

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA**

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

**ESCUELA PROFESIONAL DE CIENCIAS FÍSICO
MATEMÁTICAS**

ESPECIALIDAD DE FÍSICA



**Estimación de parámetros geométricos y espectrales diferenciados en
imágenes de radar Sentinel-1 para la clasificación de uso del suelo en la
microcuenca Apacheta**

Tesis presentado para la obtención del Título Profesional de Licenciado en Física

Bach. HINOSTROZA FARFÁN, Hugo

Asesor: MONCADA SOSA, Wilmer

Co-asesor: PEREDA MEDINA, Alex

AYACUCHO – PERÚ

2022

Índice

Índice	ii
Declaración jurada de autenticidad.....	6
Dedicatoria.....	7
Agradecimientos	8
Índice de tablas	9
Índice de figuras	10
Lista de abreviaturas y siglas.....	13
Resumen	14
Introducción.....	16
CAPITULO I.....	18
I. Planteamiento del Problema.....	18
1.1. Descripción de la situación problemática	18
1.2. Formulación del problema	19
1.3. Formulación de objetivos.....	19
1.4. Justificación (teórica, práctica y metodológica)	20
CAPITULO II.....	22
II. Marco Teórico.....	22
2.1. Antecedentes	22
2.2. Bases teóricas.....	23
2.3. Geometría de adquisición y conceptos básicos de SAR	24
2.4. Bases del sistema SAR	26
2.5. Ecuación de radar.....	30
2.5.1. Radar de Apertura Real.....	30
2.5.2. Radar de Apertura Sintética	31

2.6. Distorsiones radiométricas y geométricas	33
2.6.1. Distorsiones radiométricas.....	33
2.6.1.1. Ambigüedades de Rango y Azimut	35
2.6.2. Distorsiones geométricas	35
2.7. Polarimetría SAR.....	37
2.7.1. Propagación de una onda electromagnética plana monocromática	38
2.7.2. Polarización Elíptica	38
2.7.3. Vector de Jones	40
2.7.4. Vector de Stokes	40
2.7.5. Operadores de dispersión de vectores electromagnéticos.....	41
2.7.6. Polarizaciones de la transmisión de onda de radar	43
2.7.7.1. Penetración de ondas electromagnéticas.....	44
2.8. Clasificación y descomposición polarimétrico del objetivo	44
2.8.1. Introducción al concepto de descomposición polarimétrico del objetivo.....	44
2.8.2. Descomposiciones basadas en vector propio.....	46
2.8.3. Descomposición de Cloude	46
2.8.4. Descomposición de Holm.....	47
2.8.5. Descomposición de VAN ZYL.....	47
2.8.6. Teorema de descomposición polarimétrico $H/A/\alpha$	47
2.8.6.1. Dispersión polarimétrica α	48
2.8.6.2. Entropía de dispersión polarimétrico (H)	49
2.8.6.3. Dispersión polarimétrica anisotrópica (A)	50
2.8.6.4. Espacio tridimensional de clasificación $H/A/\alpha$	50
2.9. PolSAR Clasificación de terreno y uso del suelo	54
2.9.1. Clasificador de Wishart complejo para datos PolSAR multilook.....	55
2.9.2. Clasificador supervisado mediante la media de distancia de Wishart	55

2.9.2.1. Clasificador no supervisado basada en dispersión mecanismos y clasificador Wishart.....	57
2.10. Dispersión de las características de la superficie de la tierra.....	57
2.10.1. Mecanismos de dispersión comunes.....	58
2.10.2. Dispersión de superficie lisa.....	59
2.10.3. Superficies rugosas.....	60
2.10.4. Dispersión de volumen.....	61
2.10.5. Dispersores compuestos.....	62
2.11. Contenido de humedad.....	62
2.12. Presencia de vegetación.....	62
CAPITULO III.....	64
III. Metodología.....	64
3.1. Formulación de hipótesis.....	64
3.2. Variables y Operacionalización de variables.....	64
3.3. Técnicas, instrumentos y procesamiento de datos.....	67
3.3.1. Instrumentos utilizados.....	67
3.3.2. Procesamiento de datos.....	67
3.3.3. Procedimientos de los métodos empleados.....	71
3.4. Tipo y nivel de investigación.....	75
3.5. Métodos.....	75
3.6. Diseño de investigación.....	75
3.7. Población y muestra.....	75
3.8. Técnicas e instrumentos.....	76
3.9 Validez y confiabilidad de instrumentos.....	76
3.10. Técnicas de procesamiento de datos.....	76
3.11. Aspectos éticos.....	77

3.12. Método aplicado para la clasificación del uso de uso de suelo en la microcuenca Apacheta	77
CAPITULO IV	79
IV. Resultados y Discusión	79
4.1. Estimación de los parámetros geométricos en imágenes Sentinel-1	79
4.2. Estimación de los parámetros espectrales diferenciados en imágenes de radar Sentinel-1, para la clasificación del suelo en la microcuenca Apacheta.....	94
4.3. Comparar los métodos de clasificación de uso de suelo que involucren los parámetros geométricos y espectrales en una imagen de radar Sentinel-1.....	111
4.3.1. Clasificación del suelo con el método de Polarimetría de Cloude-Pottier Dual Pol.....	111
4.3.3. Clasificación del suelo con el método Polarimétrico de Wishart Dual Pol	114
Conclusiones.....	119
Discusiones.....	120
Recomendaciones	121
Referencias bibliográficas	123
Anexos A	127
Anexos B	129

Declaración jurada de autenticidad

Yo, **HINOSTROZA FARFÁN HUGO** con DNI N° 70541109, código de matrícula N° 26125788 con domicilio legal en Assoc. 27 de octubre Mz. “C” Lt. 02, distrito de San Juan Bautista provincia de Huamanga región Ayacucho. Bachiller de la facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil, de la Escuela Profesional de Ciencias Físico Matemáticas de la especialidad de Física. El proyecto de investigación es titulado como: **“Estimación de parámetros geométricos y espectrales diferenciados en imágenes de radar Sentinel-1 para la clasificación de uso del suelo en la microcuenca Apacheta”**
Bajo juramento declaro que:

1. El presente trabajo es de mi autoría.
2. Se presento normas universales de redacción en citas y referencias para las fuentes consultadas. El proyecto de investigación no presenta plagio.
3. El proyecto se presenta con el objetivo de obtener el título profesional.

En caso de encontrarse lo contrario asumo las consecuencias y sanciones correspondientes, sometiéndose a las normas vigentes de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga.

Ayacucho, diciembre 2022.



Hugo Hinostroza Farfán

DNI : 70541109

Dedicatoria

A mi madre porque fue el soporte de toda mi trayectoria y a mis seres queridos que siempre estuvieron a mi lado.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga y a todos los miembros de la Escuela Profesional de Ciencias Físico Matemáticas.

Al proyecto FOCAM "Modelado del comportamiento de aguas subterráneas en los ecosistemas de Humedales de la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, Región Ayacucho", por financiar la presente tesis.

Al laboratorio de Teledetección y Energías renovables (LABTELER-UNSCH).

Y a todas aquellas personas que de alguna u otra manera, colaboraron o participaron en la realización de esta investigación, hago extensivo mi más sincero agradecimiento.

Índice de tablas

Tabla 1	: Estadísticos del nivel 0	79
Tabla 2	: Estadísticos del nivel 1	80
Tabla 3	: Estadísticos del nivel 2	82
Tabla 4	: Estadísticos del nivel 3	83
Tabla 5	: Estadísticos del nivel 4	84
Tabla 6	: Estadísticos del nivel 5	85
Tabla 7	: Estadísticos del nivel 6	86
Tabla 8	: Estadísticos del nivel 7	87
Tabla 9	: Estadísticos del nivel 8	88
Tabla 10	: Estadísticos del nivel 9	89
Tabla 11	: Estadísticos de la Represa.....	90
Tabla 12	: Pixeles extraídos del Shape-Apacheta clasificado	92
Tabla 13	: Pixeles exportados al Excel del Shape-Apacheta clasificado	92
Tabla 14	: Pixeles extraídos del Shape-Apacheta clasificado Cloude-Pottier Dual Pol 113	
Tabla 15	: Pixeles extraídos del Shape-Apacheta clasificado Wishart Dual Pol...	116

Índice de figuras

Figura 2.1: Geometría de imágenes Radar de Apertura Sintética (SAR).....	25
Figura 2.2: Sistemas de imágenes de microondas: (a) Biestaticos (b) Monásticos.....	26
Figura 2.3: Bandas de onda utilizadas en la detección remota por radar.	27
Figura 2.4: Definición de algunos términos comunes de imágenes de radar.....	30
Figura 2.5: Radar de Apertura Sintética e integrada la señal dispersada. El dispersor permanece en el haz de la antena.....	32
Figura 2.6: Ejemplo de una imagen SAR en píxeles sobre interferencias.	35
Figura 2.7: Ejemplo de bordes del espectro de azimut pliegándose sobre si mismos creando imágenes fantasma.	36
Figura 2.8: Imagen de NASA / JPL AIRSAR muestra el acortamiento y sombreado..	37
Figura 2.9: Evolución espacial de componentes de ondas planas monocromáticas.	39
Figura 2.10: Evolución espacial de una onda plana polarizada linealmente (horizontal).	39
Figura 2.11: Evolución espacial de una onda plana polarizada circularmente.	40
Figura 2.12: Interacción de una onda electromagnética y un objetivo.....	42
Figura 2.13: Parámetro α invariantes en rollo	49
Figura 2.14: Parámetro de entropía invariantes de rollo H	50
Figura 2.15: Plano Bidimensional \mathbf{H}/α	51
Figura 2.16: Segmentación no supervisada de la imagen PolSAR de San Francisco usando espacio 3-D de \mathbf{H}/α	54
Figura 2.17: Hielo marino en potencia total con color rojo= banda P, verde = banda L, azul = banda C	56
Figura 2.18: Mecanismo de dispersion comunes	59
Figura 2.19: Constante dielectrica compleja ($\epsilon'_r - j\epsilon''_r$) de arena en funcion del contenido de humedad.....	60
Figura 2.20: Dispersión de la superficie a medida que aumenta la rugosidad	61

Figura 3.1: Zona geográfica de la imagen S1/20180811	68
Figura 3.2: Pasos para la Calibración	69
Figura 3.3: Pasos para los Filtros	70
Figura 3.4: Pasos para la Corrección de Terreno	70
Figura 3.5: Opción en el software Snap de normalización.....	71
Figura 4.1: Gráfico resultante del nivel 0(Agua).....	80
Figura 4.2: Gráfico resultante del nivel 1(Bosque poblado).....	81
Figura 4.3: Gráfico resultante de nivel 2(Cultivos).....	82
Figura 4.4: Gráfico resultante de nivel 3(Gras natural).....	83
Figura 4.5: Gráfico resultante de nivel 4(Plantaciones).....	84
Figura 4.6: Gráfico resultante de nivel 5 (Río seco).....	85
Figura 4.7: Gráfico resultante de nivel 6 (Sombras).	86
Figura 4.8: Gráfico resultante de nivel 7 (Zona urbana con pendiente).....	87
Figura 4.9: Gráfico resultante de nivel 8 (Zona urbana).....	88
Figura 4.10: Gráfico resultante de nivel 9 (Zona urbana 2).....	89
Figura 4.11: Gráfico resultante de una Represa.....	90
Figura 4.12: Resultados de la clasificación.	91
Figura 4.13: Resultados de Apacheta clasificado.....	93
Figura 4.19: Cobertura de vegetación en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, el color verde me indica vegetación	95
Figura 4.21: Firmas espectrales y descripción de la cobertura en Apacheta.....	96
Figura 4.22: Apacheta en diferentes clasificaciones, enmarcadas con un Shape.....	98
Figura 4.23: Represa Cuchoquesera	99
Figura 4.24: Parte de Apacheta	100
Figura 4.26: Una parte de Apacheta	102
Figura 4.27: Lagunas en Apacheta	103

Figura 4.28: Totoria en Ayacucho.....	104
Figura 4.29: Nevado en Apacheta	105
Figura 4.30: Ciudad de Huamanga- Ayacucho.	106
Figura 4.31: Lagunas en Apacheta	107
Figura 4.32: Estadio Cumaná de Ayacucho.	108
Figura 4.33: Residencia universitaria de la UNSCH.....	109
Figura 4.34: Apacheta en sus diferentes clasificaciones con diferentes métodos (primera imagen es de Sentinel-2).....	110
Figura 4.14: Resultados del diagrama plano H-alpha de Apacheta clasificado	111
Figura 4.15: Resultados de la clasificación Cloude-Pottier Dual Pol.	112
Figura 4.16: Resultados de Apacheta clasificado por Cloude-Pottier Dual Pol.....	114
Figura 4.17: Resultados de la clasificación Wishart Dual Pol.	115
Figura 4.18: Resultados de Apacheta clasificado por Wishart Dual Pol.	117
Figura 4.18.1	118

Lista de abreviaturas y siglas

MSE	Mean Square Error
ESA	Agencia Espacial Europea
S1	Sentinel-1
S2	Sentinel-2
SNAP	Plataforma de Aplicaciones SentiNe1
CE	Comisión Europea
SAR	Radar de Apertura Sintética
SNR	Relación señal-ruido
AIRSAR	The Airborne Synthetic Aperture Radar
ANA	Autoridad Nacional del Agua
ISODATA	Es el acrónimo de Iterative Self-Organizing Data Analysis Techniques
JPL	Jet Propulsion Laboratory
MINAM	Ministerio del Ambiente
NAME	Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias
NAMIN	Nivel de Aguas Mínimas
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio de los Estados Unidos
OEM	Ondas Electromagnéticas
PolSAR	Radar de apertura sintética polarimétrico
Radar	Radio Detection and Ranging
SAFE	Formato de archivo estándar de Sentinel para Europa
WWF	Fondo Mundial para la Naturaleza

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo estimar los parámetros geométricos y espectrales diferenciados en las imágenes de radar Sentinel-1 para la clasificación de uso del suelo en la microcuenca Apacheta y comparar los métodos de clasificación. Se utiliza la banda C, y con ayuda de las herramientas del Software SNAP se obtienen los ángulos de incidencia correspondientes a los canales de polarización VH+VV y otros. Asimismo, el preprocesamiento permite determinar los valores de cada pixel correspondientes a los coeficientes de retrodispersión con los cuales se clasifica las distintas zonas de uso de suelo de manera espacial en la microcuenca Apacheta. Los métodos de clasificación utilizados son: Wishart Dual Pol y Cloude-Pottier Dual Pol. Los resultados obtenidos muestran zonas de uso de suelo debidamente clasificadas mediante los parámetros y validadas mediante imágenes Sentinel-2, con la cual se han georreferenciado y caracterizado ríos, lagunas, bosques, bofedales y otros, consiguiendo establecer características numéricas de cada zona clasificada. La metodología de clasificación supervisada aplicada en Apacheta es efectiva y estima los suelos, así como, ángulos de incidencia y los Σ^0 polarimétricos.

Palabras clave: Radar; Uso de suelo; Sentinel-1; Angulo de incidencia; Retrodispersión.

Abstract

The objective of this research is to estimate the differentiated geometric and spectral parameters in the Sentinel-1 radar images for the classification of land use in the Apacheta micro-basin and to compare the classification methods. The C band is used, and with the help of the SNAP Software tools, the angles of incidence corresponding to the VH+VV and other polarization channels are obtained. Likewise, the reprocessing allows to determine the values of each pixel corresponding to the retroscattering coefficients with which the different land use zones are spatially classified in the Apacheta micro-basin. The classification methods used are: Wishart Dual Pol and Cloude-Pottier Dual Pol. The results obtained show land use zones duly classified by the parameters and validated by Sentinel-2 images, with which rivers, lakes, forests, etc. have been georeferenced and characterized. Wetlands and others, managing to establish numerical characteristics of each classified area. The supervised classification methodology applied in Apacheta is effective and estimates soils, as well as angles of incidence and polarimetric Σ^0 .

Keywords: Radar; land use; Sentinel-1; Angle of incidence; Backscatter.

Introducción

En los andes peruanos de América del sur se ubica la zona del Abra Apacheta, en la provincia de Cangallo (Ayacucho) y Huaytará (Huancavelica), por encima de los 3000 a 5000 ms.n.m. La cobertura del suelo es diversa existiendo zonas de deshielo, poblaciones vegetales, minería, pajonales, roquedales y otros (Cano, 2011). De acuerdo con (Sosa, 2019), Apacheta tiene diversos relieves presentando periódicamente descenso de algunas poblaciones y humedales con el pasar de los años. La modernidad y el avance de satélites permite resolver la comprensión superficial de la Tierra, beneficiándose en agricultura, cambio climático, poblaciones, recursos, etc. Por lo que, en la actualidad existen pocos trabajos de investigación con radar sobre la caracterización en coberturas de suelos en el lugar de cabecera de la cuenca CACHI-APACHETA región Ayacucho. Estas modernas tecnologías ayudaran a reducir tiempo y horas de trabajo. Según Caballero (2018), “los datos (producto) de Sentinel-1 (S1) y Sentinel-2 (S2) es en la actualidad un interesante proyecto de la agencia espacial europea (ESA) que tiene un sensor SAR en banda-C incorporados en los satélites S1-A y de S1-B. Así, todos los equipos de radar de SAR de Sentinel-1 proporciona hasta cuatro tipos o modos de operación con diferentes resoluciones (hasta 5 metros) y coberturas (hasta 400 kilómetros). Asimismo, proporciona polarización” (p. 6). El producto (datos de Sentinel-1) se convirtió en una herramienta importa para el desenvolvimiento de investigaciones geográficas, ambientales, económicas entre otras. La caracterización de la cobertura de suelo en esta investigación se realiza en el lugar de Cabecera de la cuenca CACHI-APACHETA región Ayacucho con ayuda de los datos Sentinel-1. Las imágenes ópticas del sentinel-2 por su parte identifica zonas características de la nuestra región en el rango óptico, es decir, para percibir características morfológicas en Apacheta (Caballero, 2018).

En ese sentido, esta investigación comprenderá un desarrollo progresivo de diferentes etapas que inicia desde la recopilación de información, obtención de las imágenes de radar, descarga de Softwares (SNAP), revisión de artículos, identificación de zonas, estudio de parámetro, revisión cartográfica de Apacheta y comparaciones metodológicas. Para la adquisición de los datos satelitales (imágenes de radar Sentinel-1) son proporcionadas a través de una interfaz gráfica de usuario interactiva disponibilidad gratuitamente por la web oficial de la plataforma Copernicus (Programa de Observación de la Tierra de la Unión Europea). La Comisión Europea (CE) coordina y gestiona el programa Copernicus en colaboración de ESA. Este trabajo de investigación se desarrolla

básicamente con S1 cuyas imágenes serán del año 2016 hasta 2019, el S1 incluye imágenes de banda C (longitudes de onda 3.8 -7.5cm) teniendo un funcionamiento de cuatro tipos de datos con múltiples resoluciones (de 5 m) y cobertura (hasta 400 km) (Hornacek, 2012). Por lo tanto, estas características serán idóneos para la clasificación de la cobertura de uso de suelo en el lugar de cabecera de la cuenca Cachi Apacheta. Importantes características de los datos científicos Sentinel permiten el desarrollo de esta investigación, así como, obtención de imágenes independientemente del clima. El Radar de Apertura Sintética más conocido como SAR tiene la ventaja de trabajar en longitudes de onda no impedidas por la cobertura de nubes o la falta de sol, puede adquirir datos de la tierra durante el día y la noche en cualquier tipo de condiciones climáticas. Sentinel-1 con su instrumento C-SAR puede ofrecer monitoreo confiable en áreas amplias de varios planos orbitales ((CCRS), 2003).

La investigación tiene por objetivo examinar e identificar las características de la superficie terrestre con S1, así como, compararlas con diversas metodologías de clasificación de la cobertura de suelo en lugares de humedad del sitio de cabecera de cuenca Cachi Apacheta, en Ayacucho. Describiremos la aplicación del Radar de Apertura Sintética (SAR) polarimétrica a la teledetección de la Tierra en la clasificación superficial. Los procesamientos en datos de radar S1 son manipuladas en LABTELER (Es el laboratorio de teledetección y energías renovables de FISMA) ubicado en la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga (UNSCH).

CAPITULO I

I. Planteamiento del Problema

1.1. Descripción de la situación problemática

En Perú, exactamente el departamento de Ayacucho se localiza en el sur en la zona central de los andes, cubriendo un total de 43815 km², equivalentemente al 3,4 por ciento del territorio peruano y tiene una altura de 2746 metros sobre el nivel del mar (ms.n.m) aproximadamente. La superficie muestra un relieve muy accidentado, en las punas o altas mesetas andinas su relieve presenta pampas onduladas y en el sur la nevada Sara-Sara. Su suelo es muy accidentado por el cruce de dos cordilleras que lo dividen en tres unidades orográficas: por el norte montañosa y tropical, en el centro abrupta serranía y el sur de altiplanicies (CARPETA GEOREFERENCIAL REGIÓN AYACUCHO, 2015). En la actualidad estimaciones científicas muestran que desde 1900 ha desaparecido el 64% de los humedales del planeta. Por otro lado, existe una convención llamada “Ramsar” que es uno de los patrocinadores del índice de extensión de los humedales, en el cual proporciona indicadores de pérdida en las últimas décadas y mostro que hay una disminución a nivel mundial con más de 1.000 humedales entre 1970 y 2008. En general, la extensión de humedales reducidos es de 40% en promedio (Biosphere, 2012).

Por otro lado, no existe en la actualidad investigaciones sobre clasificación de patrones geométricos con imágenes de radar Sentinel-1 en Ayacucho con sensores remotos de satélite, por ello, la posibilidad de estimar los suelos; que es un parámetro biofísico en el cual describe materiales que cubren el territorio como, por ejemplo, asfalto, ciudades, bosques, vegetación, superficies, ríos, bofedales y otros. Es interesante este tipo de trabajos porque especialmente en los últimos años se modernizan y se desenvuelven más tecnológicamente (Engman, 1991).

Según MINAM (2015), “En 2012, la Autoridad Nacional del Agua (ANA) con aportes del Ministerio del Ambiente (MINAM), estimaron cartográficamente extensiones de humedales en el territorio peruano obteniéndose resultados novedosos como el Mapa Nacional de Humedales. Donde se determinó: lagos, lagunas y cochas con 944 134 ha, bofedales 549 156 ha, aguajales y pantanos amazónicos 6 447 728 ha y humedales costeros (12 173 ha), llegando a un total en hectáreas de 7 953 191 ” (p. 11)

1.2. Formulación del problema

1.1.1 Problema principal

¿En qué medida los parámetros geométricos y espectrales diferenciados estimados en imágenes de radar Sentinel-1, permiten la clasificación del uso del suelo en la microcuenca Apacheta?

1.1.2 Problemas secundarios

- ¿En qué medida la estimación de los parámetros geométricos estimados en imágenes de radar Sentinel-1, permiten la clasificación de uso del suelo en la microcuenca Apacheta?
- ¿En qué medida la estimación de los parámetros espectrales diferenciados en imágenes de radar Sentinel-1, permiten la clasificación de uso del suelo en la microcuenca Apacheta?
- ¿Cuáles son los métodos de clasificación de uso de suelo apropiadas que involucran la medida de parámetros geométricos y espectrales diferenciados estimados en imágenes de radar Sentinel-1?

1.3. Formulación de objetivos

1.3.1 Objetivo General

Estimar los parámetros geométricos y espectrales diferenciados en imágenes de radar Sentinel-1, para la clasificación de uso del suelo en la microcuenca Apacheta.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estimar los parámetros geométricos en imágenes de radar Sentinel-1, para la clasificación del suelo en la microcuenca Apacheta.
- Estimar los parámetros espectrales diferenciados en imágenes de radar Sentinel-1, para la clasificación del suelo en la microcuenca Apacheta.

- Comparar los métodos de clasificación de uso de suelo que involucren los parámetros geométricos y espectrales en una imagen de radar Sentinel-1.

1.4. Justificación (teórica, práctica y metodológica)

1.4.1 Justificación de la investigación

La clasificación de la superficie de suelos en cualquier parte del mundo permite una mejor comprensión de la Tierra como sistema integrado. La modernidad y la tecnología permite reducir trabajos a grande escala, antiguamente era imposible clasificar un terreno de dimensiones mayores. Ahora con el desarrollo de satélites los ciudadanos de todos los ámbitos, responsables políticos, investigadores, empresas privadas y estatales, así como la comunidad científica mundial, podrán beneficiarse en muchos aspectos con la información que proporciona las imágenes de radar Sentinel-1. A continuación se menciona algunos beneficios de la investigación en diferentes ámbitos:

Medio ambiente, agricultura, cambio climático, protección civil, asistencia humanitaria, desarrollo, cooperación, energía, turismo, transporte, planificación urbana y regional.

1.4.2 Importancia de la investigación

En la actualidad, las modernas tecnologías del sistema SAR con microondas para la clasificación de la cobertura de suelos han demostrado tener el potencial de reducir tiempo y horas de trabajo, así como, detectar, rastrear y monitorear cambios relativos. Diferentemente de los datos ópticos (S2), las imágenes radar Sentinel-1 (S1) trabaja en cualquier condición independiente del clima y la luz solar. Por otro lado, la clasificación de la superficie del suelo (en esta investigación) tiene un importante rol en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta (región Ayacucho), porque permite monitorear los ecosistemas existentes.

En definitiva, numerosos estudios se desarrollan para esta temática, con el uso de tecnologías de radar. Un ejemplo resaltante son los experimentos de campo donde se correlaciona espacial y temporalmente la humedad del suelo de superficie bajo distintas coberturas. Humedales terrestres en general tienen un valioso papel en el mundo, como el equilibrio de energía entre animales, plantas, superficies terrestres, atmósfera y otros. Es de allí, su rol importante en la clasificación de la superficie en Apacheta porque nos permitirá analizar con claridad efectos, beneficios y consecuencias (Biosphere, 2012).

1.4.3 Limitaciones de la investigación

Una de las limitaciones de la investigación es el almacenamiento y procesamiento de los datos (o productos soportados) IW, EW, SM SLC y GRD de Sentinel-1B para la clasificación del uso de suelo en zonas de influencia en la microcuenca Apacheta. Los datos proporcionados por *Copernicus Open Access Hub* (ESA) tienen limitaciones en resolución porque pertenecen al nivel 1, son productos disponibles a la mayoría personas. Existen pocos trabajos de investigación relacionados a la clasificación de cobertura de suelo. Por otro lado, otros productos (datos) integrados en el Sentinel-1 como el “S1B_IW_GRDH” de 1.62 GB de tamaño son limitados, proporcionan solo dos tipos de polarización VV y VH. Esto reduce la capacidad de clasificar el suelo en las zonas de la microcuenca Apacheta. Otra de las limitaciones de la investigación son las comparación y validación, existen pocos trabajos científicos con relaciona a la clasificación de suelos con imágenes de radar Sentinel-1 en la microcuenca Apacheta en Ayacucho-Perú, entre otros.

CAPITULO II

II. Marco Teórico

2.1. Antecedentes

De acuerdo con (Caballero, 2018), los radares tienen las herramientas para monitorear las superficies con vegetación, condiciones de terreno y otros con parámetros biofísicos. Para (Arias Cuenca, 2017), la clasificación de cultivos con observaciones multitemporales de radar Sentinel-1 ayuda y facilita la política agraria en un año agrícola. Según Filipponi (2019), el Programa Copernicus se ha convertido en el proveedor de productos o datos espaciales más grande del mundo, proporcionando acceso completo, gratuito y abierto a los datos satelitales, principalmente adquiridos por los satélites Sentinel-1. Los datos numéricos del sistema radar SAR Sentinel tienen una resolución espacial mejorada y una alta frecuencia de revisión, lo que los hace útiles para varias aplicaciones. Sentinel-1 (S1) satélite artificial de la Agencia Espacial Europea (ESA) destinado a monitorear océanos y zonas terrestres fue lanzado al espacio el 3 de abril de 2014 desde la Guayana Francesa, su instrumento principal es el radar de apertura sintética (SAR) en banda C y es utilizado en diversas áreas humanas y ecológicas brindando información de día y noche en variadas condiciones atmosféricas (Torres, 2017). Unos de los principales ensayos de obtención de datos del sistema SAR en ayuda de la NASA SEASAT fueron realizados en 1978. De allí en adelante se incorporaron tecnologías más desarrolladas con distintos dispositivos basando en principios del sistema SAR (Puig, 2001). En otras palabras, el sistema de radar activo puede emitir pulsos en intervalo de frecuencias de microondas cortos y recibir los ecos provenientes de reflexiones de los objetos dando lugar al sistema de radar apertura sintética (Puig, 2001).

Por otro lado, con la evolución de ESA, esta involucró extensiones de capacidades interferométricas para la plataforma de Aplicaciones SentiNel (SNAP), que es un software para de aplicaciones de los datos de Sentinel. Permitiendo también el análisis de datos (series temporales) interferométricas SAR a través del paquete de software *Stanford Method of Persistent Scatterer* (StaMPS) (Foumelis, 2018). Existen otros beneficios de trabajar con estas plataformas (SNAP), por ejemplo, obtener Modelo Digital de Elevaciones (DEM) mediante Interferometría con radar de apertura sintética (InSAR).

Los ajustes y las validaciones pueden ser programados utilizando el lenguaje Python, R-studio y otros (O'Connor, 2020).

2.2. Bases teóricas

Estimar los parámetros geométricos y espectrales con radar Sentinel-1 para la clasificación del suelo con diferentes metodologías es compleja. Así, la dificultad matemática en los datos (imágenes) del sistema radar de Apertura Sintética (SAR) para la clasificación de suelo fue evolucionando con el desarrollo de los satélites. La aplicación a la detección remota de la tierra proporciona una descripción concisa de los fundamentos matemáticos en los datos SAR. La detección remota de la tierra analiza algunos de los conceptos polarimétricos avanzados que permiten inferir más información sobre el terreno del que se está creando la imagen. Sin embargo, para analizar estos datos cuantitativamente y matemáticamente de las señales deben analizarse cuidadosamente (Van Zyl, Synthetic aperture radar polarimetry, 2011).

Según Richards (2009):

“Si la energía incidente está en el rango óptico de las longitudes de onda, es decir, en el visible o infrarrojo cercano: se dispersa en gran parte por la superficie del material que se está fotografiando. Algunas veces hay penetración en un medio, como longitudes de onda cortas en el agua, pero en general la energía recibida por un sensor óptico se refleja desde las superficies. Debido a que la longitud de onda de la energía de microondas utilizada en la detección remota por radar es tan larga en comparación con el utilizado en los sensores ópticos, la energía incidente en la superficie de la tierra en materiales a menudo puede ser penetrados, de modo que la dispersión puede ocurrir desde dentro del propio medio, así como desde la superficie. De hecho, hay varios mecanismos por los cuales la energía puede dispersarse al sensor, y pueden ser bastante complejas. Para poder interpretar las imágenes de radar es necesario tener una comprensión de los principales mecanismos de dispersión y que la energía recibida puede estar relacionada con las características biofísica subyacentes del medio” (p. 135).

No en tanto, existen trabajos de investigación ya desarrolladas en teoría de control, procesamiento digital de imágenes, transferencia radiactiva, SAR y polarimétrico.

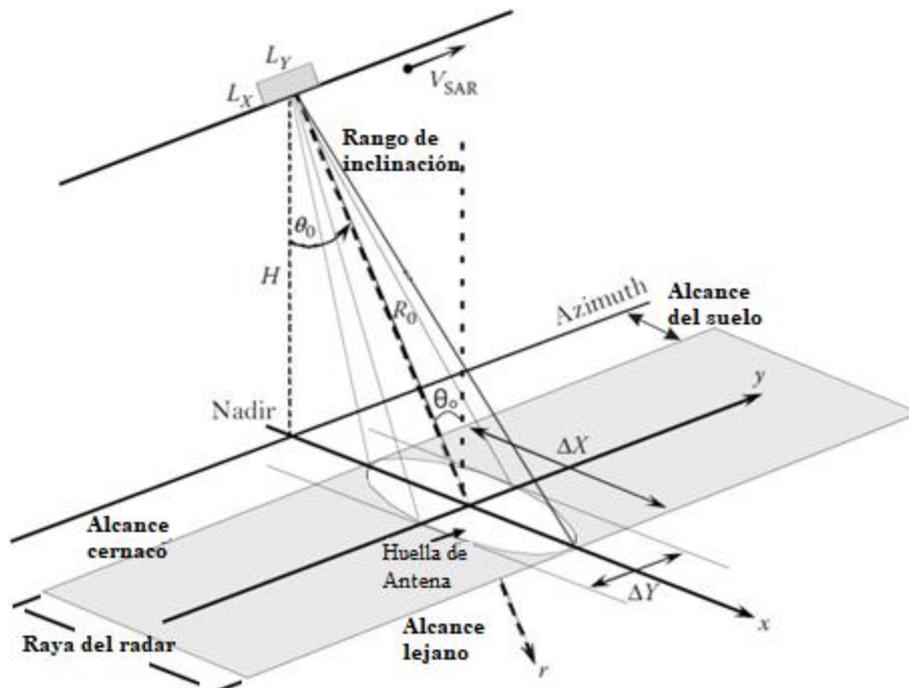
Woodhouse (2012) y Anfinen (2011) por ejemplo desarrollan: procesamiento de información SAR que incluye polarimetría de radar, punto polarimétrico de SAR estadísticas, filtrado de manchas, detección remota oceánica utilizando SAR polarimétrico, supervisado y el terreno del SAR polarimétrico no supervisado y la clasificación del uso de la tierra.

Sin embargo, Lee (2017) experto en procesamiento de señales y telecomunicaciones de la Universidad de Rennes, desarrolla la teoría de microondas e imágenes de radar con énfasis en la polarimetría de radar. Su investigación abarca un amplio espectro desde procesamiento de imágenes de radar (SAR, ISAR), modelado de dispersión polarimétrica, supervisado- Segmentación polarimétrica no supervisada y clasificación a fundamentales y básicos. Autores como Cloude (2002) desarrolla las clasificaciones en base a polarizaciones duales, entropía H y el parámetro α .

2.3. Geometría de adquisición y conceptos básicos de SAR

Los sistemas de radar activo, diferente del pasivo, han sido diseñados para obtener resoluciones espaciales finas mediante la emisión de pulsos electromagnéticos direccionales que luego son recibidas como ondas de señal retrodispersada. La antena transmite pulsos cortos en una dirección específica, teniendo la capacidad de medir la distancia del objeto (Target) (GUEVARA, 2013). Una descripción abreviada de datos de imágenes radar de apertura sintética (SAR) monostático (Figura 2.1.b) se basa en un transmisor de microondas que utiliza la antena como transmisor y receptor. Los SAR se montan en una plataforma móvil que opera de forma lateral, geoméricamente como se ilustra en la Figura 2.1.

Figura 2.1: Geometría de imágenes Radar de Apertura Sintética (SAR).



Nota. Fuente: (Lee y Pottier, 2009)

Las imágenes SAR están ubicados a una distancia H moviéndose a una velocidad V_{SAR} . La antena está orientada 90 grados o perpendicularmente al movimiento del vuelo, llamada "azimut" (y). La punta de la antena se dirige de forma inclinada en función al suelo con un ángulo de incidencia θ_0 . Por otro lado, la línea radial o la dirección de visión del radar (RLOS) es denominado "distancia oblicua" en inglés es llamado *Slant rang* (r). La dimensión o perímetro cubierta por el haz de la antena en el "Rango de tierra" en inglés *Ground range* (x) y azimut (y) son las "Huella de la antena" en inglés es *Antenna footprint*. (Lee & Pottier, 2017)

La plataforma en movimiento a lo largo de la dirección de vuelo proporciona la exploración. El área rastreada por el haz es la *Radar swath* (franja de radar). La huella de la antena es definida a partir de la abertura de la antena (θ_x, θ_y) dadas por

$$\theta_x \approx \frac{\lambda}{L_X} \quad \theta_y \approx \frac{\lambda}{L_Y} \quad (2.1)$$

En el cual, L_X y L_Y son dimensiones físicas de la antena, λ , es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia portadora de la transmisión de señal. Las expresiones aproximadas de la franja de rango (ΔX) y la franja de azimut (ΔY) se puede derivar como

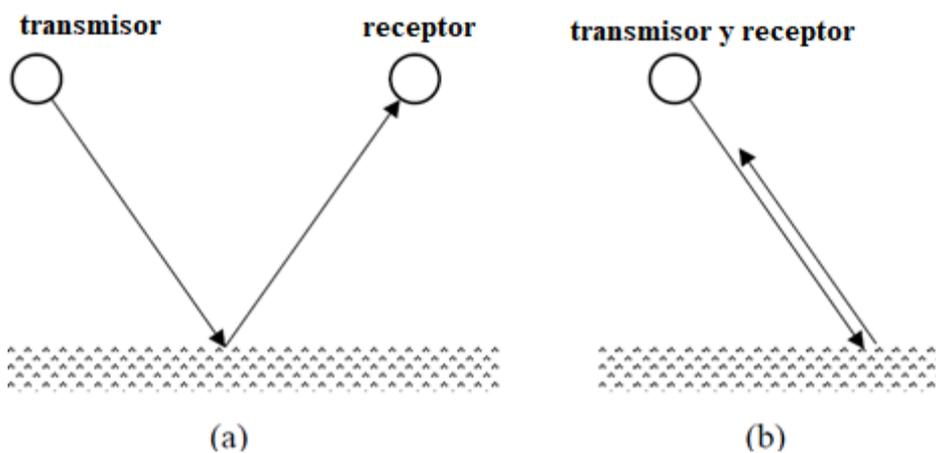
$$\Delta X \approx \frac{R_0 \theta_x}{\cos \theta_0} \quad \Delta Y \approx R_0 \theta_y \quad (2.2)$$

En el cual, R_0 es la distancia entre el radar y el centro de la huella de la antena R_{MIN} y R_{MAX} son respectivamente el “rango cercano” en inglés *Near range* (el más cercano al punto del nadir) y distancias de “largo alcance-*Far range*”.

2.4. Bases del sistema SAR

Los Radares son sistemas activos de iluminación electromagnéticos con tecnología para emitir y medición de radiación que detecta y localiza elementos en la superficie terrestre (O’Connor, 2020). El sistema y sus componentes tienen un transmisor que emite ondas de radiofrecuencia, así como un sensor de recepciones de las energías luego de ser reflejadas. Estos sistemas incorporados en los radares tanto transmisor y receptor siempre son hallados en dos bases o plataformas diferentes, denominada como “biestática”. Asimismo, para el sistema en que el transmisor y receptor son ubicados en un mismo lugar, es decir, el mismo sensor de la antena funciona para transmitir y recibir la energía retro dispersada por el objetivo son llamadas de monostáticas. Los sensores “monostática” son los más utilizados en la actualidad en aplicaciones de sistemas de radar (Richards J. A., 1999). En la Figura 2.2 se detalla ambos sistemas.

Figura 2.2: Sistemas de imágenes de microondas: (a) Biestaticos (b) Monásticos



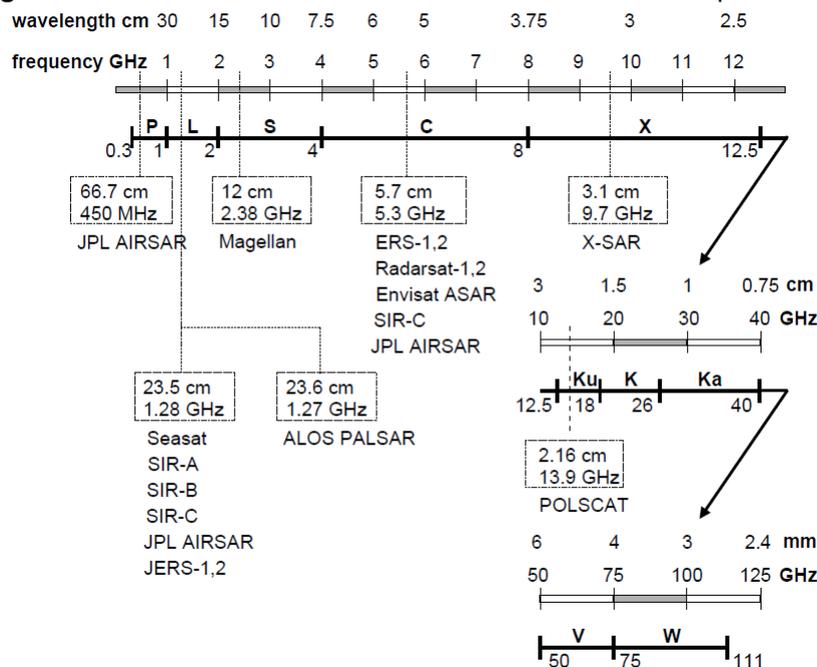
Nota. Fuente: (Richards, 1999)

Las siglas en inglés (*Synthetic Aperture Radar*) o Radar de Apertura Sintética (SAR), generan datos (productos o imágenes Sentinel) en frecuencias de microondas de alta resolución espacial, de la reflectividad compleja de la superficie de la Tierra (Van Zyl,

Synthetic aperture radar polarimetry, 2011). Un sistema de radar SAR proporciona información del rango de microondas (del espectro). Además, estos sistemas activos, proporcionan su propia fuente de iluminación, los procesos naturales no son un impedimento pueden transmitir sobre nubes, lluvias, de noche y otros dándole una gran ventaja. Otros tienen limitaciones como sistemas de satélites ópticos.

