelos obtenidos; adicionalmente, se requiere adquirir un par de imágenes que posea una menor temporalidad entre las mismas, o a su vez que sean capturadas con un modo de adquisición *single pass*; para la disminución de ruido en las imágenes SAR, es recomendable la aplicación del filtrado multilooking, esto a su vez puede mejorar el desarrollo de un MDS con interferometría; sin embargo, perjudica la

resolución espacial del producto final, por lo cual, se puede aplicar un remuestreo del MDS final para restaurar la medida de la resolución espacial inicial.

Para la evaluación de los MDS, se sugiere tomar puntos de control (GCP) actualizados en zonas de coherencia mayor, estableciendo como referencia un umbral de coherencia mayor a 0.5 para el ingreso de GCP, adicionalmente, adquirir mayor cantidad de puntos en zonas de alta vegetación, con una distribución completa, con la finalidad de identificar la exactitud de la información altimétrica en toda el área de estudio.

Para verificar la calidad de resultados obtenidos con imágenes SAR, es recomendable la aplicación de la metodología de interferometría en diferentes zonas del país, como en regiones planas y de menor vegetación arbustiva, a diferencia de la zona de estudio que se encuentra dentro de la región Sierra, para identificar mayores zonas de alta coherencia entre las imágenes.

Existen diversas plataformas informáticas para el procesamiento de MDS, por lo cual, además de las mencionados en el presente estudio, es recomendable la investigación y uso de diferentes programas para conocer la variabilidad del proceso de cada uno, además de la aplicación de diferentes constelaciones en las plataformas informáticas usadas en el procesamiento descrito.



## BIBLIOGRAFÍA

- Agrawal, R., Das, A., & Rajawat, A. S. (2018). Accuracy Assessment of Digital Elevation Model Generated by SAR Stereoscopic Technique Using COSMO-SkyMed Data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46(10), 1739–1747. <https://doi.org/10.1007/s12524-018-0835-6>
- ASPRS. (2014). ASPRS Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING & REMOTE SENSING*, March, 1–13. [http://www.asprs.org/a/society/divisions/pad/Accuracy/Draft\\_ASPRS\\_Accuracy\\_Standards\\_for\\_Digital\\_Geospatial\\_Data\\_PE&RS.pdf](http://www.asprs.org/a/society/divisions/pad/Accuracy/Draft_ASPRS_Accuracy_Standards_for_Digital_Geospatial_Data_PE&RS.pdf)
- Bourbigot, M., Johnsen, H., & Piantanida, R. (2016). Sentinel-1 Product definition. *MPC-S1*, 2/7, 129. <https://sentinel.esa.int/documents/247904/1877131/Sentinel-1-Product-Definition.pdf/6049ee42-6dc7-4e76-9886-f7a72f5631f3?t=1461673251000>
- Braun, A. (2020). Sentinel-1 Toolbox DEM generation with Sentinel-1 Workflow and challenges. *SKYWATHC*, January, 1–27. [http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX DEM generation with Sentinel-1 IW Tutorial.pdf](http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20DEM%20generation%20with%20Sentinel-1%20IW%20Tutorial.pdf)
- Braun, A., & Veci, L. (2021). SENTINEL-1 Toolbox SAR Basics Tutorial. *Esa*, March, 1–20.
- Burgos, V., & Salcedo, A. (2016). Modelos digitales de elevación: Tendencias, correcciones hidrológicas y nuevas fuentes de información. *Instituto Nacional Del Agua - Centro Regional Andino*, October 2014, 16. <http://www.b.ns.ina.gov.ar/ifrh-2014/Eje3/3.10.pdf>
- Burgos, V., Solorza, R., & Salcedo, A. P. (2017). La interferometría sar en la modelación hidráulica: estado del arte y aplicación. *CONAGUA*, September, 1–16. [https://www.researchgate.net/publication/321082398\\_LA\\_INTERFEROMETRIA\\_SAR\\_EN\\_LA\\_MODELACION\\_HIDRAULICA\\_ESTADO\\_DEL\\_ARTE\\_Y\\_APLICACION](https://www.researchgate.net/publication/321082398_LA_INTERFEROMETRIA_SAR_EN_LA_MODELACION_HIDRAULICA_ESTADO_DEL_ARTE_Y_APLICACION)
- Calle, A., & Salvador, P. (2012). Revisando el concepto de resolución en teledetección. *Revista de Teledeteccion*, 37, 74–79. [http://www.aet.org.es/revistas/revista37/Numero37\\_09.pdf](http://www.aet.org.es/revistas/revista37/Numero37_09.pdf)
- Cango, L. (2017). Evaluación de Modelos Digitales de Elevación usando datos LiDAR e imágenes satelitales [Universidad Técnica Particular de Loja]. In *Universidad Técnica Particular de Loja*. <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/20.500.11962/20778>
- Chen, C. W., & Zebker, H. A. (2002). Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical

- segmentation and generalized network models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8), 1709–1719. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.802453>
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial* (Segunda Ed). RIALP. S.A.
- Colesanti, C., & Wasowski, J. (2006). Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology*, 88(3–4), 173–199. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.013>
- Crosetto, M., & Crippa, B. (2000). Quality assessment of interferometric SAR DEMs. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 33(May). [https://www.researchgate.net/publication/228958078\\_Quality\\_assessment\\_of\\_interferometric\\_SAR\\_DEMs](https://www.researchgate.net/publication/228958078_Quality_assessment_of_interferometric_SAR_DEMs)
- Di Bella, C. ., Posse, G., Beget, M. ., Fischer, M. ., Mari, N., & Veron, S. (2008). La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones. *Ecosistemas*, 17(3), 39–52. <https://doi.org/10.7818/re.2014.17-3.00>
- Doyle, F. J. (1978). Digital Terrain Models: An Overview. In *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* (Vol. 44, Issue 12). [https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1978journal/dec/1978\\_dec\\_1481-1485.pdf](https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1978journal/dec/1978_dec_1481-1485.pdf)
- Duque, J. (2015). *Comparación Estadística de Métodos Interpolación Determinísticos y Estocásticos para la generación de Modelos Digitales del Terreno a partir de datos LIDAR, en la parroquia de Tumbabiro, cantón San Miguel de Urququí, provincia de Imbabura* [Universidad San Francisco de Quito]. <https://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/3569?mode=simple>
- Edrosa, M. (2011). *Aplicación de la Teledetección para el Monitoreo de Eventos Hídricos Superficiales mediante Imágenes Cosmo Sky Med* [Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich]. [https://pep.unc.edu.ar/wp-content/uploads/sites/68/2017/08/2009\\_Edrosa-Rodrigo.pdf](https://pep.unc.edu.ar/wp-content/uploads/sites/68/2017/08/2009_Edrosa-Rodrigo.pdf)
- ENVI. (2004). ENVI User's Guide. *Research Systems Software Vision, September*, 13–32. [http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso\\_SR/biblio\\_sr/ENVI\\_userguid.pdf](http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/biblio_sr/ENVI_userguid.pdf)
- ESA. (2014). *RADAR and SAR Glossary*. <http://envisat.esa.int/handbooks/asar/CNTR5-2.html>

- ESA. (2021a). *Product Types and Processing Levels*. Copernicus.  
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/product-types-processing-levels>
- ESA. (2021b). *Sentinel Toolboxes*. Copernicus. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes>
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2007). Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), 3–5. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183.1>.INTRODUCTION
- Felícísimo, A. (1994). Modelos digitales del terreno: introducción y aplicaciones a las ciencias ambientales. In *Oviedo: Universidad de Oviedo*.  
<http://www6.uniovi.es/~feli/pdf/libromdt.pdf>
- Fernandez, Y., & Soria, J. (2015). Imagenes de Radar de Apertura Sintética y Conceptos Básicos de Polarimetría. In *Avances y Perspectivas de Geomatica con Aplicaciones Ambientales, Agrícolas y Urbanas* (Issue December 2015).  
[https://www.researchgate.net/publication/301247047\\_Imagenes\\_SAR\\_y\\_Conceptos\\_Basicos\\_de\\_Polarimetria](https://www.researchgate.net/publication/301247047_Imagenes_SAR_y_Conceptos_Basicos_de_Polarimetria)
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., & Rocca, F. (2007a). *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation* (K. Fletcher (ed.)). ESA.  
[http://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19\\_ptA.pdf](http://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptA.pdf)
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., & Rocca, F. (2007b). *Part B InSAR processing: a practical approach* (K. Fletcher (ed.)). ESA. [http://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19\\_ptB.pdf](http://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptB.pdf)
- FGDC. (1998). Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3 : National Standard for Spatial Data Accuracy. *National Spatial Data Infrastructure*, 1–28.  
<http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/chapter3>
- Fiorentino, C., & Virelli, M. (2016). COSMO-SkyMed Mission and Products Description. *Agenzia Spaziale Italiana*, 2, 151. [https://www.asi.it/wp-content/uploads/2019/08/COSMO-SkyMed-Mission-and-Products-Description\\_rev3-2.pdf](https://www.asi.it/wp-content/uploads/2019/08/COSMO-SkyMed-Mission-and-Products-Description_rev3-2.pdf)