Los procesos en Teledetección fueron siempre conectados con desarrollo tecnológico, como los datos ópticos, los sensores remotos (pasivos y activos), los sistemas del vehículo que lo transporta y los sensores de transmisión. Hoy en día, los datos (imágenes) del sistema SAR son un control remoto de microondas coherente y bien desarrollado técnicamente de detección para proporcionar imágenes bidimensionales (2-D) a gran escala de resolución y reflectividad de la superficie terrestre (Solorza, 2013). En la figura 2.3 representa el espectro electromagnético (región de microondas), así como, en longitud de onda (en cm) y frecuencia (en GHz).

Figura 2.3: Bandas de onda utilizadas en la detección remota por radar.



Nota. Fuente: (Richards J. A., 2009)

Las configuraciones múltiples en el sistema radar fue posible a partir del lanzamiento del satélite Envisat que proporciono la ESA y ASAR operadas en la banda C (Aabouch Azougarh, 2018). Envisat proporciono, una mayor capacidad para coberturas superficiales, ángulos de incidencia, polarizaciones y modos de operación. Mejorando en la calidad de estimación y las aplicaciones que utilizan los sistemas SAR. Para los satélites ALOS de la Agencia Japonesa de Exploración Espacial (JAXA) ya no operan desde 2011

junto a su sensor de microondas PALSAR. Actualmente, los productos del satélite RADARSAT2 están operativos que pertenece a la agencia espacial canadiense (CSA), ya que ERS2 desde septiembre 2011 y ENVISAT de la ESA desde abril 2012 ya no están más disponibles (Louet, 1999).

Estimar datos del suelo desde sistemas de radar se denomina “Problemas mal Condicionados”, porque las reflexiones superficiales pueden ser las mismas respuestas electromagnéticas, por ejemplo: arena, piedras, aguas, cobertura de árboles y vegetales, etc. El motivo principal es que las superficies pueden emitir la señal de microondas de manera particular y también depende de la configuración del sensor (Solorza, 2013). Trabajos de humedad fueron proporcionadas en diferentes frecuencias, polarizaciones y ángulos de incidencia, trabajos de (Macelloni, 1999) y (Paloscia, 2002) lo demuestran. Ahora, el coeficiente de retrodispersión es muy sensible a la micro rugosidad del lugar captado y a las plantas. Estas investigaciones fueron desarrolladas para determinar los parámetros adecuados en los sensores. Y las longitudes de onda, la frecuencia, la polarización y los ángulo de incidencia, para disminuir la interferencia al momento de detectar humedad (Alvarez-Mozos, 2005); (Suárez Arévalo, 2016).

En referencia a estudios específicos de humedad, para estimar precisamente la humedad se utilizan ángulos incidentes bajos entre 20 grados y 37 grados, la polarización del radar HH (Horizontal Horizontal) es más detectable que la polarización HV (Horizontal Vertical) al contenido volumétrico de humedad, pero menos sensible que VV (Vertical Vertical) (Holah, 2005). Según Chen (1995), utilizar polarizaciones múltiples o copolarizadas (HH/VV), debería en teoría mejorar la rugosidad superficial.

Los ángulos incidentes relativamente menores, longitudes de onda larga en banda L y polarizaciones (HH y HV) son los aspectos más importantes para los para hallar humedad (Solorza, 2013). El contenido de humedad afecta a la señal de retrodispersión a lo largo del tiempo. En ese sentido, se desarrollaron técnicas de detección con series temporales como en la investigación de productos del modo (Wide Swath) del sensor Envisat ASAR1, para la estimación de Humedad del uso de suelo con Sentinel 1 (Hornacek et al., 2012).

2.4.1. Resolución espacial

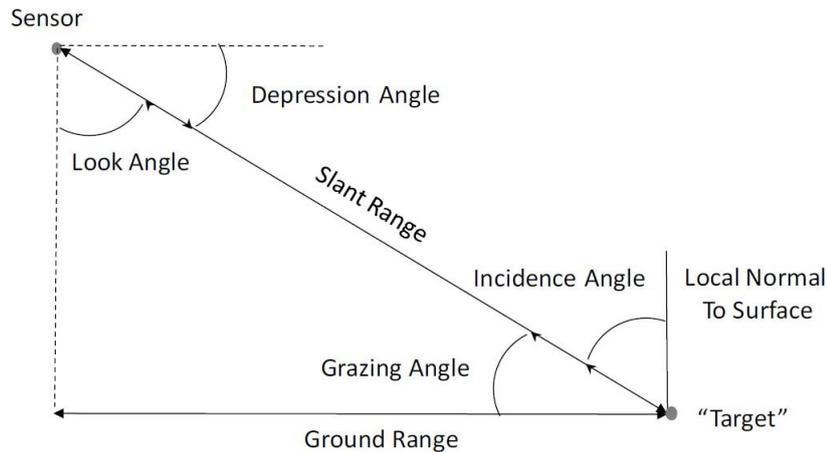
En sistemas radar un transmisor genera un pulso de alta potencia que es conducido a la antena a través de un circulador, donde se envía el pulso al blanco de interés y después

devuelve parte de la energía a la antena. La energía que se redirige al receptor es procesada o almacenada. Por lo general los radares están montados sobre sistemas móvil, aviones o satélites (Rosell, 2018). Cuando el radar hace una trayectoria, es llamada azimut, genera una huella, *Swath*. Generalmente a lo largo de la superficie del suelo como se muestra en la Figura 2.3. El haz de la antena está siempre orientado con un ángulo en función del suelo, 90 grados con dirección al vuelo, definiendo así el range. Esta es la mínima separación entre dos puntos en el range que el radar separa. Por lo tanto, la resolución en range δ_r depende de la duración del pulso radar τ_p , o del ancho de banda B de la señal,

$$\delta_r = \frac{c}{2B} \quad \delta_r = r_{slant} \quad (2.3)$$

c es la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas y se divide entre 2 por el recorrido de la onda, cuando va y viene (Lee, 2017). Existen dos significados diferentes para el término rango en imágenes de radar, rango de inclinación y rango de terreno, como se muestra en la Figura 2.4. Los rangos de inclinación se miden a lo largo de la línea que conecta el radar y el objeto (objetivo o el dispersor) que se está fotografiando. El segundo uso del término, rango de terreno que se refiere al rango a lo largo de una superficie lisa (el suelo) para el dispersor (Gutiérrez Núñez, 2018). El rango de terreno se mide desde la llamada pista nadir, que representa la línea descrita por la posición directamente debajo de la plataforma de imágenes de radar. Por otro lado, el ángulo de visión se define como el ángulo entre la dirección vertical y el haz del radar en la plataforma del radar. Se define ángulo de incidencia como el ángulo entre la dirección vertical y el vector de propagación de la onda del radar en la superficie (como se muestra en la Figura 2.4). En el caso de los sistemas espaciales, se debe tener en cuenta la curvatura de la superficie; esto conduce a un ángulo de incidencia que siempre es más grande que el ángulo de aspecto para superficies planas. Si la topografía está presente (es decir, si la superficie no es plana), el ángulo de incidencia local puede variar en los datos o productos del radar de píxel a píxel (Podest, Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética, 2017).

Figura 2.4: Definición de algunos términos comunes de imágenes de radar.



Nota. Fuente: (Zyl, 2011)

2.5. Ecuación de radar

En sistemas SAR típicos a bordo de vehículos espaciales y aerotransportados, se utilizan longitudes de pulso físico de varias decenas de microsegundos, mientras que los anchos de banda de varias decenas de mega Hertz ya no son infrecuentes para los sistemas a bordo de vehículos espaciales. La resolución de la pista en el caso del radar es independiente de la distancia entre la escena y el instrumento del radar. La expresión general para determinar la cantidad de potencia reflejada que mide el receptor del radar es descrita a través de la llamada ecuación de radar (Zozaya, 2017). De esa manera, uno de los factores clave que determinan la calidad de los datos (imagen) de radar es la correspondiente relación señal ruido (SNR), comúnmente llamada SNR. Es equivalente al brillo de una escena fotografiada con una cámara (Sánchez Orduña, 2011). El ancho de banda de ruido suele ser más grande que el ancho de banda de transmisión. Una forma común de caracterizar un sensor de radar de imágenes es determinar la sección transversal de retrodispersión de la superficie " σ_N ", que da una $SNR = 1$. Esto se denomina sección transversal de la dispersión de ruido equivalente. Define el retorno de superficie más débil que se puede detectar y, por lo tanto, identifica el rango de unidades de superficie de las que se puede obtener una imagen (Sánchez Orduña, 2011), (Van Zyl, Synthetic aperture radar polarimetry, 2011).

2.5.1. Radar de Apertura Real

El sensor de radar de imágenes de apertura real utiliza una antena que ilumina la superficie a un lado de la pista de vuelo. La antena generalmente tiene un haz de ventilador que

ilumina un área con forma elíptica muy alargada en la superficie, como se muestra en la Figura.2.3, el área iluminada a través de la pista define la franja de imagen. Para una antena de ancho W que opera a una longitud de onda λ , el ancho angular del haz en el plano de rango viene dado por (Van Zyl, Synthetic aperture radar polarimetry, 2011):

$$\theta_r \approx \frac{\lambda}{W} \quad (2.4)$$

y la huella de la superficie resultante o franja S está dada por

$$S \approx \frac{h\theta_r}{\cos^2\theta} = \frac{h\lambda}{W\cos^2\theta} \quad (2.5)$$

donde h es altura del sensor sobre la superficie del suelo, θ ángulo desde el centro del haz de iluminación a la vertical (el ángulo de la mirada en el centro de la franja), donde se supone que θ_r es muy pequeño. Si el pulso tiene una longitud τ_p en el tiempo, y la señal incide en el suelo en un ángulo θ_i , la longitud proyectada del pulso en el suelo es

$$l_g = \frac{c\tau_p}{2\text{sen}\theta_i} \quad (2.6)$$

Por lo tanto, la ecuación del radar en el caso de un radar de apertura real se convierte en

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r c \lambda^2 \lambda R c \tau_p}{(4\pi)^3 R^4 L 2\text{sen}\theta_i} \sigma_0 \quad (2.7)$$

La sección transversal de retrodispersión normalizada σ_0 se define como

$$\sigma_0 = \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{4\pi R^2}{A_0} \frac{|E_r|^2}{|E_i|^2} \quad (2.8)$$

donde A_0 es el área de la superficie iluminada, P_t densidad de potencia incidente, G_t ganancia de potencia de la antena transmitida, R la distancia a la antena, E_r es el campo eléctrico reflejado y E_i es el campo eléctrico incidente. Esto muestra que cuando un radar de apertura real representa un área extendida, la potencia recibida disminuye a medida que el rango alcanza la tercera potencia (Penttilä, 2006).

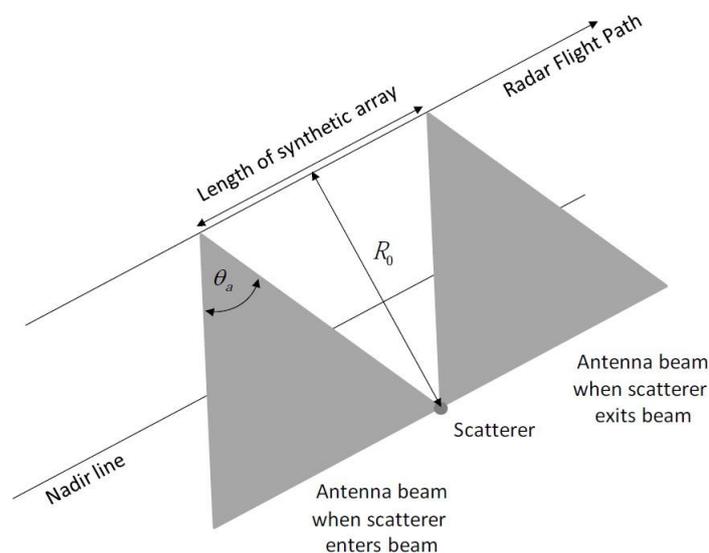
2.5.2. Radar de Apertura Sintética

El radar de apertura sintética se refiere a una implementación particular de un sistema de radar de imágenes que utiliza el movimiento de la plataforma de radar y el procesamiento de señales especializado para generar imágenes de alta resolución. Antes del

descubrimiento del radar de apertura sintética, los radares de imágenes principales operaban usando el principio de apertura real y eran conocidos como radares de apertura lateral (SLAR) (Podest, 2017). Según, Carl Wiley (1985), de la Goodyear Aircraft Corporation, es generalmente reconocido como la primera persona en describir el uso del análisis de frecuencia Doppler de señales de un radar coherente en movimiento para mejorar la resolución a lo largo de la trayectoria. Señaló que dos objetivos en diferentes posiciones a lo largo de la trayectoria estarán en ángulos diferentes en relación con el vector de velocidad de la aeronave, lo que resultará en diferentes frecuencias Doppler. Usando este efecto, los objetivos se pueden separar en la dirección a lo largo de la pista en función de sus diferentes Frecuencias Doppler. Esta técnica se conocía originalmente como agudeza del haz Doppler, pero luego se conoció como radar de apertura sintética (SAR).

La principal diferencia entre los radares de apertura real y sintética es, por lo tanto, en la forma en que se logra la resolución de azimut. Sin embargo, el mecanismo de generación de imágenes a lo largo de la trayectoria y la resolución resultante de la trayectoria a lo largo son diferentes para el caso del radar de apertura real y sintético. Cuando el radar se mueve a lo largo de la trayectoria de vuelo, transmite pulsos de energía y registra las señales reflejadas (Van Zyl, 2011), como se muestra en la Figura 2.3. Cuando se procesan los datos del radar, la posición de la plataforma del radar se tiene en cuenta al agregar las señales para integrar la energía para la dirección a lo largo del camino. Un ejemplo a considerar con su geometría es la Figura 2.7.

Figura 2.5: Radar de Apertura Sintética e integrada la señal dispersada. El dispersor permanece en el haz de la antena.



Nota. Fuente: (Zyl, 2011)

Cuando el radar se mueve a lo largo de la trayectoria de vuelo, la distancia entre el radar y el dispersador cambia, con el mínimo distancia que se produce cuando el dispersor está directamente al costado de la plataforma del radar. La fase de la señal del radar está dada por $-4\pi R(s)/\lambda$. La distancia cambiante entre el radar y el dispersor significa que después de la compresión de rango, la fase de la señal será diferente para las diferentes posiciones a lo largo del camino de vuelo. Esta distancia cambiante se puede escribir como.

$$R(s) = \sqrt{R_0^2 + v^2 s^2} \quad (2.9)$$

donde R_0 es el rango más cercano al dispersor, v es la velocidad de la plataforma del radar y s es el tiempo a lo largo de la trayectoria de vuelo (el llamado tiempo lento) con tiempo cero en el momento del acercamiento más cercano (Márquez Lozano, 2016).

2.6. Distorsiones radiométricas y geométricas

En esta sección se resume las anomalías comúnmente integradas en la imagen de radar Sentinel 1 usadas para el proyecto de investigación. Estas imágenes de radar tienen que ser corregidas, decodificadas y luego procesadas según los objetivos requeridos. Algunos de estos tienen similitud a los sistemas ópticos como el desenfoque debido al movimiento de la escena. Las ambigüedades de alcance y azimut que son exclusivos de los sistemas de radar.

2.6.1. Distorsiones radiométricas

Desvanecimiento y el *Moteado* son procesos inherentes a imágenes de radar Sentinel-1, o conocido como “ruido”, esta malogra la calidad de la imagen. El *desvanecimiento* es el cambio en el retroceso de la fase del pulso recepcionado, influenciado por varios reflectores en un mismo pixel de resolución (Richards J. A., 2009). Las interferencias constructivas, así como las destructivas siempre están presentes los datos (imágenes Sentinel-1) como *moteado* brillante y oscuro, varias imágenes utilizadas para analizar un mismo punto pueden llevar al deterioro y a la baja calidad por consecuencia del moteado y desvanecimiento (Díaz Santana, 2016).

Por otro lado, las señales devueltas al radar siempre están sujetas a variaciones por causa de la interacción de las ondas electromagnéticas (OEM) como por ejemplo suelos rocosos (Engman, 1991). En áreas homogéneas dentro de los datos (pixeles de imagen), existe

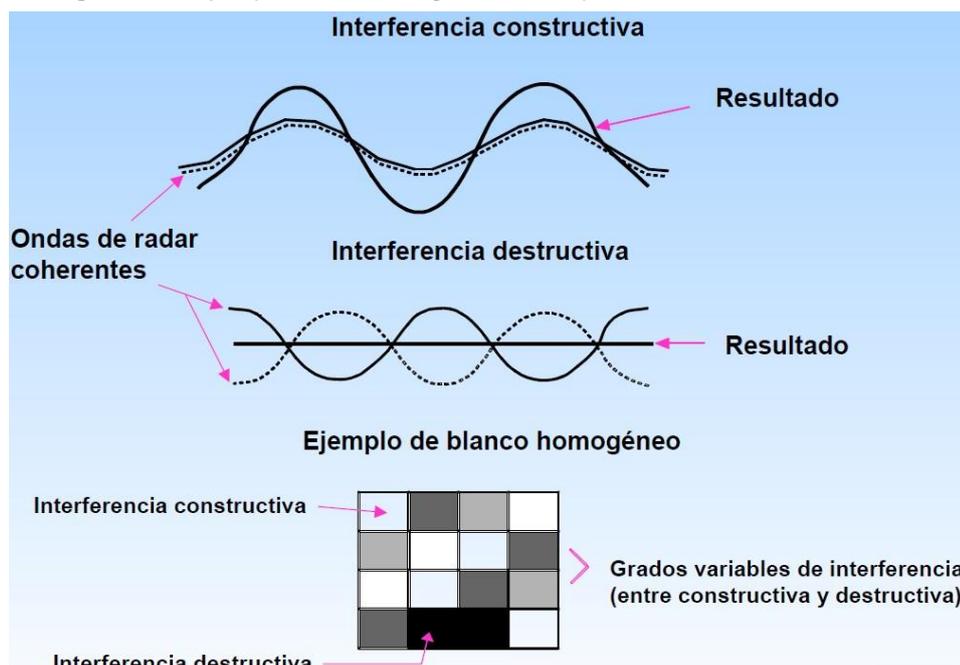
interferencia de las ondas electromagnéticas (OEM) coherentes que provienen desde distintos objetivos dentro de un pixel (Filipponi, 2019). Esto es, que al ser los blancos de la superficie reflectores irregulares, los pulsos emitidos regresan con distintas distancias y diferentes fases (CCRS, 2003). Es así que, dependiendo del valor de fase, interferirán constructiva, parcial o destructivamente, como lo explica la Figura 2.6.

El fenómeno “*speckle*”, es básicamente interferencia a gran escala (Podest, 2017). Este ruido está físicamente ligado a la naturaleza coherente de los sensores SAR e imparte una aleatoriedad tal que la magnitud de cada pixel obedece una distribución de Rayleigh (Rosell, 2018). Esto también es llamado por otros autores como el “Ruido de Sal y Pimienta” incorporada en la imagen radar Sentinel-1 en blanco y oscuro representando un gran obstáculo para la clasificación e interpretación de las imágenes en donde el *speckle* es ruido multiplicativo, y no aditivo, es muy difícil de extraer (Podest, Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética, 2017).

Existen métodos o técnicas para reducir estas distorsiones y reducción del *speckle*. Una está relacionada al procesamiento de la imagen luego del proceso de su formación y en el nivel de procesamiento *Single Look Complex* donde es posible dividir esa escena en diferentes imágenes promediadas (Lee, 2017). Cada uno de estos looks también está afectado por ruido *speckle*, pero la posibilidad de sumar y promediar estas miradas en una sola resultante permite reducir el ruido *speckle* presente en la imagen, conocido como *Multilooking* (Woodhouse, 2012).

Este procedimiento tiene como resultado la mejora de la calidad radiométrica de la imagen reduciendo el *speckle*. Otras técnicas de corrección son aplicando filtros específicos, de paso bajo y adaptivos, que se basan en modelos estadísticos (GUEVARA, 2013).

Figura 2.6: Ejemplo de una imagen SAR en píxeles sobre interferencias.



Fuente: Centro Canadiense de Percepción Remota (CCPR, 2003)

2.6.1.1. Ambigüedades de Rango y Azimut

Un radar imagina una superficie registrando la línea de eco en línea con pulsos sucesivos. El borde anterior de cada eco corresponde al borde cercano de la escena de la imagen; el extremo de la cola del eco corresponde al borde más alejado de la escena. La longitud del eco (es decir, el ancho de la franja de la escena fotografiada) está determinada por el ancho del haz de la antena o el tamaño de la ventana de datos utilizada en la grabación de la señal (España, 2004). La sincronización exacta de la recepción de eco depende del rango entre el sensor y la superficie de la imagen que se está grabando. Si la sincronización de los pulsos o la extensión de los ecos es tal que el borde anterior de un eco se superpone con el final de la cola anterior, entonces el borde lejano de la escena se dobla sobre el borde cercano de la escena. Esto se llama ambigüedad de rango (Van Zyl, 2011).

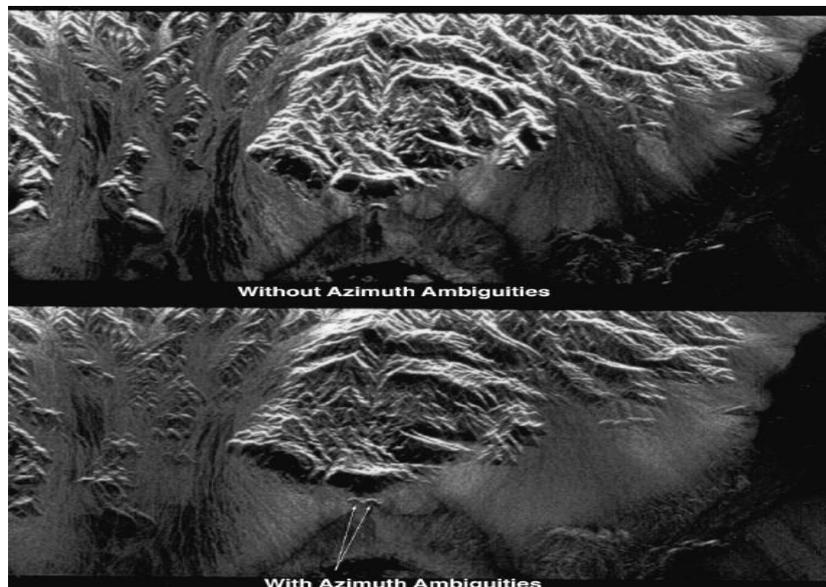
2.6.2. Distorsiones geométricas

En las distorsiones geométricas son relacionadas comúnmente con su geometría de adquisición, especialmente en zonas con pendiente de montañas o de relieve pronunciado (Díaz Santana, 2016). Estos son conocidos como acortamiento (*foreshortening*),

inversión (*layover*) y sombra (*shadow*) (Geotecnología, 2005), (Euillades y Blanco, 2005).

En efectos de geométricos y proyección las imágenes de radar parecen muy similares a las imágenes ópticas, un examen detallado muestra rápidamente que los dos sensores proyectan formas y patrones geométricos de manera diferente. Esta diferencia es particularmente aguda en terrenos escarpados. Si se conoce la topografía, una imagen de radar se puede volver a proyectar en un formato idéntico a una imagen óptica, lo que permite el registro de píxeles de imagen. Sin embargo, en terrenos extremadamente escarpados, la naturaleza de la proyección de imágenes de radar conduce a distorsiones que a veces no se pueden corregir sin conocer las elevaciones del terreno. En la imagen del radar, dos píxeles adyacentes en la dimensión del rango corresponden a dos áreas en la escena con un rango ligeramente diferente al sensor. Esto tiene el efecto de proyectar la escena en una geometría cilíndrica en el plano de la imagen, lo que conduce a distorsiones (como se muestra en la Figura 2.7).

Figura 2.7: Ejemplo de bordes del espectro de azimuth pliegándose sobre si mismos creando imágenes fantasma.

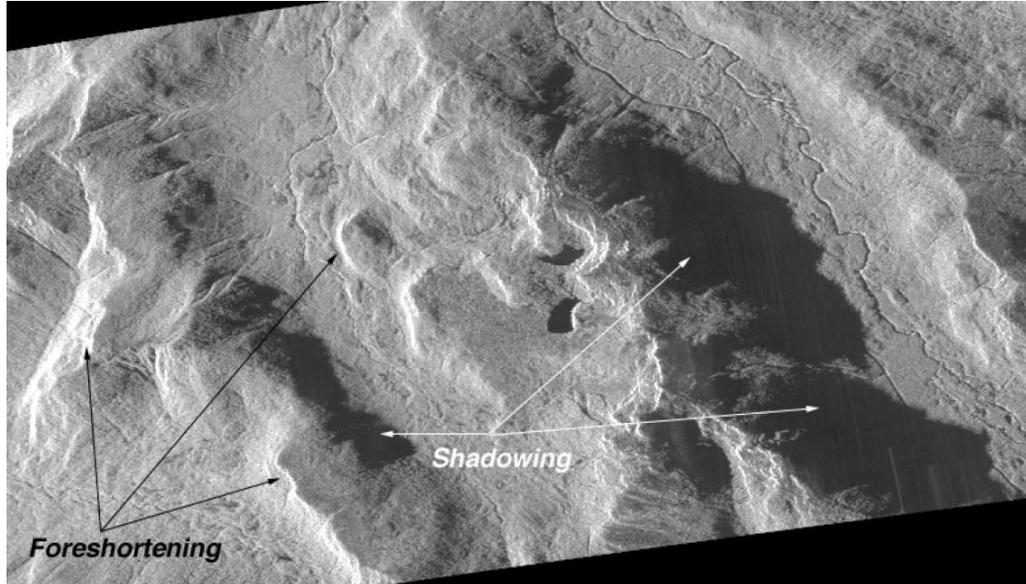


Fuente: (Zyl, 2011)

La Figura 2.8 es ejemplo de acortamiento y sombreado en donde el efecto de acortamiento aparece cuando las pendientes son orientadas hacia el sensor en el instante de la toma de imagen (Van Zyl, Synthetic aperture radar polarimetry, 2011). Las laderas aparecen comprimidas en la dirección de la inclinación de rango (*Slant Range*). Tenga en cuenta

que, dado que el radar proporciona su propia iluminación, el sombreado del radar es una función de la dirección de la vista del radar en relación con el terreno y no depende del ángulo del Sol. La imagen siguiente fue iluminada desde la izquierda.

Figura 2.8: Imagen de NASA / JPL AIRSAR muestra el acortamiento y sombreado.



Fuente: Imagen cortesía de la Jet Propulsion Laboratory

2.7. Polarimetría SAR

Los sistemas de radar de apertura sintéticas (SAR) operan cuando se emite un pulso electromagnético, calculando el tiempo y la intensidad del eco reflejado midiendo su amplitud y fase (Díaz Santana, 2016). Es decir, esa onda electromagnética emitida está compuesta por un campo eléctrico y un campo magnético que cambio en la década de 1980 con la introducción de técnicas avanzadas de radar, como la polarimetría y la interferometría (Lee, 2017).

Aunque las técnicas ya se habían demostrado mucho antes, la polarimetría por radar solo se convirtió en una herramienta de investigación operativa con la introducción del sistema radar de apertura sintética aerotransportada de la NASA /JPL (AIRSAR) a principios de los años ochenta. La polarimetría de radar se probó desde el espacio con los dos vuelos SAR de Spaceborne Imaging Radar C y X-band (SIR-C/X) a bordo del transbordador espacial Endeavor en abril y octubre de 1994. En esta sección, describimos los principios básicos de La polarimetría SAR para la clasificación de suelos.

2.7.1. Propagación de una onda electromagnética plana monocromática

En las ecuaciones de propagación el comportamiento espacio-temporal de las ondas electromagnéticas se rige por el conjunto de ecuaciones de Maxwell definidas como

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad (2.10)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{J}_T(\mathbf{r}, t) + \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad (2.11)$$

$$\nabla \times \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \rho(\mathbf{r}, t) \quad (2.12)$$

$$\nabla \times \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (2.13)$$

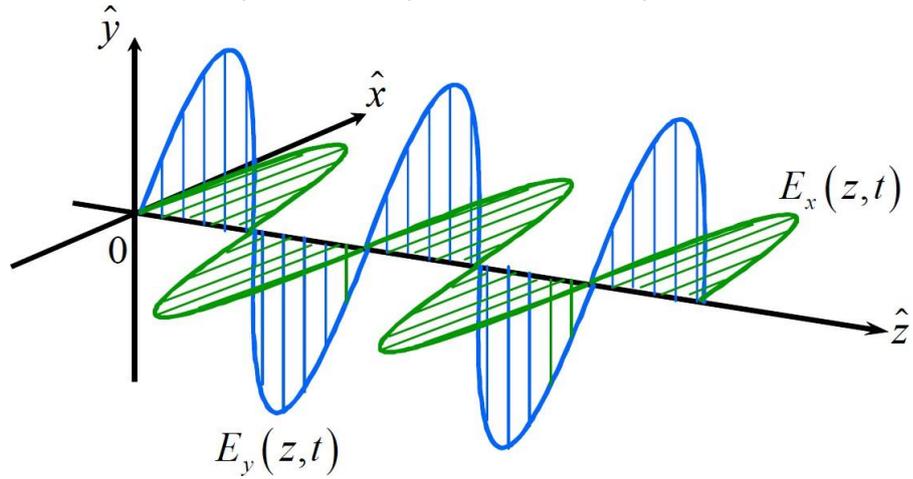
dónde $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$, $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$, $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$, y $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ están el campo eléctrico de la onda, el campo magnético, la inducción eléctrica y la inducción magnética respectivamente. La densidad de corriente total $\mathbf{J}_T(\mathbf{r}, t) = \mathbf{J}_a(\mathbf{r}, t) + \mathbf{J}_c(\mathbf{r}, t)$ se compone de dos términos. El primero, corresponde a un término fuente, mientras que la densidad de corriente de conducción, $\mathbf{J}_c(\mathbf{r}, t) = \sigma \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ depende de la conductividad del medio de propagación σ . El campo escalar $\rho(\mathbf{r}, t)$ representa la densidad de volumen de las cargas libres.

2.7.2. Polarización Elíptica

Antes de presentar la polarización elíptica se pueden especificar tres tipos de polarizaciones:

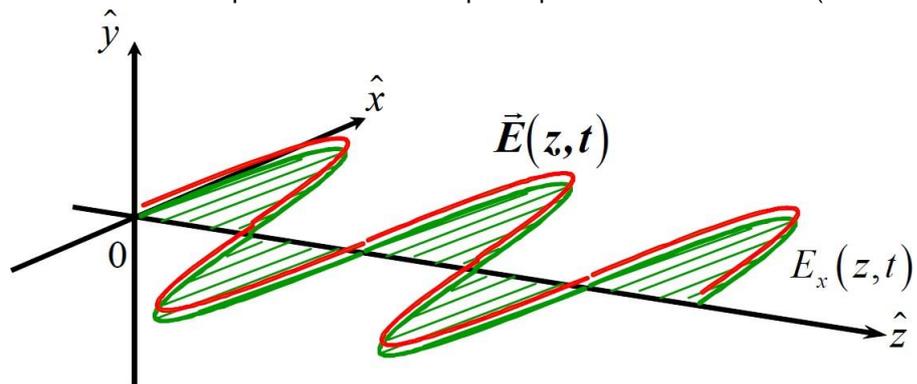
- **Polarización lineal:** El campo eléctrico es una onda sinusoidal inscrita en un plano orientado con un ángulo θ con respecto al eje \hat{x}
- **Polarización circular:** En este caso, la onda gira circularmente alrededor del eje \hat{z} como se muestra en la Figura 2.11, tiene un módulo constante y está orientada con un ángulo $\theta(z)$ con respecto al eje \hat{x}
- **Polarización elíptica:** En el caso de polarización elíptica, la onda describe una trayectoria helicoidal alrededor del eje \hat{z} .

Figura 2.9: Evolución espacial de componentes de ondas planas monocromáticas.



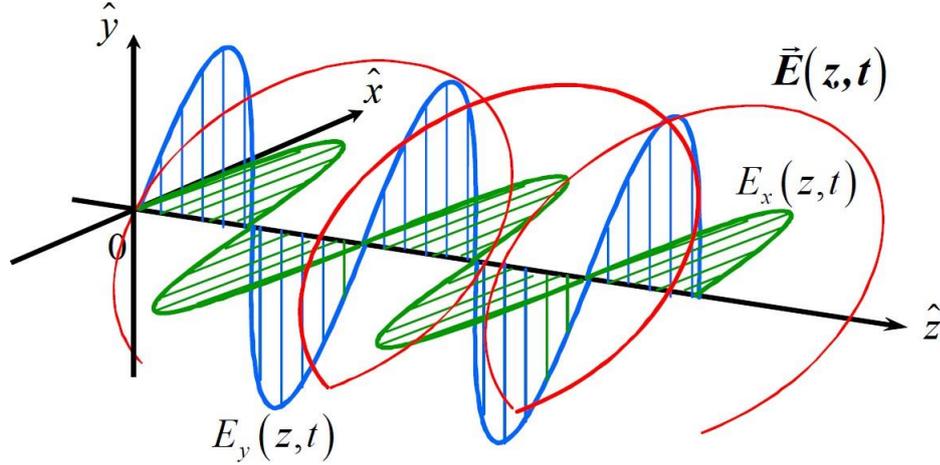
Fuente: (Lee & Pottier, 2019)

Figura 2.10: Evolución espacial de una onda plana polarizada linealmente (horizontal).



Fuente: (Lee & Pottier, 2019)

Figura 2.11: Evolución espacial de una onda plana polarizada circularmente.



Fuente: (Lee & Pottier, 2019)

2.7.3. Vector de Jones

La representación de un plano de campo eléctrico monocromático en forma de un vector de Jones tiene como objetivo describir la polarización de la onda utilizando la cantidad mínima de información (Woodhouse, 2012). El vector de tiempo-espacio $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$, y se puede escribir como

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \begin{bmatrix} E_{0x} \cos(\omega t - kz + \delta_x) \\ E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta_y) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \text{Re}\{\mathbf{E}(z)e^{j\omega t}\} \quad (2.14)$$

Se define un vector de Jones $\vec{\mathbf{E}}_J$ del vector de campo eléctrico complejo $\mathbf{E}(z)$ como

$$\vec{\mathbf{E}}_J = \mathbf{E}(z)|_{z=0} = \mathbf{E}(0) \quad (2.15)$$

Las definiciones de un estado de polarización de los descriptores de la elipse de polarización o de un vector de Jones son equivalentes. Un vector de Jones se puede formular como una función de vector complejo 2-D de las características de la elipse de polarización.

2.7.4. Vector de Stokes

Los parámetros de Stokes proporcionan un medio muy conveniente para describir las relaciones de densidad de potencia en una onda electromagnética en el radar, ya sea la onda utilizada para irradiar la superficie de la tierra o lo que se dispersa. Para una señal

de frecuencia única (monocromática), como suponemos que es el caso de la detección remota por radar (Lee, 2017).

Es necesario caracterizar la polarización de una onda por mediciones de potencia (cantidades reales). Esta caracterización es llevada a cabo por el llamado vector de Stokes. Una matriz Hermitiana de 2×2 puede generarse a partir del producto externo de un vector de Jones \vec{E}_J con su transposición conjugada, con:

$$\vec{E}_J \cdot \vec{E}_J^{*T} = \begin{bmatrix} E_x E_x^* & E_x E_y^* \\ E_y E_x^* & E_y E_y^* \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

En consecuencia, este vector de stokes es capaz de caracterizar el estado de polarización de una onda mediante cuatro parámetros reales.

2.7.5. Operadores de dispersión de vectores electromagnéticos

Ecuación de Radar

Una OEM (onda electromagnética) que viaja en el tiempo y el espacio puede alcanzar un objetivo en particular y luego interactuar con él y como consecuencia de esta interacción, parte de la energía transportada por la onda incidente es absorbida por el propio objetivo (blanco), mientras que el resto se renuncia como una nueva onda electromagnética. Entonces, debido a la interacción con el objetivo, las propiedades de la onda re dirigidas pueden ser diferentes de las de la onda incidente (Pérez, 2010). Puntualmente estamos interesados en los cambios relacionados con la polarización de la onda y un objetivo dado. Dado la configuración del radar, como se muestra en la Figura 2.12, puede ocurrir que el objetivo de interés sea más pequeño que la huella del sistema de radar. En esta situación, consideramos al objetivo como un dispersado aislado y, desde el punto de vista del intercambio de energía, este objetivo se caracteriza por la denominada sección transversal del radar. No obstante, podemos encontrar situaciones en las que el objetivo de interés es significativamente mayor que la huella del sistema de radar en estas ocasiones, es más conveniente caracterizar el objetivo independientemente de su alcance. Por lo tanto, en estas situaciones, el objetivo se describe mediante el llamado coeficiente de dispersión.

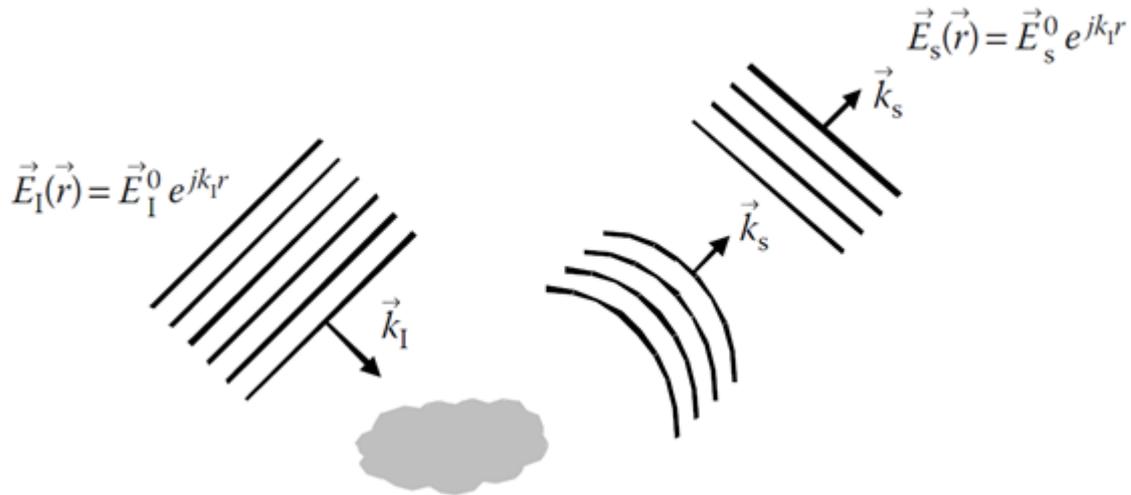
La forma más primordial descrita entre onda electromagnética y su objetivo o blanco es la llamada ecuación de radar. Esta ecuación establece la relación entre la potencia que el objetivo intercepta desde la onda electromagnética incidente E_I y la potencia radar por el

mismo objetivo en forma de la onda E_S dispersada (Lee, 2017). La ecuación de radar presenta la siguiente forma

$$P_R = \frac{P_t G_t(\theta, \phi)}{4\pi r_T^2} \sigma_0 \frac{A_{ER}(\theta, \phi)}{4\pi r_R^2} \quad (2.17)$$

En el cual P_R representa la potencia detectada en el sistema receptor.

Figura 2.12: Interacción de una onda electromagnética y un objetivo.



Las variables en la ecuación 2.17 son la potencia de transmisión P_T , la ganancia de la antena de transmisión G_T , la Apertura efectiva de la antena receptora A_{ER} , la distancia r_T entre el sistema de transmisión y el objetivo, la distancia r_R entre el objetivo y el sistema de recepción, y los ángulos esféricos (θ, ϕ) que definen la dirección de observación y corresponden respectivamente a los ángulos de acimut y elevación (Gutiérrez Núñez, 2018). La sección transversal del radar, σ , determina los efectos del objetivo de interés en el equilibrio de potencias establecido por la ecuación del radar. La sección transversal del radar de un objeto se define como la sección transversal de un dispersor isotrópico idealizado equivalente que genera la misma densidad de potencia dispersa que el objeto en la dirección observada. La sección transversal del radar está dada por (Cloude, 2002)

$$\sigma = 4\pi r^2 \frac{|E_S|^2}{|E_I|^2} \quad (2.18)$$

La sección transversal del radar denominado como, σ , de un objetivo es una función de una gran cantidad de parámetros que son difíciles de considerar individualmente. El primer conjunto de estos parámetros está conectado con el sistema de imágenes:

- Frecuencia de onda f .

- Configuración de imágenes, direcciones de incidentes (θ_i, ϕ_i) y dispersión (θ_s, ϕ_s) .

2.7.6. Polarizaciones de la transmisión de onda de radar

La polarización depende de la configuración de la antena y hace referencia a la orientación espacial del campo eléctrico, en este caso en una OEM plana, y que frecuentemente está orientada horizontal \mathbf{H} o verticalmente \mathbf{V} mientras el campo oscila (Márquez Lozano, 2016). Para el caso de los Sentinel-1 de sistemas SAR actuales, las antenas de emisión de la OEM están diseñadas para controlar la dirección del campo eléctrico emitido (Lee, 2017). Es decir, que un sistema SAR puede transmitir las ondas de radar en polarizaciones horizontal \mathbf{H} y vertical \mathbf{V} (Chen, 1995). Asimismo, el sensor puede recibir el retorno de la onda en ambos canales H o V, y en algunos casos, en ambas polarizaciones inclusive. Esto produce señales co-polarizadas (HH y VV) en el primer caso y señales cross-polarizadas (HV y VH) en el segundo caso (Lee, 2017). Los productos de Sentinel-1 tienen las combinaciones posibles:

- HH es una transmisión y recepción horizontal
- HV es una transmisión horizontal y recepción vertical
- VH es una transmisión vertical y recepción horizontal
- VV es una transmisión y recepción vertical.

En una OEM (onda electromagnética) en una polarización horizontal plana H, si el vector del campo eléctrico cae en la misma dirección que el plano de incidencia, se dice que el tipo de polarización es “paralela”; mientras que, si el vector cae en un ángulo recto, respecto del ángulo de incidencia, se dice que el tipo de polarización es “perpendicular” (Pérez, 2010).

En sistemas radar (SAR), ambas son denominadas polarizaciones “horizontal” y “vertical”. Un SAR de polarización completa, también denominado full polarimétrico o quad-pol, está adaptado para emitir y recibir la onda en las cuatro combinaciones posibles HH, VV, HV y VH. Esto significa que un blanco de la superficie tendrá cuatro respuestas diferentes para cada tipo de polarización (Wiley, 1985).

Entonces, estos pueden expresarse con una matriz de polarización que contendrá la información de la magnitud física del blanco (Richards J. A., 1999)

$$\mathbf{S}_{(\hat{x}, \hat{y})} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

En la base cartesiana (\hat{x}, \hat{y}) o en la base vertical horizontal (\hat{u}_H, \hat{u}_V) la matriz \mathbf{S} de 2×2 de retrodispersión compleja se puede expresada como la ecuación 2.19. Los elementos S_{HH} y S_{VV} producen el retorno de potencia en los canales copolarizados y los elementos S_{HV} y S_{VH} producen el retorno de potencia en los canales polarizados cruzados. Si se intercambian el papel de las antenas transmisora y receptora, el teorema de reciprocidad (en el caso de un medio de propagación recíproca) requiere que la matriz de retrodispersión sea simétrica, con $S_{HV} = S_{VH}$.

2.7.7.1. Penetración de ondas electromagnéticas

Las cualidades de imágenes Sentinel-1 de SAR está relacionado a la sensibilidad de las propiedades dieléctricas del blanco u objetivo los cuales a su vez responden a los cambios en el contenido de humedad o agua (Cloude, 2002). La alta constante dieléctrica por presencia de agua en el suelo frena la penetración de la onda incidente, entonces, cuanto más húmedo está el suelo, hay una menor penetración (Alvarez-Mozos, 2005). La profundidad de penetración de la onda incidente en los suelos es una función que depende del contenido de humedad del suelo y la longitud de la onda incidente (Woodhouse, 2012). Se ha observado que cuando la humedad es mayor la profundidad de penetración de la onda radar baja a 1 cm para frecuencias de 10 GHz, y a 10 cm para frecuencias menores de 1,3 GHz (Carrascal, 1986); (Ulaby et al., 1986). Ahora, para el caso de la Banda L (1.3 GHz) la penetración de la onda decrece de 1m, con un contenido de 1% de humedad, a 6cm con un 40 %. En la práctica, según (Solorza, 2013) encontraron que el espesor de la capa del suelo a la cual la humedad es captada por un radar en Banda L está en el orden de los 5cm (Díaz Santana, 2016).

2.8. Clasificación y descomposición polarimétrico del objetivo

2.8.1. Introducción al concepto de descomposición polarimétrico del objetivo

Es necesario reducir el aspecto aleatorio de las variables polarimétricas mediante el filtrado de puntos antes de cualquier interpretación de la información polarimétrica. El promedio incoherente de la matriz de coherencia $T_3 = \langle \mathbf{K} \cdot \mathbf{K}^{*T} \rangle$ (Coherencia Polarimétrico) o las matrices de covarianza $C_3 = \langle \mathbf{\Omega} \cdot \mathbf{\Omega}^{*T} \rangle$ (Covarianza de Matrices) tiene un impacto importante en sus propiedades polarimétricas. Una matriz de coherencia T_3 o una matriz de covarianza C_3 está completamente definida por nueve coeficientes reales: tres términos diagonales y tres coeficientes de correlación complejos, donde en el caso de

los datos de una sola mirada, los tres coeficientes de correlación tienen un módulo y una de sus fases se pueden obtener mediante una combinación lineal de los dos restantes, dejando cinco grados de libertad (Lee, 2017). Una matriz de dispersión relativa S_{rel} y una matriz de coherencia de mirada simple T_3 o matriz de covarianza C_3 pueden relacionarse de manera única.

El mecanismo de dispersión puede entonces interpretarse comparando S_{rel} con ejemplos canónicos. Después del filtrado de manchas o el promediado multilook, esto puede dejar de ser cierto. En general, el módulo de coeficientes de correlación es menor que o igual a uno y los términos de fase son linealmente independientes. La información adicional contenida en los términos de correlación cruzada será explotada por los “teoremas de descomposición polarimétrica” para extraer aún más características de los conjuntos de datos polarimétricos. El observable más importante medido por tales sistemas de radar es la matriz de coherencia T_3 de 3×3 . Esta matriz da cuenta de las variaciones locales en la matriz de dispersión y es el operador de orden más bajo adecuado para extraer parámetros polarimétricos para dispersadores distribuidos en presencia de aditivo (sistema) y multiplicativo (punto) ruido. Muchos objetivos de interés en la detección remota por radar requieren una descripción estadística multivariable debido a la combinación de ruido de moteado coherente y efectos aleatorios de dispersión vectorial de la superficie y el volumen. Para tales objetivos, es de interés generar el concepto de un mecanismo de dispersión “promedio” o “dominante” con el fin de clasificar o invertir datos de dispersión. Este proceso de promediación lleva al concepto del “objetivo distribuido” que tiene su propia estructura en oposición al objetivo estacionario o “objetivo único puro” (Richards et al., 2009). Los “teoremas de descomposición del objetivo” tienen como objetivo proporcionar una interpretación de este tipo basada en restricciones físicas sensibles, como que el objetivo medio sea invariable a los cambios en la base de polarización de la onda. Los teoremas de descomposición objetivo fueron formalizados por primera vez por Huynen, pero tienen sus raíces en el trabajo de Chandrasekhar sobre la dispersión de la luz por pequeñas partículas anisotrópicas. Desde esta obra original, ha habido muchas otras descomposiciones propuestas que se pueden clasificar en cuatro tipos principales (Lee & Pottier, 2009):

- Los basados en la dicotomía de la matriz \mathbf{K} de Kennaugh (Huynen, Holm y Barnes, Yang)

- Aquellos basados en una descomposición "basada en modelos" de la matriz de covarianza C_3 o la matriz de coherencia T_3 (Freeman y Durden, Yamaguchi, Dong)
- Aquellos que utilizan un vector propio o un análisis de valores propios de la matriz de covarianza C_3 o la matriz de coherencia T_3 (Cloude, Holm, an Zyl, Cloude y Pottier)
- Aquellos que emplean la descomposición coherente de la matriz de dispersión S (Krogager, Cameron, Touzi).

2.8.2. Descomposiciones basadas en vector propio

Una clase importante de teoremas de descomposición objetivo es la que se basa en valores propios de la matriz T_3 de coherencia promediada de 3×3 de Hermitiano. Dado que el problema del valor propio es automáticamente invariante en la base, tales descomposiciones se han sugerido como alternativas al enfoque de Huynen. Los vectores propios y los valores propios de la matriz T_3 de coherencia promediada de 3×3 Hermitiano se pueden calcular para generar una forma diagonal de la matriz de coherencia que se puede interpretar físicamente como independencia estadística entre un conjunto de vectores objetivo (Van Zyl, Synthetic aperture radar polarimetry, 2011).

2.8.3. Descomposición de Cloude

Cloude fue el primero en considerar dicha descomposición basada en vectores propios, basándose en un algoritmo para identificar el mecanismo de dispersión dominante mediante la extracción de mayor valor propio (λ_1). En este caso, la matriz T_{01} de coherencia extraída es de rango 1, tiene una matriz S de dispersión equivalente, y se puede expresar como el producto externo de un único vector objetivo K_1 . Es interesante observar que los módulos de los tres componentes de este vector objetivo son iguales a los tres "generadores de objetivo de Huynen" (Cloude, 2002). Sin utilizar mediciones de la verdad en el terreno, esta parametrización polarimétrica del vector objetivo K_1 implica una combinación de tres mecanismos de dispersión simples: dispersión de superficie, dispersión diedro y dispersión de volumen, que se caracterizan a partir de los tres componentes (generadores de destino) del vector objetivo.

2.8.4. Descomposición de Holm

Holm proporcionó una interpretación física alternativa del espectro de valores propios al interpretar el objetivo como la suma de una matriz \mathbf{S} de dispersión única (matriz de coherencia de rango 1) más dos términos de ruido o de resto. Este es un enfoque híbrido, que combina un análisis de valor propio (que proporciona invariancia bajo transformaciones unitarias) con el concepto del modelo de objetivo único más ruido del enfoque de Huynen. La matriz T_1 de 3×3 de coherencia representa un estado objetivo puro y proporciona la representación objetivo promedio. La matriz T_2 de 3×3 coherencia representa un estado objetivo mixto y proporciona la varianza del objetivo de su representación promedio. Finalmente, la matriz T_3 de 3×3 coherencia representa un estado mixto no polarizado equivalente a un término de ruido.

2.8.5. Descomposición de VAN ZYL

La descomposición de van Zyl se introdujo por primera vez utilizando una descripción general de la matriz C_3 de covarianza 3×3 para un terreno natural azimutalmente simétrico en el caso monoestático. La hipótesis de la simetría de reflexión establece que, en el caso de un medio natural, como el suelo y el bosque, se supone que la correlación entre canales copolarizados y polarizados cruzados es cero. La descomposición de van Zyl muestra, por lo tanto, que los dos primeros vectores propios representan matrices de dispersión equivalentes que se pueden interpretar en términos de números pares e impares de reflexiones. La expresión dada por su ecuación y obtenida para un eigenvector/eigenvalue análisis de 3×3 matriz de covarianza C_3 promediada por Hermitianos corresponde al punto de inicio de otra clase de teoremas de descomposición objetivo denominados descomposiciones basadas en modelos (Van Zyl, 2011).

2.8.6. Teorema de descomposición polarimétrico $H/A/\bar{\alpha}$

En 1997, Cloude y Pottier propusieron un método para extraer parámetros promedio de datos experimentales utilizando un algoritmo de suavizado basado en estadísticas. Este método no se basa en el supuesto de una distribución estadística y por lo tanto está libre de las restricciones físicas impuestas por tales modelos multivariados. Un análisis del vector propio de la matriz T_3 de 3×3 coherencias es utilizado, ya que proporciona una descripción invariante de la base del dispersor con una descomposición específica en tipos de procesos de dispersión (los vectores propios) y sus magnitudes relativas (los valores

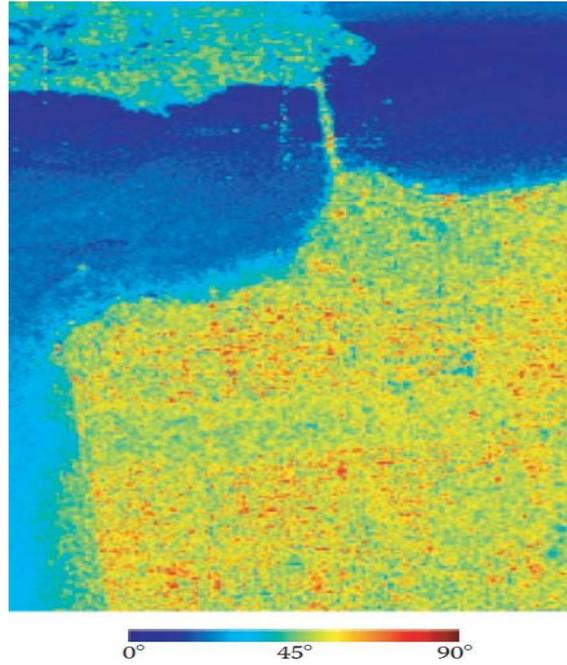
propios). Este método original, basado en un análisis de valores propios de la matriz T_3 , emplea un modelo estadístico de Bernoulli de tres niveles para generar estimaciones de los parámetros de matriz de dispersión objetivo promedio. Este modelo estadístico alternativo se establece con el supuesto de que siempre hay un mecanismo de dispersión dominante “promedio” en cada celda y luego encuentra los parámetros de este componente promedio (Cloude, 2019).

2.8.6.1. Dispersión polarimétrica $\bar{\alpha}$

Entre los parámetros medios ($\bar{\alpha}$, $\bar{\beta}$, $\bar{\delta}$ y $\bar{\gamma}$) del mecanismo de dispersión dominante que puede extraerse de la matriz T_3 de 3×3 de coherencia, ahora queda claro a partir del análisis anterior que, para los problemas de medios aleatorios, el parámetro principal para identificar el mecanismo de dispersión dominante es como un parámetro invariante de rollo. Los otros tres parámetros ($\bar{\beta}$, $\bar{\delta}$ y $\bar{\gamma}$) se pueden usar para definir el ángulo de orientación de polarización objetivo (Cloude, 2009).

En resumen, el rango útil del parámetro corresponde a un cambio continuo desde la dispersión de la superficie en el límite de la óptica geométrica ($\bar{\alpha}=0^\circ$) a través de la dispersión de la superficie bajo la óptica física hasta el modelo de superficie de Bragg, que abarca la dispersión del dipolo o la dispersión única por una nube de partículas anisotrópicas. ($\bar{\alpha}=45^\circ$), moviéndose a mecanismos de dispersión de doble rebote entre dos superficies dieléctricas y finalmente alcanzando la dispersión de diedro desde las superficies metálicas ($\bar{\alpha}=90^\circ$). La imagen en la Figura 2.21 muestra que el parámetro está relacionado directamente con el mecanismo de dispersión física promedio subyacente, y por lo tanto puede ser utilizado para asociar los observables con las propiedades físicas del medio. Se produce un valor bajo en la región del océano, indicativo de dispersión única dominante ($\bar{\alpha}=0^\circ$). El área urbana y las áreas de parque consisten en valores de parámetros medios y altos ($45^\circ < \bar{\alpha} < 90^\circ$) (Cloude, s.f.).

Figura 2.13: Parámetro $\bar{\alpha}$ invariantes en rollo.



2.8.6.2. Entropía de dispersión polarimétrico (H)

Anteriormente se demostró que si solo un valor propio es distinto de cero ($\lambda_1 \neq 0$; $\lambda_2 = \lambda_3 = 0$), entonces el “peso estadístico” se reduce al de una matriz \mathbf{S} de Sinclair de dispersión de puntos; en el otro extremo, si todos los valores propios son distintos de cero e idénticos ($\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 \neq 0$), luego, la matriz T_3 de coherencia promediada representa una estructura de dispersión aleatoria no polarizada completamente desasociada. Entre los dos extremos, prevalece el caso de los dispersores distribuidos o parcialmente polarizados. Para definir el grado de trastorno estadístico de cada tipo de dispersión distinto dentro del conjunto, la entropía polarimétrica H , de acuerdo con Von Neumann, proporciona un parámetro invariante de base eficaz y conveniente y está dada por

$$\mathbf{H} = - \sum_{k=1}^N P_k \log_N (P_k) \quad (2.20)$$

donde P_i corresponde a las pseudo-probabilidades obtenidas de los valores propios λ_i . N es la base logarítmica y es importante tener en cuenta que esta base no es arbitraria sino que debe ser igual a la dimensión polarimétrica ($N = 3$ en el caso monoestático y $N = 4$ en el caso biestático). En el caso límite, cuando $\mathbf{H}=1$, la información de polarización se vuelve cero y la dispersión objetivo es verdaderamente un proceso de ruido aleatorio. La imagen de la Figura 2.14 muestra que la dispersión de baja entropía se produce sobre el océano (dispersión por una superficie ligeramente rugosa).

Figura 2.14: Parámetro de entropía invariantes de rollo H .



Fuente: (Lee & Pottier, 2009)

2.8.6.3. Dispersión polarimétrica anisotrópica (A)

Si bien la entropía polarimétrica H es un descriptor escalar útil de la aleatoriedad del problema de dispersión, no es una función única de las relaciones de valores propios (Lee, 2017). Por lo tanto, otro parámetro de valor propio definido como la “anisotropía polarimétrica A ” puede ser introducido, teniendo en cuenta que los valores propios se han ordenado como $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 > \lambda_3 > 0$, con

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (2.21)$$

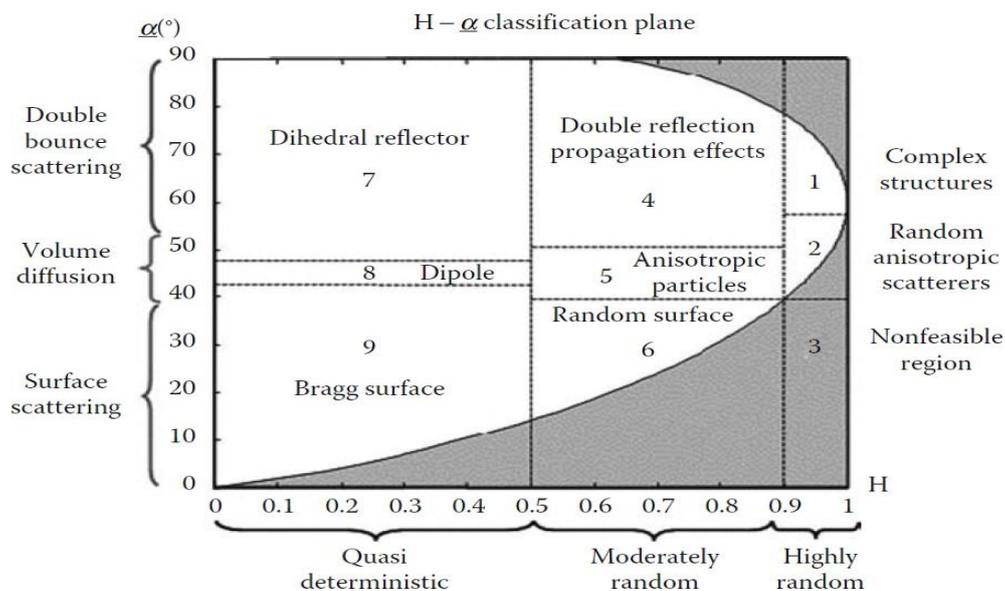
La anisotropía polarimétrica A es un parámetro complementario de la entropía polarimétrica H . La anisotropía mide la importancia relativa de la segunda y el tercer valor propios de la descomposición propia. Desde un punto de vista práctico, la anisotropía A puede emplearse como fuente de discriminación, principalmente cuando $H > 0.7$.

2.8.6.4. Espacio tridimensional de clasificación $H/A/\bar{\alpha}$

Cloude y Pottier propusieron un esquema de clasificación sin supervisión basado en el uso del plano 3-D $H/\bar{\alpha}$, donde se pueden representar todos los mecanismos de dispersión

aleatoria. La idea clave es que la entropía surge como una medida natural de la reversibilidad inherente de los datos de dispersión y que el ángulo alfa ($\bar{\alpha}$) se puede usar para identificar los mecanismos de dispersión promedio subyacentes. La $\mathbf{H}/\bar{\alpha}$ un plano se subdivide en nueve zonas básicas características de las diferentes clases de comportamiento de dispersión, para separar los datos en mecanismos básicos de dispersión, como se muestra en la Figura 2.15. La ubicación de los límites dentro de las combinaciones factibles de \mathbf{H} y $\bar{\alpha}$ valores se establece en función de las propiedades generales de los mecanismos de dispersión. Por supuesto, existe un cierto grado de arbitrariedad en el establecimiento de estos límites que no dependen de un conjunto de datos en particular. (Cloude, s.f.). En la Figura 2.15, se especifican nueve zonas relacionadas con características específicas de dispersión que pueden medirse mediante la matriz de coherencia T_3 : (Van Zyl, Synthetic aperture radar polarimetry, 2011); (Lee y Pottier, 2009)

Figura 2.15: Plano Bidimensional $\mathbf{H}/\bar{\alpha}$.



Fuente: (Lee & Pottier, 2009)

Zona 9: Dispersión de superficie de baja entropía, en esta zona, se producen procesos de dispersión de entropía baja con valores inferiores a 42.58° . Estos incluyen GO (óptica geométrica) y PO (óptica física. Dispersión de la superficie de Bragg y fenómenos de dispersión especular que no implican inversiones de fase 180° entre S_{HH} y S_{VV} . Superficies físicas como el agua en las bandas L y P, el hielo marino en la banda L, así como superficies terrestres muy suaves, todos caen en esta categoría (Cloude, 2002).

Zona 8: Dispersión de dipolos de baja entropía, en esta zona se producen mecanismos fuertemente correlacionados que tienen un gran desequilibrio. Entre S_{HH} y S_{VV} en amplitud. Aparecería aquí un dispersor de dipolo aislado, al igual que la dispersión de la vegetación con una orientación fuertemente correlacionada de los elementos de dispersión anisotrópica (Cloude, 2002).

Zona 7: Eventos de dispersión múltiple de baja entropía, esta zona corresponde a doble entropía baja, o incluso, eventos de dispersión de rebote, como los proporcionados por dispersores diédricos dieléctricos y metálicos aislados. Estos se caracterizan por valores de $\bar{\alpha}$ más de 47.5° . El límite inferior elegido para esta zona está dictado por la constante dieléctrica esperada de los diedros y por la precisión de medición del radar (Cloude, 2002).

Zona 6: Dispersión de la superficie de entropía media, esta zona refleja el aumento de la entropía H debido a los cambios en la rugosidad de la superficie y debido a los efectos de propagación del dosel. En la teoría de dispersión de superficie, la entropía H de las teorías de baja frecuencia como la dispersión de Bragg es cero. Asimismo, la entropía de las teorías de alta frecuencia como GO también es cero. Sin embargo, entre estos dos extremos, hay un aumento en la entropía H debido a la Física de la propagación de ondas secundarias y mecanismos de dispersión. Así, a medida que la rugosidad/longitud de correlación de una superficie cambia, su entropía H aumentará (Cloude, 2002). Además, una cubierta superficial que incluye a difusores elipsoidales achatadas (hojas o discos, por ejemplo) generará una entropía $0.6 < H < 0.7$.

Zona 5: Dispersión de vegetación de entropía media, aquí nuevamente tenemos entropía H moderada, pero con un mecanismo de dispersión de tipo dipolo dominante. La mayor entropía H se debe a una distribución estadística central del ángulo de orientación. Dicha zona incluiría la dispersión de superficies vegetadas con dispersores anisotrópicos y una correlación moderada de orientaciones del dispersor (Cloude, 2002).

Zona 4: Dispersión múltiple de entropía media, Esta zona explica la dispersión diédrica con entropía moderada H . Esto ocurre, por ejemplo, en aplicaciones forestales, donde ocurren mecanismos de doble rebote en las bandas P y L después de la propagación a través de un toldo. El efecto del toldo es aumentar la entropía H del proceso de dispersión. Un segundo proceso importante en esta categoría son las áreas urbanas, donde El empaquetamiento denso de los centros de dispersión localizados puede generar una

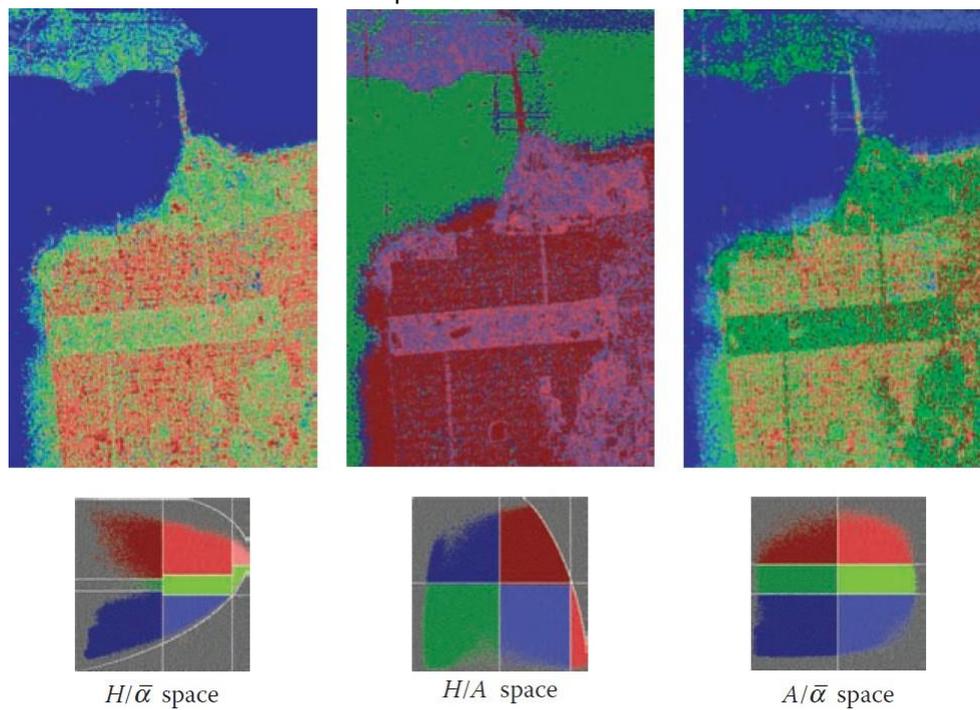
entropía moderada \mathbf{H} con dispersión dominante de orden bajo (Cloude, 2002). El límite entre las zonas 4, 5, 6 y 1, 2, 3 se establece como $\mathbf{H}=0.9$. Esto se elige sobre la base del límite superior para la superficie, el volumen y dispersión diedro antes de distribuciones aleatorias.

Zona 3: Dispersión de superficie de alta entropía, Esta clase es una región no factible en el plano $\mathbf{H}/\bar{\alpha}$, es decir, es imposible la distinción de dispersión de superficie con entropía $\mathbf{H}>0.9$ (Cloude, 2002).

Zona 2: Dispersión de vegetación de alta entropía, la dispersión de volumen de alta entropía surge cuando $\bar{\alpha}=45^\circ$ y $\mathbf{H}>0.9$. Esto puede surgir por dispersión única de una nube de partículas anisotrópicas similares a agujas o por dispersión múltiple de una nube de partículas simétricas de baja pérdida. En ambos casos, sin embargo, la entropía \mathbf{H} se encuentra por encima de 0.9, donde la región factible de $\mathbf{H}/\bar{\alpha}$ un plano se está reduciendo rápidamente. La dispersión de las copas de los bosques se encuentra en esta región, al igual que la dispersión de algunos tipos de superficies con vegetación con elementos dispersos aleatorios altamente anisotrópicos. El comportamiento extremo en esta clase es el ruido aleatorio, es decir, sin dependencia de polarización, un punto que se encuentra en el extremo derecho de la Zona 2 (Cloude, 2002).

Zona 1: Dispersión múltiple de alta entropía, en la región $\mathbf{H}>0.9$, todavía es posible distinguir los mecanismos de doble rebote en un entorno de alta entropía. De nuevo, tales mecanismos pueden debe observarse en aplicaciones forestales o en dispersión de vegetación que tiene una estructura de ramificación y corona bien desarrollada (Cloude, 2002).

Figura 2.16: Segmentación no supervisada de la imagen PolSAR de San Francisco usando espacio 3-D de $H/A/\bar{\alpha}$.



Fuente: (Lee & Pottier, 2009)

2.9. PolSAR Clasificación de terreno y uso del suelo

Clasificación del terreno y uso de la tierra es sin duda la más importante aplicación de radar de apertura sintética polarimétrico (PolSAR). Se han desarrollado muchos algoritmos para la clasificación de terrenos supervisados y no supervisados. En la clasificación supervisada, se seleccionan conjuntos de entrenamiento para cada clase, según los mapas de verdad terrestres o las diferencias de contraste de dispersión en las imágenes de PolSAR. Para cada píxel, la respuesta PolSAR se integra en tres parámetros reales y tres complejos: un total de nueve parámetros. Cuando no están disponibles los mapas de verdad terrestres, la alta dimensionalidad de los datos de PolSAR puede dificultar la selección de conjuntos de entrenamiento. La clasificación no supervisada, por otro lado, clasifica la imagen automáticamente mediante la búsqueda de grupos basado en un cierto criterio. Sin embargo, la identificación final de la clase puede ser inferida manualmente. En los primeros años, se han aplicado técnicas de procesamiento de imágenes para la clasificación de imágenes PolSAR. Muchas técnicas redujeron los nueve parámetros de la matriz de covarianza polarimétrica a un vector de características, y luego se asumió el vector de características para tener una distribución gaussiana conjunta. Se adoptó la medida de distancia típica de la distribución gaussiana y luego se

aplicaron técnicas de clasificación supervisada o de clasificación no supervisada, como ISODATA y c-mean difusa. (Avance de la Ciencia, s.f.) aplicó el método fuzzy c-mean a un vector de características que contiene el logaritmo de los cinco parámetros seleccionados bajo el supuesto de simetría de reflexión. De hecho, para la clasificación de PolSAR, la difícil tarea de selección de vectores de características se puede evitar, ya que la matriz de covarianza multilook obedece a la compleja distribución de Wishart (Cuadras, 2007). Para datos de SAR polarimétricos complejos de una sola mirada, (Kong, 1988) derivó una medida de distancia para la clasificación de máxima verosimilitud basada en la compleja distribución gaussiana (Lee y Pottier, 2009). Wiley, s.f. lo extendió para datos de SAR polarimétricos normalizados. Van Zyl y Burnette (Wiley, s.f.) expandieron aún más este enfoque mediante iterativamente aplicando las probabilidades a priori de las clases.

2.9.1. Clasificador de Wishart complejo para datos PolSAR multilook

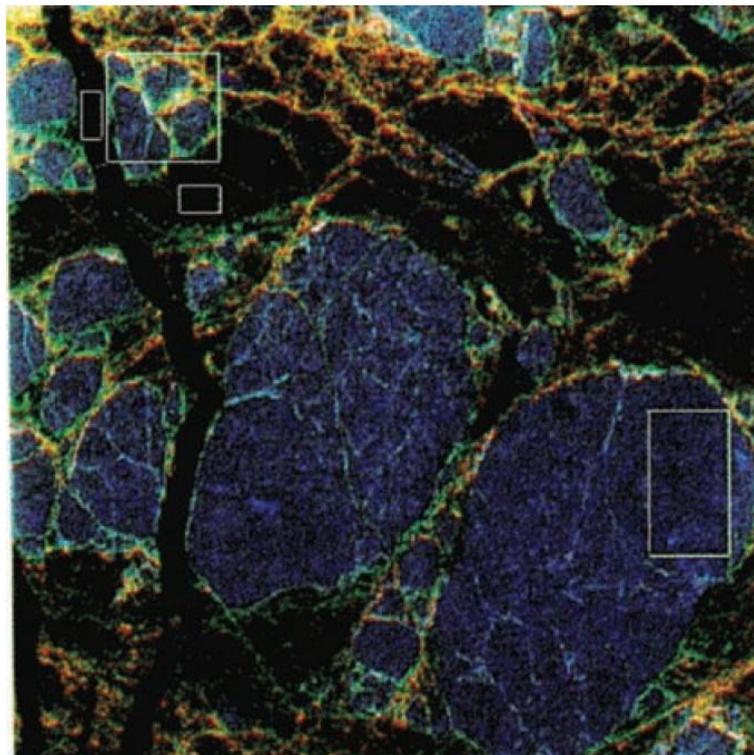
Se ha mencionado que los datos SAR se procesan con frecuencia en múltiples puntos para la reducción de manchas y la compresión de datos. Algunos datos PolSAR multilook, como JPL AIRSAR se almacenan en formato de matriz de Stokes. El promedio en la matriz de Stokes produce resultados idénticos a los promedios en las matrices de covarianza. Sin embargo, la matriz de covarianza tiene la clara ventaja de que tiene una distribución de Wishart compleja multivariada, que es muy adecuada para aplicaciones de clasificación. En consecuencia, nos limitaremos a tratar con la clasificación basada en matriz de covarianza o matriz de coherencia. El procesamiento del SAR polarimétrico multilook requiere un promedio de varias matrices de covarianza independientes (Woodhouse, 2012).

2.9.2. Clasificador supervisado mediante la media de distancia de Wishart

La clasificación supervisada utilizando la medida de distancia de Wishart se puede aplicar fácilmente, si los conjuntos de entrenamiento obtenidos de un mapa de medición de la verdad del terreno están disponibles. En ausencia de un mapa de verdad, las áreas de entrenamiento deben seleccionarse de PolSAR imágenes basadas en características de dispersión de cada clase. Mostraremos un ejemplo de la clasificación de hielo marino utilizando los datos de SAR polarimétrico de 4 bandas de aspecto P, L y C de JPL AIRSAR del mar de Beaufort. La clasificación del hielo marino es importante para el

envío y para comprender los cambios climáticos. Para este estudio, ilustramos la efectividad de la medición de la distancia de Wishart para la clasificación basada en cada banda de frecuencia y en tres bandas combinadas. Se extrajo una sección de 512×512 píxeles de la imagen de potencia total (span) de tres bandas y se muestra en la Figura 2.17 con el color rojo para la banda P, verde para la banda L y azul para la banda C. Las áreas de entrenamiento fueron seleccionadas para cuatro clases: Hielo de primer año (hielo FY), hielo multianual (MY hielo), “aguas abiertas (leads) çordilleras de hielo”. El cuadro a la derecha de la Figura 2.17 contiene MY píxeles de hielo. Las dos cajas más pequeñas en la esquina superior izquierda contienen agua abierta y hielo FY. La gran caja cercana contiene algunos píxeles de cresta de hielo. Como no hay un área de cresta de hielo uniforme grande, se usó un umbral para establecer una máscara para seleccionar los píxeles de la cresta de hielo. Solo aquellos píxeles por encima del umbral se consideran píxeles de la capa de hielo para incluirlos en el cálculo de C_m .

Figura 2.17: Hielo marino en potencia total con color rojo= banda P, verde = banda L, azul = banda C.



Fuente: (Lee & Pottier, 2009)

2.9.2.1. Clasificador no supervisado basada en dispersión mecanismos y clasificador Wishart

En las clasificaciones no supervisadas, no se requieren muestras de capacitación ni mapas de la verdad del terreno. Hemos mencionado anteriormente que los algoritmos de clasificación no supervisados se pueden dividir en tres categorías. En la primera categoría, los algoritmos se desarrollan en base a las características estadísticas inherentes de las clases en los datos de PolSAR. La mayoría de los algoritmos no supervisados en la primera categoría utilizan rutinas de agrupación para encontrar centros de agrupación, y luego se aplica la técnica de agrupación *k-mean* o ISODATA para alcanzar la clasificación final de forma iterativa. En la segunda categoría, la clasificación se basa en las características de dispersión física de los datos de PolSAR, pero ignora sus propiedades estadísticas. Tal algoritmo fue propuesto por primera vez por van Zyl. Clasificó los tipos de terreno como rebote impar, incluso rebote y dispersión difusa. La clasificación no está supervisada y separa la imagen en cuatro clases, incluida una clase para píxeles indeterminados. Para una imagen de banda L, la superficie del océano y el suelo plano suelen tener las características de dispersión de Bragg (rebote impar); las manzanas, edificios y blancos duros tienen las características de dispersión de doble rebote (incluso rebote), excepto para edificios no alineados a lo largo de la dirección azimutal; el bosque y la vegetación pesada tienen las características de dispersión de volumen (dispersión difusa). En consecuencia, este algoritmo de clasificación proporciona información para la identificación del tipo de terreno. Para una clasificación refinada en más clases, (Cloude y Pottier, 2009) propusieron otro algoritmo de clasificación no supervisado basado en su teoría de descomposición objetivo. Los mecanismos de dispersión, caracterizados por la entropía \mathbf{H} y un ángulo $\bar{\alpha}$, se utilizan para la clasificación.

2.10. Dispersión de las características de la superficie de la tierra

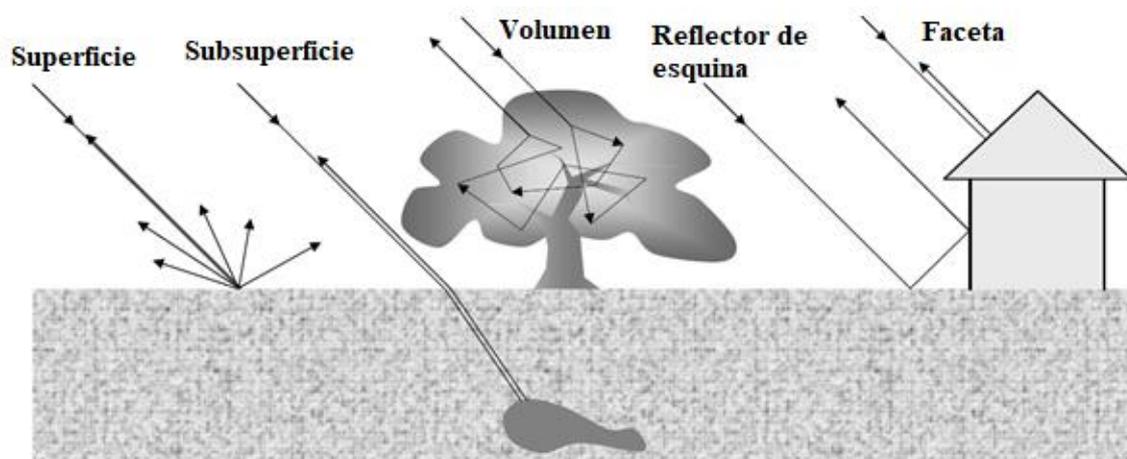
La detección remota depende de la medición de la reflexión o dispersión de la energía incidente de las características de la superficie terrestre; la emisión desde una superficie también es posible. Si la energía incidente está en el rango óptico de las longitudes de onda, es decir, en el infrarrojo visible o cercano, se dispersa en gran parte por la superficie del material que se está fotografiando. A veces hay penetración en un medio, como longitudes de onda cortas en el agua, pero en general la energía recibida por un sensor

óptico se refleja en las superficies. Debido a que la longitud de onda de la energía de microondas utilizada en la detección remota por radar es tan larga en comparación con la utilizada en los sensores ópticos (Las longitudes de onda del radar son del orden de 10 cm, mientras que las longitudes de onda ópticas son del orden de 1 μm , aproximadamente cinco órdenes de magnitud diferentes), la energía incidente en los materiales de la superficie de la tierra a menudo puede penetrar, de modo que la dispersión puede ocurrir desde el mismo medio y desde la superficie (Podest, 2017). De hecho, hay varios mecanismos por los cuales la energía puede dispersarse al sensor y pueden ser bastante complejas. Para poder interpretar las imágenes de radar es necesario tener una comprensión de los principales mecanismos para que la energía recibida pueda relacionarse con las características biofísicas subyacentes del medio.

2.10.1. Mecanismos de dispersión comunes

La Figura 2.18 muestra los tres mecanismos de dispersión más comunes que se producen en la detección remota por radar de la superficie terrestre. El primero es la dispersión de la superficie (análoga a la de la imagen óptica) en la que se puede ver que la energía se dispersa o refleja desde una interfaz bien definida. El segundo es la dispersión de volumen, no hay un número único contable identificable de sitios de dispersión; en cambio, se ve que los reflejos provienen de una gran cantidad de elementos dispersos, como los componentes de la copa de un árbol. El tercero se denomina dispersión de objetivo fuerte o duro y puede presentarse en una variedad de formas. El reflector de esquina y dispersión de facetas, que dan respuestas particularmente fuertes en las imágenes de radar. Si una superficie está muy seca, la energía incidente puede penetrar, refractarse y dispersarse desde las características de la subsuperficie (Richards J. A., 1999).

Figura 2.18: Mecanismo de dispersion comunes.