- Fuentes, J. E., Bolaños, J. A., & Rozo, D. M. (2012). Modelo digital de superficie a partir de imágenes de satélite ikonos para el análisis de áreas de inundación en Santa Marta, Colombia. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 41(2), 251–266.  
[https://www.researchgate.net/publication/303838466\\_MODELO\\_DIGITAL\\_DE\\_SUPERFICIE\\_A\\_PARTIR\\_DE\\_IMAGENES\\_DE\\_SATELITE\\_IKONOS\\_PARA\\_EL\\_ANALISIS\\_DE\\_AREAS\\_DE\\_INUNDACION\\_EN\\_SANTA\\_MARTA\\_COLOMBIA](https://www.researchgate.net/publication/303838466_MODELO_DIGITAL_DE_SUPERFICIE_A_PARTIR_DE_IMAGENES_DE_SATELITE_IKONOS_PARA_EL_ANALISIS_DE_AREAS_DE_INUNDACION_EN_SANTA_MARTA_COLOMBIA)
- Geymen, A. (2014). Digital elevation model (DEM) generation using the SAR interferometry technique. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(2), 827–837. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0811-3>
- Goldstein, R. M., & Werner, C. L. (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25(21), 4035–4038.  
<https://doi.org/10.1029/1998GL900033>
- González, P. (2010). *Medida y caracterización de deformaciones usando técnicas geodésicas y de teledetección. Aplicación en volcanología y sismotectónica*. [Universidad Complutense de Madrid]. <http://hdl.handle.net/10261/39652>
- Guerero, R., David, S., & Bacuilima, Á. (2017). *Correlación entre imágenes satelitales de nubosidad y precipitación*. *October*, 8.  
[https://www.researchgate.net/publication/320271317\\_CORRELACION\\_ENTRE\\_IMAGENES\\_SATELITALES\\_DE\\_NUBOSIDAD\\_Y\\_PRECIPITACION](https://www.researchgate.net/publication/320271317_CORRELACION_ENTRE_IMAGENES_SATELITALES_DE_NUBOSIDAD_Y_PRECIPITACION)
- Guerrero, C., & Hernandez, P. (2017). *Determinación de un modelo digital de elevación a partir de imágenes de radar Sentinel-1 usando interferometría SAR* [Universidad Distrital Francisco José de Caldas].  
<http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5915/1/HernandezCardenasPaolaAndrea2017.pdf>
- HARRIS. (2019). ENVI SARscape. Turn SAR Data Into Meaningful, Contextual Information. *HARRIS*, 2. [https://www.l3harrisgeospatial.com/Portals/0/pdfs/3-19\\_ENVISARscape\\_ForArcGIS\\_Datasheet\\_Web.pdf](https://www.l3harrisgeospatial.com/Portals/0/pdfs/3-19_ENVISARscape_ForArcGIS_Datasheet_Web.pdf)
- Hexagon. (2014). RADAR ANALYST WORKSTATION. *Producer Suite, December*, 6.
- Hexagon. (2020). Erdas Imagine. *Hexagon*, 1–16.  
[https://bynder.hexagon.com/m/57a0703769b73f32/original/Hexagon\\_GSP\\_ERDAS\\_IMAGI](https://bynder.hexagon.com/m/57a0703769b73f32/original/Hexagon_GSP_ERDAS_IMAGI)

NE\_Brochure.pdf

- IEEE. (2017). IEEE Standard for Radar Definitions. In *IEEE Std 686-2017 (Revision of IEEE Std 686-2008)*.
- IGM. (2016). *Especificaciones Técnicas para la producción de Cartografía Escala 1:5000. Primera Ed*, 1–37. [http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/?wpfb\\_dl=851](http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/?wpfb_dl=851)
- IGN. (2015). *Teledetección Radar. Módulo 1*, 1–27.
- IGN. (2018). Fundamentos de teledetección RADAR. *Comisión Europea*, 1–15.  
[https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/actividades/OBS/Programa\\_Marco\\_Copernicus\\_User\\_Uptake/5\\_Fundamentos\\_de\\_teledeteccion\\_radar.pdf](https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/actividades/OBS/Programa_Marco_Copernicus_User_Uptake/5_Fundamentos_de_teledeteccion_radar.pdf)
- JAXA. (2008). ALOS Data Users Handbook. *Earth Observation Research and Application Center Japan Aerospace Exploration Agency, March*, 158.  
[http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/fdata/ALOS\\_HB\\_RevC\\_EN.pdf](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/fdata/ALOS_HB_RevC_EN.pdf)
- JAXA, & EORC. (2021). ALOS Global Digital Surface Model ( DSM ) “ ALOS World 3D-30m ” (AW3D30). *Earth Observation Research Center Japan Aerospace Exploration Agency*, 1(January), 1–20. <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>
- Joly, F. (1979). *La Cartografía*. Ariel. [http://ffyl1.uncu.edu.ar/IMG/pdf/Joly-La\\_CartografYa.pdf](http://ffyl1.uncu.edu.ar/IMG/pdf/Joly-La_CartografYa.pdf)
- Krieger, G., Hajnsek, I., Papathanassiou, K., Younis, M., & Moreira, A. (2010). Interferometric Synthetic Aperture Radar (SAR) Missions Employing Formation Flying. *Proceedings of the IEEE*, 98(5), 816–843. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2038948>
- Lanfri, S. (2011). *Desarrollo de una metodología para la detección de cuerpos de agua mediante el análisis de imágenes SAR COSMO SkyMed y de DEMs* [Universidad Nacional de Córdoba]. [https://pep.unc.edu.ar/wp-content/uploads/sites/68/2017/08/2009\\_Lanfri-Sofía-pt1.pdf](https://pep.unc.edu.ar/wp-content/uploads/sites/68/2017/08/2009_Lanfri-Sofía-pt1.pdf)
- Makineci, H. B., & Karabörk, H. (2016). Evaluation digital elevation model generated by synthetic aperture radar data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, XL1-B1*(June 2016), 57–62.  
<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B1-57-2016>
- Mancero, H., Toctaguano, D. S., Tacuri, C. A., Kirby, E., & Tierra, A. (2015). *Evaluación de Modelos Digitales de Elevación obtenidos por diferentes sensores remotos*. *June*, 1–6.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4777.2325>