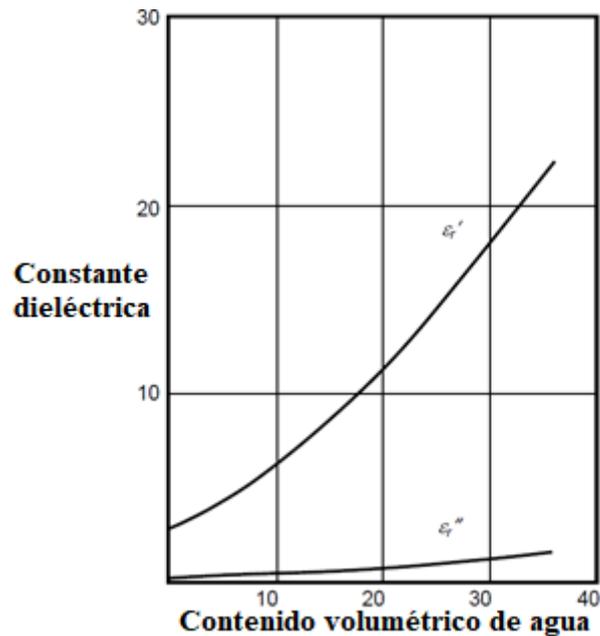
2.10.2. Dispersión de superficie lisa

Considere una superficie lisa entre el aire y un medio con constante dieléctrica ϵ_r . La constante dieléctrica también se llama permitividad relativa. El índice de refracción de un medio es la raíz cuadrada de la constante dieléctrica de la faceta del reflector de la esquina del volumen de la superficie inferior de la superficie. De un medio es una de sus tres propiedades electromagnéticas. Los demás la permeabilidad, que describe su comportamiento magnético pero que es menos importante en nuestros estudios, y la conductividad, que describe su pérdida o tendencia a absorber energía de la onda a medida que se propaga. Todos los medios tienen una constante dieléctrica $\epsilon_r \geq 1$, incluido un vacío para el cual es la unidad. A menos que el aire sea muy húmedo, asumimos que también tiene una constante dieléctrica unitaria. La resistencia de la dispersión de la superficie depende de la rugosidad de la superficie y de la constante dieléctrica del material a partir del cual se produce la dispersión (Richards J. A., 1999). Para distinguir mejor su comportamiento de la dispersión de volumen, decimos que la dispersión de una superficie ocurre cuando hay una discontinuidad identificable en la constante dieléctrica (como de aire a agua, aire a suelo, etc.). En el caso de la dispersión de volumen, un cambio tan abrupto en la constante dieléctrica no se puede distinguir, aunque los eventos de dispersión individuales dentro del volumen se producen en muchas discontinuidades dieléctricas (hojas de aire, ramitas de aire, etc.). La forma más simple de dispersión de la superficie es el reflejo de una superficie lisa.

Debido a que la constante dieléctrica del agua es mucho más grande que la del suelo seco, la constante dieléctrica, y por lo tanto la reflectividad del radar, del suelo es una función

importante de la humedad contenida, como se muestra en la Figura 2.19 para la arena. En la figura se muestran dos componentes de la constante dieléctrica: la parte real corresponde a la constante dieléctrica; el componente imaginario está relacionado con la pérdida del medio. La mayoría de los medios naturales secos, no solo los suelos, tienen constantes dieléctricas bajas; es la presencia de humedad lo que conduce a valores mucho mayores (Richards et al., 2009).

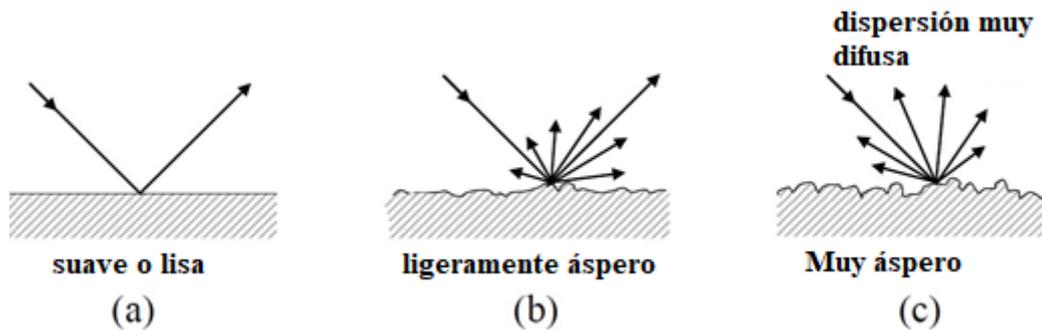
Figura 2.19: Constante dieléctrica compleja ($\epsilon'_r - j\epsilon''_r$) de arena en función del contenido de humedad.



2.10.3. Superficies rugosas

Es de esperar que a medida que aumenta la rugosidad de una superficie, habrá más dispersión hacia el radar, y que cuanto más rugosa sea la superficie, más claro aparecerá en las imágenes del radar. La Figura 2.20 muestra cualitativamente cómo el nivel de rugosidad afecta a la retrodispersión y la existencia o no de un componente especular en la señal dispersa. Si la superficie es solo ligeramente rugosa, habrá un componente especular de tamaño considerable, con solo un pequeño componente de la retrodispersión, mientras que para una superficie muy rugosa se producirá una dispersión significativa en todas las direcciones, incluida la parte posterior del sensor. Es relativamente fácil de entender la dispersión de los dos extremos de la rugosidad. En el otro extremo, una superficie rugosa "totalmente" se llama Lambertian, bien conocida en la teoría de la dispersión de la luz (De Bernardis, 2018), ("Teledetección: óptica y sistemas ópticos", s.f.)

Figura 2.20: Dispersión de la superficie a medida que aumenta la rugosidad.



2.10.4. Dispersión de volumen

Los medios tales como las copas de los árboles y el hielo marino contienen muchos sitios de dispersión individuales que contribuyen colectivamente a la energía retrodispersada. Las discontinuidades en la constante dieléctrica dan lugar a la dispersión, pero son muchas y son tan difíciles de identificar y describir, que comprender cómo contribuyen de manera individual a la retrodispersión no es sencillo. En el caso de los toldos son las interfaces entre las hojas y el aire y las ramitas y el aire, por ejemplo, las que están involucradas, mientras que para el hielo marino son las inclusiones de aire y salmuera en la masa de hielo. Con el hielo también habrá dispersión de la superficie. Supongamos que representamos un volumen de dispersión por el conjunto aleatorio de dispersores individuales. Si la densidad de los dispersores es uniforme, es evidente que el volumen se vería muy parecido al visto desde cualquier ángulo, en cuyo caso podríamos concluir que la cantidad de retrodispersión será casi independiente de, o dependerá únicamente de, del ángulo de incidencia. No habrá ningún componente especular como con las superficies (a menos que también esté presente una superficie definida) ya que el volumen se verá igual desde arriba como lo haría en un ángulo. A medida que la energía incidente viaja hacia el volumen, se encontrará con una pérdida en la dirección hacia adelante como resultado de la dispersión de cualquier falta de homogeneidad dieléctrica. Los dispersores también pueden absorber parte de la radiación. El comportamiento de dispersión es lo que da lugar a la señal de vuelta en el radar del cual inferimos las propiedades del medio de volumen. Es útil considerar los sitios de dispersión como pequeños con la longitud de onda de la señal del radar, de modo que se puede suponer que se dispersan de forma casi isotrópica (en todas las direcciones); esta es otra razón por la que la retrodispersión de un medio de volumen es casi independiente del ángulo de incidencia. A menos que el volumen tenga mucha pérdida, en cuyo caso toda la energía que viaja hacia adelante finalmente disminuye a cero, debemos tener en cuenta su dimensión vertical. En otras

palabras, cuando se analiza el comportamiento de dispersión de volumen, debemos reconocer que el hielo marino, por ejemplo, tiene un límite superior e inferior, al igual que un dosel del bosque tiene un margen superior e inferior (Engman, 1991).

2.10.5. Dispersores compuestos

En la práctica, a menudo nos encontramos con comportamientos de dispersión resultantes de una combinación de los efectos tratados en las secciones anteriores. O bien habrá múltiples dispersiones involucrando el mismo tipo de elemento (como de hoja a hoja en un toldo) o habrá mecanismos que involucren más de un tipo de dispersión. Muchos de estos se encuentran en el comportamiento de dispersión de árboles y bosques. Cuando se manejan situaciones compuestas, es necesario determinar si cada uno de los componentes de dispersión que pueden identificarse. En general, si hay muchos dispersos al azar dispersores dentro de los elementos de resolución de una escena podemos suponer que los mecanismos de dispersión de componentes pueden combinarse de forma no coherente.

2.11. Contenido de humedad

En el ámbito de la retrodispersión el suelo está altamente influenciada por el contenido de humedad mayor en donde es posible confirmar que la intensidad del backscattering es directamente proporcional al contenido de humedad (Chen, 1995); (Ulaby et al., 1986). Las propiedades de humedad de una superficie se describen por su constante dieléctrica, también llamada permitividad que depende del contenido de humedad en el suelo. De hecho, la teoría detrás del sistema radar remoto con microondas para su aplicación en humedad del suelo está basada en el gran contraste que existente entre las propiedades dieléctricas de un suelo húmedo ($\epsilon_r \approx 24$ a 20°C) y un suelo seco ($\epsilon_r \approx 6$) (Richards J. A., 2009); (Barrett et al., 2009). La constante dieléctrica (ϵ_r) está representada por un número complejo adimensional (Alvarez-Mozos, 2005).

2.12. Presencia de vegetación

En la vegetación afectan la señal de retrodispersión de manera diferente, de acuerdo a las dimensiones de sus componentes y a la longitud de la onda incidente (Sosa, 2019). Para cada frecuencia se puede identificar el origen de respuesta, por ejemplo, el backscattering en Banda-L estará más influenciado por las hojas mayores, mientras que el backscattering de la Banda-C está significativamente influenciado por hojas menores (Lusch, 1999);

(Suárez Arévalo, 2016). Asimismo, la retrodispersión también está influenciada por la geometría de incidencia de la onda, longitudes de onda corta (Banda X, 3 cm.) reflejan desde la parte superior de los árboles, en condición de cobertura continua; mientras que longitudes de onda larga (Banda L, 23 cm.) penetran la parte superior de árboles y reflejan desde la superficie del suelo. Longitudes intermedias Banda-C (6 cm) tienen contribuciones tanto desde el dosel como de la superficie (Barrett et al., 2009). En consecuencia, usar la banda-L es más apropiado que la banda-C debido a que longitudes de onda más larga penetran más en el dosel de las plantas permitiéndote ver las áreas cultivadas de aquellas que tienen una baja densidad de biomasa (Richards J. A., 1999);(Lusch, 1999).

CAPITULO III

III. Metodología

3.1. Formulación de hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

Los parámetros geométricos y espectrales diferenciados estimados en imágenes de radar Sentinel-1, permite la clasificación de uso del suelo en la microcuenca Apacheta, de manera significativa.

3.1.2 Hipótesis secundarias

- Los parámetros geométricos estimados en imágenes de radar Sentinel-1, permiten la clasificación del suelo en la microcuenca Apacheta, de manera significativa.
- Los parámetros espectrales diferenciados estimados en imágenes de radar Sentinel-1, permiten la clasificación del suelo en la microcuenca Apacheta, de manera significativa.
- Los métodos de clasificación de uso de suelo involucran de manera eficiente los parámetros geométricos y espectrales estimados en una imagen de radar Sentinel-1.

3.2. Variables y Operacionalización de variables

Variable Independiente: Parámetros geométricos y espectrales diferenciados

Variable Dependiente: Clasificación de uso del suelo

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Tipo de variable	Escala de Medición	Instrumento
<p>Independiente:</p> <p>Parámetros geométricos y espectrales diferenciados en las imágenes de radar Sentinel-1.</p>	<p>El instrumento consiste en un transmisor que envía ondas de radiofrecuencia, y un objeto receptor que recibe la energía después de haber sido reflejada. El transmisor y el receptor pueden estar localizados en dos plataformas distintas, cuya configuración es denominada “biestática”. Asimismo, transmisor y receptor pueden estar ubicados en la misma plataforma, compartiendo la misma antena para irradiar y recibir la energía retrodispersada por el blanco. Este es el caso de los sensores de configuración “monostática”.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Las polarizaciones completas y duales son dos modos operativos típicos de SAR polarimétrico. 	<ul style="list-style-type: none"> Ángulo de incidencia Coefficiente de Scattering Longitudes de onda del SAR Latitudes Longitudes 	<p>Cuantitativo</p>	<p>Intervalo</p>	<p>Sentinel-1</p>

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Tipo de variable	Escala de Medición	Instrumento
Dependiente: Clasificación del suelo en la microcuenca Apacheta	La caracterización de un dispersador dado por medio del coeficiente de dispersión, también depende de la polarización del campo incidente. El término Polarización depende de la configuración de la antena y hace referencia a la orientación espacial del campo eléctrico, en este caso en una onda electromagnética plana, y que frecuentemente está orientada horizontal o verticalmente, durante su propagación, mientras el campo oscila.	<ul style="list-style-type: none"> Clasificación del 	<ul style="list-style-type: none"> Índice de suelos 	Cualitativo	Rango	Simulaciones
		<ul style="list-style-type: none"> La cabecera cuenca Cachi-Apacheta, ubicada en las alturas de la cuenca Cachi, con una altura máxima de 5000 ms.n.m. Los bofedales son humedales propios de las regiones alto andinas. 	<ul style="list-style-type: none"> Índice: <ul style="list-style-type: none"> -Vegetación - Ríos - Bofedales - Lagunas - Ciudades - Bosques - Plantaciones - Hielo - Arboles. 	Cuantitativo	Rango	Métodos

3.3. Técnicas, instrumentos y procesamiento de datos

3.3.1. Instrumentos utilizados

El registro e instrumentos de datos en las diferentes áreas especializadas para la clasificación de cobertura de suelos se ha obtenido en el marco del proyecto “Modelado del comportamiento de aguas subterráneas en los ecosistemas de Humedales de la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, Región Ayacucho”, son:

- Imágenes de radar de productos GRDH, SLC de Sentinel-1B. Modo: IW, Satélite: Sentinel-1B, Tamaño de imágenes hasta: 7.26 GB, Polarización: VV VH o HH HV.
- Equipamiento geológico
- Cámaras digitales
- GEPARD y GEOSIKER
- GPS

Generalmente en proyectos procesamiento de imágenes de radar Sentinel-1 que contienen los datos asociados a las variables de estudio y los formatos para registrar la data producida. Los instrumentos a utilizarse en el recojo de la información y su posterior procesamiento son diversos.

3.3.2. Procesamiento de datos

Se descargo la parte de Sudamérica Perú, región de Ayacucho, especificándose la hora y fecha en el cual paso el sensor Sentinel-1. Una vez descargada las imágenes de radar (ejemplo Figura 3.1) de la página oficial de Copernicus Open Access Hub (ESA) obtendremos numerosos datos el cual debemos seleccionar donde se ubica la zona de trabajo.

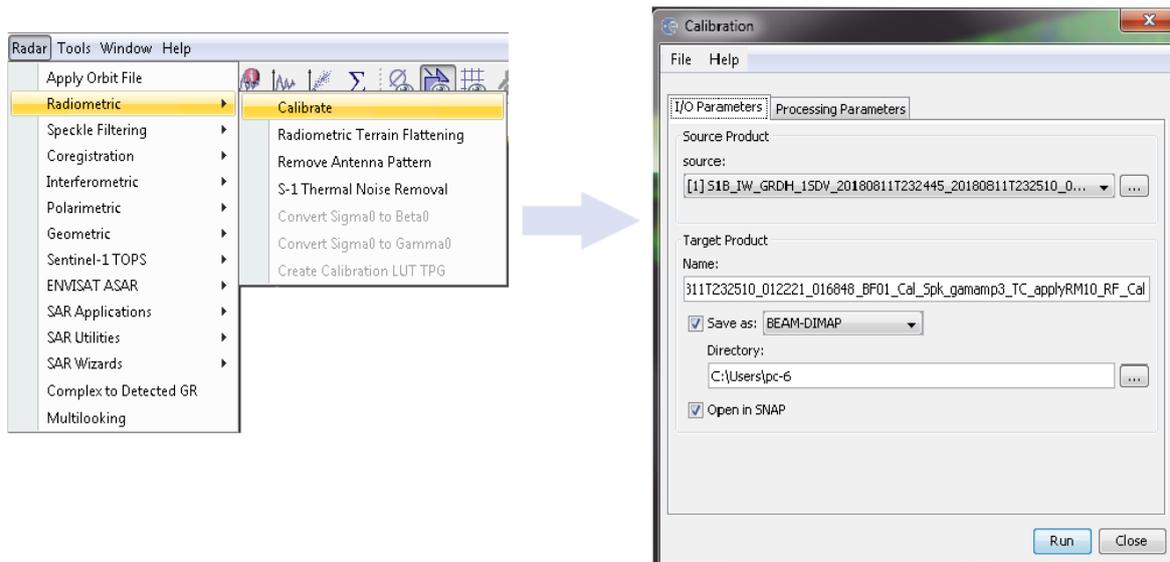
Los pasos son los siguientes:

- a. Operación de calibración
- b. Operador de Speckle Filter
- c. Algoritmo de ortorectificación
- d. Normalización Radiométrica
- e. Procesos adicionales

a) Operador de Calibración

El objetivo de la calibración en una imagen radar es proporcionar imágenes en las que los valores de píxel puedan relacionarse directamente con la retrodispersión del radar de la

Figura 3.2: Pasos para la Calibración

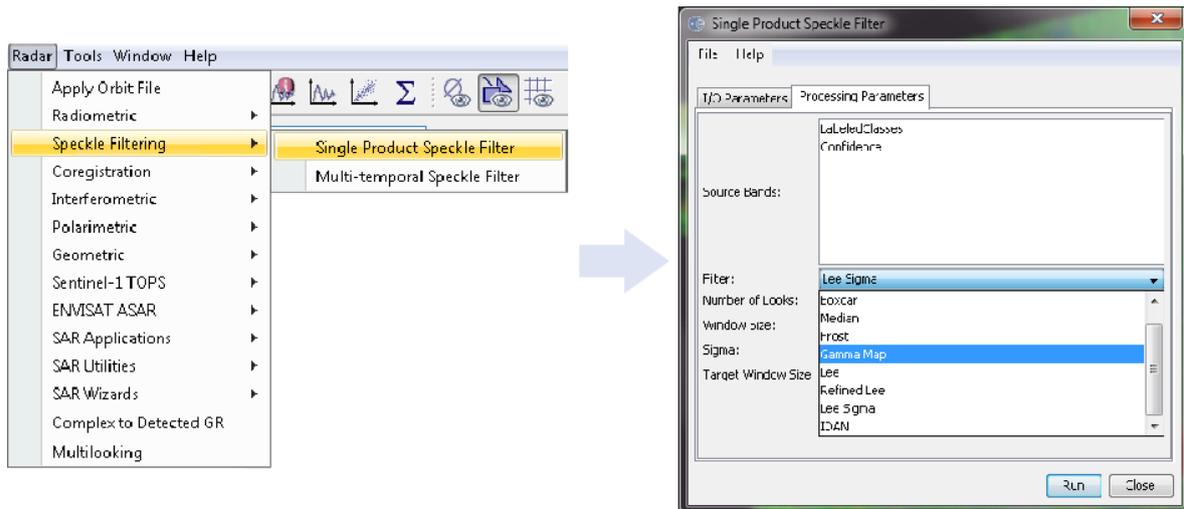


b) Operador de Speckle Filter

Las imágenes SAR tienen una textura inherente a la sal y la pimienta, llamadas motas (*Speckle*) que degradan la calidad de la imagen. Los puntos son causados por la interferencia aleatoria constructiva y destructiva de las ondas de retorno desfasadas pero coherentes dispersadas por las dispersiones elementales dentro de cada celda de resolución. La reducción de ruido de *speckle* se puede aplicar mediante filtrado espacial o procesamiento *Multilook*. Generalmente, una imagen Sentinel-1 aparece moteada con un ruido de moteado inherente (Van Zyl, Synthetic aperture radar polarimetry, 2011).

Entonces, para reducir este aspecto, varias imágenes o productos de Sentinel-1 se combinan de forma incoherente como si correspondieran a diferentes apariencias de la misma escena. Este procesamiento se conoce como procesamiento *multilook*, como resultado, la imagen *multilooked* mejora la interpretabilidad de la imagen (Engman, 1991).

Figura 3.3: Pasos para los Filtros



c) Algoritmo de ortorectificación

El operador de corrección de terreno Range Doppler implementa el método de ortorectificación range doppler para geocodificar imágenes SAR desde una única geometría de radar de trama 2D. Utiliza la información de vector de estado de órbita disponible en los metadatos u órbita precisa externa (solo para ERS y ASAR), las anotaciones de temporización del radar, los parámetros de conversión de rango de inclinación a tierra junto con los datos de referencia de DEM para obtener la geolocalización exacta.

Figura 3.4: Pasos para la Corrección de Terreno

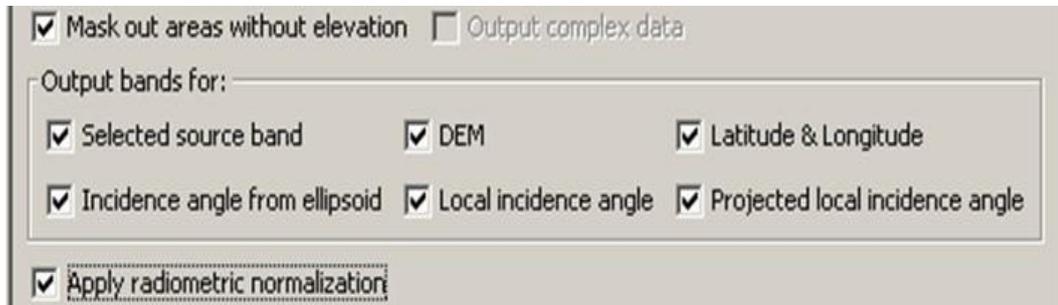


d) Normalización Radiométrica

Aquí se implementa una normalización radiométrica propuesto por (Kelldorfer et al.), septiembre de 1998. En la implementación actual, Θ_{DEM} es el ángulo de incidencia local

proyectado en el plano de rango y definido como el ángulo entre el vector de radiación entrante y el vector normal de superficie proyectada en el plano de rango. El plano de rango es el plano formado por la posición del satélite, la posición del elemento de retrodispersión y el centro de la tierra.

Figura 3.5: Opción en el software Snap de normalización



e) Procesos adicionales

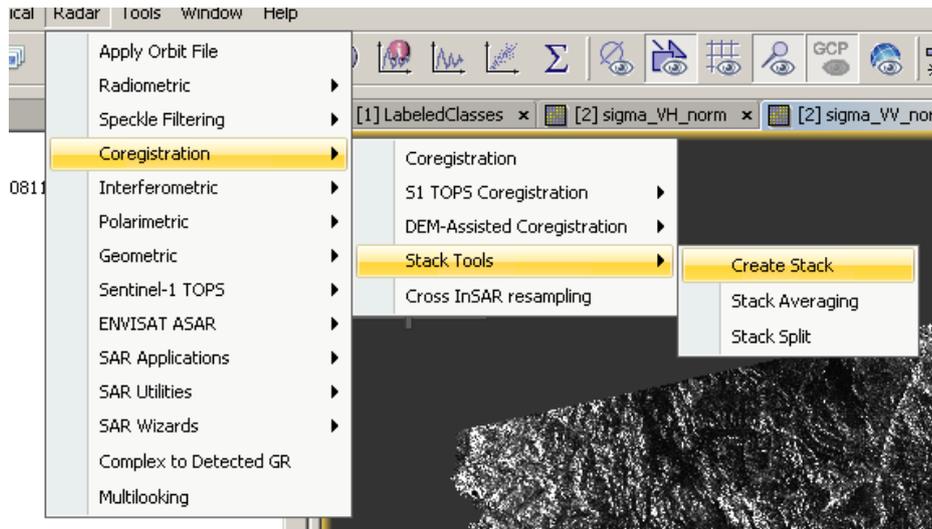
- Aplicar el operador de archivos (*Orbit-Apply Orbit File Operator*)
- Operador de eliminación de ruido térmico (*Thermal Noise Removal Operator*)

3.3.3. Procedimientos de los métodos empleados

Los siguientes pasos a seguir fueron empleados en los métodos de clasificación, Wishart Dual Pol y Cloude-Pottier Dual Pol. Previamente a la aplicación de los métodos, ya fueron aplicados:

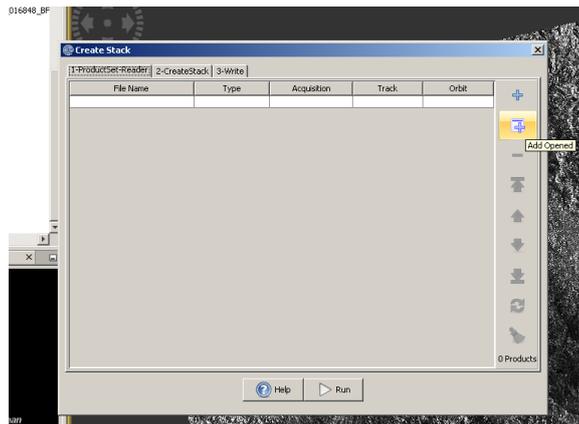
- 1). Operador de Calibración
- 2). Operador de Speckle Filter
- 3). Algoritmo de rectificación
- 4). Normalización radiométrica
- 5). Operador de Archivos
- 6). Operador de eliminación de ruido

Luego se emplearon los siguientes métodos de las herramientas de SNAP

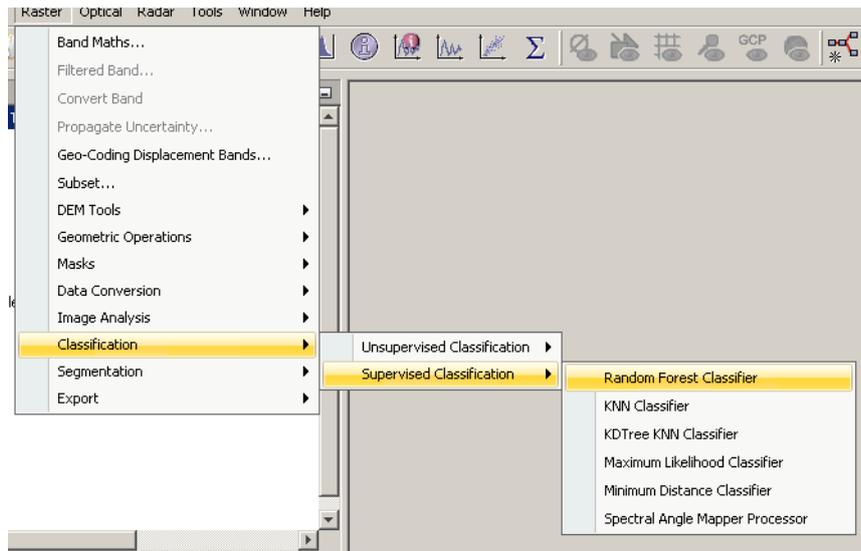


Este paso es para unir las bandas en una sola, por ejemplo, si tenemos HH, HV, VH y VV todas ellas podemos unir en una sola consola para trabajar mejor.

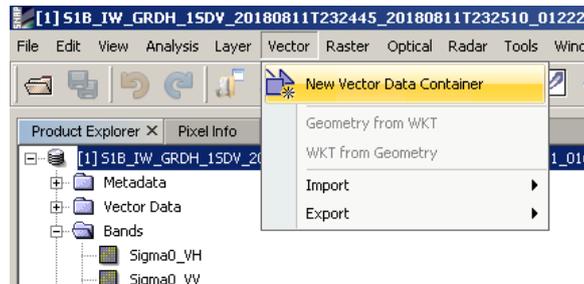
En el caso del sentienel-1 ya viene unidas las VV y VH.



Ahora, la clasificación supervisada aplicada en esta investigación fue aplicando los siguientes métodos y entrenar el algoritmo. La primera opción es el mejor clasificador para el terreno de Apacheta.



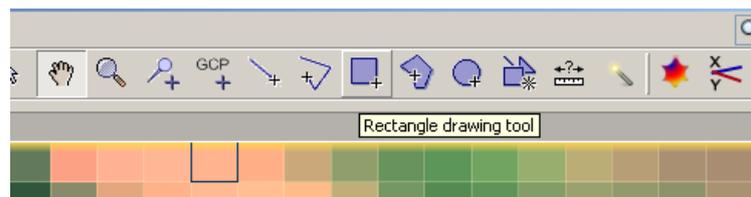
Entrenaremos el algoritmo con los siguientes pasos, la mejoría de la clasificación depende de las muestras o áreas seleccionadas.



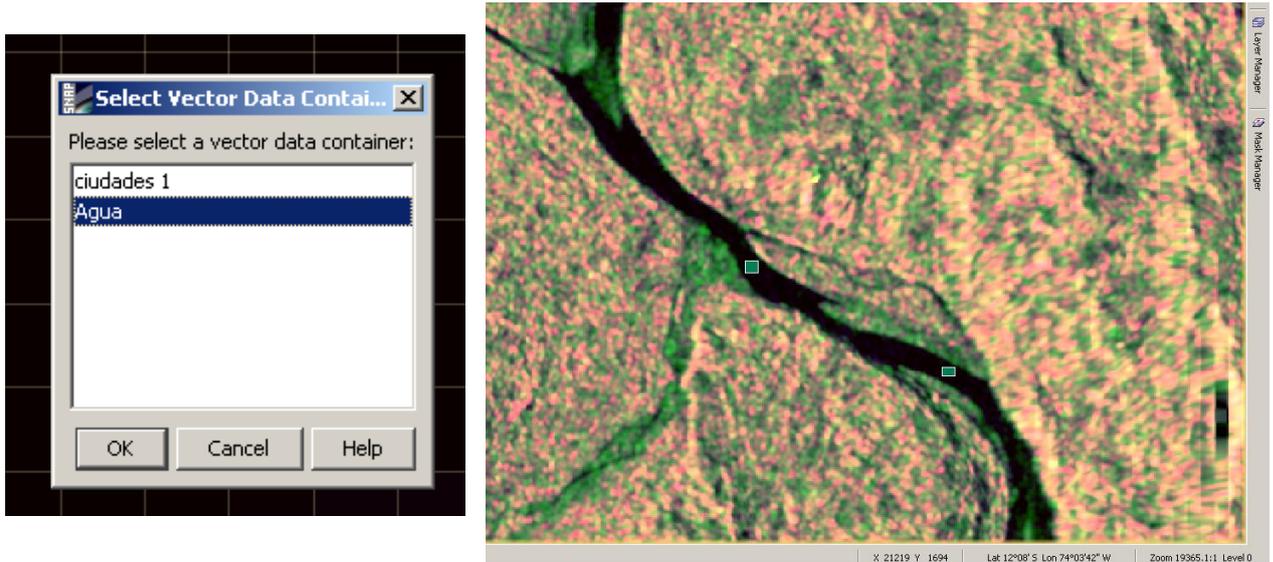
Se define la primera clase como agua y así por delante para el resto.



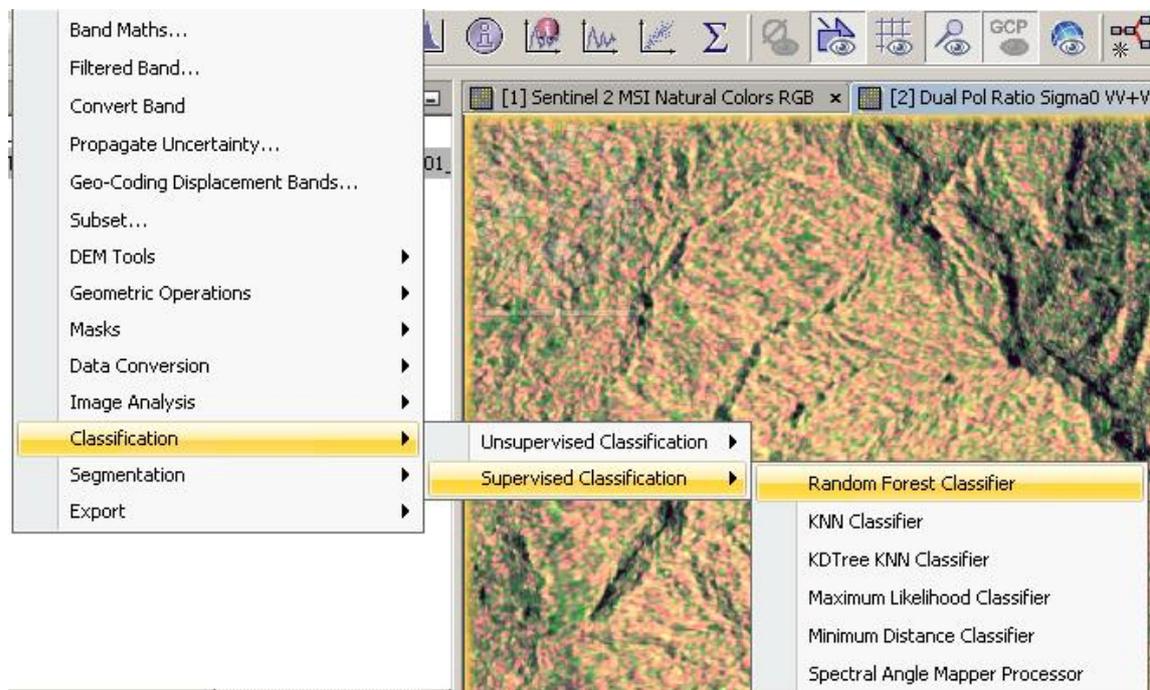
Creamos un polígono u otra geometría para seleccionar las muestras (zonas a clasificar).



Una vez seleccionada, en el proceso nos va mostrando las zonas de clasificación.



Después definiremos la próxima clase (zonas) de la misma manera y así sucesivamente los mismos procedimientos. Por último, para aplicar los métodos (Wishart Dual Pol y Cloude-Pottier Dual Pol) en Apacheta, seleccionamos las opciones: Unsupervised Classification Wishart y Cloude.



3.4. Tipo y nivel de investigación

3.4.1 Tipo de investigación

Por su finalidad es aplicada, depende de los descubrimientos y aportes de la investigación. Se dirige a su aplicación inmediata y no al desarrollo de teorías.

3.4.2 Nivel de investigación

- Explicativo - correlacional– descriptivo

Explicativa: porque presenta el panorama real de Apacheta

Descriptiva: describe características fundamentales que involucran la cuantificación de Apacheta.

Correlacional: mide la relación que puede darse o no entre las variables.

3.5. Métodos

3.5.1 Método de la investigación

- Cualitativo – Cuantitativo

Por su manejo en la correlación de datos.

3.6. Diseño de investigación

3.6.1 Diseño de la investigación

- No experimental – transversal

3.7. Población y muestra

3.7.1 Población

• Está constituida por todas las imágenes de radar Sentinel-1 que contienen información de la extensión de la superficie terrestre de la microcuenca Apacheta de Ayacucho.

3.7.2 Muestras

- Constituida por una selección aleatoria de un subconjunto de imágenes de radar Sentinel-1 que contienen información de la extensión de la superficie terrestre de la microcuenca Apacheta de Ayacucho de ecosistemas de ríos, lagunas, plantaciones vegetales, bosques, poblaciones rurales, montañas y otros.

3.8. Técnicas e instrumentos

Procesamiento de imágenes de radar Sentinel-1B que contienen los datos asociados a las variables de estudio y los formatos para registrar la data producida. Los instrumentos son:

- Imágenes de radar Sentinel-1B
- Equipos de laboratorio de LABTELER.
- Software SNAP
- Guía de análisis documental
- Código en SNAP, Python, Rstudio, SPS, QGIS
- Guía de análisis documental y de observación

3.9 Validez y confiabilidad de instrumentos

- Aplicación de estadística descriptiva e inferencial para la presentación de la clasificación del suelo en la microcuenca Apacheta, mediante el uso de imágenes de radar Sentinel-1, así mismo, se aplica los criterios del análisis de correlación para establecer el grado de relación que existe entre las variables de regresión para describir las características de las variables de estudio.
- El diseño estadístico será realizado con diferentes herramientas y conocimientos estadísticos lo cual se encargará de realizar el procesamiento de un imagan y la validación de los resultados, y serán contrastados con la hipótesis para su validación.

3.10. Técnicas de procesamiento de datos

Softwares como:

- SNAP, Rstudio, Python, QGIS y Excel.

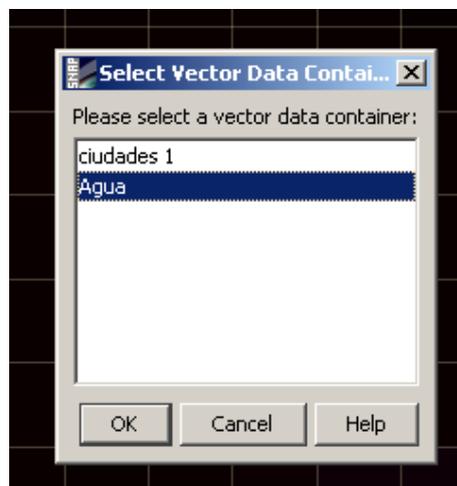
3.11. Aspectos éticos

La realización de la tesis es de mi autoría pura y se analizará e interpretará los resultados haciendo uso del análisis físico y estadístico bajo el asesoramiento de profesionales.

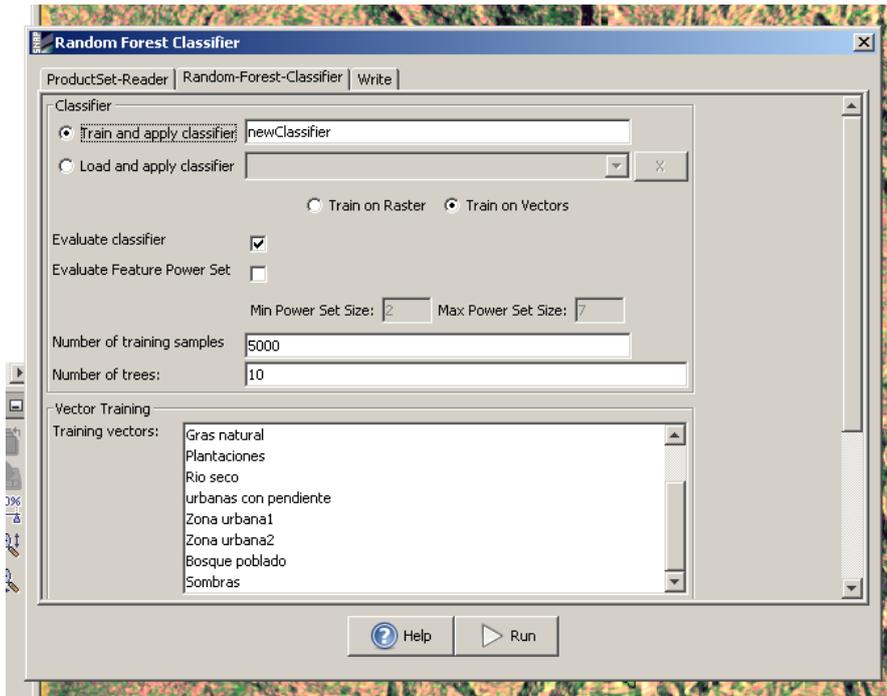
3.12. Método aplicado para la clasificación del uso de uso de suelo en la microcuenca Apacheta

El método aplicado consiste en seleccionar áreas o muestras de reflexiones lisas, rugosas, doble rebote, etc. Todos ellas para preparar el área en estudio, que es la microcuenca Apacheta. Sentinel-1 proporciona las imágenes de radar con los productos Sigma_VV y Sigma_VH. Estos datos que tienen incluidos los parámetros geométricos y espectrales se aplica los siguientes procesos:

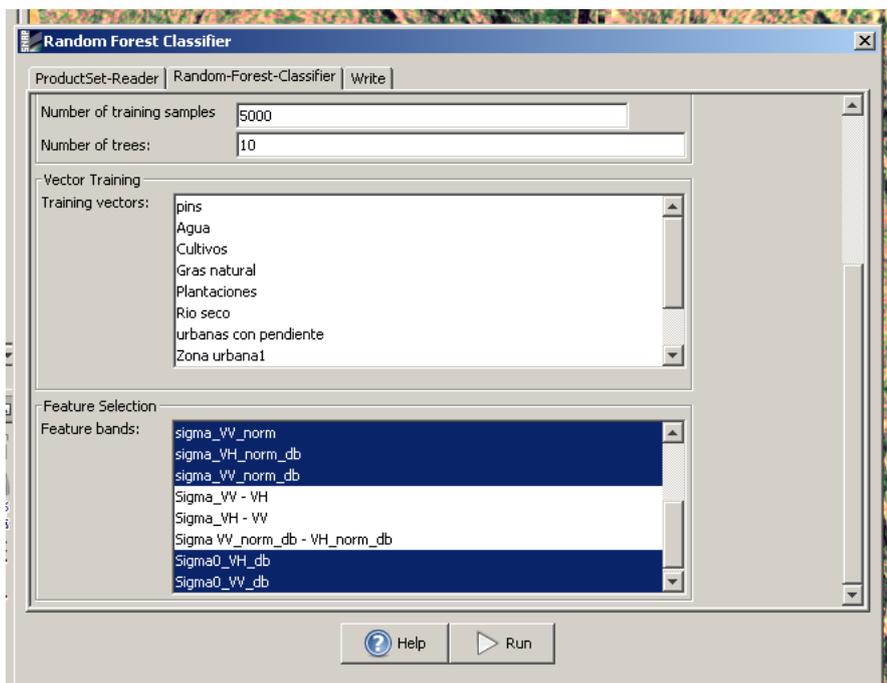
1. Primero se hace las correcciones radiométricas y geométricas respectivas: Operador de Calibración, Operador de Speckle Filter, Algoritmo de rectificación, Normalización radiométrica, Operador de Archivos y Operador de eliminación de ruido.
2. Después se van seleccionando lugares o muestras evidentes como ríos, lagunas, etc.



3. Se almacenan todos los suelos clasificados



4. Luego seleccionamos las bandas trabajadas y normalizadas. Finalmente se guardan y se aplica el clasificador supervisado



CAPITULO IV

IV. Resultados y Discusión

Todos los datos obtenidos de la clasificación del uso del suelo con los diferentes métodos se trabajaron en diferentes softwares SNAP, SPSS25, Rstudio y Excel (el principal fue SNAP), de modo que, en este presente capítulo se mostrará los resultados, estadísticas, diferencias y evaluaciones de los resultados que se obtuvieron. De manera que, en cada sección se hará uso de muchas gráficas; estadísticas de los resultados y análisis de los resultados. Antes de enumerar las características principales se mostrarán una lista de resultados, gráficos, tablas y resultados numéricos que son resultados extraídos de cada zona o nivel de los productos (datos) imágenes de radar Sentinel-1 en la clasificación de cobertura de la cuenca Cachi-Apacheta en la región Ayacucho.

4.1. Estimación de los parámetros geométricos en imágenes Sentinel-1

A continuación, se muestra los resultados de los niveles de clasificación trabajada en la imagen (*S1B_IW_GRDH_1SDV_20180811T232510*) en la Cuenca Cachi Apacheta región Ayacucho mediante imágenes Sentinel-1B. Existen 9 niveles clasificados del uso del suelo y son los siguientes:

- Nivel 0: Ríos, lagunas, ojos de agua, represas y agua en movimiento
- Nivel 1: Elevada población de vegetación y árboles
- Nivel 2: Zonas con cultivo
- Nivel 3: Áreas planas donde hay pasto natural
- Nivel 4: Zonas donde hay plantaciones
- Nivel 5: Bordes de los ríos
- Nivel 6: Sombras
- Nivel 7: Zona urbana ubicados en áreas con pendiente
- Nivel 8: Zona urbana de Huamanga
- Nivel 9: Zona urbana Huamanga y otros lugares cercanos
- Represas: Agua almacenada o tranquila.

Tabla 1: Estadísticos del nivel 0

Estadísticos

	localIncidence Angle	Sigmao_VH norm	Sigmao_VV norm
N Válido	140	140	140
N Perdidos	0	0	0
Media	44.09646129	0.0027625	0.00904307
Error estándar de la media	0.103582442	5.6626E-05	0.00027477
Mediana	43.76495	0.00262	0.008285
Moda	43,65363a	0,00222a	0.00877
Desv. Desviación	1.225603982	0.00067	0.00325113
Varianza	1.502105121	4.489E-07	1.057E-05
Asimetría	3.052222864	0.89906559	2.49565289
Error estándar de asimetría	0.204847149	0.20484715	0.20484715
Curtosis	9.736779313	1.43856942	10.2183519
Error estándar de curtosis	0.406942072	0.40694207	0.40694207
Rango	6.97728	0.00397	0.021
Mínimo	42.62064	0.00161	0.00535
Máximo	49.59792	0.00558	0.02635
Suma	6173.50458	0.38675	1.26603

a. Existen múltiples modas. Se muestra el valor más pequeño.

La Tabla 1 pertenece a la zona de clasificación 1, en dicha zona se encuentran ubicadas aguas, lagunas, represas, ojos de agua y aguas en reposo en Apacheta de 140 muestras.

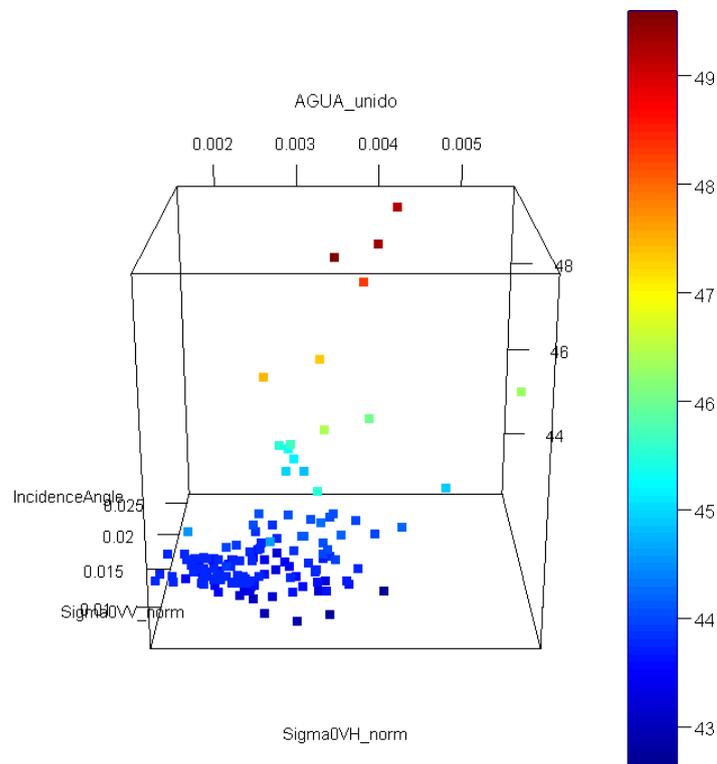


Figura 4.1: Gráfico resultante del nivel 0(Agua).

Tabla 2 : Estadísticos del nivel 1

Estadísticos

	localIncidence Angle	Sigmao_VH norm	Sigmao_VV norm
N Válido	3083	3083	3083
N Perdidos	0	0	0
Media	46.23574658	0.04238101	0.20573917
Error estándar de la media	0.272529221	0.00047104	0.00277616
Mediana	45.88991	0.03605	0.16578
Moda	36,061320a	0.01373	,177200a
Desv. Desviación	15.13212213	0.02615434	0.1541454
Varianza	228.9811202	0.00068405	0.0237608
Asimetría	0.097682084	1.48905566	1.69655267
Error estándar de asimetría	0.044093818	0.04409382	0.04409382
Curtosis	-0.613506265	3.7415302	3.83389026
Error estándar de curtosis	0.088159111	0.08815911	0.08815911
Rango	76.18531	0.2431	1.1314
Mínimo	8.70445	0.00472	0.01107
Máximo	84.88976	0.24782	1.14247
Suma	142544.8067	130.66066	634.29385

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

La Tabla 2 pertenece a la zona de clasificación 2, en dicha zona se encuentran ubicadas arboles con población de densidad alta, bosques, y arboles con docel alto en Apacheta de 3083 muestras.

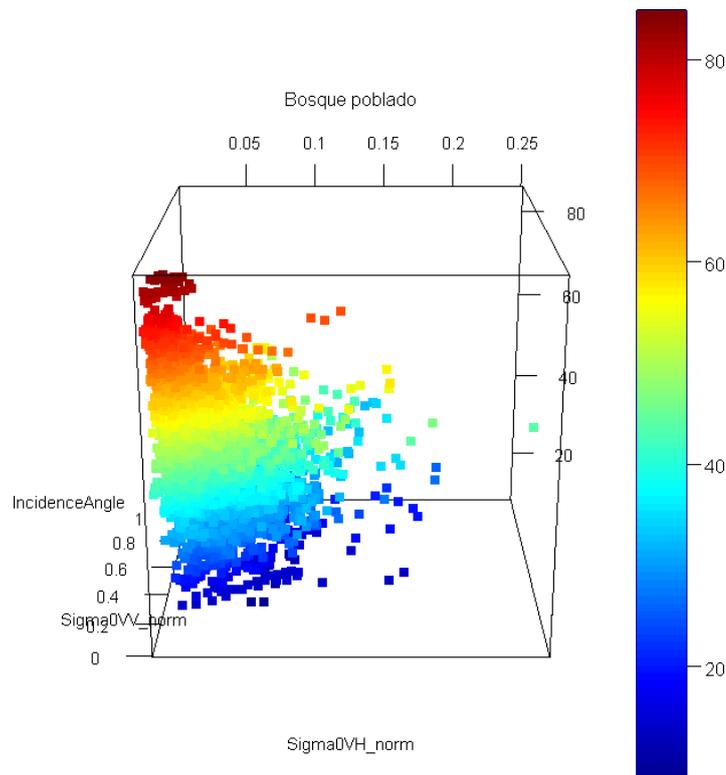


Figura 4.2: Gráfico resultante del nivel 1(Bosque poblado).

Tabla 3 : Estadísticos del nivel 2

Estadísticos	localIncidence Angle	Sigmao_VH norm	Sigmao_VV norm
N Válido	132	132	132
N Perdidos	0	0	0
Media	40.71752432	0.02841159	0.11834879
Error estándar de la media	0.564648338	0.00106853	0.00494756
Mediana	41.11309	0.0266	0.10521
Moda	40,391140a	,014520a	,046300a
Desv. Desviación	6.487315506	0.01227644	0.05684316
Varianza	42.08526247	0.00015071	0.00323115
Asimetría	-0.701338049	1.02813889	0.71445999
Error estándar de asimetría	0.210830703	0.2108307	0.2108307
Curtosis	0.880504782	1.27374398	-0.28224293
Error estándar de curtosis	0.4186684	0.4186684	0.4186684
Rango	27.82064	0.06319	0.23842
Mínimo	24.49619	0.00964	0.03928
Máximo	52.31683	0.07283	0.2777
Suma	5374.71321	3.75033	15.62204

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

La Tabla 3 pertenece a la zona de clasificación 3, en dicha zona se encuentran ubicadas chacras, plantaciones de tubérculos, y plantas de dimensiones pequeñas en Apacheta de 132 muestras.

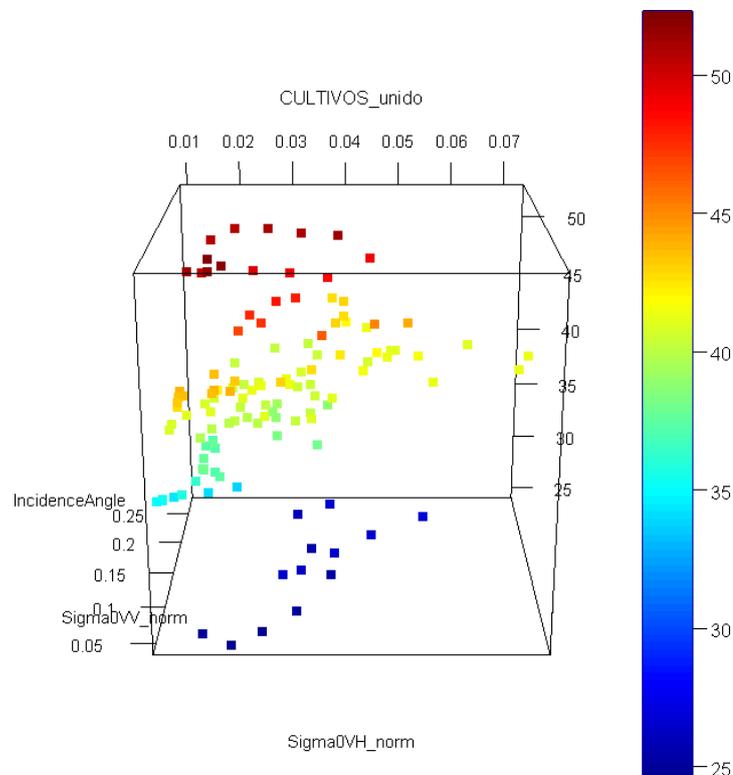


Figura 4.3: Gráfico resultante de nivel 2(Cultivos).

Tabla 4 : Estadísticos del nivel 3

Estadísticos	localIncidence Angle	Sigmao_VH norm	Sigmao_VV norm
N Válido	140	140	140
N Perdidos	0	0	0
Media	36.5794233	0.00396793	0.02869786
Error estándar de la media	0.09700214	0.00011341	0.00068184
Mediana	36.569515	0.003485	0.0271
Moda	35,098580a	,002420a	0.02543
Desv. Desviación	1.1477448	0.00134183	0.00806764
Varianza	1.31731813	1.8005E-06	6.5087E-05
Asimetría	0.11401205	0.77056069	0.73204979
Error estándar de asimetría	0.20484715	0.20484715	0.20484715
Curtosis	-0.51715246	-0.33015388	-0.16335375
Error estándar de curtosis	0.40694207	0.40694207	0.40694207
Rango	5.32844	0.00563	0.0366
Mínimo	34.10355	0.00204	0.01492
Máximo	39.43199	0.00767	0.05152
Suma	5121.11926	0.55551	4.0177

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

La Tabla 4 pertenece a la zona de clasificación 4, en dicha zona se encuentran ubicadas gramado natural (pastos) y plantas pegadas a la superficie en lugares de superficie lisa en Apacheta de 140 muestras.

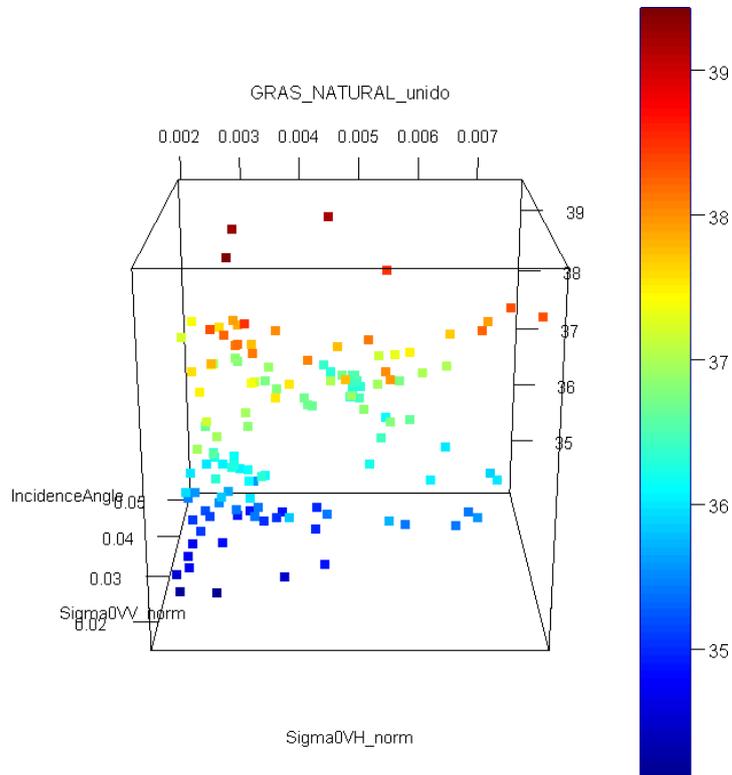


Figura 4.4: Gráfico resultante de nivel 3(Gras natural)

Tabla 5 : Estadísticos del nivel 4

Estadísticos	localIncidence Angle	Sigmao_VH norm	Sigmao_VV norm
N Válido	302	302	302
N Perdidos	0	0	0
Media	41.65126775	0.01330467	0.05645023
Error estándar de la media	0.14974949	0.00046992	0.00161498
Mediana	42.287035	0.010415	0.051305
Moda	35,531160a	0.01235	,027420a
Desv. Desviación	2.602368685	0.00816641	0.02806538
Varianza	6.772322773	6.669E-05	0.00078767
Asimetría	-1.52428203	1.34021585	0.74455371
Error estándar de asimetría	0.140258918	0.14025892	0.14025892
Curtosis	2.454113652	1.57165402	-0.02670361
Error estándar de curtosis	0.279614867	0.27961487	0.27961487
Rango	14.12399	0.03842	0.13764
Mínimo	33.38552	0.00403	0.01166
Máximo	47.50951	0.04245	0.1493
Suma	12578.68286	4.01801	17.04797

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

La Tabla 5 pertenece a la zona de clasificación 5, en dicha zona se encuentran ubicadas superficies con plantaciones (plantas y vegetales) en Apacheta de 302 muestras.

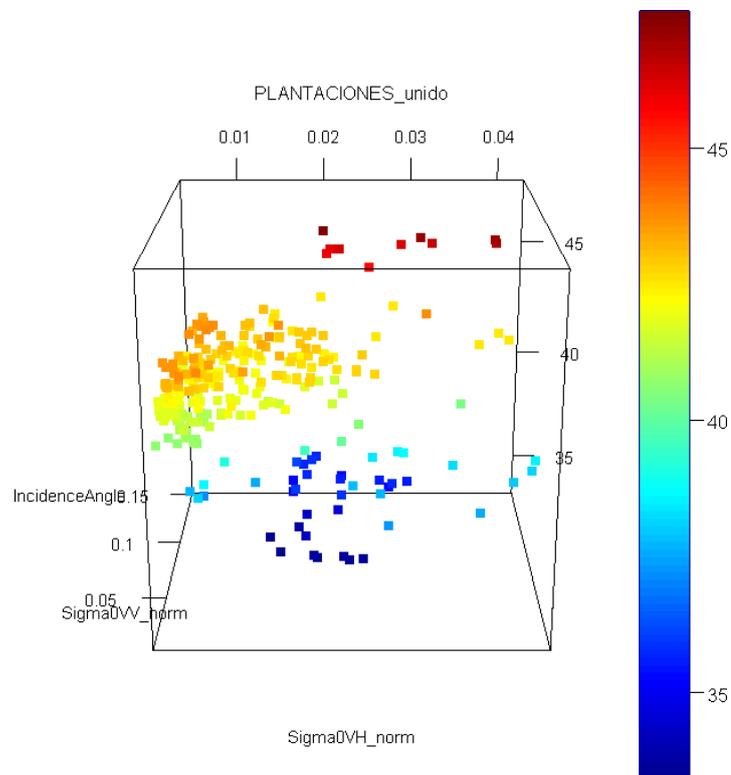


Figura 4.5: Gráfico resultante de nivel 4(Plantaciones).

Tabla 6 : Estadísticos del nivel 5

Estadísticos	localIncidence Angle	Sigmao_VH norm	Sigmao_VV norm
N Válido	468	468	468
N Perdidos	0	0	0
Media	43.8998129	0.01093806	0.09176906
Error estándar de la media	0.03812486	0.00027648	0.00260061
Mediana	44.084035	0.00953	0.07996
Moda	43,785860a	,004940a	,025740a
Desv. Desviación	0.8247669	0.00598118	0.05625971
Varianza	0.68024044	3.5775E-05	0.00316515
Asimetría	-1.8943736	1.72083547	2.20075451
Error estándar de asimetría	0.11286705	0.11286705	0.11286705
Curtosis	5.72399181	4.54995405	8.54269593
Error estándar de curtosis	0.22526046	0.22526046	0.22526046
Rango	6.3239	0.03908	0.44045
Mínimo	39.37156	0.00305	0.01582
Máximo	45.69546	0.04213	0.45627
Suma	20545.1124	5.11901	42.94792

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

La Tabla 6 pertenece a la zona de clasificación 6, en dicha zona se encuentran ubicadas a los bordes de ríos, arena, tierra, y piedras en Apacheta de 468 muestras.

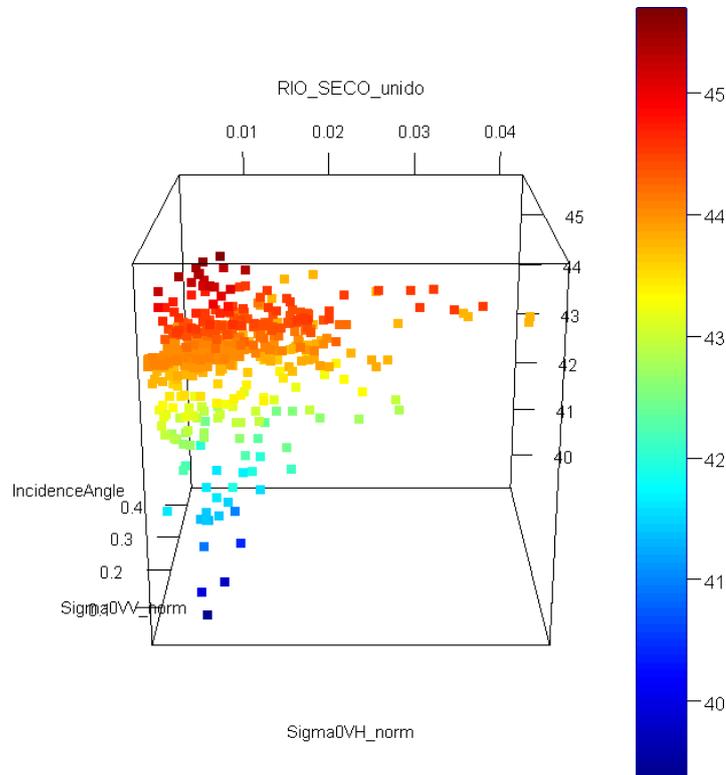


Figura 4.6: Gráfico resultante de nivel 5 (Río seco).

Tabla 7: Estadísticos del nivel 6

Estadísticos	localIncidence Angle	Sigmao_VH norm	Sigmao_VV norm
N Válido	362	362	362
N Perdidos	0	0	0
Media	82.7290528	0.0057213	0.00915994
Error estándar de la media	0.48614548	8.1519E-05	0.00016631
Mediana	84.83198	0.00539	0.00865
Moda	85,238220a	0.00503	,005990a
Desv. Desviación	9.24954858	0.001551	0.00316434
Varianza	85.5541489	2.4056E-06	1.0013E-05
Asimetría	-1.31614264	0.99661154	2.66662301
Error estándar de asimetría	0.12821313	0.12821313	0.12821313
Curtosis	1.81756059	1.46400146	13.5349463
Error estándar de curtosis	0.25573441	0.25573441	0.25573441
Rango	47.10775	0.00925	0.0277
Mínimo	49.51208	0.00271	0.00438
Máximo	96.61983	0.01196	0.03208
Suma	29947.9171	2.07111	3.3159

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

La Tabla 7 pertenece a la zona de clasificación 7, en dicha zona se encuentran ubicadas las sombras técnicamente llamado (*Shadowing*), estas se ubican siempre al lado de las montañas en Apacheta de 362 muestras.

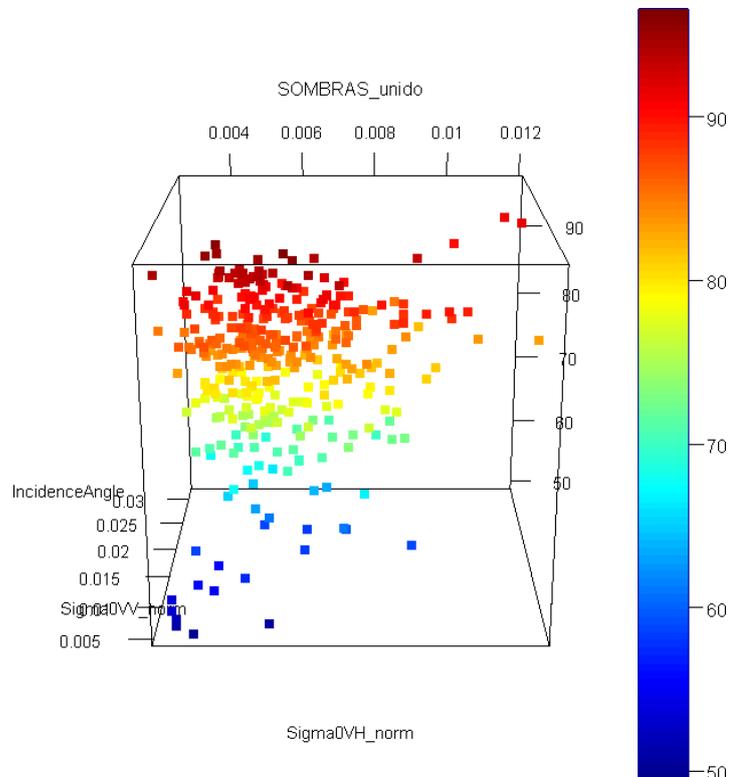


Figura 4.7: Gráfico resultante de nivel 6 (Sombras).

Tabla 8 : Estadísticos del nivel 7

Estadísticos	localIncidence Angle	Sigmao_VH norm	Sigmao_VV norm
N Válido	123	123	123
N Perdidos	0	0	0
Media	32.53416593	0.05304195	0.21329358
Error estándar de la media	1.645658047	0.00238769	0.01010465
Mediana	21.87975	0.05013	0.21768
Moda	17,635490a	,021800a	,195970a
Desv. Desviación	18.25123065	0.02648077	0.11206601
Varianza	333.1074202	0.00070123	0.01255879
Asimetría	1.050625369	1.26235602	0.36993503
Error estándar de asimetría	0.218232434	0.21823243	0.21823243
Curtosis	-0.60668304	2.04363657	-0.21219311
Error estándar de curtosis	0.433156107	0.43315611	0.43315611
Rango	50.36625	0.13153	0.48384
Mínimo	16.80244	0.01752	0.02723
Máximo	67.16869	0.14905	0.51107
Suma	4001.70241	6.52416	26.23511

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

La Tabla 8 pertenece a la zona de clasificación 8, en dicha zona se encuentran ubicados lugares urbanos, carreteras, edificios y materiales que contienen hierro, técnicamente llamado (reflexiones altas), en Apacheta de 123 muestras.

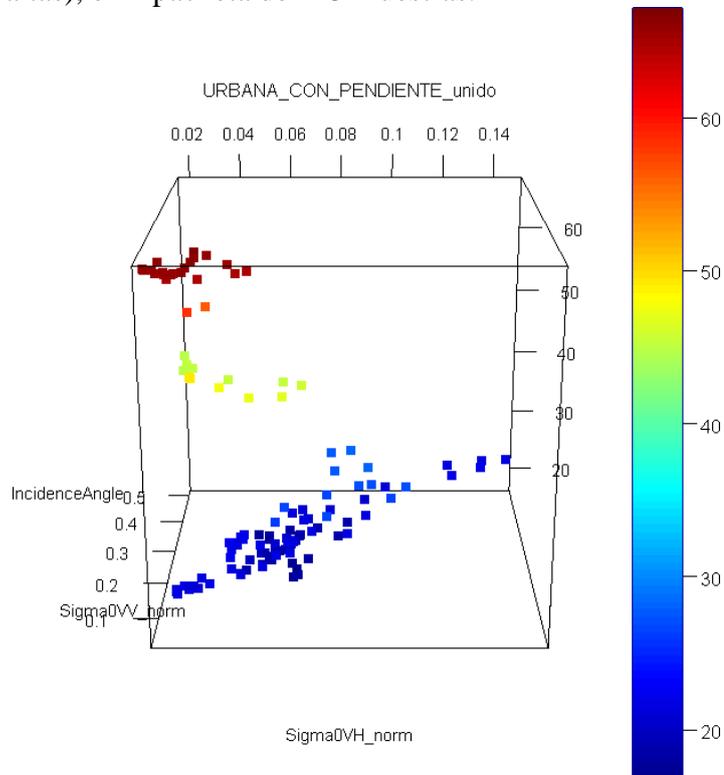


Figura 4.8: Gráfico resultante de nivel 7 (Zona urbana con pendiente).

Tabla 9: Estadísticos del nivel 8

Estadísticos	localIncidence Angle	Sigmao_VH norm	Sigmao_VV norm
N Válido	176	176	176
N Perdidos	0	0	0
Media	43.9475108	0.03163972	0.5537821
Error estándar de la media	0.08245333	0.00088723	0.03821826
Mediana	43.80542	0.029585	0.392065
Moda	43.87362	0.04127	0.67839
Desv. Desviación	1.09386704	0.01177045	0.50702255
Varianza	1.19654511	0.00013854	0.25707187
Asimetría	1.42377478	1.18372029	3.26085964
Error estándar de asimetría	0.1830894	0.1830894	0.1830894
Curtosis	2.62888894	1.82529915	18.6706929
Error estándar de curtosis	0.36419713	0.36419713	0.36419713
Rango	6.29606	0.0643	4.34606
Mínimo	41.48514	0.01173	0.05113
Máximo	47.7812	0.07603	4.39719
Suma	7734.7619	5.56859	97.46565

La Tabla 9 pertenece a la zona de clasificación 9, dicha zona es una extensión de la zona de clasificación 8. En ellas se encuentran muestras combinadas, es decir, árboles, campos, concreto, sombras, edificios, etc. de 176 muestras en total.

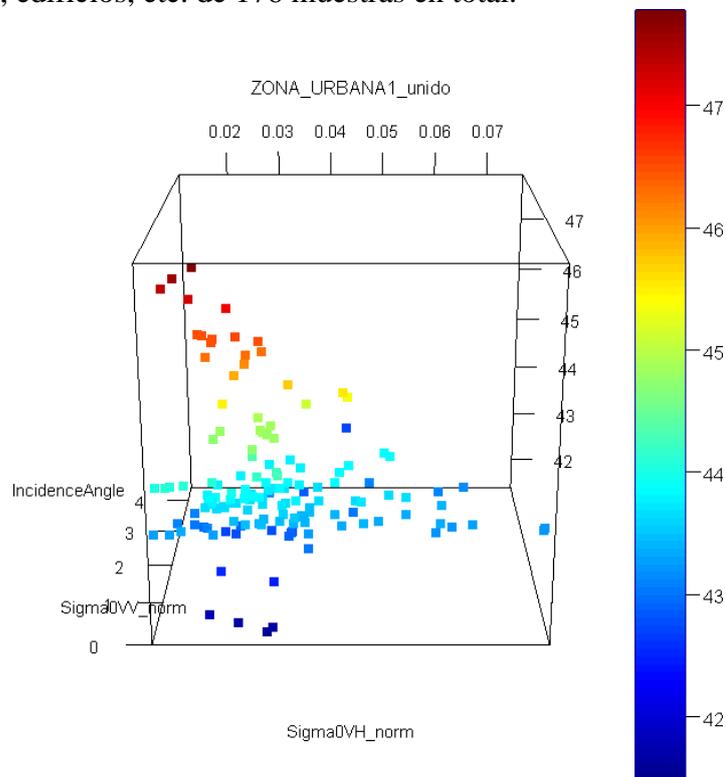


Figura 4.9: Gráfico resultante de nivel 8 (Zona urbana).

Tabla 10 : Estadísticos del nivel 9

Estadísticos	localIncidence Angle	Sigmao_VH norm	Sigmao_VV norm
N Válido	274	274	274
N Perdidos	0	0	0
Media	42.0692837	0.08568883	0.24848839
Error estándar de la media	0.08618776	0.00358234	0.00981157
Mediana	41.85214	0.073805	0.189695
Moda	39,899810a	,027010a	0.1774
Desv. Desviación	1.42666131	0.05929831	0.16241042
Varianza	2.03536248	0.00351629	0.02637714
Asimetría	0.3667264	3.0858189	1.90106766
Error estándar de asimetría	0.14717754	0.14717754	0.14717754
Curtosis	-0.97760506	13.9565271	3.86085196
Error estándar de curtosis	0.29331378	0.29331378	0.29331378
Rango	4.8994	0.46539	0.89694
Mínimo	39.85326	0.01623	0.06218
Máximo	44.75266	0.48162	0.95912
Suma	11526.9837	23.47874	68.08582

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

La Tabla 10 pertenece a la zona de clasificación 10, en dicha zona se encuentran ubicados lugares u objetivos difíciles o duros en Apacheta de 274 muestras.

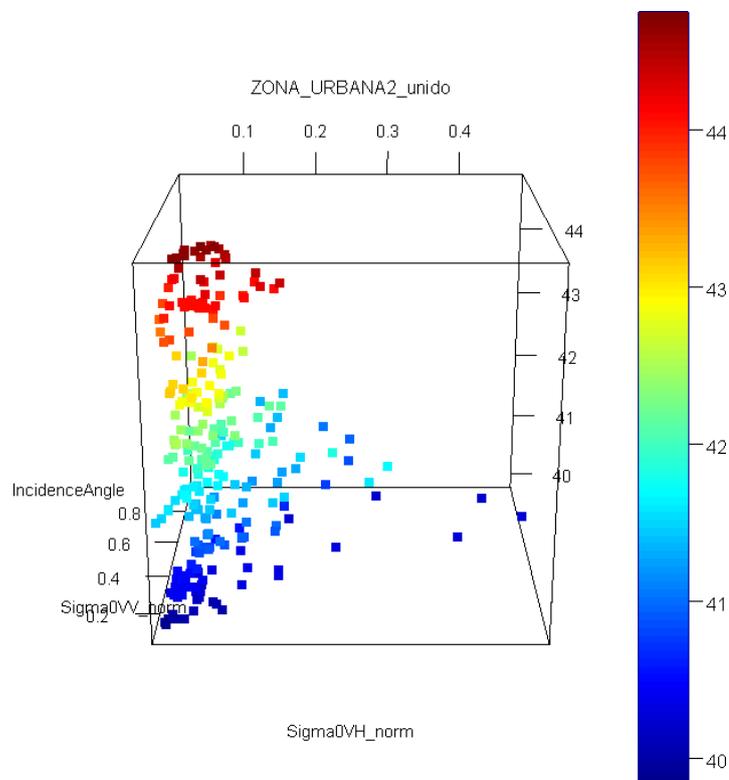


Figura 4.10: Gráfico resultante de nivel 9 (Zona urbana 2).

Tabla 11 : Estadísticos de la Represa

Estadísticos	localIncidence Angle	Sigmao_VH norm	Sigmao_VV norm
N Válido	174	174	174
N Perdidos	0	0	0
Media	40.76426362	0.00241103	0.01017213
Error estándar de la media	0.050558486	4.1353E-05	0.00021226
Mediana	40.54376	0.0023	0.00979
Moda	40,537290a	0.00201	,009790a
Desv. Desviación	0.666912233	0.00054549	0.00279993
Varianza	0.444771926	2.9756E-07	7.8396E-06
Asimetría	0.295209877	0.40365759	0.42947299
Error estándar de asimetría	0.18412104	0.18412104	0.18412104
Curtosis	0.489742219	-0.23691795	0.18127898
Error estándar de curtosis	0.366227473	0.36622747	0.36622747
Rango	3.07756	0.00283	0.01562
Mínimo	39.34582	0.00127	0.00364
Máximo	42.42338	0.0041	0.01926
Suma	7092.98187	0.41952	1.76995

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

La Tabla 11 no pertenece a la zona de clasificación 1, dicha zona es una extensión de la zona de clasificación 1. Específicamente es la represa de Cuchoquisera de 174 muestras de estudio.

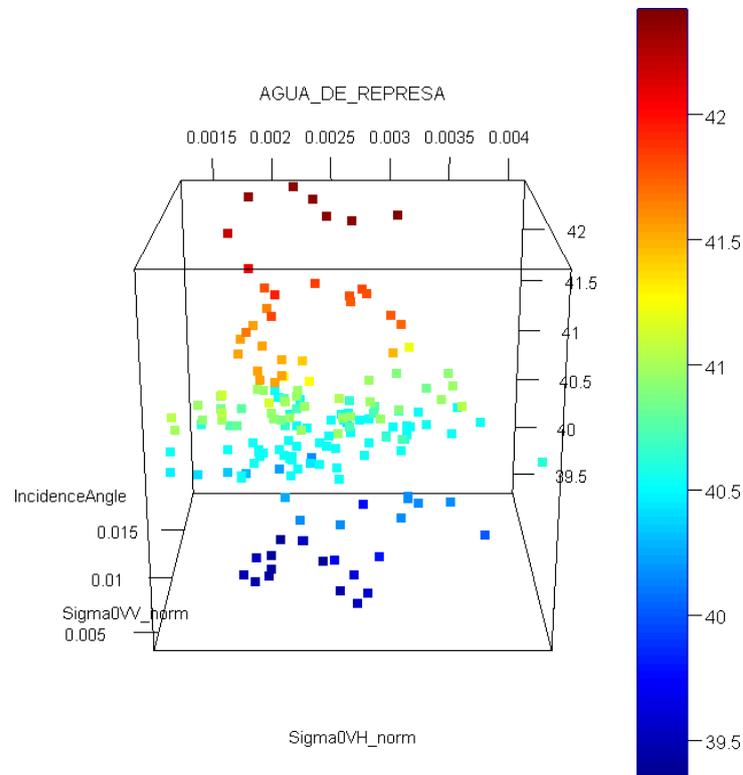
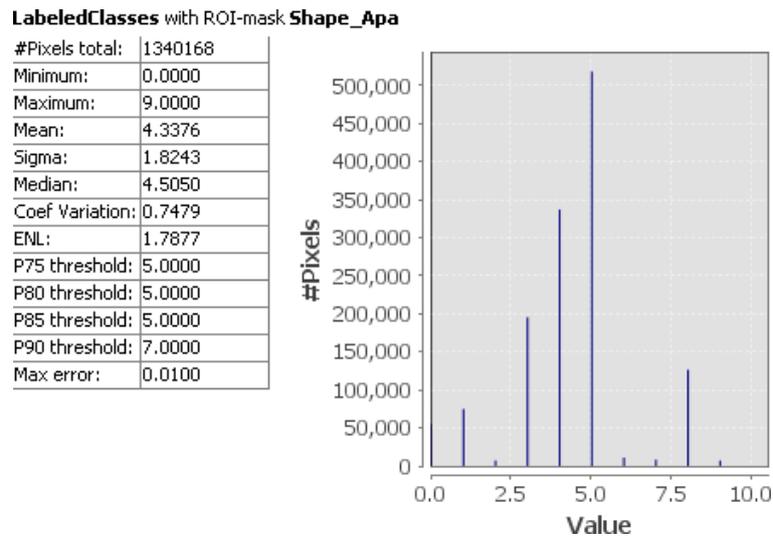


Figura 4.11: Gráfico resultante de una Represa.

Resultados del Shape-Apacheta del suelo clasificado



(a) Histograma & Percentiles de Shape-Apacheta

Label	Colour	Value	Frequency	Description
Sombras		6	2.270%	
Agua		0	2.621%	
Cultivos		2	1.843%	
Gras natural		3	5.016%	
Bosque poblado		1	16.357%	
Rio seco		5	24.124%	
Plantaciones		4	32.527%	
no data		-1	0.000%	no data
Zona urbana1		8	5.957%	
urbanas con pen...		7	3.156%	
Zona urbana2		9	6.128%	

(b) Porcentaje & Colores de la imagen clasificada

Figura 4.12: Resultados de la clasificación.

A continuación, se detalla las características principales de pixeles del Shape-Apacheta clasificado en imágenes de radar Sentinel-1.

Radio medio de la tierra utilizado:

6371.0 km

Área total del pixel:

97.06628739 m²

97.71826878 m² por exceso.

En la *Tabla 12* está representada los cálculos en pixeles y metros cuadrados de la clasificación realizada en esta investigación en Apacheta. La zona 5 (nivel 5) es donde existen mayores pixeles en Apacheta. Con un total de 5063.88 Ha contenidos

en la cuenca Apacheta, en esta zona se encuentran ríos, lagunas, ojos de agua, represas, etc.

Tabla 12 : Pixeles extraídos del Shape-Apacheta clasificado

Zona	Pixel	Pixel(m ²)	Pixel(Ha)
nivel0	54879	5362680.872	536.26
nivel1	74871	7316264.502	731.62
nivel2	7212	704744.1544	70.47
nivel3	195296	19083987.02	1908.39
nivel4	336842	32915617.09	3291.56
nivel5	518213	50638877.22	5063.88
nivel6	11076	1082327.545	108.23
nivel7	8318	812820.5597	81.28
nivel8	126348	12346507.82	1234.65
nivel9	7113	695070.0458	69.50
nivel-1			
Total	1340168	130958896.83	13095.88

Tabla 13 : Pixeles exportados al Excel del Shape-Apacheta clasificado

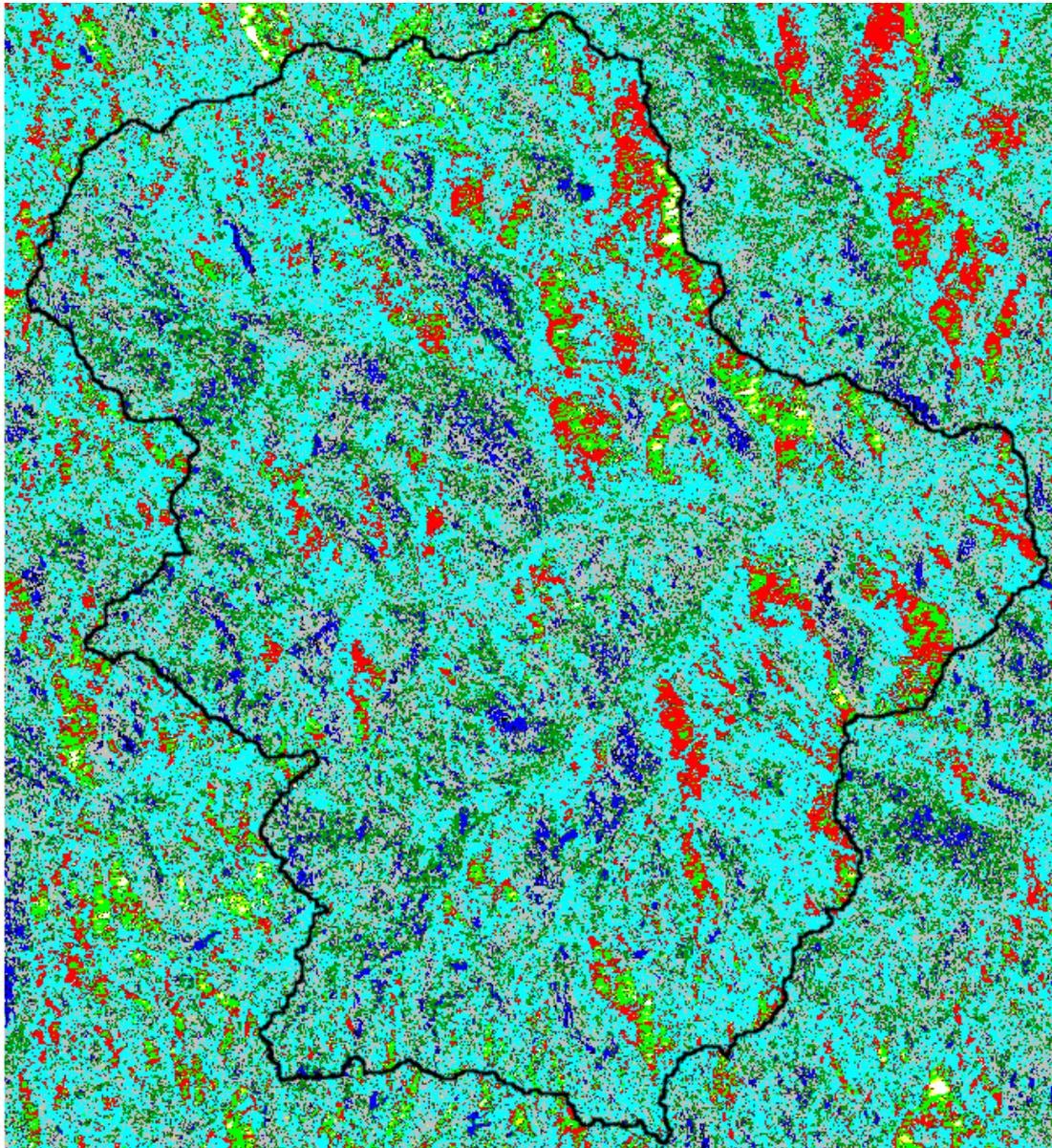
Zona	Pixel
nivel0	45491
nivel1	46223
nivel2	4741
nivel3	156356
nivel4	249354
nivel5	352805
nivel6	8706
nivel7	4913
nivel8	82157
nivel9	4810
nivel-1	93013
Total	1048569

Área total del Shape-Apacheta clasificado:

130958896.83435504m² /13095.889683435503684 Ha

102464347.37637582m² /10246.434737637582657 Ha (Exportados al excel)

La Figura 4.13 pertenece a la clasificación supervisada hecha en esta investigación. Las líneas negras pertenecen al “Shape” de la cuenca Apacheta, lugar donde se realizó la clasificación. La tabla de colores son niveles de clasificados en Apacheta a su vez representa los lugares donde hay agua, hielo, ríos, bofedales, vegetación, etc.