- Marchionni, D., & Cavayas, F. (2014). LA TELEDETECCIÓN POR RADAR COMO FUENTE DE INFORMACIÓN LITOLÓGICA Y ESTRUCTURAL. ANÁLISIS ESPACIAL DE IMÁGENES SAR DE RADARSAT-1. *Geoacta*, 39(1), 62–89.
- Martínez, C. (2012). *Estadística y Muestreo* (Décima ter).
- Mouratidis, A. (2010). Use of satellite Geodesy in slope stability monitoring. *National Observatory Of Athens, July*, 43–50. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3682.1601>
- NASA. (1998). Mapping the World in Three Dimensions. *National Imagery and Mapping Agency*, 07, 6–7. [https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/factsheet\\_tech.pdf](https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/factsheet_tech.pdf)
- Navarro, D. (2014). *Interferometría Polarimétrica Diferencial SAR con Satélite* [Universitat d'Alcant]. [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/39875/1/tesis\\_navarro\\_sanchez.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/39875/1/tesis_navarro_sanchez.pdf)
- Olmsted, C. (1993). Scientific SAR User ' s Guide. *Alaska SAR Facility, July*, 1–29. <https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads/2019/02/sci-sar-userguide.pdf>
- Reuter, F. (2009). Principios de teledetección. *Catedra de Teldetección y Cartografía. Facultad de Ciencias Forestales - UNSE, No. 33*, 1–63. <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/SD-33-Principios-teledeteccion-REUTER.pdf>
- SARMAP. (2009). Synthetic Aperture Radar and SARscape. *Signal Processing*, 29(1), 107. [https://doi.org/10.1016/0165-1684\(92\)90103-4](https://doi.org/10.1016/0165-1684(92)90103-4)
- Schumann, G., Matgen, P., Cutler, M. E. J., Black, A., Hoffmann, L., & Pfister, L. (2008). Comparison of remotely sensed water stages from LiDAR, topographic contours and SRTM. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(3), 283–296. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.09.004>
- Skolnik, M. I. (1990). Radar Handbook. In M. I. Skolnik (Ed.), *McGraw-Hill* (Second Edi, Vol. 53). McGraw-Hill. <http://www.geo.uzh.ch/microsite/rsldocuments/research/SARlab/GMTILiterature/PDF/Skolnik90.pdf>
- Vidal, P., Pérez, W., & Fernández-Sarría, A. (2019). Evaluación de Modelos Digitales de Elevación (MDEs) obtenidos a partir de imágenes Sentinel-1 en la Región Metropolitana de Chile. *Teledetección: Hacia Una Visión Global Del Cambio Climático*, 2(2), 373–376. [https://cgat.webs.upv.es/BigFiles/papers/Evaluación de Modelos Digitales de Elevación %28MDEs%29 obtenidos a partir de.pdf](https://cgat.webs.upv.es/BigFiles/papers/Evaluación%20de%20Modelos%20Digitales%20de%20Elevación%20obtenidos%20a%20partir%20de.pdf)

Wang, X., Holland, D. M., & Gudmundsson, G. H. (2018). Accurate coastal DEM generation by merging ASTER GDEM and ICESat/GLAS data over Mertz Glacier, Antarctica. *Remote Sensing of Environment*, 206(December 2017), 218–230.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.12.041>