Sombras	■
Agua	■
Cultivos	■
Gras natural	■
Bosque poblado	■
Rio seco	■
Plantaciones	■
no data	■
Zona urbana1	■
urbanas con pen...	■
Zona urbana2	■

Figura 4.13: Resultados de Apacheta clasificado.

4.2. Estimación de los parámetros espectrales diferenciados en imágenes de radar Sentinel-1, para la clasificación del suelo en la microcuenca Apacheta

Las imágenes del satélite Landsat 5, 7 y 8 en la figura 4.84, cuyo procesamiento fue con el software ENVI 5.3 ha permitido la obtención de la cobertura de vegetación mediante el cálculo del NDVI en la microcuenca Apacheta, donde se observan los mapas de la evolución espacial del comportamiento de la cobertura de vegetación del valor medio del NDVI del mes de enero-diciembre del año 2018, los suelos presentan baja vegetación, lo que significa que la mayor parte de estas zonas corresponden a suelos degradados o suelos ocupados por nieve o suelos áridos, así mismo los valores altos de NDVI corresponden a zonas de vegetación y humedales (Puig, 2001);(Moncada, 2019).

Para entender mejor se realizó una clasificación de suelos con vegetación escasa, dispersa y densa, en relación a los suelos desnudos, para ello, partieron del concepto de que el contenido de clorofila de las hojas en las plantas absorbe mayor cantidad de energía que reciben del sol, reduciendo el nivel de reflectancia de la banda roja, mientras que la banda del infrarrojo cercano a penas se ve afectado por estas sustancias, por lo que, cuanto mayor sea la diferencia entre las reflectividades entre ambas bandas, mayor será la vigorosidad de la vegetación (Alvarado, 2019); (Moncada, 2020).

A continuación, se menciona los resultados obtenidos de índice de vegetación en Hectáreas de Apacheta en diferentes temporadas:

NDVI-14-NOV-18 hay en total 30448 pixeles de modo que NDVI=2740.3Ha

NDVI-14-ENE-18 hay en total 51825 pixeles de modo que NDVI=4664.25Ha

NDVI-22-MAY-18 hay en total 48182 pixeles de modo que NDVI=4336.38Ha

NDVI-23-JUN-18 hay en total 4151 pixeles de modo que NDVI=3735.9Ha

NDVI-29-OCT-18 hay en total 30661 pixeles de modo que NDVI=2759.4Ha

De acuerdo con (Moncada, 2020), también se obtuvo de la cobertura de nieve mediante el cálculo del NDSI en la microcuenca Apacheta.

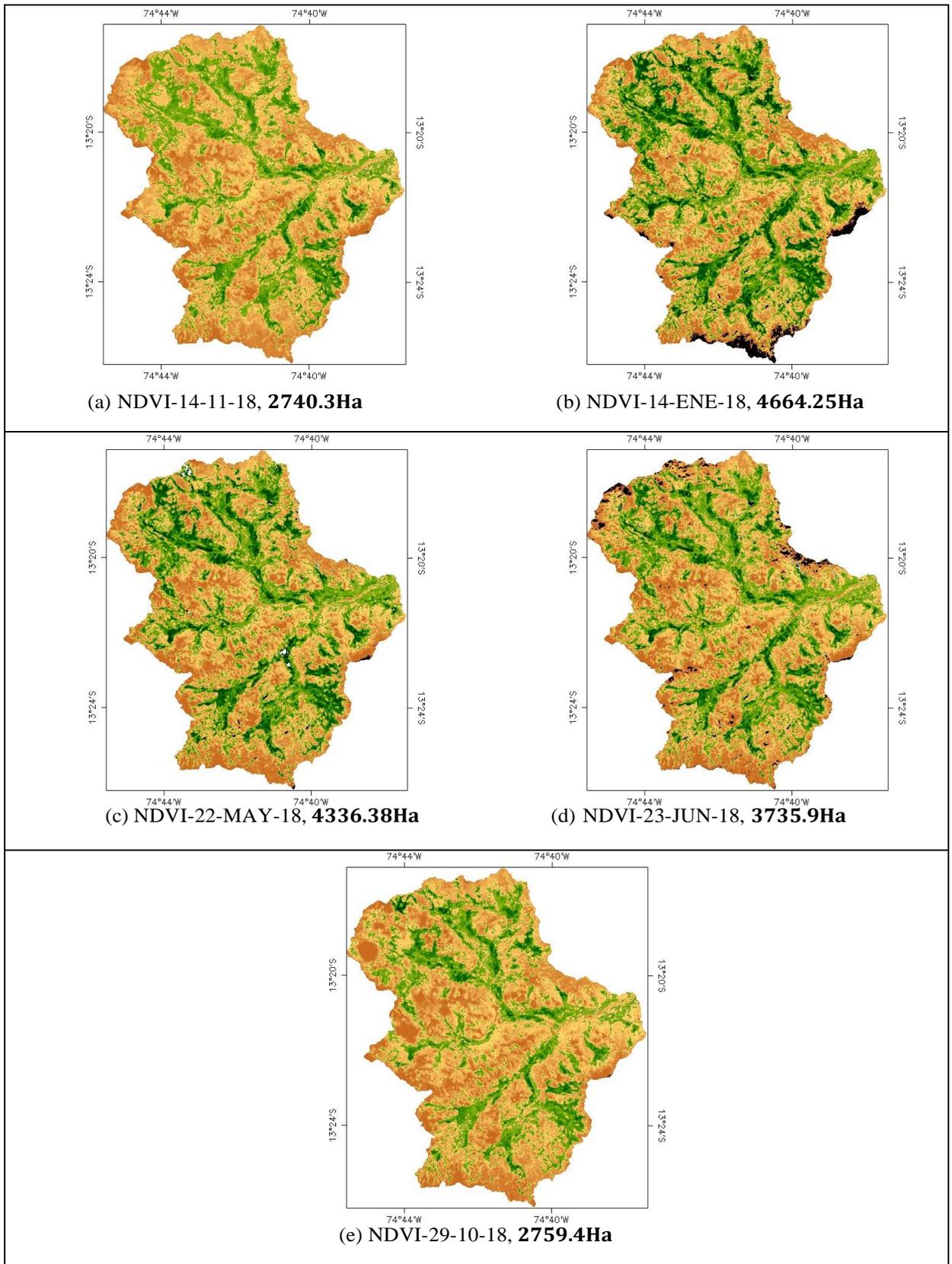
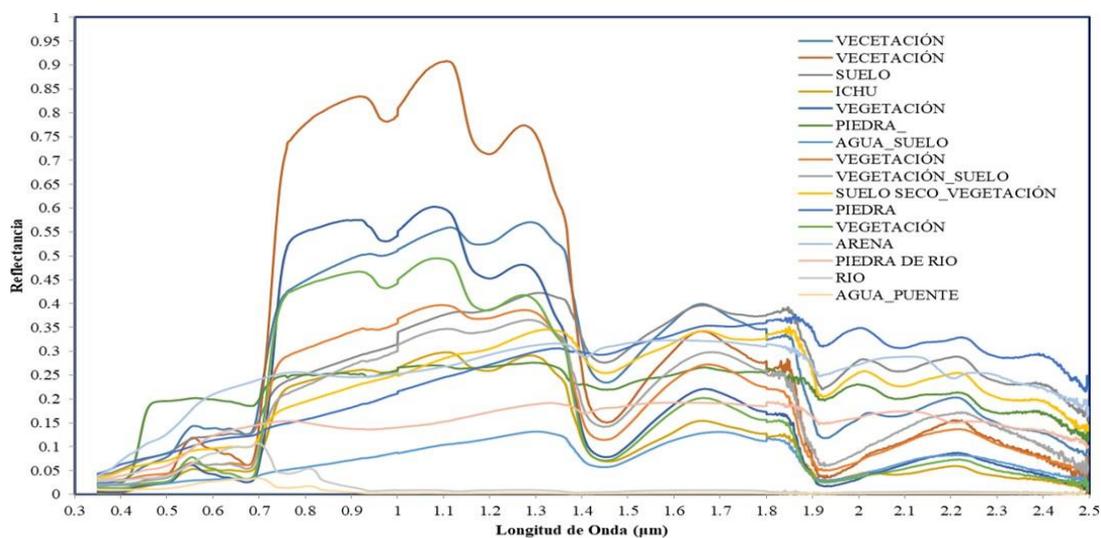


Figura 4.19: Cobertura de vegetación en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, el color verde me indica vegetación

La figura 4.99(a) muestra las firmas espectrales de los diferentes tipos de vegetación, realizadas con el espectroradiómetro “FIELDSPEC4” mediante imágenes Sentinel-2 en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, región Ayacucho. Así como también muestra el suelo y agua analizados en los bofedales de Apacheta de la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, Región Ayacucho, se observa que el comportamiento de la firma espectral para cada tipo de especie de vegetación, suelo y agua, muestra factores que afectan su reflectividad con respecto a la longitud de onda de las bandas espectrales que guardan relación directa con la proporción de las hojas, lignina y el efecto del suelo, la geometría de las hojas y los ángulos de observación de éstas (Sosa, 2019).



(a).Firmas espectrales

Clase	Descripción	Color	N° Puntos	Área (Ha)
1	Aciachne Pulvinata / Muhlenbergia Fastigiata	Green1	9305	372.2
2	Graminea sp. / Muhlenbergia Fastigiata	Green2	1	0.04
3	Stipa sp. / Alchemilla Pinnata / Plantago Sericea / Luzula Peruviana	Green3	91998	3679.92
4	Stipa Ichu	Orange3	3932	157.28
5	Graminea sp.	Magenta1	0	0
6	Flavoparmelia Caperata	Magenta2	2924	116.96
7	Alchemilla Pinnata / Suelo Húmedo	Magenta3	8001	320.04
8	Werneria Pygmaea / Plantago Tubulosa	Yellow1	24828	993.12
9	Alchemilla Pinnata	Yellow2	23545	941.8
10	Vegetación en Suelo Seco	Yellow3	63678	2547.12
11	Roca	Sienna	21554	862.16
12	Plantago Rigida	Sea Green	802	32.08
13	Arena	Marron2	67454	2698.16
14	Piedra de Rio	Marron3	35343	1413.72
15	Rio	Blue1	20	0.8
16	Agua	Blue3	787	31.48

(b) Cobertura espacial de las especies

Figura 4.21: Firmas espectrales y descripción de la cobertura en Apacheta

Fuente: Artículo (Moncada & Pereda, 2019)

La figura 4.21a, muestra el resultado de la clasificación del área en estudio mediante la introducción de las firmas espectrales de las diferentes especies vegetales, suelo y agua, los cuales dan lugar a un mapa de cobertura de uso de suelo de la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta con las áreas involucradas para las diferentes especies vegetales, suelo y agua, las cuales están clasificadas según un código de colores.

Según Moncada y Pereda, se logró determinar los patrones espectrales de la vegetación en los bofedales, medidos en las imágenes de satélite Sentinel-2, mediante la clasificación de su área con 16 diferentes especies de vegetación, suelo y agua, en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, siendo las vegetaciones de los bofedales con mayor cobertura de área la colonia de vegetación conformada por *Stipa* sp., *Alchemilla Pinnata*, *Plantago Sericea*, *Luzula Peruviana*, de aproximadamente 3679.92 Ha, seguido de la especie vegetal contenida en suelo seco con 2547.12 Ha. En la parte suelo se visualizan áreas extensas de suelo arenoso cubriendo áreas de 1413,72 Ha. Las lagunas y zonas con agua llegan a alcanzar un área de 31,48 Ha. (Sosa, 2019); (Moncada & Pereda, 2019).

Las figura 4.21b, muestra la imagen de las firmas espectrales de las especies vegetales, suelo y agua, tomadas con el espectrorradiómetro Field Spec4, introducidas en el software ENVI en donde se les denomina enmembers, para su clasificación en la imagen Sentinel-2 de la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, Región Ayacucho, el código de colores utilizado se describe en el cuadro 4.99b, y difiere sus formas de la imagen de firmas espectrales, dado que para su introducción es necesario colocar el valor de la reflectancia correspondiente a cada longitud de onda de cada banda de la imagen Sentinel-2 a clasificar (Moncada & Pereda, 2019)

Resultados espectrales de la clasificación

- Vegetación de bofedales de mayor cobertura es aproximadamente **3679.92 Ha**
- Especie vegetal contenida en suelo seco con **2547.12 Ha**
- Suelo arenoso cubre un área de **1413,72 Ha**
- Lagunas y zonas con agua llegan a alcanzar un área de **31,48 Ha**

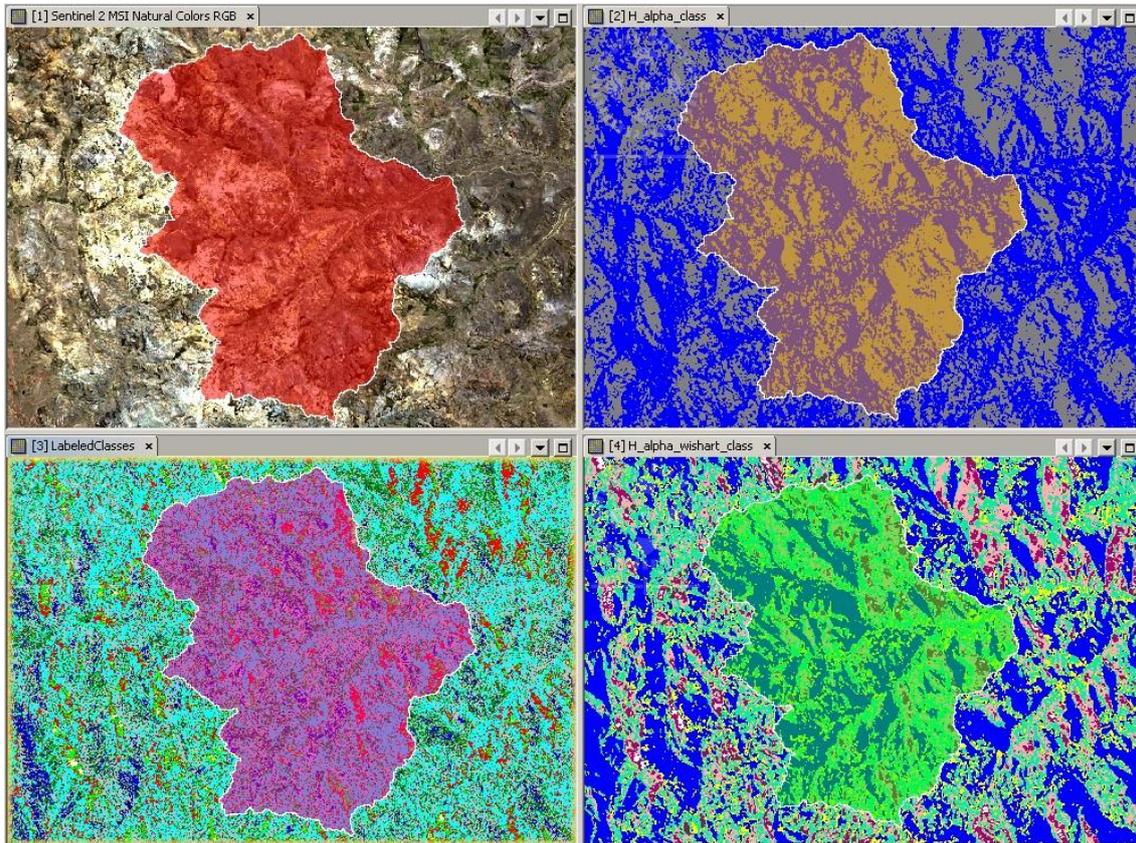


Figura 4.22: Apacheta en diferentes clasificaciones, enmarcadas con un Shape

Discusión:

- Se introdujo el Shape de Apacheta del mismo modo a todas las clasificaciones realizadas.
- El primer cuadro de la Figura 4.22 de color rojo (el Shape) es una imagen óptica del Sentinel-2.
- El segundo de color crema (el Shape) es la clasificación H-Alpha Pottier.
- El tercero de color rosado (el Shape) es la clasificación realizada de la investigación.
- El cuarto de color verde (el Shape) es clasificación Wishart.

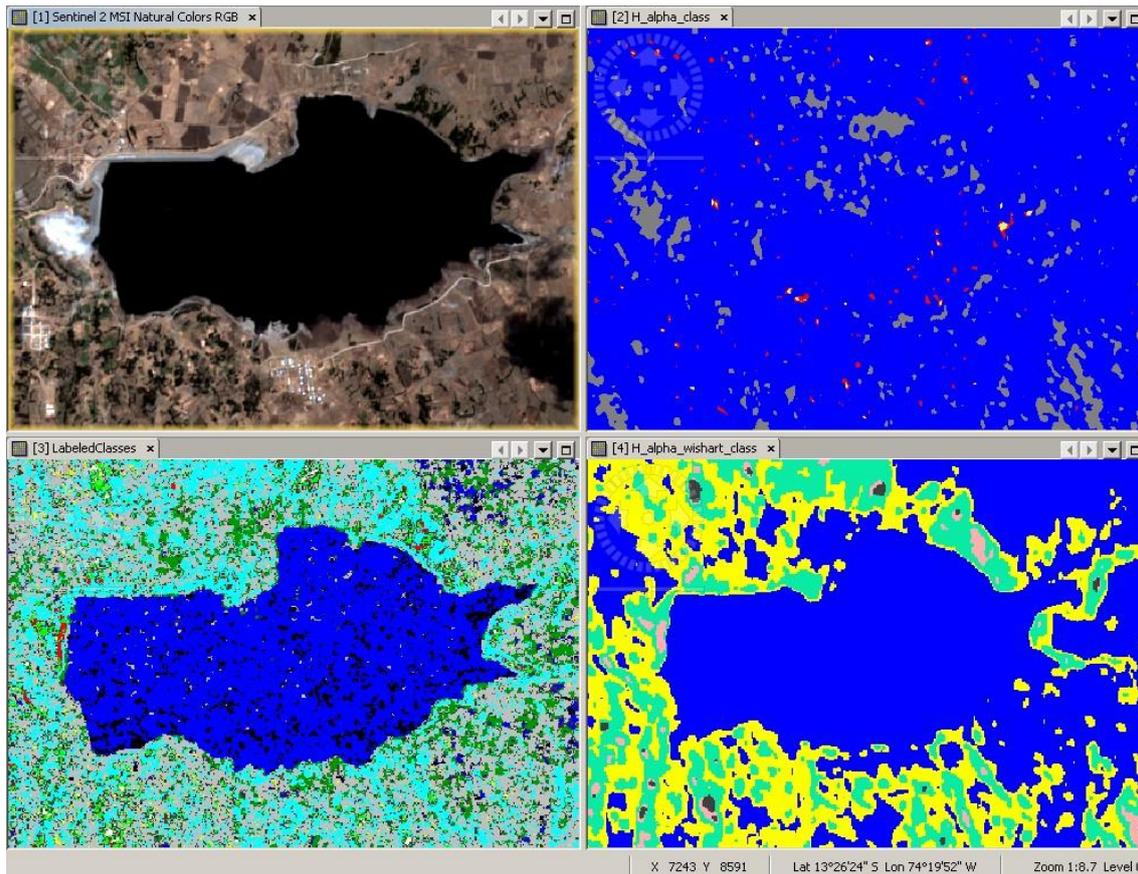


Figura 4.23: Represa Cuchoquesera

Discusión:

- El área de estudio de la Figura 4.23 es la represa Cuchoquesera ubicado en la coordenadas: Lat.13°26'24"S Lon.74°19'52"W.
- La mejor clasificación es el tercero porque comparando con la imagen óptica (el primero) es la que mejor se asemeja.
- La imagen óptica del primer cuadro tiene las características: S2A-MSIL2A-20190826T150721-N0213-R082-T18LWL-20190826T224544.
- En la clasificación Wishart solo hay: Estructuras complejas(7-Azul), Esparcidores Anisotrópicos Aleatorios(8-amarillo), Reflector diédrico(1-salmon), Double Reflection(4-Aguamarina) y Anisotropic particles(5-negro).
- La clasificación H-Alpha son nos muestra: Double Reflection(4-Azul), Estructuras complejas(7-Rojo) y Random Anisotropic Scatterers(8-amarillo). En esta clasificación no hay mucha información porque es una clasificación no supervisada de imágenes SAR polarimétricas.

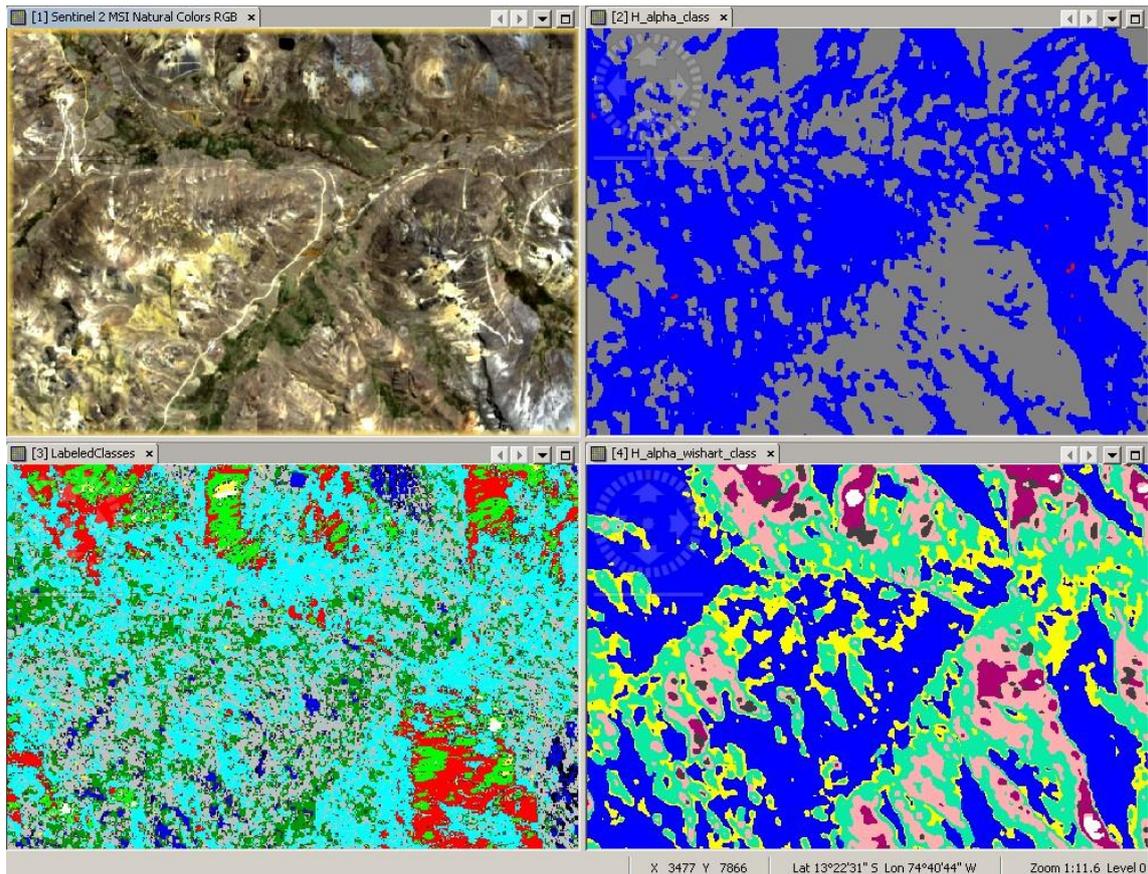


Figura 4.24: Parte de Apacheta

Discusión:

- El área de estudio de la Figura 4.24 es una parte de Apacheta ubicado en la coordenadas: Lat.13°22'31"S Lon.74°40'44"W.
- En el tercer cuadro de la Figura 4.24 vemos que hay una mejor relación con la imagen Óptica.
- En el tercer cuadro: Hay gras natural (3-Verde kelly), agua(0-Azul), rio seco (5-Cian), plantaciones (4-Gris), zona urbana1(8-Rojo), zona urbana2 (9-Blanco), urbana con pendiente (7-Amarillo), bosque poblado (1-Verde) y sombras (6-Negro).
- En el tercer cuadro: Las lagunas encajan bien muy en las mismas coordenadas así como también de forma.
- En el tercer cuadro: Las áreas verdes de la imagen óptica se ajustan muy bien a esta clasificación.

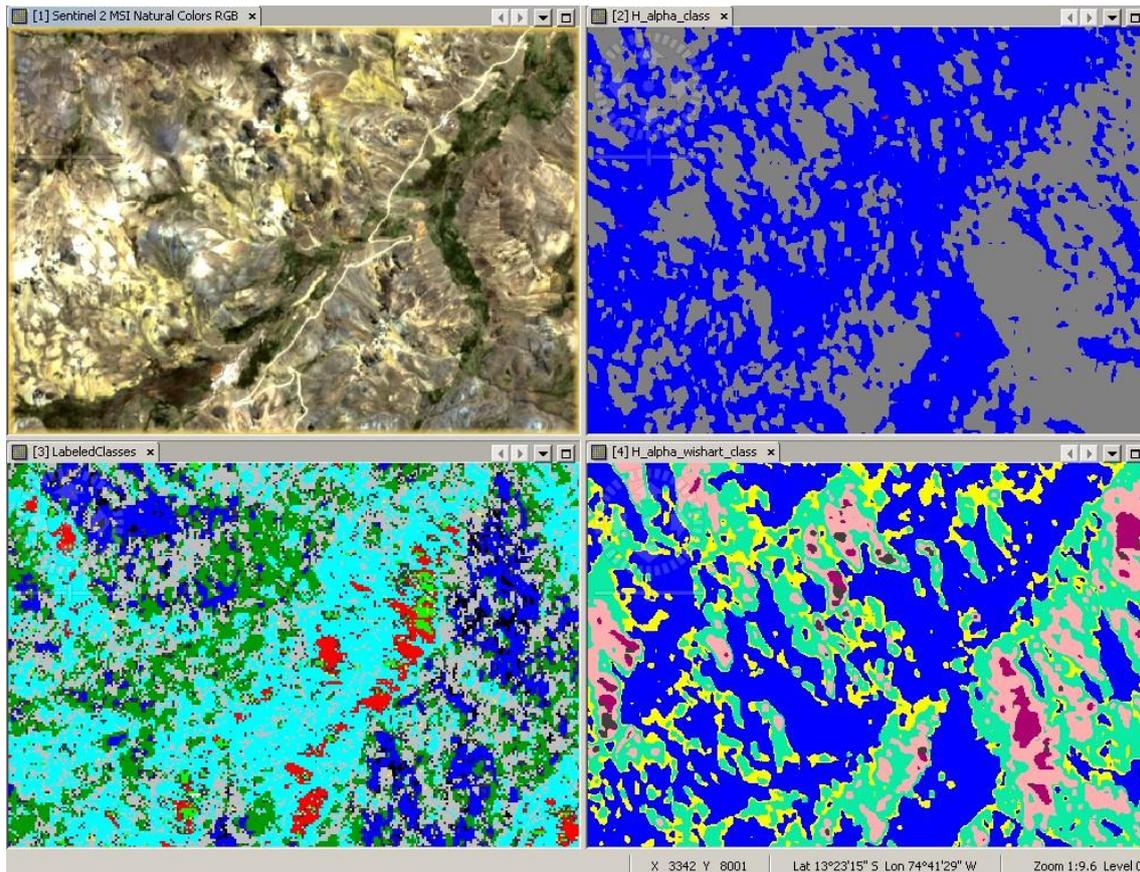


Figura 4.25: Una parte de Apacheta

Discusión:

- El área de estudio de la Figura 4.25 es una parte de Apacheta ubicado en las coordenadas: Lat.13°23'15''S Lon.74°41'29''W.
- En el segundo cuadro de la Figura 4.25 vemos que hay una mala relación con la imagen Óptica.
- En el segundo cuadro: sólo hay Double reflection (4-Azul), Reflector Dihedral (1-Gris) y en mínima cantidad Complex structures (7-rojo).
- En el segundo cuadro: El H-Alpha se subdivide en nueve zonas básicas características de las diferentes clases de comportamiento de dispersión, para separar los datos en mecanismos básicos de se establece en función de las propiedades generales de los mecanismos de dispersión., como se muestra en la Figura2.25. Se establece en función de las propiedades generales de los mecanismos de dispersión.

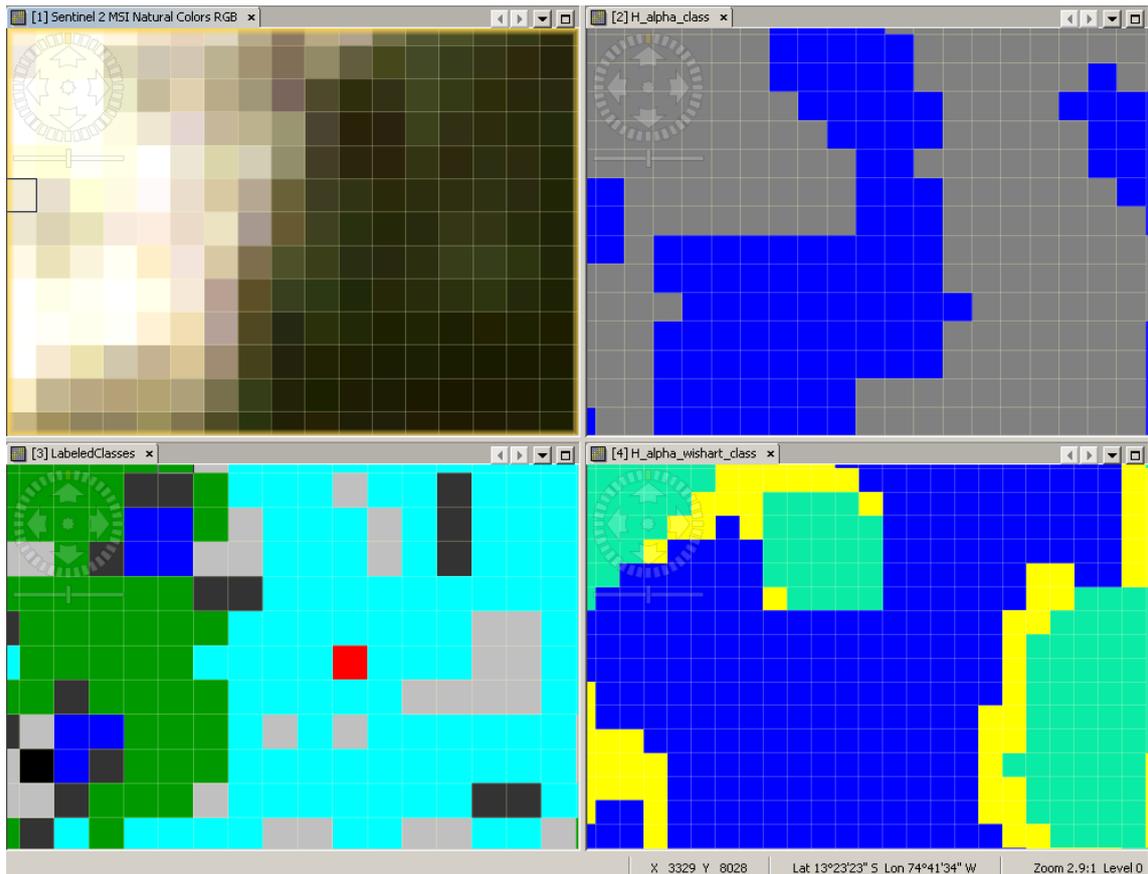


Figura 4.26: Una parte de Apacheta

Discusión:

- El área de estudio de la Figura 4.26 es una parte de Apacheta ubicado en la coordenadas: Lat.13°23'23"S Lon.74°41'34"W.
- En todas las clasificaciones se hizo el mismo Zoom o acercamiento para hacer una buena comparación.
- Entre el tercero y cuarto cuadro de la Figura 4.26 vemos que hay una mejor relación con la imagen óptica en comparación con el segundo.
- Vemos que entre el tercero y cuarto cuadro el que mejor se asemeja a la óptica es el tercero.
- Fue en esta zona donde se hizo algunas mediciones.

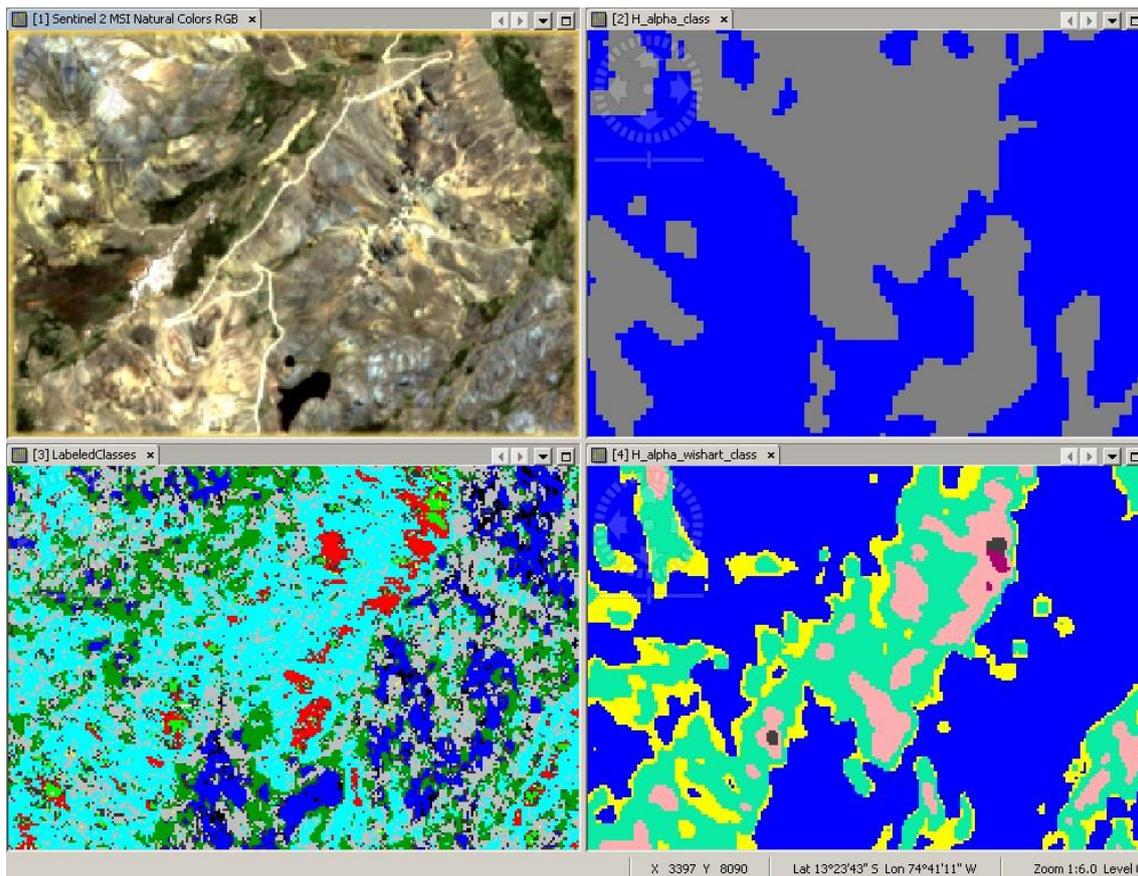


Figura 4.27: Lagunas en Apacheta

Discusión:

- El área de estudio de la Figura 4.27 es una parte de Apacheta ubicado en la coordenadas: Lat.13°23'15"S Lon.74°41'29"W.
- En estas zonas de Apacheta no hay bosques poblados como en la selva peruana, pero sin embargo en el tercer cuadro de la Figura 4.27 se presenta estas características.
- También vemos que en el tercer cuadro se presentan zonas urbanas en tanto en Apacheta no los hay.
- Se manifiesta también las Sombras (nivel-6) en zonas que abundan agua con mayor frecuencia.
- Otro detalle particular en el tercer cuadro es que aparecen Zonas urbanas con Pendiente (nivel-7) que son características de las viviendas en Apacheta.

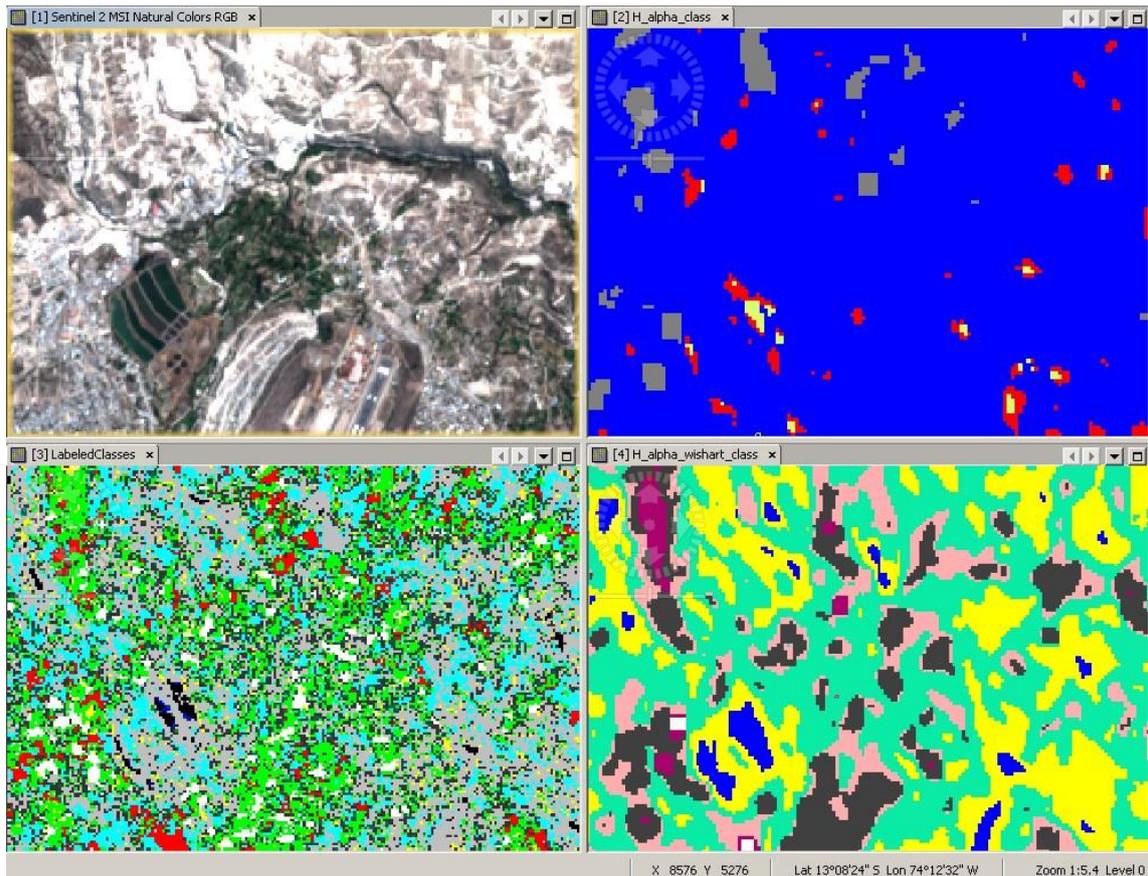


Figura 4.28: Totoria en Ayacucho

Discusión:

- El área de estudio de la Figura 4.28 es una parte de Ayacucho-Humanga en el distrito de Nazarenas en el lugar de Totoria (Aguas residuales de Huamanga), ubicado en las coordenadas: Lat.13°08'24"S Lon.74°12'32"W.
- En el cuarto cuadro de la figura 4.28 vemos que el área de Totoria lo clasifica como: Complex Structures (class-7)
- En el tercer cuadro de la figura 4.28 vemos que el área de Totoria lo clasifica como: Agua(nivel0) y Sombras(nivel6)
- Otro detalle que se manifestó en la clasificación de Wishart (cuarto cuadro) es que en Complex Structures (class-7) están áreas como: agua en reposo y superficies planas, ejemplo el aeropuerto de Huamanga.
- En el tercer cuadro a primera vista pareciera que fuese una mala clasificación, pero sin embargo nos detalla mejor de todas las estructuras que realmente hay en esa zona de Totoria.

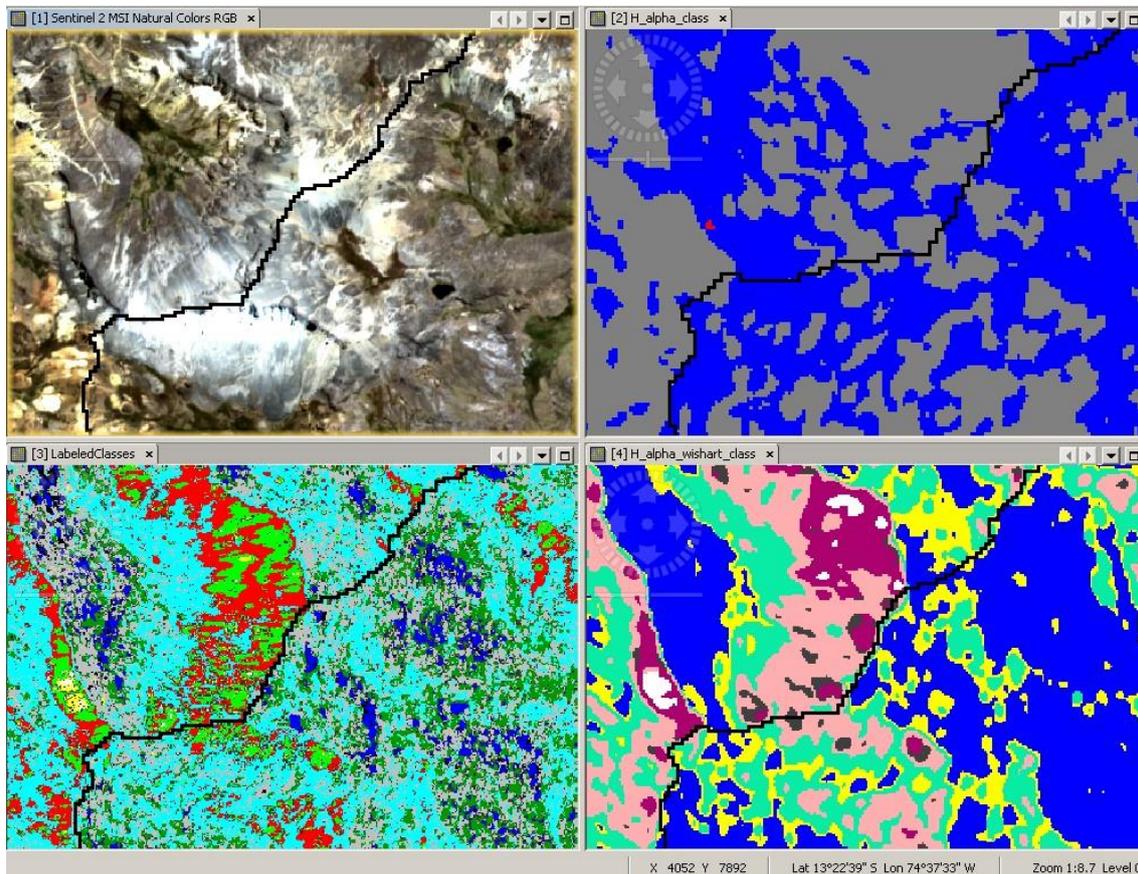


Figura 4.29: Nevado en Apacheta

Discusión:

- El área de estudio de la Figura 4.29 es una parte de Apacheta, ubicado en la coordenadas: Lat.13°22'39"S Lon.74°37'33"W.
- En el primer cuadro de la figura 4.29 vemos claramente marcada las áreas con nevado de color blanco.
- En el tercer cuadro de la figura 4.29 se ve que donde hay nevado están las zonas: Bosque poblado(nivel1), zona urbana1(nivel 8) y zona urbana con pendiente (nivel 7) en mínima cantidad.
- En la Figura 4.29 de Cobertura de nieve en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta realizadas con imágenes Landsat muestran en la misma zona la cobertura de nieve.
- En el cuarto cuadro lo clasifica como: Dipole (class-2), Non-Feasible (class-9) y Dihedral Reflector (class-1)

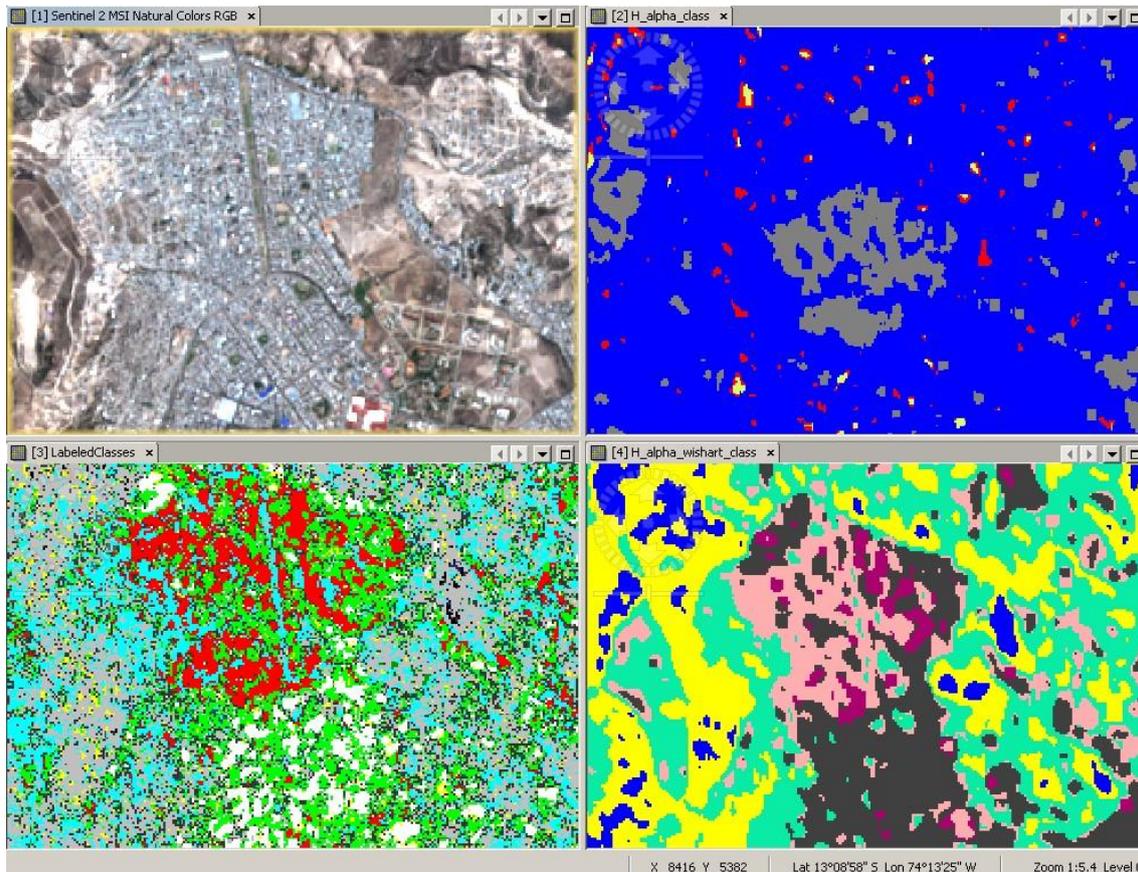


Figura 4.30: Ciudad de Huamanga- Ayacucho.

Discusión:

- El área de estudio de la Figura 4.30 es una parte de ciudad de Huamanga (Por la UNSCH), ubicado en las coordenadas: Lat.13°08'58''S Lon.74°13'25''W.
- En el tercer cuadro de la figura 4.99 vemos claramente que coincide con las zonas urbanas clasificadas.
- En el tercer cuadro de la figura 4.30 hubo un detalle peculiar, vemos junto a las zonas urbanas hay bosque poblado. Esto nos lleva a decir que algunas retrodispersiones de las zonas urbanas se comportan como bosque poblado.
- Pero en cambio en el cuarto cuadro hay partes que lo clasifica como Anisotropic Particles (class-5).

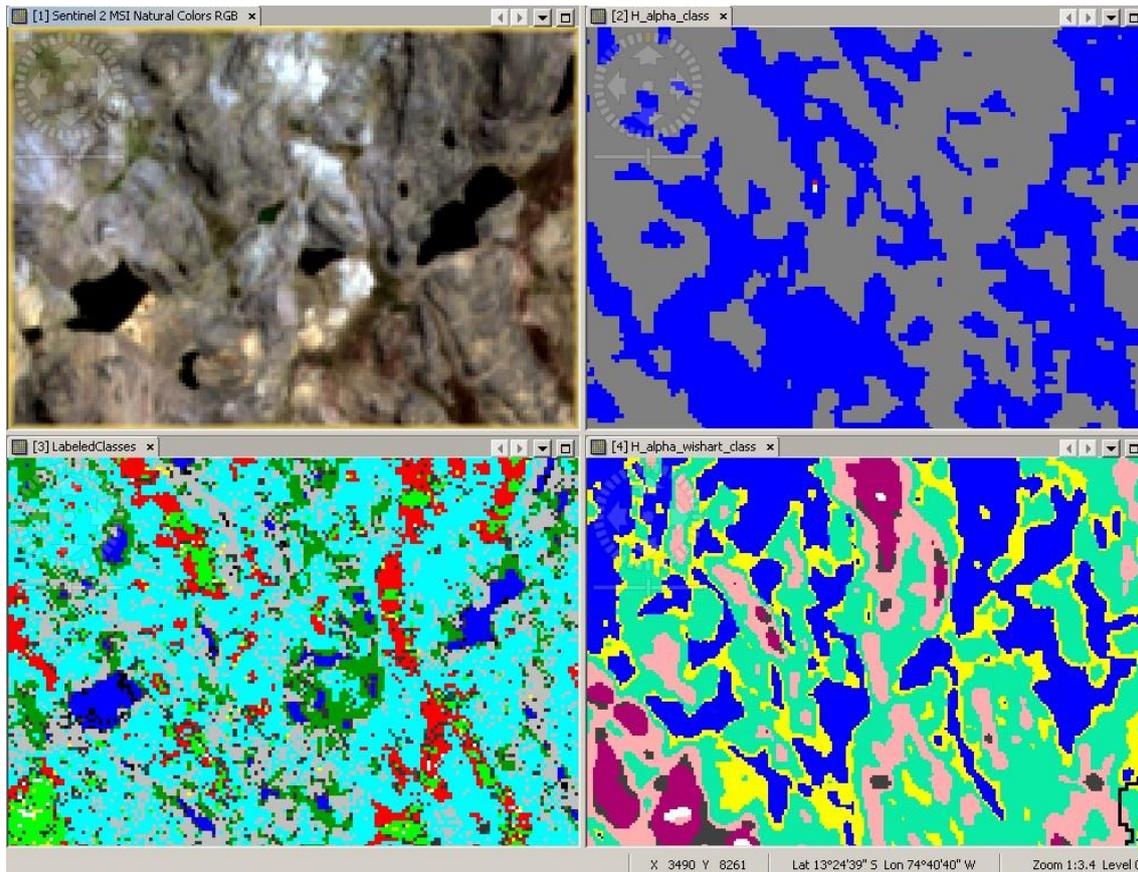


Figura 4.31: Lagunas en Apacheta

Discusión:

- El área de estudio de la Figura 4.31 es una parte de Apacheta, ubicado en las coordenadas: Lat.13°24'39''S Lon.74°40'40''W.
- En el tercer cuadro de la figura 4.31 vemos las lagunas se van enmarcando justo en la zona de clasificación del Agua.
- En el tercer cuadro de la figura 4.31 nuevamente vemos que en los lugares que hay cobertura de nieve se clasifican como zona urbana y bosque poblado.
- También vemos que las áreas verdes de la imagen óptica (Sentinel-2) se enmarcar muy bien con las zonas verdes del tercer cuadro.

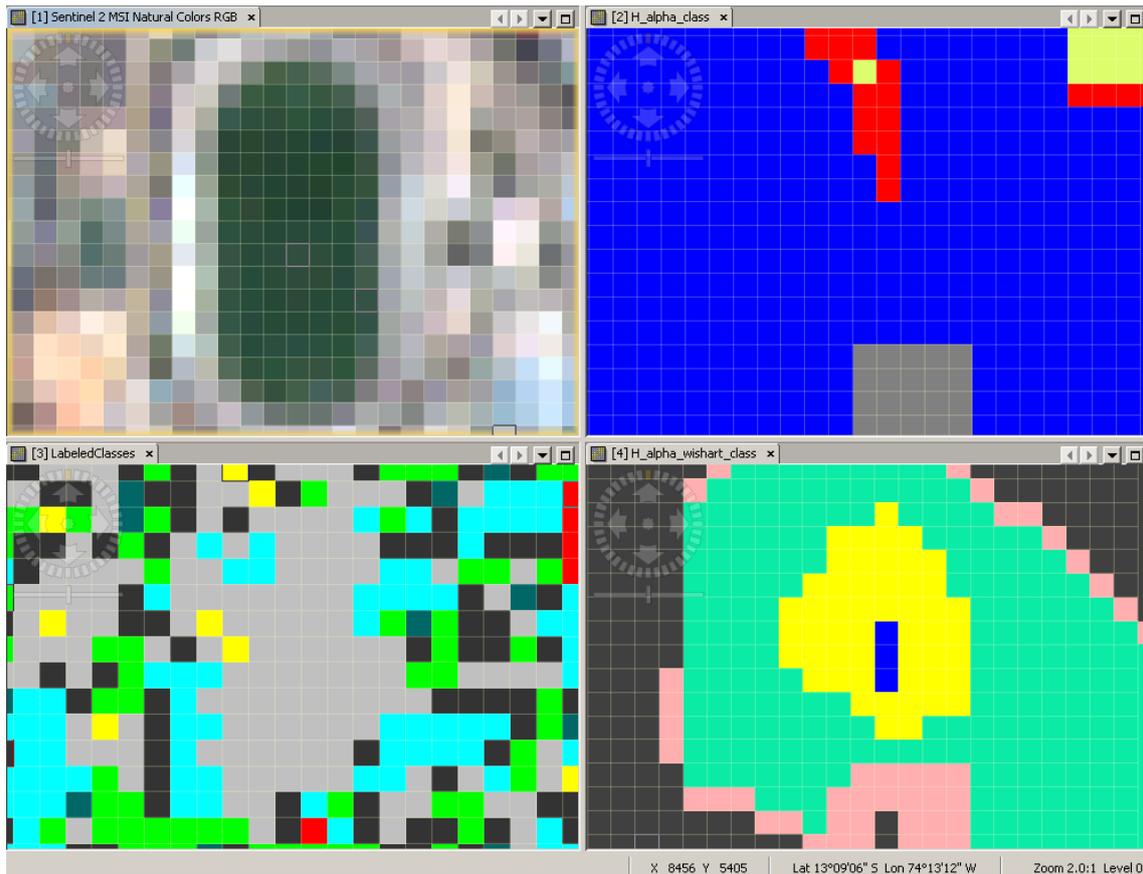


Figura 4.32: Estadio Cumaná de Ayacucho.

Discusión:

- El área de estudio de la Figura 4.32 es el estadio Ciudad de Cumana en Ayacucho, ubicado en las coordenadas: Lat.13°09'06''S Lon.74°13'12''W.
- En el tercer cuadro de la figura 4.32 se ve que el estadio se clasifico como Plantaciones (zona-4).
- En el tercer cuadro de la figura 4.32 nos da una mejor visualización si queremos examinar los pixeles con mucho más detalle, en definitiva, mejor resolución.
- Pero, el cuarto cuadro solo lo clasifica como: Complex Estructures (class-7).
- Un detalle muy importante de mencionar del estadio es las dimensiones que son 100-110m de largo y 64-75m de ancho; que efectivamente están próximos a las medidas del tercer cuadro.

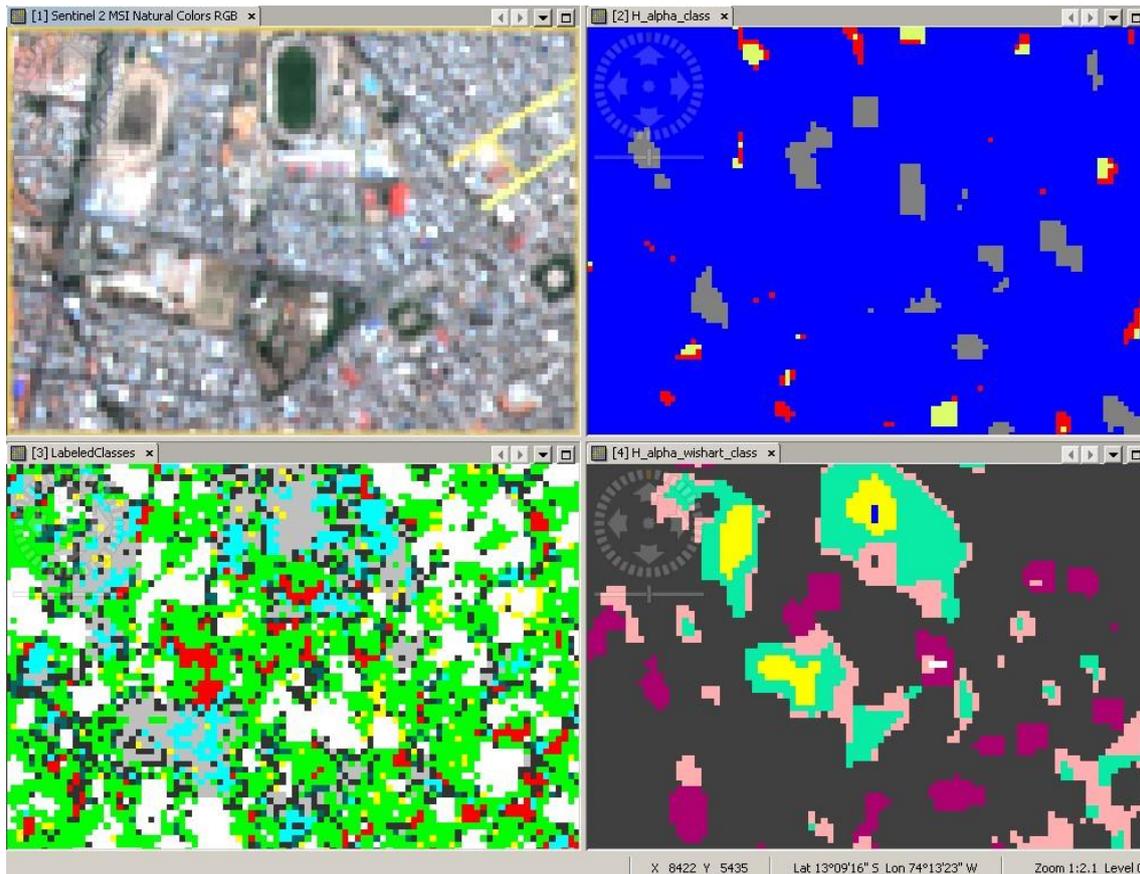


Figura 4.33: Residencia universitaria de la UNSCH.

Discusión:

- El área de estudio de la Figura 4.33 es la Residencia Universitaria de la UNSCH y lugares cercanos a Este, ubicado en las coordenadas: Lat.13°09'16''S Lon.74°13'23''W.
- En el tercer cuadro de la figura 4.33 vemos que el estadio de la residencia de la UNSCH y el estadio Leoncio prado tambien estan clasificados con plantaciones (zona-4). Con la dificultad que no están muy bien enmarcados geoméricamente.
- En el cuarto cuadro de la figura 4.33 da una mejor resolución a los estadios mencionados, pero, con la dificultad que lo caracteriza de la misma forma a sus alrededores como zonas urbanas.
- En el cuarto cuadro a la zona urbana lo clasifica como: Anisotropic Particles (clase-5)
- Se ve nuevamente en el tercer cuadro que algunas zonas urbanas lo clasifican como Bosque poblado.

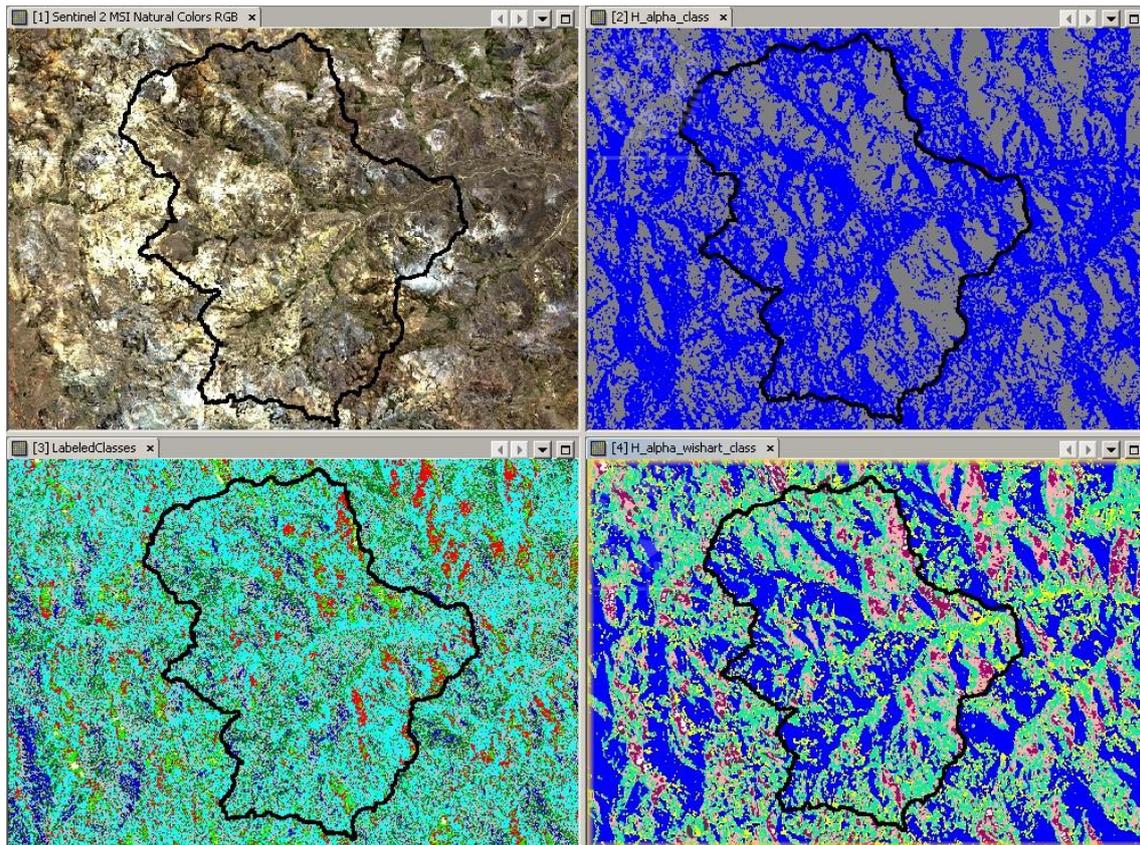


Figura 4.34: Apacheta en sus diferentes clasificaciones con diferentes métodos (primera imagen es de Sentinel-2).

Discusión final de Apacheta:

- Las áreas verdes de Apacheta Figura 4.34 del tercer cuadro como: Bofedales, pasto, cultivos, etc. concuerdan en su mayoría con la imagen óptica Sentinel-2.
- La cobertura de nieve de Apacheta concuerda en su mayoría con Zona urbana1 (zona-8) y Bosque poblado (zona-1).
- Las lagunas o lugares con agua de Apacheta en el tercer cuadro concuerdan con mayor precisión con las imágenes ópticas.
- En el segundo cuadro en su mayoría todo Apacheta lo clasifica como Double Reflection (class-4), casi un 70 %.
- El cuarto cuadro Clasificación Wishart, algunas zonas como 3, lo clasifican muy bien.

4.3. Comparar los métodos de clasificación de uso de suelo que involucren los parámetros geométricos y espectrales en una imagen de radar Sentinel-1.

4.3.1. Clasificación del suelo con el método de Polarimetría de Cloude-Pottier Dual Pol

La clasificación del suelo en la microcuenca Apacheta aplicando el método de Cloude-Pottier consiste en verificar los píxeles identificados dentro del esquema de clasificación no supervisado que se basa en el uso del plano Entropía (H)/Alfa. La entropía, por definición, es una medida natural de la reversibilidad inherente de los datos de dispersión, mientras que alfa puede usarse para identificar los mecanismos de dispersión promedio subyacentes (Cloude, 2002).

Entonces, el plano H/Alfa dividimos en nueve zonas correspondientes a nueve clases de diferentes mecanismos de dispersión. Para cada píxel en el producto fuente, se calculan su entropía y ángulo alfa. Basado en la posición de la entropía calculada y alfa en el plano H/Alfa, el píxel se clasifica en una de las nueve zonas, se asigna un índice de zona al píxel como se muestra en la siguiente imagen (Figura 4.14).

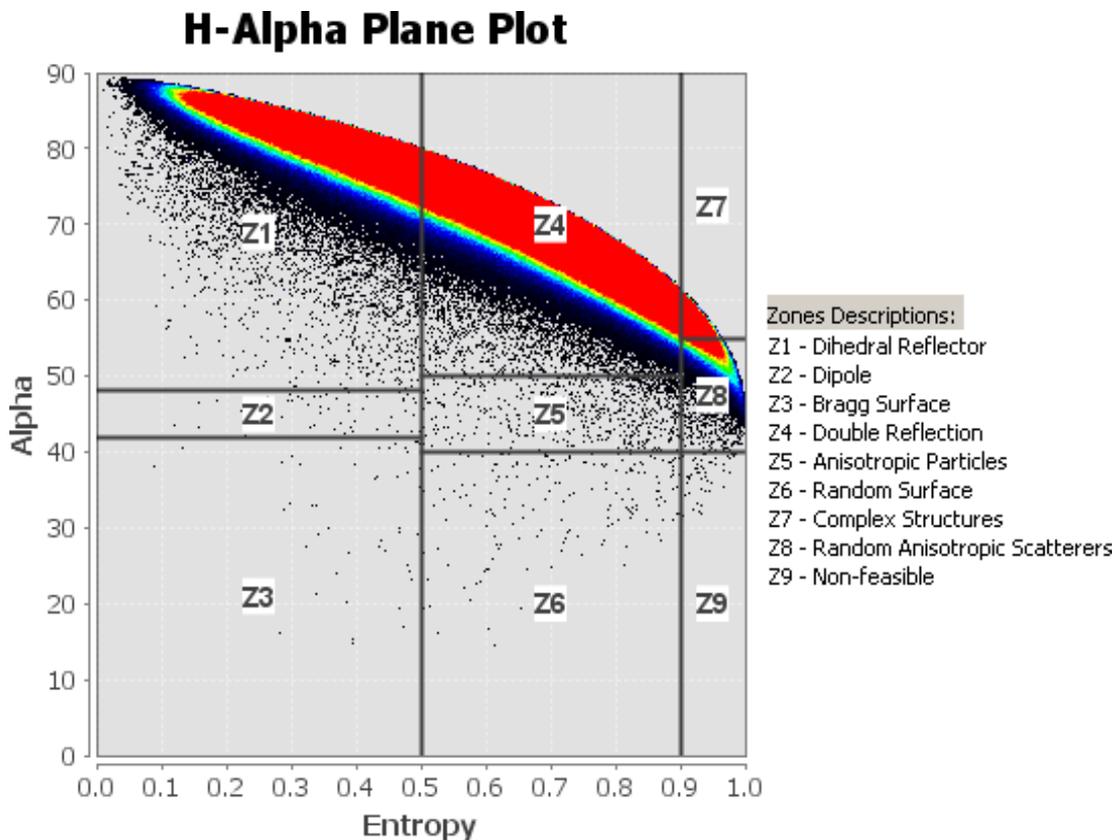
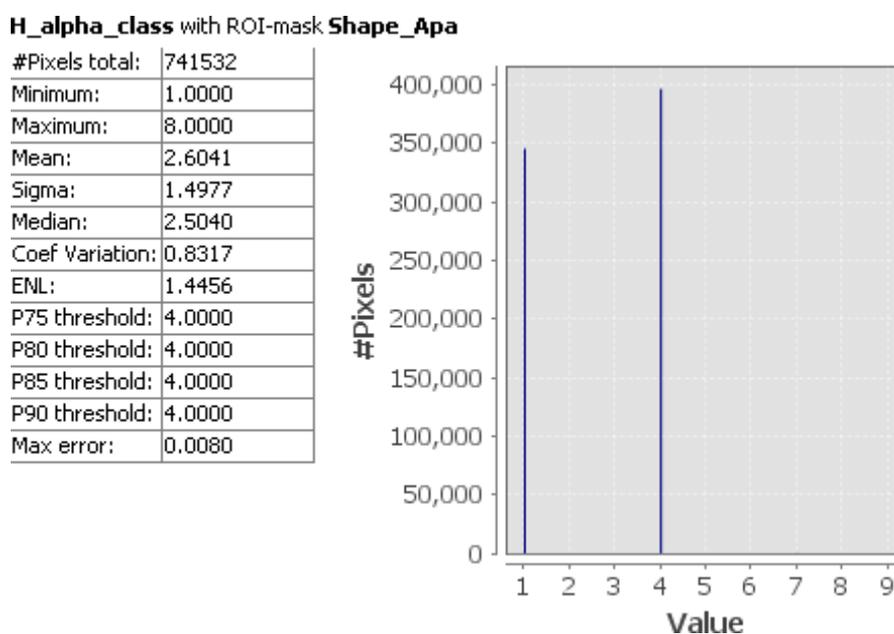


Figura 4.14: Resultados del diagrama plano H-alpha de Apacheta clasificado.

Resultados del Shape-Apacheta del suelo clasificado Cloude-Pottier Dual Pol

La figura 4.15 (a) representa el total de pixels utilizados con el método Cloude-Pottier Dual Pol en la microcuenca Apacheta. Además, algunos estadísticos como los percentiles y el coeficiente de variación. Y (b) la descripción de las zonas clasificadas con sus colores respectivos.

Figura 4.15: Resultados de la clasificación Cloude-Pottier Dual Pol.



(a) Histograma & Percentiles de Shape-Apacheta

Label	Colour Δ	Value	Frequency	Description
class_4		4	72.818%	Double Reflection
class_3		3	0.000%	Bragg Surface
class_6		6	0.000%	Random Surface
class_1		1	25.612%	Dihedral Reflector
class_2		2	0.000%	Dipole
class_8		8	0.373%	Random Anisotropic Scatterers
no data		0	0.000%	no data
class_7		7	1.197%	Complex Structures
class_9		9	0.000%	Non-feasible
class_5		5	0.000%	Anisotropic Particles

(b) Porcentaje & Colores de la imagen clasificada

En la *Tabla 14* está representada los cálculos en pixeles y metros cuadrados de la clasificación Cloude-Pottier Dual Pol en Apacheta. La zona 4 (nivel4) es donde existen mayores pixeles en Apacheta en otras palabras Z4 – Doble reflexión. Con un total de 7652.98 Ha contenidos en la cuenca Apacheta, en esta zona es donde ocurren mecanismos de doble rebote en las bandas P y L. Y se genera una entropía moderada **H** con dispersión dominante de orden bajo.

Tabla 14 : Pixeles extraídos del Shape-Apacheta clasificado Cloude-Pottier Dual Pol

Zona	Pixel	Pixel(m²)	Pixel(Ha)
nivel1	345200	66 683418.358268	6668.34
nivel2	0	0	0
nivel3	0	0	0
nivel4	396172	76 529847.096847	7652.98
nivel5	0	0	0
nivel6	0	0	0
nivel7	150	28 975.992913	2.89
nivel8	10	1931.7328609	0.19
nivel9	0	0	0
nivel-1			
Total	741532	14324413.16	14324.41

A continuación, se detalla las características principales de pixeles del Shape-Apacheta clasificado en imágenes de radar Sentinel-1 con el método de Cloude-Pottier Dual Pol.

Radio medio de la tierra utilizado:

6371.0 km

Área total del pixel:

190.59987378 m²

193.17328609 m² por exceso.

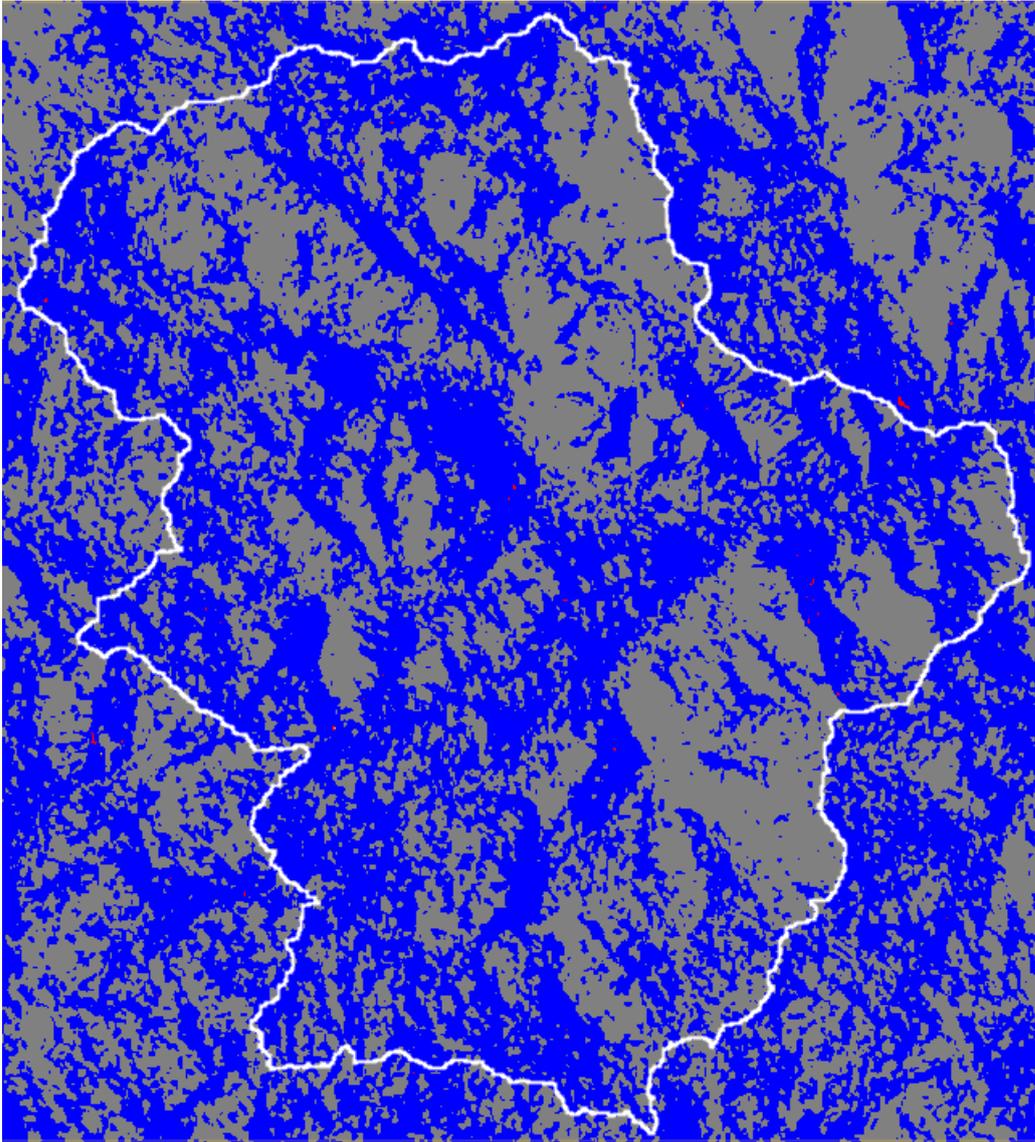


Figura 4.16: Resultados de Apacheta clasificado por Cloude-Pottier Dual Pol.

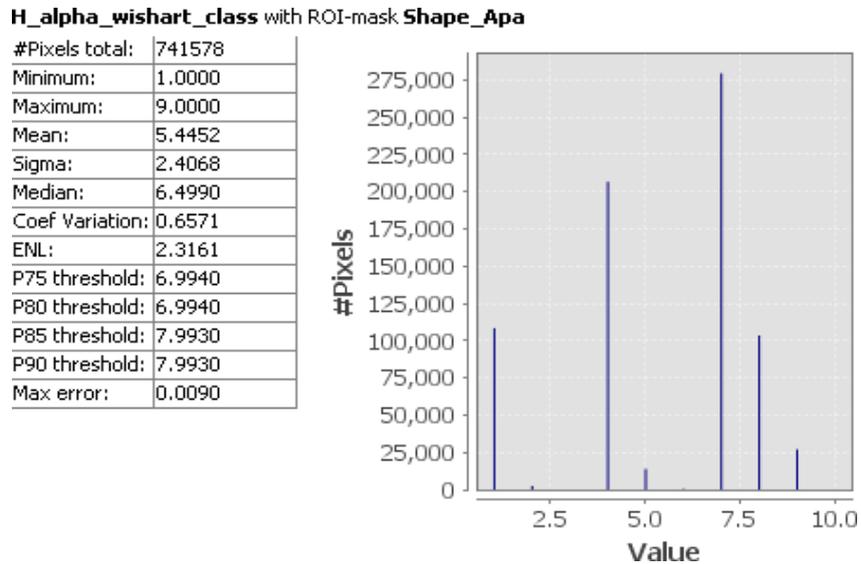
4.3.3. Clasificación del suelo con el método Polarimétrico de Wishart Dual Pol

Similar a la clasificación de Cloude-Pottier, la clasificación de Wishart sin supervisión también separa los datos en nueve grupos utilizando las zonas definidas en el plano H / Alfa anterior. A diferencia de la clasificación Cloude-Pottier, la clasificación Wishart continuará calculando los centros de los nueve grupos, luego reclasificará los píxeles en función de sus distancias Wishart a los centros de los grupos. Este procedimiento se repetirá varias veces hasta que se alcance el número total de iteraciones definidos. Para lograr un resultado de clasificación preciso, se debe aplicar el filtrado de manchas antes de la clasificación.

Resultados del Shape-Apacheta del suelo clasificado Wishart Dual Pol

La figura 4.17 (a) representa el total de pixels utilizados con el método Wishart Dual Pol en la microcuenca Apacheta. Además, algunos estadísticos como los percentiles y el coeficiente de variación. Y (b) la descripción de las zonas clasificadas con sus colores respectivos.

Figura 4.17: Resultados de la clasificación Wishart Dual Pol.



(a) Histograma & Percentiles de Shape-Apacheta

Label	Colour	Value	Frequency	Description
no data		0	0.000%	no data
class_1		1	10.489%	Dihedral Reflector
class_2		2	0.957%	Dipole
class_3		3	0.000%	Bragg Surface
class_4		4	22.963%	Double Reflection
class_5		5	6.708%	Anisotropic Particles
class_6		6	0.529%	Random Surface
class_7		7	33.850%	Complex Structures
class_8		8	20.302%	Random Anisotropic Scatterers
class_9		9	4.202%	Non-feasible

(b) Porcentaje & Colores de la imagen clasificada

En la *Tabla 15* está representada los cálculos en pixeles y metros cuadrados de la clasificación Wishart Dual Pol en Apacheta. La zona 7 (nivel 7) o “Random Surface” es donde existen mayores pixeles en Apacheta. Con un total de 5399.54 Ha contenidos en la cuenca Apacheta, en esta zona es donde ocurren mecanismos de dispersión aleatoria. En decir, en este nivel pueden existir árboles, superficies

rugosas, sombras y reflexión de doble rebote y todos ellos ubicados en la micro cuenca Apacheta.

Tabla 15 : Pixeles extraídos del Shape-Apacheta clasificado Wishart Dual Pol

Zona	Pixel	Pixel(m ²)	Pixel(Ha)
nivel1	108370	20 938231.724996	2093.82
nivel2	2398	463318.9967384	46.33
nivel3	0	0	0
nivel4	206669	39930639.590045	3993.06
nivel5	13817	2669590.7330836	266.95
nivel6	473	91388.609448	9.13
nivel7	279464	53995404.547331	5399.54
nivel8	103429	19983578.1958539	1998.35
nivel9	26958	5208571.106786	520.85
nivel-1			
Total	741578	143280728.161392	14328.07

A continuación, se detalla las características principales de pixeles del Shape-Apacheta clasificado en imágenes de radar Sentinel-1 con el método de Wishart Dual Pol.

Radio medio de la tierra utilizado: 6371.0 km

Área total del pixel: 190.63668957 m²; 193.21059708 m² por exceso.

La Figura 4.18 pertenece a la clasificación no supervisada por Wishart Dual Pol. Las líneas negras pertenecen al “Shape” de la cuenca Apacheta, lugar donde se realizó la clasificación. La tabla de colores son niveles de clasificados en Apacheta a su vez representa los lugares donde hay agua, hielo, ríos, bofedales, vegetación, etc. Resaltando que en este método existe datos (puntos de Apacheta) no clasificados con valores ceros.

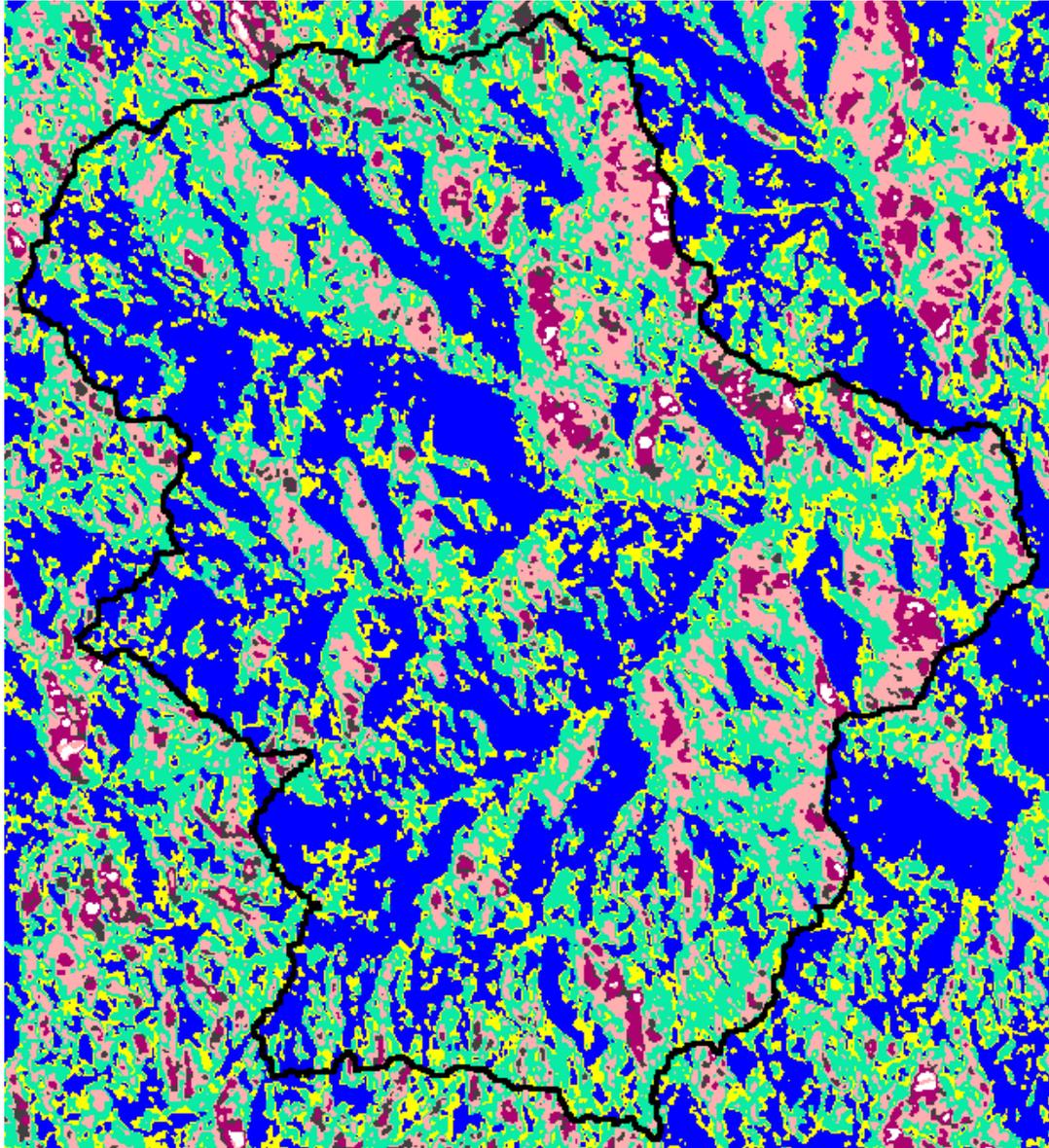


Figura 4.18: Resultados de Apacheta clasificado por Wishart Dual Pol.

Imágenes ópticas de Sentinel-2

Las Figuras de 4.18.1 siguientes son imágenes ópticas Sentinel-2 que fueron utilizadas para comparar las zonas clasificadas por los diferentes métodos Cloude y Wishart. La (a) y (b) es la ciudad de Huamanga y Represa Cuchoquisera, (c) y (d) ríos y plantaciones y (e) y (f) montañas y lagunas, respectivamente.

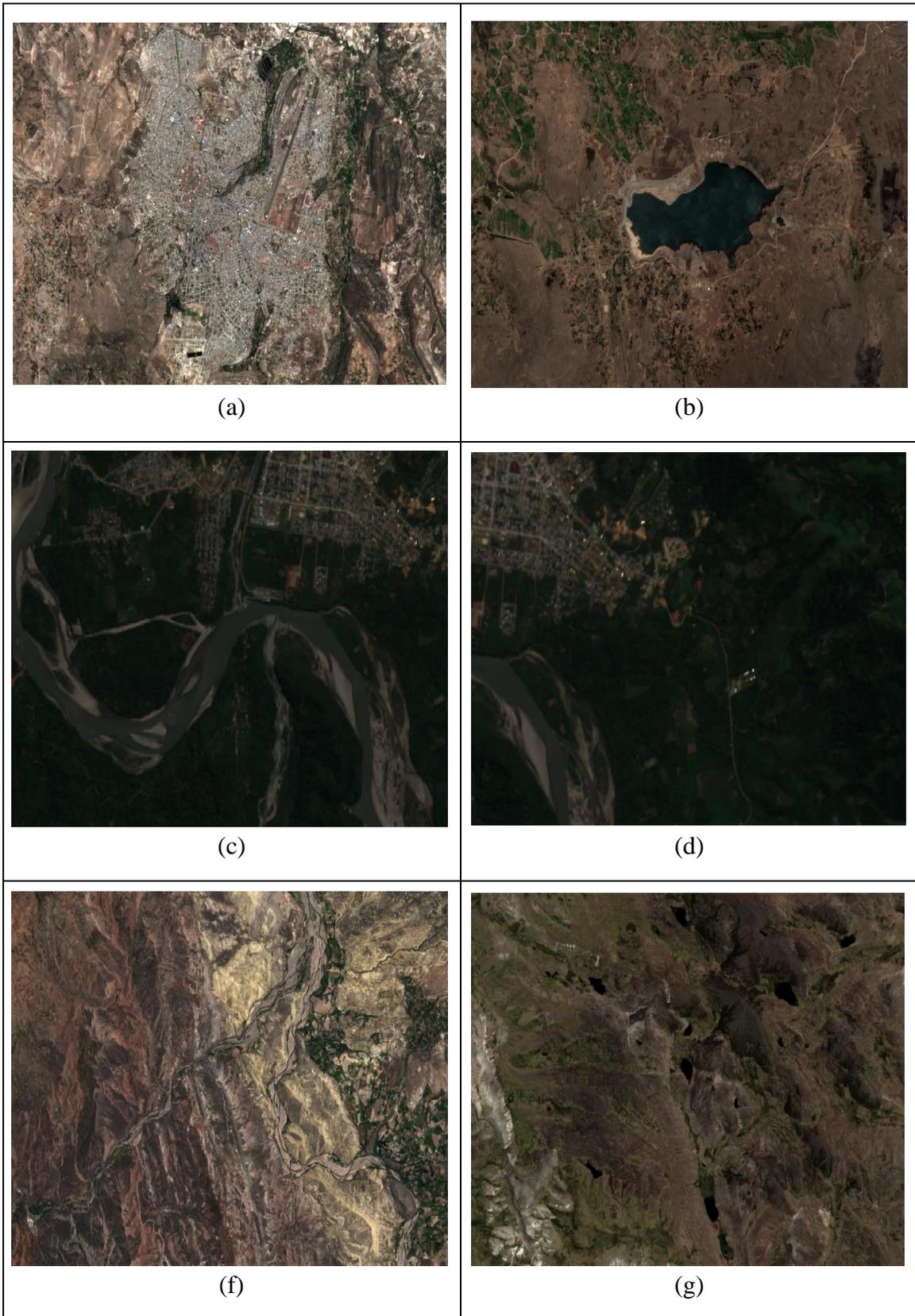


Figura 4.18.1: Imágenes Ópticas Sentinel-2.

Conclusiones

- Los resultados exhibidos en el capítulo anterior demuestran que la evaluación de patrones geométricos y espectrales diferenciados en las imágenes de radar Sentinel-1 ha cumplido con los objetivos de estimar la clasificación de la superficie del suelo en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, mediante el empleo de técnicas de teledetección satelital realizadas en el SNAP 6.0. Además, los resultados obtenidos de la clasificación de la superficie del suelo en la microcuenca Apacheta se han podido correlacionar con los datos de otras clasificaciones de diferentes autores como: Cloude Pottier, Wishart y Análisis espectral.
- Se logró determinar los patrones geométricos como el ángulo de incidencia para cada nivel de clasificación en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, Región Ayacucho, mediante datos del producto SCL/GRDH de las imágenes de radar Sentinel-1, del año 2019, siendo lo más importante la identificación de 3679.92 Ha. de vegetación que crece sobre suelo clasificado como bofedal, seguido de la cobertura de 2547.12 Ha. de especie vegetal sobre suelo seco, asimismo, se tiene una extensión de 1413.72 Ha. de suelo arenoso y una extensión de 31.48 Ha. de lagunas y zonas con agua. Estas estimaciones realizadas con la metodología de evaluación de patrones geométricos y espectrales diferenciados en las imágenes de radar sentinel-1, permiten tener un banco de información que permite monitorear la variación de las extensiones de especies vegetales y del suelo en los próximos años.
- Se logro determinar los patrones espectrales como el σ^0 VV/VH para cada nivel de clasificación en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, Región Ayacucho, mediante datos del producto SCL/GRDH de las imágenes de radar Sentinel-1, del año 2019.
- Se ha logrado determinar la metodología de calificación de la superficie de suelo apropiado que involucro la medida de patrones geométricos y espectrales diferenciados en las imágenes de radar en la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta, Región Ayacucho, del año 2019. Resultando con mayor extensión en clasificación la zona 5, lugar donde se encuentran ríos, lagunas, ojos de agua, represas, etc.

Discusiones

Los parámetros geométricos y espectrales diferenciados en imágenes de radar Sentinel-1 ayudan no en gran medida a clasificar el uso del suelo en la microcuenca Apacheta.

Los parámetros geométricos en imágenes de radar Sentinel-1 son equivalentes en algunas zonas respecto a las metodologías aplicadas.

Los parámetros espectrales diferenciados en imágenes de radar Sentinel-1 ayudan en gran medida a la clasificación del suelo en la microcuenca Apacheta.

Existe una gran diferencia en los métodos de clasificación para el uso de suelo. Comparados en gran parte con otras clasificaciones (de otros autores), la clasificación desarrollada en esta tesis, supera y da mejores resultados para la interpretación en Apacheta.

Se ha logrado también correlacionar los parámetros de cada nivel de clasificación en Apacheta con respecto a los datos de las imágenes ópticas Sentinel-2.

Recomendaciones

Recomendaciones desde el punto de vista metodológico; con la metodología aplicada o realizado para la clasificación de superficie en Apacheta, ya no será necesario identificar a qué tipo de área o zona pertenece cada clasificación porque ya se puede identificar el rango numérico donde pertenece los ángulos de incidencia y el Σ_0 . Se deja abierta la posibilidad de que en estudios posteriores se aborde el tema tratado empleando metodologías diferentes, ya sea clasificando la superficie del suelo en imágenes de Radar mediante otros métodos y con más polarizaciones. La sugerencia trascendental es: esta metodología se puede emplear en estudios o investigaciones de otras especialidades e incluso de otras áreas del conocimiento científico.

Recomendaciones desde el punto de vista académico, es importante mencionar que esta tesis realizada deja numerosas interrogantes y trabajos por resolver, siendo así, cualquier órgano como: Universidades, facultades, programas académicos, etc. es importante seguir investigando el mundo de la Teledetección en imágenes de Radar Sentinel-1, las aplicaciones de esta rama de estudio son infinitas.

Además, se mencionan que en esta investigación realizada se trabajaron con imágenes antiguas; ósea no actualizadas, ya que en un futuro estas compañías mejoraran estos productos o datos para realizar mejoras en los trabajos a porvenir.

Recomendaciones prácticas, en caso de que se haga estudios aplicados a alguna organización, sector económico, investigación, comunidad, etc.; es importante siempre incluir las imágenes Sentinel-2 para te facilitan la georreferenciación de cada zona a evaluar. Es recomendable también actualizar las librerías y Softwares.

Adicional, se debe sistematizar o reconocer la zona de trabajo, así la metodología empleada en el trabajo de investigación será mucho más útil y provechosa.

Por último, se mencionan que este tipo de trabajos en Teledetección es un instrumento muy valioso para futuras investigaciones como el calentamiento global, deforestación, desabastecimiento, disminución de agua, organización, etc. Y hacer un llamado a nuestras autoridades tanto locales como nacionales para fomentar, educar, informar y generar políticas de inclusión y prevención mediante este tipo de trabajos. En un futuro serán muy valiosas porque la disminución del agua, así como el nevado en la microcuenca Apacheta

se manifiesta aceleradamente. Esta a su vez el principal proveedor de agua a la represa Cuchoquesera de Ayacucho.

Por tanto, se deben tomar ya las medidas necesarias para solucionar este tipo problema mediante estas investigaciones.

Referencias bibliográficas

- (CCRS), C. C. (2003). *Ministerio de recurso naturales de Canada*.
- Aabouch Azougarh, K. (2018). Nuevos productos humedad de nivel L4 de SMOS. *B.S. thesis*.
- Alvarado, C. a. (2019). Comparación de Índices de Vegetación con imágenes Landsat usando la computación en la nube: zona Pampa de Majes-Siguas, Arequipa Perú. *Revista de Investigación de Física*, 27--34.
- Alvarez-Mozos, J. a.-A. (2005). Teledetección radar como herramienta para la estimación de la humedad superficial del suelo en cuencas agrícolas. *Revista de Teledetección*, 27--42.
- Anfinsen, S. N. (2011). Application of the matrix-variate Mellin transform to analysis of polarimetric radar images. (IEEE, Ed.) *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(6), 2281--2295.
- Arias Cuenca, M. (2017). Clasificación de cultivos de Navarra mediante series temporales de imágenes Sentinel-1.
- Biosphere, C. d. (2012). Destino humedales: promoviendo el turismo sostenible. 2012, Secretaría de la Convención de Ramsar sobre los Humedales, Gland, Suiza, y Organización Mundial del Turismo, Madrid, España. 78.
- Caballero, G. a. (2018). *Clasificación de cobertura de suelo para un valle irrigado a partir de series temporales de datos SAR en banda C con Sentinel-1*.
- Cano, A. a. (2011). Flora y vegetación de suelos crioturbados y hábitats asociados en los alrededores del abra Apacheta, Ayacucho-Huancavelica (Perú). *18(2)*, 169--178.
- CARPETA GEOREFERENCIAL REGIÓN AYACUCHO, P. (29 de Marzo de 2015). *Oficina de Gestión de la Información y Estadística*. Obtenido de <https://www.congreso.gob.pe/Docs/DGP/GestionInformacionEstadistica/files/i-05-ayacucho.pdf>.
- Carrascal, C. a. (1986). Estimacion de la humedad superficial del suelo a partir de datos de microondas satelitales.
- Chen, K. a. (1995). A simple model for retrieving bare soil moisture from radar-scattering coefficients. *Remote sensing of environment*, 121--126.

- Cloude, S. R. (2002). *Unsupervised image classification using the entropy/alpha/anisotropy method in radar polarimetry* (Vol. 44). NASA-JPL, AIRSAR-02 Workshop.
- De Bernardis, C. G. (2018). Técnicas dinámicas para teledetección empleando imágenes SAR ópticas y vehículos aéreos no tripulados. *Universitat d'Alacant-Universidad de Alicante*.
- Díaz Santana, A. (2016). Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.
- Engman, E. T. (1991). *Remote sensing in hydrology*. Chapman and Hall Ltd.
- España, M. D. (2004). Fusión INS/GPS/SAR para la Navegación con Georreferenciación de Imágenes SAR. *sea*, 2, 2.
- Filipponi, F. (2019). Sentinel-1 GRD preprocessing workflow. *Multidisciplinary digital publishing institute proceedings*, 18(1), 11.
- Foumelis, M. a.-L. (2018). *ESA SNAP-StaMPS integrated processing for sentinel-1 persistent scatterer interferometry*. (I. 2.-2. Symposium, Ed.) IEEE.
- Geotecnología, 1. p. (2005). Euillades, Pablo A and Euillades, Leonardo D and Blanco, Mauro H. *Petrotecnia*, 59.
- GUEVARA, V. a. (2013). PRECISIÓN DE LA ORTO-RECTIFICACIÓN DE UNA IMAGEN DEL RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (SAR).
- Gutiérrez Núñez, J. M. (2018). Radar meteorológico y red de rayos. *Agencia Estatal de Meteorología*.
- Holah, N. a. (2005). Potential of ASAR/ENVISAT for the characterization of soil surface parameters over bare agricultural fields. *Remote sensing of environment*, 96(1), 78--86.
- Hornacek, M. a.-L. (2012). Potential for high resolution systematic global surface soil moisture retrieval via change detection using Sentinel-1. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 1303--1311.
- Lee, J.-S. a. (2017). *Polarimetric radar imaging: from basics to applications*. CRC press.
- Louet, J. a. (1999). *IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99 (Cat. No. 99CH36293)* (Vol. 3). (IEEE, Ed.)

- Macelloni, G. a. (1999). The SIR-C/X-SAR experiment on Montespertoli: Sensitivity to hydrological parameters. *International Journal of Remote Sensing*, 20(13), 2597-2612.
- Márquez Lozano, A. d. (2016). Fundamentos matemáticos de las señales de radar.
- MINAM. (2015). Estrategia Nacional de Humedales. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente, Dirección General de Diversidad Biológica Lima, Perú.
- Moncada, W. a. (2020). Análisis espacial y temporal de la temperatura superficial en la microcuenca Apacheta mediante datos térmicos Landsat. *Revista de Teledetección*, 51--63.
- O'Connor, J. G. (2020). Metodología para ajuste y validación de DEMs InSAR en áreas urbanas con datos GNSS.
- Paloscia, S. (2002). A summary of experimental results to assess the contribution of SAR for mapping vegetation biomass and soil moisture. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 246--261.
- Penttilä, K. K. (2006). Radar cross-section analysis for passive RFID systems. *IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation*, 103--109.
- Pérez, V. C. (2010). Introducción al radar. *Departamento de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Cantabria, España*.
- Podest, E. (2017). Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética.
- Podest, E. (2017). Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética.
- Puig, C. a.-B. (2001). *Aplicación de imágenes Radarsat a la zona de la marisma de Doñana*. IX Congreso Nacional de Teledetección. Lérida.
- Richards, J. A. (1999). *Remote sensing digital image analysis* (Vol. 3). Springer.
- Richards, J. A. (2009). *Remote sensing with imaging radar. I*.
- Rosell, P. A. (2018). Correcciones atmosféricas en interferometría SAR utilizando la Red SIRGAS y la herramienta de cálculo TRAIN.
- Sánchez Orduña, Q. (2011). Simulación de un radar pulsado para el control de aeronaves. *Universitat Politècnica de Catalunya*.

- Solorza, R. (2013). Estimación de la humedad superficial del suelo mediante el uso combinado de modelos electromagnéticos y el enfoque bayesiano. Estudio exploratorio en imágenes SARAT. *Maestría en Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias (AEARTE)*.
- Sosa, W. M. (2019). Análisis espectral de la vegetación de bofedal con el espectroradiómetro “fieldspec4” e imágenes de satélite sentinel2, en la cabecera de cuenca cachi-apacheta, Región Ayacucho. 145--154.
- Suárez Arévalo, D. A. (2016). Análisis de la Utilización de la Dimensión Fractal y Multifractal para la Clasificación del Uso y la Cobertura del Suelo en una Imagen de Radar de Apertura Sintética SAR, en una Zona Urbana.
- Torres, R. a. (2017). *Sentinel 1 evolution: Sentinel-1C and-1D models*. 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).
- Van Zyl, J. J. (2011). *Synthetic aperture radar polarimetry*. John Wiley & Sons.
- Van Zyl, J. J. (2011). *Synthetic aperture radar polarimetry*. John Wiley & Sons.
- Wiley, C. A. (1985). Synthetic aperture radars. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, pp. 440--443.
- Woodhouse, I. H. (2012). Polarimetric radar imaging: from basics to applications by Jong-Sen Lee and Eric Pottier: CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2009, 398 pp., hardback (ISBN: 978-1420054972).
- Zozaya, A. a. (2017). Radar imaging basics. (U. d. Carabobo, Ed.) *Revista Ingeniería UC*, 24(1), pp. 73--80.

Anexos A

Título: Evaluación de parámetros geométricos y espectrales diferenciados en imágenes de radar Sentinel-1 para la clasificación de la superficie del suelo en la microcuenca Apacheta

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	MARCO TEÓRICO	VARIABLES	METODOLOGÍA
<p>¿En qué medida los parámetros geométricos y espectrales diferenciados estimados en imágenes de radar Sentinel-1, permiten la clasificación del uso del suelo en la microcuenca Apacheta?</p> <p>PROBLEMA ESPECÍFICOS</p> <p>1. ¿En qué medida la estimación de los parámetros geométricos estimados en imágenes de radar Sentinel-1, permiten la clasificación de uso del suelo en la microcuenca Apacheta?</p> <p>2. ¿En qué medida la estimación de los parámetros espectrales diferenciados en imágenes de radar Sentinel-1, permiten la clasificación de uso del suelo en la microcuenca Apacheta?</p>	<p>Estimar los parámetros geométricos y espectrales diferenciados en imágenes de radar Sentinel-1, para la clasificación de uso del suelo en la microcuenca Apacheta.</p> <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <p>1. Correlacionar los parámetros geométricos en imágenes de radar Sentinel-1, para la clasificación del suelo en la microcuenca Apacheta.</p> <p>2. Estimar los parámetros espectrales diferenciados en imágenes de radar Sentinel-1, para la clasificación del suelo en la microcuenca Apacheta.</p> <p>3. Comparar los métodos de clasificación de uso de suelo que</p>	<p>Los parámetros geométricos y espectrales diferenciados estimados en imágenes de radar Sentinel-1, permite la clasificación de uso del suelo en la microcuenca Apacheta, de manera significativa.</p> <p>HIPÓTESIS ESPECIFICAS</p> <p>1. Los parámetros geométricos estimados en imágenes de radar Sentinel-1, permiten la clasificación del suelo en la microcuenca Apacheta, de manera significativa.</p> <p>2. Los parámetros espectrales diferenciados estimados en imágenes de radar Sentinel-1, permiten la clasificación del suelo en la microcuenca</p>	<p>La complejidad matemática de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) para la clasificación de suelo fue evolucionando con el desarrollo de los satélites.</p> <p>No en tanto, existen trabajos de investigación ya desarrolladas en teoría de control, procesamiento digital de imágenes, transferencia radiactiva, SAR y polarimétrico. Woodhouse (2012) y Anfinsen (2011) por ejemplo desarrollan: procesamiento de información SAR que incluye polarimetría de radar, punto polarimétrico de SAR estadísticas, filtrado de manchas, detección remota oceánica utilizando SAR polarimétrico, supervisado y el terreno del SAR polarimétrico no supervisado y la clasificación del uso de la tierra.</p>	<p>Variable independiente:</p> <p>Parámetros geométricos y espectrales diferenciados.</p> <p>Indicadores:</p> <p>Angulo de incidencia y Coeficiente de Scattering.</p> <p>Latitudes y Longitudes.</p> <p>Variable Dependiente:</p> <p>Clasificación de uso del suelo</p> <p>Indicadores:</p> <p>✓ Zonas de clasificación en Apacheta:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vegetación - Ríos - Bofedales 	<p>Tipo de Investigación</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aplicada. <p>Nivel de Investigación</p> <ul style="list-style-type: none"> • Descriptivo – explicativo – correlacional. <p>Métodos de investigación</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cualitativo – cuantitativo <p>Métodos de procesamiento de imágenes de radar SLC Sentinel 1</p> <p>Diseño de Investigación</p> <p>No Experimental del tipo Transversal</p> <p>Universo</p> <p>Está compuesto por todas las imágenes de radar Sentinel-1 de la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta de la Región Ayacucho.</p> <p>Población</p> <ul style="list-style-type: none"> • Está constituida por todas las imágenes de radar Sentinel-1 que contienen información de la extensión de la superficie terrestre

3. ¿Cuáles son las metodologías de clasificación de uso de suelo apropiadas que involucran la medida de parámetros geométricos y espectrales diferenciados estimados en imágenes de radar Sentinel-1?

involucren los parámetros geométricos y espectrales en una imagen de radar Sentinel-1.

Apacheta, de manera significativa.

3. Los métodos de clasificación de uso de suelo involucran de manera eficiente los parámetros geométricos y espectrales estimados en una imagen de radar Sentinel-1.

El Radar es un sistema activo de iluminación que posee componentes y equipamiento para la emisión y medición de radiación electromagnética con el objetivo de detectar y localizar elementos en la superficie terrestre. El transmisor y el receptor pueden estar localizados en dos plataformas distintas, cuya configuración es denominada “Bistática”. Cuando el transmisor y receptor están juntos son “Mono estáticas”

- Lagunas
- Ciudades
- Bosques
- Plantaciones
- Hielo
- Árboles
- ✓ Mapeo espacial mediante Imágenes de radar Sentinel 1

de la microcuenca Apacheta de Ayacucho.

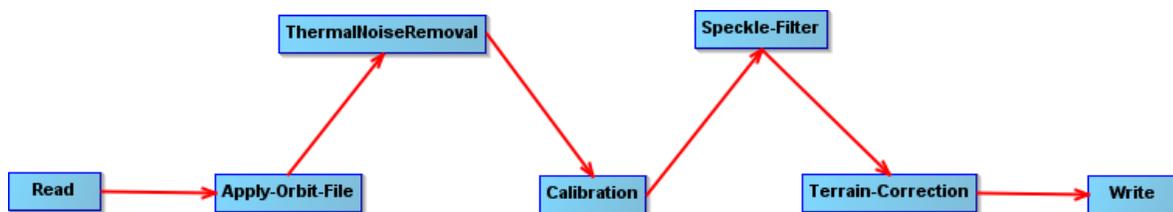
Muestra

• Está constituida por el subconjunto de imágenes de radar Sentinel-1 que contienen información de la superficie terrestre de la microcuenca Apacheta de Ayacucho de ecosistemas de ríos, lagunas, plantaciones vegetales, bosques, urbanizaciones, montañas y otros.

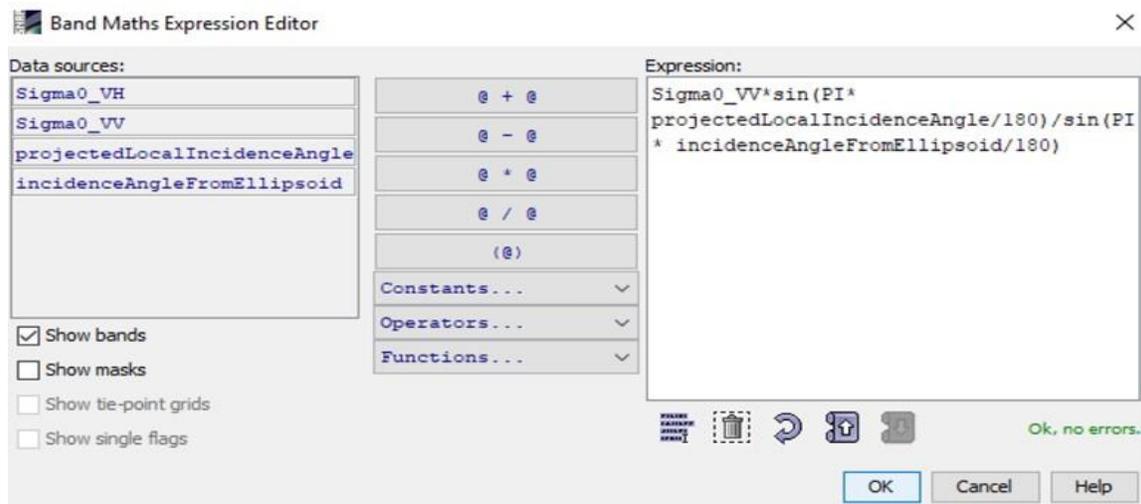
Anexos B

Procesamiento de las imágenes de radar Sentinel-1

1. Operación de calibración
2. Operador de Speckle Filter
3. Operador de corrección de terreno de rango Doppler
4. Normalización radiométrica
5. Procesos adicionales
 - Aplicar el operador de archivos (Orbit-Apply Orbit File operator)
 - Operador de eliminación de ruido térmico (Thermal Noise Removal Operator)



Proyección local de ángulo incidente en imágenes Sentinel-1 de Sigma VV/VH



Backscattering radar: Normalización de pendiente

$$\sigma_{Norm}^o = \sigma_{Elipsoidal}^o * \frac{\text{sen}(\theta_{DEM})}{\text{sen}(\theta_{Ell.})}$$

Kellndorfer, et al. (1998)

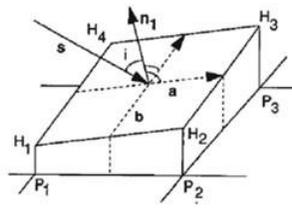
θ_{DEM}

↓

Ángulo de incidencia local proyectado en el plano del rango.

↓

Ángulo de incidencia local



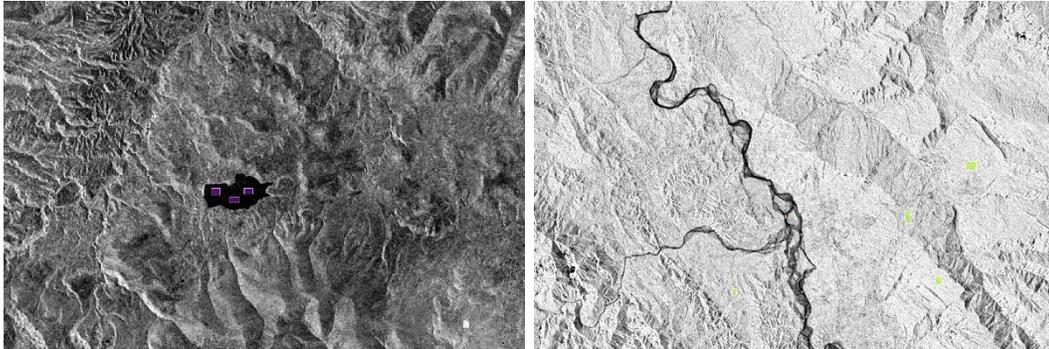
Resumen de los métodos aplicados a las imágenes de radar Sentinel-1B del tipo SLC

- S1B_IW_SLC_1SDV_20180811T232445_split
- S1B_IW_SLC_1SDV_20180811T232445_split_Cal
- S1B_IW_SLC_1SDV_20180811T232445_split_Cal_deb
- S1B_IW_SLC_1SDV_20180811T232445_split_Cal_deb_ML
- S1B_IW_SLC_1SDV_20180811T232445_split_Cal_deb_ML_Polmatx(C2)
- S1B_IW_SLC_1SDV_20180811T232445_split_Cal_deb_ML_Polmatx(C2)_PolSpkFilt(5x5 RefinLee)
- S1B_IW_SLC_1SDV_20180811T232445_split_Cal_deb_ML_Polmatx(C2)_PolSpkFilt(5x5 RefinLee)_RangDopTC(Digit Elevation HGT)
- S1B_IW_SLC_1SDV_20180811T232445_split_Cal_deb_ML_Polmatx(C2)_PolSpkFilt(5x5 RefinLee)_RangDopTC(Digit Elevation HGT)_ClassCloude(DualP)
- S1B_IW_SLC_1SDV_20180811T232445_split_Cal_deb_ML_Polmatx(C2)_PolSpkFilt(5x5 RefinLee)_RangDopTC(Digit Elevation HGT)_PolDecomp(H-Alpha)
- S1B_IW_SLC_1SDV_20180811T232445_split_Cal_deb_ML_Polmatx(C2)_PolSpkFilt(5x5 RefinLee)_RangDopTC(Digit Elevation HGT)_PolUnsupervClass(WishartDualPol)

Resumen de los métodos aplicados a las imágenes de radar Sentinel-1B del tipo GRDH

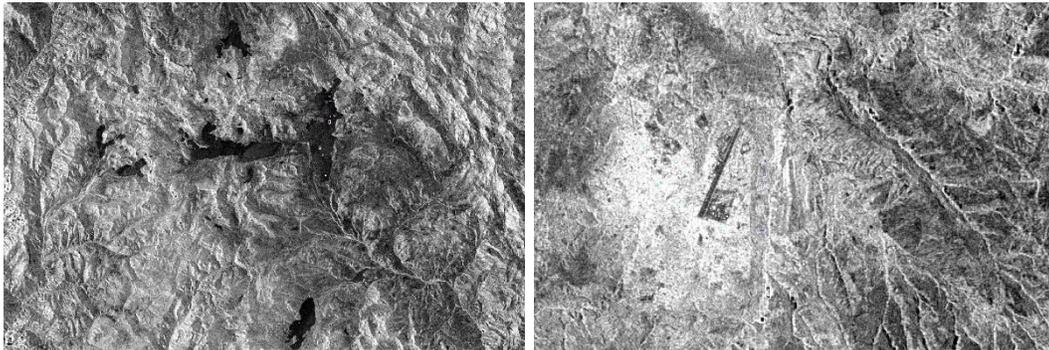
- S1B_IW_GRDH_1SDV_20180811T232445_20180811T232510_012221_016848_BF01_Cal
- S1B_IW_GRDH_1SDV_20180811T232445_20180811T232510_012221_016848_BF01_Cal_Spk_gamamp3
- S1B_IW_GRDH_1SDV_20180811T232445_20180811T232510_012221_016848_BF01_Cal_Spk_gamamp3_TC_applyRM10
- [9] S1B_IW_GRDH_1SDV_20180811T232445_20180811T232510_012221_016848_BF01_Cal_Spk_gamamp3_TC_applyRM10
 - ⊕ Metadata
 - ⊕ Vector Data
 - ⊕ Bands
 - ⊖ Masks
 - Agua
 - Bosque poblado
 - Cultivos
 - Gras natural
 - Plantaciones
 - Rio seco
 - Sombras
 - urbanas con pendiente
 - Zona urbana1
 - Zona urbana2
- S1B_IW_GRDH_1SDV_20180811T232510_012221_016848_BF01_Cal_Spk_gamamp3_TC_applyRM10_RF2 ●

Imágenes sentinel-1B de las zonas seleccionadas y clasificadas



(a)

(b)



(c)

(d)

a) Represa Cuchoquisera

b) Ríos del VRAE

c) Lagunas

d) Aeropuerto y ciudad de Ayacucho.

Otros datos:

Nombre:

S1B_IW_GRDH_1SDV_20180811T232445_20180811T232510_012221_016848_BF01.SAFE

Modo: IW

Satélite: Sentinel-1

Tamaño de imágenes: 1.62 GB

Tipo de adquisición: NOMINAL

Número de ciclo: 76

Polarización: VV & VH

Clase de producto: S

Tipo de producto: GRD

Nivel de producto: L1

Resolución: High

Nombre del instrumento: Radar de Apertura Sintética (banda-C)

Instrumentos swath: IW1 IW2 IW3

Operador: European Space Agency

Descripción del instrumento: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS****ACTA N° 288-2022-FIMGC**

En la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **Resolución Decanal N° 668-2022-FIMGC-D**, siendo los veintitrés días del mes de diciembre del 2022, a horas 10:00 a.m.; se reunieron los jurados del acto de sustentación, en el Auditorium virtual google meet del Campus Universitario de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Siendo el Jurado de la sustentación de tesis compuesto por el presidente el **Dr. Ing. Efraín Elías PORRAS FLORES**, jurado el **Mg. Julio Francisco JIMENEZ ARANA**, jurado el **Mg. Jorge Luis LOZANO RODRIGUEZ**, jurado asesor **Mg. Wilmer Enrique MONCADA SOSA** y secretario del proceso el **Mg. Ing. Christian LEZAMA CUELLAR**, con el objetivo de recepcionar la sustentación de la tesis denominada **“ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y ESPECTRALES DIFERENCIADOS EN IMÁGENES DE RADAR SENTINEL-1 PARA LA CLASIFICACIÓN DE USO DEL SUELO EN LA MICROCUENCA APACHETA”**, sustentado por el señor **Hugo HINOSTROZA FARFÁN**, Bachiller en Ciencias Físico Matemáticas.

El Jurado luego de haber recepcionado la sustentación de la tesis y realizado las preguntas, el sustentante al haber dado respuesta a las preguntas, y el Jurado haber deliberado; califica con la nota aprobatoria de **17 (diecisiete)**.

En fe de lo cual, se firma la presente acta, por los miembros integrantes del proceso de sustentación.

Dr. Ing. Efraín Elías PORRAS FLORES
Presidente

Mg. Julio Francisco JIMENEZ ARANA
Jurado

Mg. Jorge Luis LOZANO RODRIGUEZ
Jurado

Mg. Wilmer Enrique MONCADA SOSA
Jurado - Asesor

Mg. Ing. Christian LEZAMA CUELLAR
Secretario del Proceso

c.c.:
Bach. Hugo HINOSTROZA FARFÁN,
Jurados (4)
Archivo

**CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN****CONSTANCIA N° 398-2022-FIMGC**

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado con el software Turnitin, en segunda instancia para las **Escuelas Profesionales** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la **Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU**, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga y **Resolución Decanal N° 281-2022-FIMGC- UNSCH-D**, deja constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

Apellidos y Nombres : HINOSTROZA FARFÁN, Hugo
Escuela Profesional : CIENCIAS FISICO MATEMATICAS
Título de la Tesis : Estimación de parámetros geométricos y espectrales diferenciados en imágenes de radar Sentinel-1 para la clasificación de uso del suelo en la microcuenca Apacheta
Evaluación de la Originalidad : 18 % Índice de Similitud
Identificador de la entrega : 1984492426

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

En señal de conformidad y verificación se firma la presente constancia

Ayacucho, 19 de diciembre del 2022

Firmado
digitalmente por
**LEZAMA CUELLAR
CHRISTIAN**

Mg. Ing. Christian LEZAMA CUELLAR

Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado
de la FIMGC

Estimación de parámetros geométricos y espectrales diferenciados en imágenes de radar Sentinel-1 para la clasificación de uso del suelo en la microcuenca Apacheta

por Hugo Hinostroza Farfán

Fecha de entrega: 19-dic-2022 09:16a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 1984492426

Nombre del archivo: Tesis_HINOSTROZA_FARF_N,_Hugo_FISMA.pdf (7.29M)

Total de palabras: 27402

Total de caracteres: 155721

Estimación de parámetros geométricos y espectrales diferenciados en imágenes de radar Sentinel-1 para la clasificación de uso del suelo en la microcuenca Apacheta

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%

INDICE DE SIMILITUD

15%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

7%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	4%
2	ig.conae.unc.edu.ar Fuente de Internet	3%
3	docplayer.es Fuente de Internet	3%
4	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
5	I. Escobar, C. Cardenas, Carlos Lopez-Martinez, D Floriciou, E. Johnson. "Análisis de hielo marino mediante polarimetría en bahía Fildes, Isla Rey Jorge, Shetland del Sur, Antártica", 2017 First IEEE International Symposium of Geoscience and Remote Sensing (GRSS-CHILE), 2017 Publicación	1%

6	Fuente de Internet	<1 %
7	revistas.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
8	www.subpesca.cl Fuente de Internet	<1 %
9	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	<1 %
10	idoc.pub Fuente de Internet	<1 %
11	www.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
12	Submitted to Universitat Politècnica de València Trabajo del estudiante	<1 %
13	livrosdeamor.com.br Fuente de Internet	<1 %
14	oa.upm.es Fuente de Internet	<1 %
15	www.uvrcorrectoresdetextos.com Fuente de Internet	<1 %
16	www.colibri.udelar.edu.uy Fuente de Internet	<1 %
17	accedacris.ulpgc.es Fuente de Internet	<1 %

<1 %

18

eo4society.esa.int

Fuente de Internet

<1 %

19

C. Aldana, M. Revilla, J. Gonzales, Y. Saavedra, W. Moncada, J. Maicelo. "Relación de firmas espectrales para la identificación de bosque seco en imágenes de satélite Sentinel 2, cuenca baja del río Chira, Región Piura", Revista de Teledetección, 2020

Publicación

<1 %

20

repositorio.ucm.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

21

un-spider.org

Fuente de Internet

<1 %

22

ebin.pub

Fuente de Internet

<1 %

23

rdu.unc.edu.ar

Fuente de Internet

<1 %

24

qdoc.tips

Fuente de Internet

<1 %

25

www.researchgate.net

Fuente de Internet

<1 %

26

hmong.es

Fuente de Internet

<1 %

27

repositorio.concytec.gob.pe

Fuente de Internet

<1 %

28

repositorio.unsch.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo