



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Análisis polarimétrico a través de “SAR Polarimetry Target Analysis”
como apoyo para obtener coberturas de la tierra con la metodología CORINE Land Cover

Juan Carlos Parra Garzón

Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título de:
Magíster en Ciencias de la Información y las Comunicaciones con énfasis en Geomática

Asesor: Profesor MSc. José Luis Herrera Escorcía

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias de la Información y las Comunicaciones con énfasis en Geomática
Bogotá, Colombia

2022

Dedicatoria

Este esfuerzo y triunfo lo dedico a mi esposa, mi hija, mi madre, mi hermana, sobrinos y en general a toda mi familia

Agradecimientos

Quiero comenzar dándole las gracias a Dios quien me da su bendición y me fortalece todos los días, a mi tutor de tesis, profesor José Luis Herrera Escorcía, por su ayuda constante e inmejorable durante todo el desarrollo de éste proyecto, Al grupo de investigación NIDE por su gestión para poder obtener la imagen RADARSAT 2.

Tabla de contenido

Resumen.....	1
Abstract	2
Introducción	3
1 Planteamiento del problema.....	5
1.1. Contexto general.....	5
1.2. Contexto específico del problema	5
1.3. Pregunta de investigación.....	5
2 Justificación	6
3 Objetivos.....	18
3.1 General.....	18
3.2 Específicos	18
3.2.1.....	18
3.2.2.....	18
3.2.3.....	18
4 Marco teórico	19
4.1 Percepción remota con RADAR.....	19
4.1.1 Principios físicos de RADAR	19
4.1.2 RADAR de Apertura Sintética SAR	20
4.1.2.1 Factores determinantes en la captura de datos de SAR	22
4.1.2.2 Adquisición en Rango o Alcance en Tierra	24
4.1.2.3 Adquisición en Azimut.....	25
4.1.2.4 Espectro Electromagnético y Longitud de Onda en SAR.....	26
4.1.2.5 Polarización de las Ondas Electromagnéticas en SAR.....	27

4.2 Estados de la polarización	30
4.2.1 Vector de Jones	30
4.2.2 Esfera de Poincaré	33
4.2.3 Fase y dispersión de la onda electromagnética	35
4.3 Conceptos básicos de polarimetría	37
4.3.1 Influencia del ángulo de incidencia	38
4.3.2 Influencia de la constante dieléctrica.....	39
4.3.3 Dispersión de las ondas.....	39
4.4 Distorsiones geométricas de las imágenes SAR.....	40
4.4.1 Desplazamiento topográfico	41
4.4.2 Distorsiones en escala	41
4.4.3 Distorsiones radiométricas.....	41
4.4.4 Speckle.....	42
4.5 Descomposición polarimétrica.....	42
4.5.1 Descomposiciones Incoherentes.....	43
4.5.1.1 Descomposición polarimétrica e interpretación de H/A/ α Full-Polarización	43
4.5.1.1.1 Parámetro Entropía (H).....	47
4.5.1.1.2 Parámetro Anisotropía (A)	48
4.5.1.1.3 Parámetro Alpha (α)	49
4.5.1.2 Descomposición polarimétrica H/A/ α doble Polarización.....	50
4.5.1.2.1 Extracción de parámetros H- α	50
4.5.1.2.2 Interpretación del espacio H- α	52
4.5.1.3 Descomposición de Freeman & Durden	54
4.5.1.4 Descomposición de Van Zyl	56
4.5.1.5 Descomposición de Huynen.....	58
4.5.2 Descomposiciones Coherentes	59

4.5.2.1 Descomposición de Pauli	59
4.5.2.2 Descomposición de Touzi.....	60
4.5.2.3 Descomposición de Cameron	61
4.5.2.4 Descomposición de Krogager.....	62
4.6 Análisis basado en objetos de imagen (OBIA por su sigla en inglés)	63
4.7 Algoritmos Machine Learning	63
4.7.1 Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) por su sigla en Inglés.....	64
4.7.2 Bosques Aleatorios (RF) Sigla en Inglés	65
4.8 Evaluación de la exactitud de una clasificación temática	66
4.8.1 Matriz de confusión.....	66
4.8.2 Coeficiente Kappa.....	66
5 Datos y Métodos	68
5.1 Área de estudio	68
5.2 Datos	69
5.2.1 Imagen SAR.....	69
5.2.2 Imágenes Ópticas	71
5.2.2.1 Imagen ALOS	71
5.2.2.2 Imagen Landsat 7 ETM	73
5.2.3 Modelo Digital de Elevación ALOS PALSAR	75
5.2.4 Herramientas.....	76
5.3 Metodología.....	76
5.3.1 Capa de coberturas de la tierra con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia (CLCC)	77
5.3.2 Procesamiento de la imagen SAR.....	79
5.3.2.1 Importar la imagen SAR	79
5.3.2.2 Ortorección de la imagen SAR	80

5.3.2.3 Algoritmos para mejorar la imagen SAR	81
5.3.2.3.1 Realce radiométrico.....	81
5.3.2.3.2 Algoritmos de descomposiciones polarimétricas utilizados en la investigación.	82
5.3.2.3.3 Algoritmos de síntesis de canal polarimétrico utilizados en la investigación.....	85
5.3.2.3.4 Algoritmos de conversión de la representación matricial.....	86
5.3.3 Análisis polarimétrico de objetivos en imágenes SAR (SPTA) por su sigla en inglés.....	88
5.3.3.1 Despliegue de imágenes SAR.....	88
5.3.3.2 Selección de objetivos (coberturas de la tierra)	90
5.3.3.3 Generación de reporte numérico y gráfico.....	92
5.3.3.3.1 Reporte numérico	92
5.3.3.3.2 Reporte gráfico	93
5.3.4 Clasificación utilizando análisis de objetos de imágenes (OBIA) por su sigla en inglés	95
5.3.4.1 Proceso de Segmentación.....	96
5.3.4.2 Cálculo características de atributos	97
5.3.4.3 Sitios de entrenamiento.....	98
5.3.4.4 Clasificación supervisada	100
5.3.4.5 Evaluación de la exactitud de la clasificación	101
6 Resultados y Análisis	102
6.1 Resultados del análisis polarimétrico utilizando el módulo SPTA	102
6.2 Resultados de la clasificación supervisada.....	123
6.2.1 Resultado de la segmentación de las imágenes SAR con descomposición polarimétrica	123
6.2.2 Resultado de la toma de muestras sobre las imágenes SAR con descomposición polarimétrica para la clasificación supervisada.....	124
6.2.3 Resultado de la clasificación supervisada, por el método de Máquinas de Soporte Vectorial, de las imágenes SAR con descomposición polarimétrica	125
6.2.4 Resultado de la validación de la exactitud de las clasificaciones supervisadas	128

7 Conclusiones..... 135

8 Recomendaciones 138

9 Alcances e impactos 139

Referencias..... 140

Anexos 148

Lista de tablas

Tabla 1 Clasificación de cobertura de la tierra - ITC.....	7
Tabla 2 Clasificación de usos de la tierra – ITC.....	8
Tabla 3 Inventario métodos para clasificación de coberturas de la tierra en Colombia.....	9
Tabla 4 Inventario de clasificación de coberturas de la tierra que se han elaborado en Colombia con la Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia	10
Tabla 5 Ejemplos de clasificación de coberturas de la tierra en Colombia con metodología CLCC que han hecho entidades diferentes a IDEAM.....	17
Tabla 6 Bandas de SAR, frecuencia y longitud de onda λ	27
Tabla 7 Características de operación de sensores SAR	29
Tabla 8 Principales estados de la polarización	34
Tabla 9 Formas de dispersión de las ondas SAR.....	39
Tabla 10 Ejemplos de descomposiciones polarimétricas	43
Tabla 11 Características Imagen RADARSAT 2 de la zona de estudio	70
Tabla 12 Características Imagen ALOS AVNIR de la zona de estudio	71
Tabla 13 Características Imagen Landsat 7 ETM de la zona de estudio	74
Tabla 14 Características DEM ALOS PALSAR de la zona de estudio	75
Tabla 15 Características de los filtros que se le aplicaron a la imagen SAR utilizada para la investigación.....	82
Tabla 16 Características de las descomposiciones polarimétricas que se le aplicaron a la imagen SAR utilizada para la investigación	82
Tabla 17 Imágenes que cumplieron con las características para despliegue en SPTA.....	89
Tabla 18 Coberturas de la tierra seleccionadas para analizar con SPTA	90
Tabla 19 Imágenes a las que se les realizó clasificación supervisada por el método de OBIA	95
Tabla 20 Resultados análisis polarimétrico para la cobertura “tejido urbano continuo”	104
Tabla 21 Resultados análisis polarimétrico para la cobertura “cultivos anuales o transitorios”	105

Tabla 22 Resultados análisis polarimétrico para la cobertura “cultivos confinados”	106
Tabla 23 Resultados análisis polarimétrico para la cobertura “pastos limpios”	107
Tabla ‘3V24 Resultados análisis polarimétrico para la cobertura “bosque natural denso”	108
Tabla 25 Resultados análisis polarimétrico para la cobertura “bosque plantado”	109
Tabla 26 Resultados análisis polarimétrico para la cobertura “herbazal denso”	110
Tabla 27 Resultados análisis polarimétrico para la cobertura “arbustal denso”	111
Tabla 28 Resultados análisis polarimétrico para la cobertura “aguas continentales”	112
Tabla 29 Análisis de los resultados polarimétricos obtenidos con SPTA, para cada cobertura de la tierra propuesta	113
Tabla 30 Resultado de la segmentación de las Imágenes SAR con descomposición polarimétrica	123
Tabla 31 Información de las muestras que se tomaron sobre las imágenes SAR con descomposición polarimétrica	125
Tabla 32 Matriz de confusión de las muestras tomadas en la imagen SAR con descomposición polarimétrica de Kogager	129
Tabla 33 Matriz de confusión de las muestras tomadas en la imagen SAR con descomposición polarimétrica de Freeman & Durden	130
Tabla 34 Matriz de confusión de las muestras tomadas en la imagen SAR con descomposición polarimétrica PHDW	131

Lista de ilustraciones

Ilustración 1 Metodología para la interpretación de coberturas con la metodología CLCC.....	13
Ilustración 2 Esquema metodológico para la reinterpretación de coberturas de la tierra.....	14
Ilustración 3 Geometría de visualización de un sensor SAR.....	20
Ilustración 4 Principales parámetros geométricos de la ecuación de radar para el caso de SAR.....	21
Ilustración 5 Factores geométricos inherentes en la captura de una imagen de SAR.....	22
Ilustración 6 Espectro electromagnético.....	26
Ilustración 7 Orientación del vector E y sus componentes	27
Ilustración 8 Tipos de polarización lineal	28
Ilustración 9 Elipse de polarización, mostrando la orientación de ángulo ψ y elipticidad χ° , las que están en función del semi-eje mayor a y del semi- eje menor b	30
Ilustración 10 Polarizaciones de una onda electromagnética plana.....	31
Ilustración 11 Formas de la elipse de polarización	32
Ilustración 12 Elementos de la esfera de Poincaré	34
Ilustración 13 Amplitud y fase de una onda.....	36
Ilustración 14 Desplazamiento de fase de una onda	36
Ilustración 15 Ángulo de incidencia SAR	38
Ilustración 16 Plano clasificación H- α	52
Ilustración 17 Construcción de los hiperplanos de separación para un conjunto de dos muestras.....	64
Ilustración 18 Simplificación ilustrada del concepto de Bosques Aleatorios (Random Forest)	65
Ilustración 19 Localización del área de estudio.....	68
Ilustración 20 Imagen SAR utilizada en la investigación	69
Ilustración 21 Imagen ALOS AVNIR utilizada en la investigación	72
Ilustración 22 Imagen LANDSAT 7 ETM utilizada en la investigación	73
Ilustración 23 Modelo de Elevación Digital ALOS PALSAR utilizado en la investigación.....	76

Ilustración 24 Metodología general propuesta para la investigación.....	77
Ilustración 25 Capa de coberturas de la tierra con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia	78
Ilustración 26 Leyenda de coberturas de la tierra con la metodología CORINE Land Cover	79
Ilustración 27 Imagen SAR sin ortocorregir y ortocorregida.....	80
Ilustración 28 Comparación Imagen SAR sin filtro y con filtro.....	81
Ilustración 29 Algoritmo PSS2C aplicado a la imagen Radarsat de estudio	85
Ilustración 30 Tipos de matrices que representan las imágenes SAR.....	87
Ilustración 31 Procesos con el módulo SPTA.....	88
Ilustración 32 Ejemplo de despliegue de imagen SAR con mejoramiento PSBOXCAR de 3 x 3 con el módulo SPTA	89
Ilustración 33 Maneras disponibles en SPTA para toma de objetivos	91
Ilustración 34 Ubicación de los objetivos tomados con SPTA.....	91
Ilustración 35 Ejemplo toma de objetivo (cultivo confinado) en SPTA.....	92
Ilustración 36 Opciones de reporte numérico en SPTA	93
Ilustración 37 Opciones de reporte gráfico en SPTA.....	94
Ilustración 38 Procesos para realizar análisis basado en objetos a las imágenes.....	96
Ilustración 39 Parámetros para segmentación de la imagen SAR, utilizando OBIA del programa CATALYST.....	96
Ilustración 40 cálculo características de atributos para los polígonos de la segmentación de la imagen SAR, utilizando OBIA del programa CATALYST	98
Ilustración 41 Sitios de entrenamiento para los polígonos de la segmentación de la imagen SAR, utilizando OBIA del programa CATALYST	99
Ilustración 42 Parámetros de la clasificación supervisada, utilizando OBIA del programa CATALYST	100
Ilustración 43 Parámetros para la evaluación de la exactitud temática, utilizando OBIA del programa CATALYST	101
Ilustración 44 Resultado clasificación supervisada, método SVM sobre la imagen SAR con descomposición polarimétrica de Krogager.....	126

Ilustración 45 Resultado clasificación supervisada, método SVM sobre la imagen SAR con descomposición polarimétrica de Freeman & Durden	126
Ilustración 46 Resultado clasificación supervisada, método SVM sobre la imagen SAR con descomposición polarimétrica PHDW.....	127
Ilustración 47 Exactitud de usuario obtenida en cada clasificación supervisada	132
Ilustración 48 Exactitud general obtenida en cada clasificación supervisada	133
Ilustración 49 Coeficiente Kappa obtenido en cada clasificación supervisada	134
Ilustración 50 Descomposición polarimétrica de Krogager	148
Ilustración 51 Descomposición polarimétrica POLSAR	150
Ilustración 52 Ejemplo de composiciones a color con canales de descomposición polarimétrica POLSAR	152
Ilustración 53 Descomposición polarimétrica de Freeman & Durden	153
Ilustración 54 Descomposición polarimétrica PHDW	154
Ilustración 55 Descomposición polarimétrica de Touzi	155
Ilustración 56 Descomposición polarimétrica de Cloude & Pottier	158
Ilustración 57 Clasificación no supervisada de Van Zyl	159
<i>Ilustración 58 Algoritmo PSCONV c4r6c</i>	<i>160</i>
Ilustración 59 Algoritmo PSCONV c3r3c.....	163
Ilustración 60 Representación canónica de los objetivos en base H -V	165

Lista de anexos

Anexo A. PSKROG - Krogager decomposition	148
Anexo B. PSPOLDIS - POLSAR discriminators.....	149
Anexo C. PSFREDUR - Freeman-Durden decomposition	153
Anexo D. PSPHDW –POLSAR PHDW decomposition	154
Anexo E. PSTOUZIDEC - Touzi decomposition.....	155
Anexo F. PSEABA - Entropy, alpha, beta, and anisotropy Cloude & Pottier decomposition.....	158
Anexo G. PSVANZYL - Unsupervised Van Zyl classification	159
Anexo H. PSCONV – c4r6c Matriz de covarianza normalizada	160
Anexo I. PSCONV – c3r3c Matriz de covarianza normalizada	163
Anexo J. Representación canónica de los objetivos en base H –V	165

Resumen

La constante investigación y desarrollo que la comunidad científica ha hecho para desarrollar algoritmos que permitan obtener información polarimétrica de objetivos captados con imágenes SAR, se ha convertido en una herramienta útil en la obtención de información de coberturas de la tierra; es así como en esta investigación, se ha utilizado una imagen del programa RADARSAT 2 completamente polarizada (Quad Pol) tomada el 1 de septiembre de 2008, ubicada en la sabana de Bogotá, la que se procesó con el programa CATALYST Profesional, antes PCIGeomatics, con el objeto de determinar las características o firmas polarimétricas de coberturas terrestres obtenidas con la metodología CORINE Land Cover (tejido urbano continuo, cultivos anuales o transitorios, cultivos confinados, pastos limpios, bosque natural denso, bosque plantado, herbazal denso, arbustal denso y aguas continentales).

Para ello, se aplicaron procesos de filtrado de la imagen SAR para reducir el ruido o speckle, como el filtro de Lee 5 X 5 y BoxCar 3 X 3, además se ejecutaron los siguientes algoritmos de descomposición polarimétrica: Krogager, Cloude & Pottier (Entropy, alpha, beta, and anisotropy), Freeman & Durden, PHDW, Touzi y Van Zyl, así como algoritmos de transformación de matrices: C4R6C y C3R3C. A las capas resultado se les realizó un análisis visual con el objeto de inferir características particulares y relevantes como (intensidad, textura, compacidad, forma) para cada tipo de cobertura terrestre, posteriormente dichas capas resultado se intentaron desplegar en el módulo SAR Polarimetry Target Analysis – SPTA por su sigla en inglés-, no obstante, solo los dos archivos con filtro y los dos archivos de transformación de matrices se lograron desplegar y analizar debido a que son totalmente polarizadas. A partir de estas cuatro capas, se obtuvieron características polarimétricas de las coberturas de la tierra, antes mencionadas, por los métodos de co-polarización, Cloude & Pottier (H/A/ α / β) y Freeman & Durden.

Por último, se realizó la clasificación supervisada a través de análisis de objetos por los métodos de Máquinas de Soporte Vectorial – VSM, por su sigla en inglés- y Bosques Aleatorios – RF, por su sigla en inglés- sobre las imágenes SAR con descomposición de Krogager, Freeman & Durden y PHDW, obteniendo coeficientes Kappa de 0.634, 0.600 y 0.637 respectivamente, los que entran en el rango de clasificación de calidad muy buena.

Palabras clave: SAR, Polarimetría, CORINE Land Cover, Máquina de Soporte Vectorial, Bosques Aleatorios, Radar, Filtros, Speckle.

Abstract

The constant research and development carried out by the scientific community to develop algorithms to obtain polarimetric information from targets captured with SAR imagery has become a useful tool for obtaining information on land cover; thus, in this research, a fully polarized image of the RADARSAT 2 programme (Quad Pol) taken on 1st September 2008 was used, located on the Bogota, which was processed with the CATALYST Professional program, formerly PCI Geomatics, in order to determine the characteristics or polarimetric signatures of land cover obtained with the CORINE Land Cover methodology (continuous urban fabric, annual or transient crops, confined crops, clean pastures, dense natural forest, planted forest, dense grassland, dense shrubland and inland waters).

For this purpose, SAR image filtering processes were performed to reduce noise or speckle, such as the Lee filter 5 X 5 and BoxCar 3 X 3, and the following polarimetric decomposition algorithms were applied: Krogager, Cloude & Pottier (Entropy, alpha, beta, and anisotropy), Freeman & Durden, PHDW, Touzi and Van Zyl, as well as matrix transformation algorithms: C4R6C and C3R3C. The result layers were visually analyzed in order to infer particular characteristics and relevant as (intensity, texture, compactness, shape) for each type of land cover. Subsequently, these result layers were deployed in the SAR Polarimetry Target Analysis (SPTA) module. However, only the two filtered files and two matrix transformation files could be deployed and analyzed due to that they are totally polarized. From these four layers, polarimetric characteristics of the above-mentioned land cover were obtained by the co-polarization methods, Cloude & Pottier (H/A/ α/β) and Freeman & Durden.

Finally, the supervised classification was carried out through object analysis by the methods of Vector Support Machines (VSM) and Random Forests (RF) on SAR images with decomposition of Krogager, Freeman & Durden and PHDW, obtaining Kappa coefficients of 0.634, 0.600 and 0.637 respectively, those that fall into the very good quality classification range.

Keywords: SAR, Polarimetry, CORINE Land Cover, Vector Support Machine, Forest Random, Radar, Filter, Speckle.

Introducción

Contar con información actualizada de la cobertura y uso de la tierra constituye una herramienta fundamental para realizar una acertada planificación del territorio por parte de los tomadores de decisiones. Para el caso de Colombia esta valiosa información se ve limitada en su obtención debido a las cambiantes y diversas condiciones climáticas que se presentan en el territorio. Actualmente nuestro país implementa la metodología CORINE Land Cover para obtener la capa de uso y cobertura de la tierra y dentro de los procesos que se llevan a cabo para su elaboración se resalta la utilización de imágenes de sensores ópticos o pasivos de diferentes programas espaciales, las cuales son las más afectadas por las condiciones atmosféricas de nuestra región. El proceso se profundiza en el Capítulo 2.

Esta situación hace necesario que se realicen investigaciones orientadas a encontrar alternativas de información y procesos para solucionar la problemática detectada. La presente investigación, fundamentada en la utilización de sistemas de teledetección SAR (Radar de Apertura Sintética, Synthetic Aperture Radar, en inglés), basados en el análisis de ondas electromagnéticas emitidas por una antena y reflejadas por la superficie de la tierra, capturando tres tipos de dispersión: dispersión de superficie, dispersión de doble rebote y dispersión de volumen (Capítulo 4), que permita establecer si es posible obtener firmas polarimétricas de las coberturas de la tierra a partir de imágenes SAR, que contribuyan en la elaboración de una capa temática a partir de la leyenda CORINE Land Cover adaptada para Colombia con una exactitud temática aceptable, medida a través del coeficiente Kappa.

Inicialmente, con el propósito de obtener respuestas al interrogante planteado, se realiza una consulta teórica exhaustiva acerca de los conceptos y fundamentos físicos de SAR, estados de polarización, conceptos de polarimetría, descomposiciones polarimétricas, clasificación orientada a objetos, métodos de clasificación como: máquinas de soporte vectorial (SVM por su sigla en inglés) y bosques aleatorios (RF, por su sigla en inglés), así como la evaluación de la exactitud temática de una clasificación en sus componentes de matriz de confusión y coeficiente kappa, lo que se detalla en el capítulo 4.

Posteriormente, se realiza el proceso práctico sobre una imagen del sensor RADARSAT2, perteneciente al programa RADARSAT, el cual fue lanzado por la Agencia Espacial Canadiense (Canadian Space Agency) en el año 2007 con fines comerciales. La imagen se ubica en la sabana de Bogotá, en jurisdicción de los municipios de: Bogotá, Cota, Chía, El Rosal, Subachoque, Funza, Facatativá, Madrid, Tabio, Tenjo,

Zipaquirá y San Francisco, en el departamento de Cundinamarca y se procesa con el programa CATLYST Profesional, antes PCIGeomatics.

El primer paso que se efectúa es la ortocorrección de la imagen, luego se le aplica filtros que permiten minimizar el ruido moteado o speckle, paso seguido se ejecutan algoritmos de descomposición polarimétrica y algoritmos de conversión matricial para realizar un análisis visual de coberturas de la tierra y un análisis polarimétrico de las mismas a través del módulo de SAR Polarimetry Target Analysis - SPTA por su sigla en inglés- que pertenece al programa CATALYST profesional, con miras a obtener la firma polarimétrica de cada cobertura de la tierra, apoyado en la capa de coberturas de la tierra elaborada a partir de una imagen ALOS tomada el 18 de diciembre de 2008 y una imagen Landsat 7 ETM tomada el 26 de febrero de 2008, validada con la capa de coberturas de la tierra 2005 – 2009 elaborada por IDEAM, métodos que se describen en el capítulo 5.

Posteriormente, se realiza una clasificación de coberturas de la tierra sobre las imágenes SAR resultantes luego de aplicarles filtros, descomposiciones polarimétricas y/o conversión de matrices, utilizando la leyenda CORINE Land Cover adaptada para Colombia, a través de análisis de objetos con los métodos de Máquinas de Soporte Vectorial (SVM, por su sigla en inglés) y Bosques Aleatorios (RF, por su sigla en inglés), procesos que se describen en el capítulo 5.

Como último paso, se realiza la evaluación de exactitud temática de las clasificaciones obtenidas de la imagen SAR con mejoramientos, a través de la matriz de confusión y el coeficiente Kappa, tomando como referencia la capa de coberturas de la tierra elaborada a partir de una imagen ALOS tomada el 18 de diciembre de 2008 y una imagen Landsat 7 ETM tomada el 26 de febrero de 2008, validada con la capa de coberturas de la tierra 2005 – 2009 elaborada por IDEAM, actividades que se describen en el capítulo 5.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo de este trabajo de investigación y el análisis de los mismos lo que permite obtener conclusiones y dar recomendaciones con miras a mejorar los procesos para obtener la capa de uso y cobertura de la tierra.

1 Planteamiento del problema

1.1. Contexto general

Gran cantidad de estudios que requiere el estado colombiano para planificación de su territorio demandan información de coberturas de la tierra lo más actualizada posible; no obstante, debido a la ubicación del país en la zona de convergencia intertropical, donde el clima tropical se ve afectado prácticamente por variaciones altitudinales, de tal manera que el sistema orográfico es el principal determinante del clima en cada lugar; de igual manera influyen los vientos alisos, los vientos locales, la extensión y situación del mar Caribe, del océano Pacífico y la corriente fría de Humboldt (Toro & Julio, 2000), sumado al calentamiento global, han generado fenómenos que conllevan al aumento de presencia de nubes y bruma, lo que representa una limitante para obtener imágenes ópticas a través de sensores remotos pasivos que cumplan con las condiciones de calidad, temporalidad y oportunidad, lo que dificulta realizar actualizaciones frecuentes de la capa de coberturas de la tierra. Lo anterior es un obstáculo para el seguimiento y monitoreo, principalmente en temas de ordenamiento territorial y en estudios ambientales.

1.2. Contexto específico del problema

No existen estudios ni publicaciones que propongan mejorar o actualizar periódicamente la capa de coberturas de la tierra en Colombia, a través de imágenes de Radar de Apertura Sintética –SAR por sus siglas en inglés-, utilizando la leyenda CORINE Land Cover adaptada para Colombia -CLCC, como insumo esencial para realizar el seguimiento al ordenamiento ambiental de la nación. Por tal motivo es necesario generar ese tipo de conocimiento para proponerlo como alternativa de solución a la problemática detectada.

1.3. Pregunta de investigación

¿Es posible obtener firmas polarimétricas de coberturas de la tierra y generar una capa temática, utilizando la leyenda CORINE Land Cover adaptada para Colombia, a través de imágenes de Radar de Apertura Sintética polarimétricas?

2 Justificación

El manejo sostenible de los recursos naturales requiere de políticas y herramientas de planificación correctas. Para poder realizar una óptima regulación del uso de los recursos con el objetivo de garantizar su disponibilidad para las futuras generaciones, es necesario contar con la información del estado del uso de la tierra, lo cual se manifiesta directamente en la cobertura que representa la misma (Salvatierra et al, 2015).

Es por ello que uno de los principales retos para los países en vía de desarrollo es generar información precisa y estandarizada tanto de las coberturas terrestres como una base de datos histórica del uso del suelo existente (Salvatierra et al, 2015); no obstante, los términos uso y cobertura de la tierra tiene una estrecha relación llevando a confusiones a la hora de determinar los métodos para extracción de información y la lectura de la leyenda, es por ello que se hace necesario hacer la aclaración al respecto.

El término Cobertura se aplica en un todo o en parte de los atributos de la tierra y que, en cierta forma ocupan una porción de la superficie por estar localizados sobre ésta. Las interrelaciones dinámicas entre los atributos dan origen a los elementos de paisaje, en estas circunstancias, los elementos que se denominan cobertura y que dadas sus diferencias características conforman grupos que pueden derivarse de ambientes naturales producto de la evolución ecológica (bosques, sabanas, lagunas, afloramientos rocosos, etc.), o a partir de ambientes artificiales generados y mantenidos por el hombre (cultivos, represas, vías, centros poblados) (Vargas, 1992).

El término Uso se aplica al empleo que el hombre da a los diferentes tipos de cobertura “cíclica o permanente, para satisfacer sus necesidades materiales o espirituales” (Vink, 1975), como: extracción de madera, agricultura, vivienda, suministro de agua, pesca, ganadería, recreación, minería, energía, entre otros; es así como el uso de la tierra es el resultado de la interacción entre los factores físicos o naturales (atributos de la tierra) y los factores culturales o humanos que determinan la manera de aprovechamiento de los recursos naturales (Vargas, 1992).

Es así como, el mapeo de la cobertura terrestre en diferentes países de América Latina ha sido desarrollado siguiendo diversos sistemas de clasificación, fuentes de información, escalas y métodos de procesamiento de múltiples fuente de datos e imágenes (Posada & Salvatierra, 2018), por ejemplo, en

Colombia desde finales de la década de los años setenta, hasta finales de la década de los años noventa se realizaron numerosos esfuerzos para la obtención de mapas de coberturas y clasificación de tierras, pero al carecer de estándares y metodologías unificadas no lograron cumplir con los objetivos institucionales para el monitoreo de los cambios y dinámicas asociadas, ni satisfacer necesidades de información de los diferentes usuarios (Rodríguez & Peña, 2013).

En un contexto más detallado, hacia la década de los años 1980, se utilizó el sistema de clasificación del ITC adaptado por el CIAF, en donde se establece una clara distinción entre los conceptos de uso y cobertura, cuyas definiciones se dieron de manera previa, los que son clasificados en grupos diferentes de clases (Vargas, 1992), y se muestra la relación en las tablas 1 y 2.

Tabla 1

Clasificación de cobertura de la tierra - ITC

Código	Formas de Cobertura	Relación uso de la cobertura con formas de la tierra mostradas en la tabla 2
I	Construcciones	1
II	Plantaciones / Parcelas	2a, 2b, 2c, (6)
III	Vegetación Natural Abierta	3, 4, 5, 6, 7
IV	Bosques	2c, 3, 4, 5, 6
V	Cuerpos de Agua	1b, 1c, 1d, 2, 3, 5, 6, 7,
VI	Tierras Eriales	5, 7

Nota. Fuente: Vargas (1992).

Tabla 2*Clasificación de usos de la tierra – ITC*

Código	Uso de la tierra	Relación con formas de cobertura mostradas en la tabla 1
1	Asentamientos e Infraestructura	I, V
	a. Residencial	
	b. Industrial, Minería, Canteras	
	c. Transporte y Comunicaciones	
	d. Recreacional	
e. Otros		
2	Agricultura	II
	a. Cultivos Anuales	
	b. Cultivos Perennes	
	c. Cultivos de Forraje	
d. Cultivos Arbóreos		
3	Pastoreo	III, IV
	a. Intensivo	
	b. Extensivo	
c. Pastoralismo		
4	Forestal	II, III, IV
	a. Madera	
	b. Pulpa	
	c. Leña, Carbón, Postes	
d. Corteza, Resinas, Corcho, etc.		
5	Conservación	III, IV, V
	a. Reserva Natural	
	b. Recreación	
	c. Manejo de Cuencas	
	d. Estabilización Dunas, Taludes	
e. Otros		
6	Caza y Pesca	III, IV, VI
	a. Caza	
	b. Pesca	
c. Agricultura		
7	Sin Uso	

Nota. Fuente: Vargas (1992).

De igual manera diferentes entidades del estado colombiano han generado los mapas de uso y cobertura de la tierra desde el año 1981, pero con metodologías y escalas diferentes como se resume en la tabla 3, lo que dificulta la comparación entre los mismos.

Tabla 3

Inventario métodos para clasificación de coberturas de la tierra en Colombia

<i>Entidad</i>	<i>Año</i>	<i>Características</i>
CIAF	1981	Sistema de Clasificación de Tierras que permite la interpretación de imágenes de Sensores Remotos, metodología ITC adaptada por el CIAF.
IDEAM	1998	Mapa de Coberturas Vegetales, Uso y Ocupación del territorio nacional a escala 1:500.000, a partir de la interpretación de imágenes del programa Landsat 5 TM, con el fin de diferenciar las coberturas existentes y crear una herramienta básica para el estudio de los ecosistemas. Año base 1986.
IGAC	1998	Estructuración de una Metodología para la Clasificación del Uso Actual de la Tierra a diferentes escalas; 1:500.000, 1:100.000 y 1:50.000.

Nota. Fuente: FAO (2010); Lamprea (2017); <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-nacionales>, consultado 04/11/2020.

Es por ello que en Colombia desde el año 2004, El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM¹-, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC- y CORMAGDALENA, con el apoyo financiero del Fondo Francés para el Medio Ambiente Mundial - FFEM y técnico del Instituto Geográfico Nacional de Francia – IGN Internacional- y la ONF Andina sucursal colombiana de ONF International, acuerdan realizar la adaptación de la metodología CORINE (Coordination of Information on the Environment) Land Cover -CLCC- para Colombia y aplicarla a la Cuenca Magdalena-Cauca (2000-2002),

¹ Entidad generada y encargada de: “obtener, analizar, estudiar, procesar y divulgar la información básica sobre hidrología, hidrogeología, meteorología, geografía básica sobre aspectos biofísicos, geomorfología, suelos y cobertura vegetal para el manejo y aprovechamiento de los recursos biofísicos de la Nación”, según el artículo 17 de la ley 99 de 1993, artículo 2 numeral 4 del decreto 1277 de 1994 y artículo 1.2.1.1.1 numeral 4 del decreto 1076 de 2015.

considerando que es una metodología probada en países de la Unión Europea y Centroamérica, la cual por sus características, permite asociar y comparar la información a nivel internacional y facilita los análisis multi-temporales de las coberturas del territorio, logrando a su vez convertirse en un estándar para el país al ser adoptado por las entidades del Sistema Nacional Ambiental - SINA² que generan información ambiental para múltiples propósitos³(IDEAM et al, 2008; IDEAM, 2010; FAO,2010; Corredor et al, 2011; Rodríguez & Peña, 2013), con la que se han realizado los mapas de coberturas que se relacionan en la tabla 4.

Tabla 4

Inventario de clasificación de coberturas de la tierra que se han elaborado en Colombia con la Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia

Entidad	Año	Características
IDEAM, IGAC, SINCHI, IAvH, INVEMAR, PNN	2004	Estudio de Cobertura de la cuenca Magdalena - Cauca. línea base (2000-2002), se obtiene mediante la adopción, adaptación y unificación para Colombia de la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia (CLCC) escala 1:100.000.
IDEAM, IGAC, SINCHI, IAvH, IIAP, INVEMAR	2007	Mapa de Ecosistemas Continentales, Costeros y Marinos de Colombia. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra, Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia (CLCC) escala 1:100.000. Año base 2001.
IGAC	2008	Coberturas de la Región Pacífica Colombiana periodo 2007-2008, correspondiente a los departamentos de: Nariño, Cauca, Chocó y Valle del Cauca, a escala 1:100.000. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia (CLCC).
IDEAM, IGAC, SINCHI, IAvH y PNN	2008	Coberturas para los sectores: sur-oriental de la Amazonía, oriental de la Orinoquia y noroccidental de la Amazonía, metodología CORINE Land

² El SINA está conformado por: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible-Minambiente-, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales- IDEAM-, Instituto de investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt; Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas- SINCHI; Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico- IIAP, Centro de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR, las 34 Corporaciones Autónomas Regionales y Desarrollo Sostenible, seis Autoridades Ambientales Urbanas y el Sistema de Parques Nacionales Naturales.(art 4 y art 16 ley 99 de 1993).

³ <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-nacionales>, consultado 16/09/2020

		Cover adaptada para Colombia (CLCC) escala 1:100.000.
IDEAM, IGAC y PNN	2012	Coberturas de la tierra del país, año base 2005-2009, Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia (CLCC) escala 1:100.000.
IDEAM Minambiente	2015	Coberturas de la tierra del país, año base 2010-2012, Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia (CLCC) escala 1:100.000.

Nota. Fuente⁴: FAO (2010) Lamprea (2017).

Es necesario precisar que el nacimiento del programa CORINE (Coordination of Information on the Environment) se produce el 27 de junio de 1985 cuando el Consejo de la Comunidad Europea, a propuesta de la Comisión, adopta la decisión (CEI 338785) para la ejecución de "un proyecto experimental para la recogida de datos, la coordinación y homogeneización de la información sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales de la Comunidad" (Moreno et. al, 2001; Pérez C, 2013; Alva & León, 2014).

Dentro del programa CORINE se incluye el Proyecto Land Cover con el fin de suministrar información georreferenciada periódica y homogénea sobre la ocupación del suelo en los países miembros de la Comunidad. Este proyecto se considera básicamente como de ocupación del suelo. (Moreno et al, 2001; Pérez C, 2013).

El objetivo principal de la aplicación del proyecto Land Cover no es simplemente la obtención de un mapa de ocupación del suelo para un momento dado, sino el establecimiento de un inventario permanente de datos, numéricos y cartográficos, sobre usos y características del territorio, con posibilidad de integración en bases de datos geográficos y cartográficos nacionales y de la Unión Europea (MOPU, 1990; Moreno et al, 2001).

Es por ello que, en Colombia el proceso de adoptar la metodología CORINE Land Cover surge como respuesta a la necesidad que tenía el país de unificar y armonizar las diferentes metodologías y leyendas de cobertura terrestre empleadas hasta el momento, todo con el fin último de establecer un sistema de

⁴ <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-nacionales>, consultado 04/11/2020

monitoreo que le permita generar información actualizada, confiable y trazable; dado que la amplia variabilidad de sistemas de clasificación no lo permitían (Lamprea, 2017).

A partir del momento en que se adoptó la metodología CORINE Land Cover en Colombia, la capa de coberturas terrestres del territorio colombiano es un producto que se realiza de manera interinstitucional, este proceso es liderado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM⁵- (IDEAM et al, 2008; Wilches & Ch, 2005; Rodríguez & Peña, 2013) y participan entidades adscritas al Sistema Nacional Ambiental- SINA, así como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, quienes conforman el Comité Nacional de Coberturas de la Tierra, que es el ente rector de la temática a nivel nacional y el encargado de establecer las directrices y lineamientos para el estudio y monitoreo a nivel regional y local, garantizando la compatibilidad y escalamiento de la información⁶ (IDEAM et al, 2008; IDEAM, 2010; Rodríguez & Peña, 2013).

Dada la importancia que representa el contar con información de coberturas para los procesos de ordenamiento y monitoreo ambiental del territorio, en el año 2008 se formalizó un convenio de cooperación entre los institutos IDEAM, IGAC, SINCHI, Instituto de Investigación Alexander Von Humboldt -IAvH- y Parques Nacionales Naturales -PNN-, que permitió generar la información para el sector sur-oriental de la Amazonia, y para el sector oriental de la Orinoquia. A su vez el Instituto SINCHI produjo la información del sector noroccidental de la Amazonia⁷. (IDEAM et al ,2008; IDEAM, 2010; Rodríguez & Peña, 2013).

El proceso para realizar la capa de coberturas de la tierra por la metodología CLCC, independientemente de la escala, se muestra en la Ilustración 1, la diferencia está en la unidad mínima cartografiada y el nivel de desagregación en la leyenda. Como ejemplo, en la escala 1:100.000, la unidad mínima debe medir 25 hectáreas y en el caso de objetos lineales como ríos, este debe tener un ancho mínimo de 50 metros. Esas reglas se acogieron del Sistema CORINE Land Cover de Europa y fueron divulgadas por los asesores de ONF de Francia. (IDEAM, 2010; Corredor et al, 2011; Novoa & Aguilar, 2012).

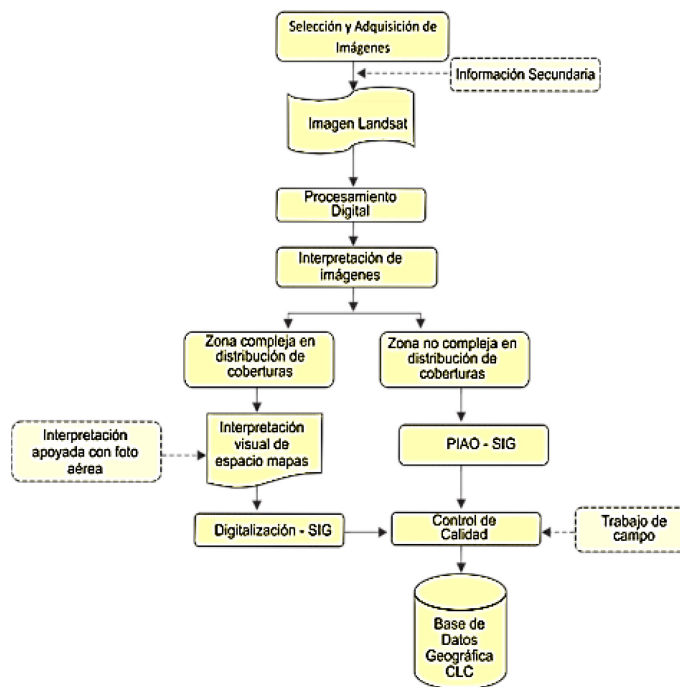
⁵ Según el artículo 17 de la ley 99 de 1993, artículo 2 numeral 4 del decreto 1277 de 1994 y artículo 1.2.1.1.1 numeral 4 del decreto 1076 de 2015.

⁶ <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-nacionales>, consultado 16/09/2020

⁷ <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-nacionales>, consultado 16/09/2020

Ilustración 1

Metodología para la interpretación de coberturas con la metodología CLCC



Nota. CORINE Land Cover adaptada para Colombia “CLCC”. Fuente: Melo & Camacho (2005).

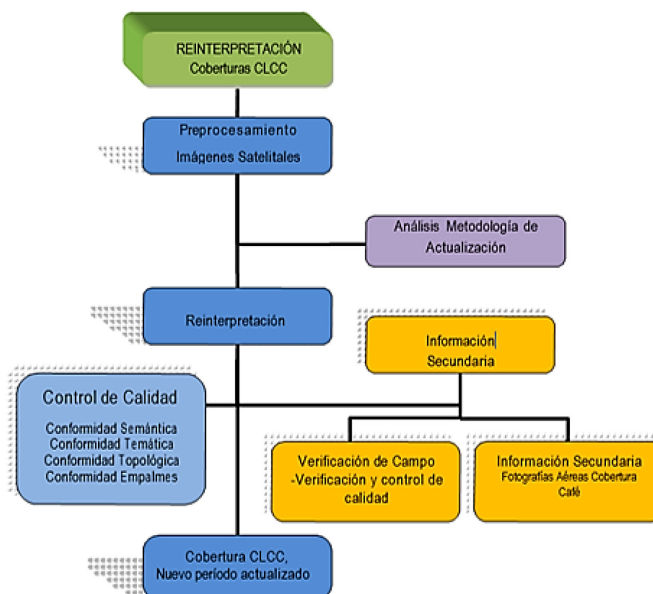
Desde que se implementó la metodología CORINE Land Cover para realizar las capas de coberturas de la tierra en el territorio Colombiano a escala 1:100.000, el proceso se ha llevado a cabo para tres períodos, cuyos principales resultados de este esfuerzo interinstitucional son la elaboración de los mapas de Cobertura de la Tierra para los períodos: 2000 – 2002, 2005 – 2009 y 2010 2012⁸ (IDEAM, 2010; Corredor et al, 2011; Rodríguez & Peña, 2013), lo que muestra que no existe una programación o plan para mantener la capa de coberturas de la tierra actualizada.

En la actualidad, el IDEAM está llevando a cabo una actualización de las coberturas al año 2018, escala 1:100.000, bajo el modelo de REINTERPRETACIÓN, de las coberturas 2010-2012, llevando la metodología que muestra en la ilustración 2.

⁸ <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-nacionales>, consultado 16/09/2020

Ilustración 2

Esquema metodológico para la reinterpretación de coberturas de la tierra



Nota. Se utiliza la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia “CLCC”. Fuente: Martín & Aguilar (2012).

En el proceso para obtener las coberturas de la tierra con la metodología CORINE Land Cover se han utilizado solamente imágenes de sensores pasivos u ópticos de los programas Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM, en ocasiones utilizaron imágenes de los programas SPOT, CBERS y ASTER, apoyados con Fotografías Aéreas⁹ (IDEAM ,2010 ; Corredor et al, 2011; Novoa & Aguilar, 2012; Rodríguez & Peña, 2013). En la actualización o reinterpretación para el año 2018 se están utilizando imágenes del programa Landsat 8 OLI.

Como se ha mencionado anteriormente, esta información es importante para los procesos de ordenamiento y en consecuencia para los procesos que conllevan a los Planes de Ordenamiento Territorial - POT, que en Colombia se concibe como: “Un instrumento del estado para el logro de la eficiencia, la consolidación de la democracia y la descentralización, respetando las autonomías locales y

⁹ <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-nacionales>, consultado 16/09/2020

velando por la unidad nacional, cuyas metas deben lograrse mediante la distribución armónica de la población, el desarrollo social, económico y político, con el uso de los recursos naturales y la protección del ser humano y el medio ambiente” (Andrade, 1994; Hernández, 2010).

Es así como “El ordenamiento del territorio municipal y distrital comprende un conjunto de acciones político-administrativas y de planificación física concertadas, emprendidas por los municipios o distritos y áreas metropolitanas, en ejercicio de la función pública que les compete, dentro de los límites fijados por la constitución y las leyes, en orden a disponer de instrumentos eficientes para orientar el desarrollo del territorio bajo su jurisdicción y regular la utilización, transformación y ocupación del espacio, de acuerdo con las estrategias de desarrollo socioeconómico y en armonía con el medio ambiente y las tradiciones históricas y culturales”¹⁰, y su objeto es “complementar la planificación económica y social con la dimensión territorial, identificar las necesidades de espacio público, priorizando los requerimientos de los niños, niñas, adolescentes, mujeres, adultos mayores y personas en condición de discapacidad, racionalizar las intervenciones sobre el territorio y orientar su desarrollo y aprovechamiento sostenible, mediante:

1. La definición de las estrategias territoriales de uso, ocupación y manejo del suelo, en función de los objetivos económicos, sociales, urbanísticos y ambientales.
2. El diseño y adopción de los instrumentos y procedimientos de gestión y actuación que permitan ejecutar actuaciones urbanas integrales y articular las actuaciones sectoriales que afectan la estructura del territorio municipal o distrital...”¹¹

Ahora, el sistema natural es el soporte para el ordenamiento territorial, si se considera que establece los parámetros de lo existente en términos de oferta y demanda de bienes y servicios ecosistémicos para la población (Minambiente, 2016). Es por ello que paralelo a los POT, se debe hacer el Ordenamiento Ambiental Territorial -OAT- definido como¹² “la función atribuida al Estado de regular y orientar el proceso de diseño y planificación de uso del territorio y de los recursos naturales renovables de la Nación, a fin de garantizar su adecuada explotación y su desarrollo sostenible¹³” (Minambiente, 2016).

¹⁰ Artículo 5 de la ley 388 de 1997

¹¹ Artículo 6 de la ley 388 de 1997, modificado por el artículo 2 de la ley 2037 de 2020

¹² Artículo 7 de la ley 99 de 1993

¹³ Artículo 3 de la ley 99 de 1993. Del concepto de Desarrollo Sostenible. Se entiende por desarrollo sostenible el que conduzca al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de vida y el bienestar social, sin agotar la base de los recursos naturales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades”

El enlace entre el POT y el OAT, en el tema ambiental, lo debe hacer las Corporaciones Autónomas Regionales y las Corporaciones para el Desarrollo Sostenible - CAR¹⁴- las que tienen un rol importante en la incorporación de los temas ambientales en los ejercicios de ordenamiento territorial de los municipios y distritos, principalmente, en los modelos de ocupación territorial por ellos propuestos, a través de las Determinantes Ambientales-DA-¹⁵ “que constituyen normas de superior jerarquía en sus propios ámbitos de competencia” (Minambiente, 2016).

Es importante aclarar que las Determinantes Ambientales no se limitan exclusivamente a definir áreas de conservación ambiental; su concepto es más amplio en la medida en que sirven de base para construir el modelo de ocupación territorial; Estas pueden generar diferentes grados de restricción al uso del suelo, desarrollo de actividades y aprovechamiento de los recursos naturales, bien sea como proveedores de servicios ecosistémicos o como receptores de emisiones y vertimientos. En consecuencia, las Determinantes Ambientales tienen doble función: ser elementos articuladores del territorio y ser orientadoras de los modelos de ocupación territorial de los municipios y distritos propendiendo por la sostenibilidad ambiental y por la reducción de conflictos socio-ambientales y territoriales asociados al uso y manejo de los recursos naturales (Minambiente, 2016).

Por el contexto anterior se evidencia que la capa de coberturas de la tierra es un insumo relevante para el ordenamiento territorial, el ordenamiento ambiental territorial, estudios para zonificación ambiental, estudios para licenciamiento ambiental, elaboración del mapa de ecosistemas, estudios hidrológicos, estudios agrícolas, determinación de frontera agrícola, estudios de riesgos de desastres, análisis de deforestación, monitoreo de quemas, entre otros; es así como instituciones estatales como las que conforman el Sistema Nacional Ambiental -SINA-, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales -ANLA-, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, El Ministerio de Agricultura, La Agencia Nacional de Tierras -ANT-, La Agencia de Desarrollo Rural -ADR-, La Unidad de Planificación Rural Agropecuaria -UPRA-, La

¹⁴ Artículo 23 de la ley 99 de 1993, numerales 2 y 5 “son la máxima autoridad ambiental y administradoras de los recursos naturales renovables de sus jurisdicciones y las encargadas de velar por la dimensión ambiental en las decisiones de planificación y de ordenamiento territorial” y de acuerdo con la misma ley, el objeto de las CAR es “ la ejecución de políticas, planes, programas y proyectos sobre medio ambiente y recursos naturales renovables en lo relacionado con su administración, manejo y aprovechamiento. Así, las corporaciones son las encargadas de administrar, dentro del área de su jurisdicción, el medio ambiente y los recursos naturales renovables y propender por su desarrollo sostenible, de conformidad con las disposiciones legales y las políticas del Ministerio del Medio Ambiente.

¹⁵ Se entiende por determinantes ambientales los términos y condiciones fijados por las autoridades ambientales (Minambiente, CAR, Parques Nacionales Naturales, Departamentos, Municipios, Distritos), para garantizar la sostenibilidad ambiental de los procesos de ordenamiento territorial.

Agencia Nacional Minera -ANM-, La Agencia Nacional de Hidrocarburos -ANH-, El servicio Geológico Colombiano, El Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE-, La Unidad Nacional para la Gestión de Riesgo de Desastres, entre otras son los principales usuarios de esta información.

Se hace necesario aclarar que la capa de coberturas de la tierra las genera el IDEAM con la metodología CLCC a escala 1:100.000 es útil para estudios de índole nacional y/o regional, no obstante por la importancia de esta como insumo para diferentes estudios del ámbito municipal y local, la escala 1:100.000 no tiene el suficiente nivel de detalle que permita hacer estudios como: licenciamiento ambiental, ordenamiento del territorio, zonificación ambiental, estructura ecológica principal, formación o actualización catastral, entre otros; Es por ello que diferentes entidades como la Agencia Nacional de Hidrocarburos - ANH, a través de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales- ANLA-, el SINCHI y algunas Corporaciones Autónomas Regionales, han venido adelantando de manera independiente la actualización de la capa de coberturas de la tierra a escala 1:25.000 en zonas prioritarias con la metodología CLCC. Algunos ejemplos se mencionan en la tabla 5.

Tabla 5

Ejemplos de clasificación de coberturas de la tierra en Colombia con metodología CLCC que han hecho entidades diferentes a IDEAM

Entidad	Zona	Año	Imágenes Utilizadas	Escala
ANH - ANLA	Departamento de Casanare	2015	Séntinel 2 y Landsat 8 OLI	1:25.000
ANH - ANLA	Sur departamento de Meta	2015	Séntinel 2 y Landsat 8 OLI	1:25.000
EcoUrrá	Tierralta - Córdoba	2015	RapidEye	1:25.000
ANH - ANLA	Límite entre departamentos de Magdalena y La Guajira	2016	Séntinel 2 y Landsat 8 OLI	1:25.000
ANH - ANLA	Departamento de Putumayo	2017	Séntinel 2 y Landsat 8 OLI	1:25.000

3 Objetivos

3.1 General

Realizar el análisis polarimétrico, a las coberturas de la tierra obtenidas con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, en una imagen del sensor RADARSAT 2 totalmente polarizada (Quad Pol) ubicada en la sabana de Bogotá, utilizando el módulo “*SAR Polarimetry Target Analysis (SPTA)*” del programa CATALYST Profesional.

3.2 Específicos

3.2.1 Determinar a cuáles de las coberturas de la tierra obtenidas en la zona de estudio, con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, se les realizará el análisis polarimétrico con el módulo “*SAR Polarimetry Target Analysis (SPTA)*” del programa CATALYST Profesional.

3.2.2 Describir el comportamiento polarimétrico de las coberturas seleccionadas, a través de: el análisis de co-polarización, el método de Cloude & Pottier (entropía, anisotropía, ángulo α) y el método de Freeman Durden, obtenidas con en el módulo “*SAR Polarimetry Target Analysis (SPTA)*” del programa CATALYST Profesional.

3.2.3 Evaluar la exactitud, en términos del coeficiente Kappa, a la clasificación de coberturas de la tierra, obtenida en la imagen RADARSAT 2, utilizando la leyenda CORINE Land Cover adaptada para Colombia.

4 Marco teórico

4.1 Percepción remota con RADAR¹⁶

4.1.1 Principios físicos de RADAR

La Percepción Remota de RADAR está basada en los trabajos de importantes físicos que han abordado el estudio de la energía electromagnética (EM o EMR) desde hace más de cien años y su técnica se fundamenta en el principio teórico de la relación intrínseca entre la energía eléctrica y la magnética, la que fue dada a conocer por el físico escocés James Clerck Maxwell (1831–1879), en donde en el espacio, la energía electromagnética se propaga como una onda y es detectable a través de su interacción con el medio ambiente (Fernández et al, 2015; Pierce, 2006), haciendo que las propiedades de emisión/recepción de estas ondas pueden caracterizar distintos materiales reflejantes y son la clave para identificar a los objetos (Fernández et al, 2015).

Es así que se puede determinar que el elemento fundamental de la Percepción Remota con radar es un rayo o señal de energía electromagnética la cual tiene dos componentes: la eléctrica y la magnética. De acuerdo con sus características de diseño y operación, los radares captan mediciones de la señal de distintas maneras, esto ofrece al usuario ciertas opciones de selección de imágenes de diferentes sensores, pudiendo ser elegirlas de acuerdo con las aplicaciones pretendidas (Fernández et al, 2015).

El RADAR es un sistema de sensoramiento remoto activo, transportado en plataformas aéreas o satelitales, emite su propia energía en el intervalo de frecuencias de microondas y recibe los ecos de la señal reflejada por los objetos observados, opera independiente de las condiciones atmosféricas, ofrece mayor información sobre la textura del terreno y cuenta con la posibilidad de obtener información sobre los sustratos inferiores de las coberturas boscosas. (Posada et al, 2010; Vásquez, 2019; Richards, 2009; Leblon et al, 1999; Chuvieco, 1990).

El desarrollo de los sistemas de radar ha sido impulsado por la misma necesidad de obtener datos espaciales en zonas de difícil acceso y de alta nubosidad, para este fin se han desarrollado investigaciones

¹⁶ Radio Detection And Ranging; Range = distancia (Fernández et al, 2015)

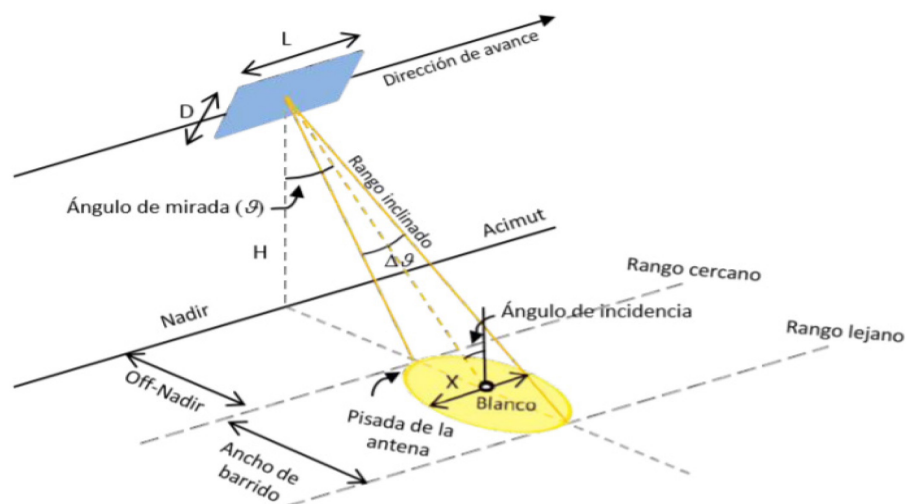
enfocadas no solo a mejorar las características de estas imágenes y sus parámetros de captura, sino también, a optimizar las formas y procesos de extracción de información temática (Posada et al, 2010).

4.1.2 RADAR de Apertura Sintética SAR¹⁷

Un RADAR de Apertura Sintética es un sensor de iluminación lateral, adaptado a una plataforma o vehículo móvil (ej. Aerotransportado o satelital), que recorre una trayectoria rectilínea a una altura predeterminada de la superficie terrestre, con una velocidad v , cuyo haz de antena se orienta perpendicularmente a esta trayectoria e ilumina en cierto ángulo de inclinación la superficie terrestre al emitir ondas electromagnéticas en el rango o longitud de onda de las microondas, como se indica en la ilustración 3 (Vásquez, 2019; Zozaya, 2015).

Ilustración 3

Geometría de visualización de un sensor SAR



Nota. Fuente: Roa (2020).

En el recorrido va almacenando la respuesta de los ecos recibidos, desde una posición distinta a intervalos regulares cada vez, los que están en función de: su amplitud, fase, polarización y tiempo de retorno (Vásquez, 2019; Zozaya, 2015; Moreira et al, 2013; Torres, 2011). La suma coherente de los ecos permite

¹⁷ Synthetic Aperture RADAR: Sigla en Inglés SAR

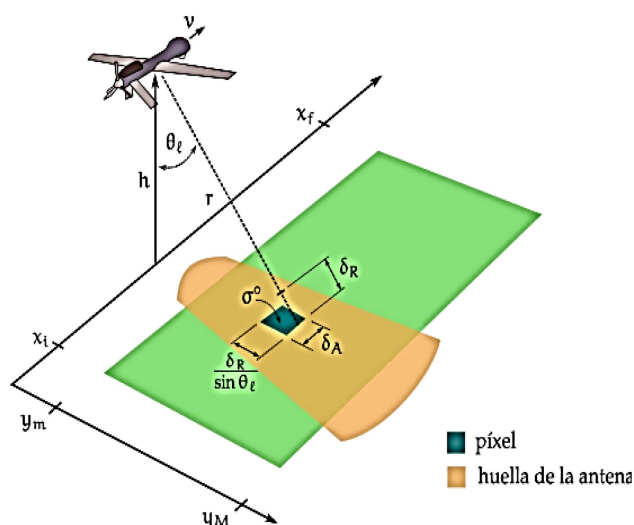
la “síntesis” de una apertura virtual de longitud mayor a la real; de allí el nombre de “Apertura Sintética” (Zozaya, 2015).

Los ecos recibidos son almacenados y posteriormente procesados para construir una imagen de los objetos que se encuentran sobre la superficie terrestre, a través de reflectancias de estos, en un plano de dos dimensiones (x, y) (Zozaya, 2015; Moreira et al, 2013, Tomiyasu, 1978).

A partir de la transmisión de la señal emitida y de la señal captada, es posible obtener mediciones sobre la dirección, distancia y velocidad del objetivo mediante la ecuación de radar (1) (Fernández et al, 2015, ESA, 2013; Zozaya, 2015; Vásquez, 2019), cuyos parámetros se presentan en la ilustración 4; Esta ecuación fundamental se usó en las calibraciones experimentales de los primeros sensores polarimétricos (Fernández et al, 2015; Hawkins et al, 2000). En esencia, los algoritmos de análisis se basan en esta ecuación, que permite calcular la potencia de la señal recibida, relacionándola con las características del radar, el objetivo y la señal recibida. (Fernández et al, 2015; El-Darymli et al, 2012).

Ilustración 4

Principales parámetros geométricos de la ecuación de radar para el caso de SAR



Nota. Fuente: Zozaya (2015).

$$P_{R_x} = \frac{P_{T_x} G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} \left(\sigma^o \frac{\delta_R \delta_A}{\sin \theta_l} \right) \frac{G_{RC} G_{AC}}{L} \quad (1)$$

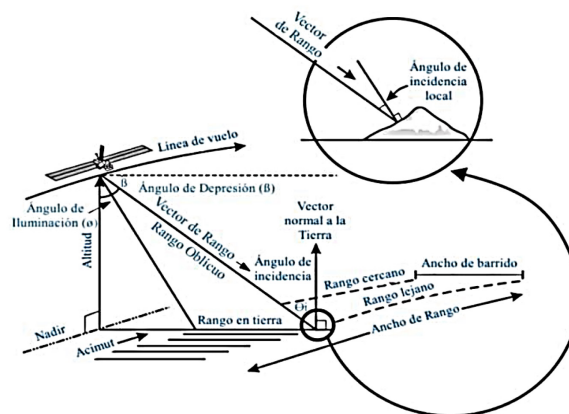
donde P_{R_x} es la potencia recibida, P_{T_x} es la potencia transmitida, $G = G(\theta, \varphi)$ es la ganancia directiva de la antena, λ es la longitud de onda de espacio libre asociada a la frecuencia central de operación del radar, L modela las pérdidas en general en la antena y cables, r es la distancia del blanco, σ^o es el coeficiente de retrodispersión promedio del píxel, $\delta_R / \sin \theta_l$ y δ_A son las resoluciones en distancia y en azimut, respectivamente, θ_l es el ángulo de observación del píxel, y G_{RC} y G_{AC} son las ganancias de los procesos de filtrado adaptado (compresión) en distancia y en azimut, respectivamente (Zozaya, 2015).

4.1.2.1 Factores determinantes en la captura de datos de SAR. Los factores que contribuyen a determinar las propiedades de la señal captada, y que por lo tanto afectan a los datos contenidos en una imagen de RADAR de Apertura Sintética - SAR, pueden ser inherentes al sensor o a las propiedades de los objetos sobre la superficie terrestre (Fernández et al, 2015).

Los principales factores inherentes al sensor SAR se muestran en la ilustración 5 y se describen a continuación:

Ilustración 5

Factores geométricos inherentes en la captura de una imagen de SAR



Nota. Fuente: Kerle et al (2004); modificado por Monella (2014); Tomado de Vásquez (2019).

- Alitud: distancia perpendicular entre el sensor y la superficie del terreno. (Kerle et al, 2004; Vásquez 2019).

- Nadir: intersección entre la superficie terrestre y la normal a ella que pasa por el satélite. (Zéner, 2013; Vásquez 2013).
- Ancho de barrido: es la porción de la superficie terrestre iluminada por el SAR con la cual se genera la imagen, es la distancia entre los rangos cercano y lejano (Vásquez, 2019).
- Rango cercano: sector de la imagen más cercano a la línea de vuelo del satélite o al nadir (Vásquez, 2019).
- Rango lejano: sector de la imagen más lejano a la línea de vuelo del satélite o al nadir (Vásquez, 2019).
- Rango oblicuo: es la distancia entre la antena y el objeto ubicado sobre la superficie de la tierra (Vásquez, 2019)
- Rango en tierra: es la proyección del rango oblicuo en la tierra (Vásquez, 2019).
- Ángulo de iluminación: es el ángulo entre la vertical de la antena con el suelo y el pulso transmitido al objetivo en la tierra. (Kerle et al, 2004; Vásquez, 2019).
- Ángulo de depresión: ángulo entre la línea horizontal de la antena y el pulso transmitido al punto de incidencia (Henderson & Lewis, 1998; Vásquez, 2019).
- Ángulo de incidencia: ángulo entre la línea del pulso del sensor y la vertical local, con referencia al geoide, es uno de los factores con mayor incidencia en el coeficiente de retrodispersión (Vásquez, 2019).
- Longitud de Onda λ : denota la distancia entre dos cimas o dos valles en una onda (Pierce, 2006).
- Polarización de las Ondas: resalta las relaciones entre señal emitida, objetivo y señal recibida por el SAR (Fernández et al, 2015).
- Resolución espacial: se refiere a dos dimensiones, una en la dirección del alcance o rango en tierra y la otra en la del azimut. La resolución en la dirección del alcance o rango de tierra se determina por las características de la señal a lo largo de la trayectoria entre el sensor y la superficie iluminada. (Fernández et al, 2015).
- Resolución radiométrica: se refiere a la habilidad de un sistema de diferenciar dos rasgos de la imagen correspondientes a dos pequeños objetos cercanos que se encuentran en la escena iluminada, cuando la brillantez de los dos objetos es comparable y cae dentro del intervalo dinámico del radar que se trate. (Fernández et al, 2015).

El proceso SAR recolecta datos para transformarlos en una imagen, se resume de la siguiente manera:

Una plataforma se desplaza con velocidad v sobre una órbita a una altura h lleva una antena de RADAR de observación lateral que ilumina la superficie de la tierra mediante pulsos con longitud de onda en el rango de las microondas. A diferencia de la visión vertical en donde los ecos recibidos por la antena arribarán al mismo tiempo, en la visión lateral la harán a diferentes tiempos, lo que permite distinguirlos entre sí y determinar la distancia hasta el sensor en la dirección perpendicular al vuelo (rango) (Vásquez, 2019).

Algunos sensores pueden orientar su visión a la derecha o a la izquierda de la dirección de vuelo. Se consideran los retardos entre la recepción de fracciones del pulso de la señal más alejadas de la antena y de las más próximas, y mediante procesos de cálculo se convierten en distancias, de esta manera la distancia para cada localidad dentro del área de barrido se usa para la representación del blanco en una imagen; aquí interviene la geometría de adquisición de datos o geometría de visualización representadas en la ilustración 5 (Fernández et al, 2015).

Como se mencionó anteriormente, la resolución espacial se refiere a dos dimensiones dadas por el alcance o la adquisición en rango de la tierra rango y la otra por el azimut, en consecuencia, se hace necesario hacer una explicación de la manera como se obtienen estos parámetros en SAR.

4.1.2.2 Adquisición en Rango o Alcance en Tierra. El sensor envía pulsos cortos modulados linealmente en frecuencia conocidos como “chirps”, éstos son enviados en dirección aproximadamente perpendicular al vector de desplazamiento de la plataforma con una duración determinada T_p , una frecuencia central f_c , y una tasa de variación de la frecuencia K (Zénere, 2013; Vásquez, 2019).

El rango de un punto sobre la tierra puede ser medido como la distancia del mismo a la trayectoria de vuelo (Rango Oblicuo: Slant Range), o como la proyección de dicha distancia sobre la superficie terrestre (Rango en Tierra: Ground Range). La resolución del rango oblicuo r_{sl} es independiente de la altura de la órbita y está dada por la ecuación (2) (Martinis, 2010; Vásquez, 2019):

$$r_{sl} = \frac{cT_p}{2} \quad (2)$$

En donde C la velocidad de la luz y T_p la duración el pulso transmitido

Por otro lado, la resolución del rango en tierra se obtiene a partir de la proyección de r_{sl} sobre la superficie. Y se obtiene dividiendo el rango oblicuo por el seno del ángulo de incidencia θ_i como se muestra en la ecuación (3) (Raney 1998; Vásquez, 2019):

$$r_{gr} = \frac{r_{sl}}{\sin \theta_i} \quad (3)$$

El ángulo de incidencia aumenta desde el rango cercano hacia el lejano; por lo tanto, al dividir por el seno de dicho ángulo, la resolución en tierra resulta mejor en el rango lejano que en el cercano (Zéner, 2013; Vásquez, 2019).

4.1.2.3 Adquisición en Azimut. En un SAR un blanco es iluminado por una serie de ases desde un momento t_1 hasta un momento en el queda fuera del cubrimiento de la antena t_2 . El estudio de los cambios de fase en la señal a lo largo de todo el tiempo que fue iluminado, permite obtener una resolución tan fina como si el blanco hubiera sido capturado por una antena cuyo tamaño de la apertura real fuera correspondiera a la distancia entre los puntos correspondientes a los tiempos t_1 y t_2 . A dicha distancia, se le conoce como apertura sintética de la antena (Curlander & McDonough, 1991; Vásquez 2019). La dimensión de la apertura sintética L_{As} está dada por la ecuación (4) (Olmsted, 1993; Vásquez, 2019):

$$L_{As} = \frac{\lambda R_0}{L_a} \quad (4)$$

Donde λ es la longitud de onda, R_0 el rango cercano y L_a el tamaño de la antena en la dirección del azimut.

La resolución óptima en azimut es la mitad de la longitud de la antena en tal dirección como se define en la ecuación (5) (Lillesand et al, 2015; Vásquez, 2019):

$$\rho_a = \frac{L_a}{2} \quad (5)$$

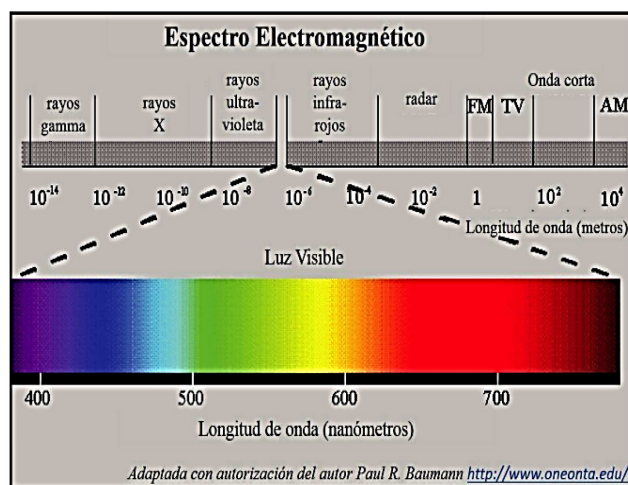
Como se puede observar, la resolución de SAR es independiente a la altura del sensor y longitud de onda, solo depende de la dimensión de la antena (Lillesand et al, 2015; Vásquez, 2019). De la misma manera, la

resolución en azimut de un SAR es constante a lo ancho de todo el barrido y las antenas más cortas producen mejores resoluciones en azimut (Lusch, 1999; Vásquez, 2019).

4.1.2.4 Espectro Electromagnético y Longitud de Onda en SAR. El espectro electromagnético es una representación de la energía en función de la frecuencia (o número de ondas generadas en determinado tiempo) y de las longitudes de onda y se ha clasificado o dividido en diferentes porciones o regiones que se encuentra entre un valor de longitud de onda λ mínimo y uno máximo, como se observa en la ilustración 6, no obstante, no es posible determinar la frontera precisa entre estas (Fernández et al, 2015).

Ilustración 6

Espectro electromagnético



Nota. Fuente: IEEE-521-2020, IEEE Standard Letter Designation for RADAR-Frequency Bands. (<https://ieeexplore.ieee.org/document/8999849>).

En el caso particular de SAR, que funciona en la longitud de onda de las microondas que va de 0.75 cms hasta 120 cms, se ha realizado una clasificación y nomenclatura de bandas de acuerdo al rango de longitud de onda en el que opera, como se muestra en la tabla 6 (Chuvieco, 1990; Chuvieco, 1998; Fernández et al, 2015; Vásquez, 2019).

Tabla 6

Bandas de SAR, frecuencia y longitud de onda λ

Banda	Ka	Ku	X	C	S	L	P
Frecuencia (GHz)	40 - 25	17,6 - 12	12 - 7,5	7,5 - 3.75	3,75 - 2	2 - 1	0,5 - 0,25
Longitud de onda λ (cms)	0,75 - 12	1,7 - 2,5	2,5 - 4	4 - 8	8 - 15	15 - 30	60 - 120

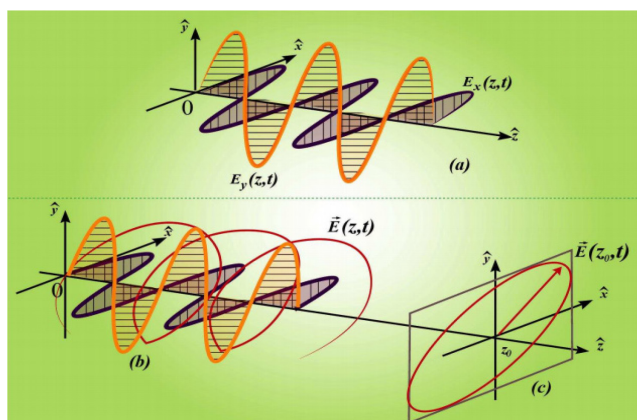
Nota. Fuente: Fernández et al (2015).

4.1.2.5 Polarización de las Ondas Electromagnéticas en SAR. La polarización es una característica de la propagación de la onda electromagnética y se refiere a la alineación y la regularidad de los componentes eléctrico y magnético de la onda en el plano perpendicular de la dirección de la propagación en función del tiempo (Ulaby & Elachi, 1990; Posada et al, 2010; Vásquez ,2019), resaltando las relaciones entre: la señal emitida, objeto sobre la superficie terrestre y la señal recibida por el sensor.

La polarización de una onda electromagnética se define como la orientación del vector E correspondiente al campo eléctrico, cuyos componentes se presentan en la ilustración 7.

Ilustración 7

Orientación del vector E y sus componentes



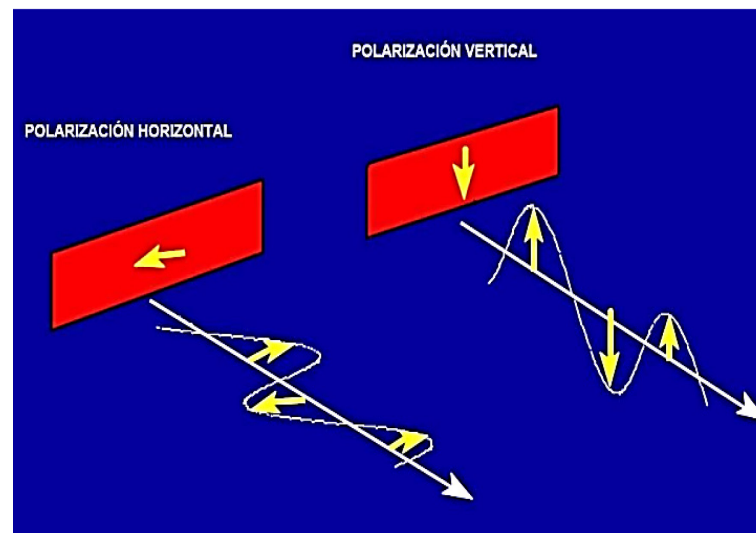
Nota. Fuente: Fernández et al (2015).

La suma de $E_x(Z,t)+E_y(Z,t)$, que se muestra en la ilustración 7(a), determina el sentido de la polarización; Al desplazarse la onda alrededor del eje \hat{z} , la punta del vector $E(Z,t)$ va generando en el tiempo una forma helicoidal, como lo muestra la línea roja en la ilustración 7(b). Ahora, representar y analizar curvas helicoidales tridimensionales es un proceso complejo, por esta razón se hace más sencillo y útil caracterizar una onda helicoidal en una posición fija en el tiempo y proyectarla en un plano con coordenadas $Z=Z_0$, lo que permite hacer el estudio del comportamiento temporal del desplazamiento de la onda en el plano ortogonal a la dirección de propagación y en la posición fija $\hat{z}=Z_0$; Sobre ese plano, el extremo del vector $E(Z_0,t)$ traza la elipse de polarización que se muestra en la ilustración 7(c), cuyos componentes son: La longitud del vector $E(Z_0,t)$ representa la amplitud de la onda, la tasa de rotación representa la frecuencia de la onda y la polarización hace referencia a la orientación y patrón elíptico (Fernández et al, 2015; Posada et al, 2010; Ríos, 2014; Andrade, 2012; Sánchez, 1999).

La onda puede ser polarizada en diferentes ángulos, no obstante, solo se utilizan las orientaciones vertical y horizontal (Lusch, 1999), como se muestra en la ilustración 8, obteniendo así cuatro posibles combinaciones de polarización lineal para la onda de energía transmitida y la recibida por la antena de los sensores SAR.

Ilustración 8

Tipos de polarización lineal



Nota. Fuente: CCRS (2001).

Teniendo en cuenta el diseño de la antena del SAR, pueden emitir y recibir ondas con diferente polarización así:

- HH emisión horizontal, recepción horizontal
- VV emisión vertical, recepción vertical
- HV emisión horizontal, recepción vertical
- VH emisión vertical, recepción horizontal

Los sensores SAR se operan en uno, dos o cuatro polarizaciones (canal), cada tipo de polarización representa un canal en la imagen, como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7

Características de operación de sensores SAR

Clase	Capacidad de transmisión y recepción de la polarización	Cantidad de canales
De polarización única	HH, VV (también HV o VH)	Uno
De polarización dual	HH y VV, VV y VH o HH y VH	Dos
De polarización alternada	HH y HV, alternando con VV y VH	Dos
Polarimétrico o quad-pol	HH, VV, HV y VH	Cuatro

Nota. Fuente: GlobeSAR (2010).

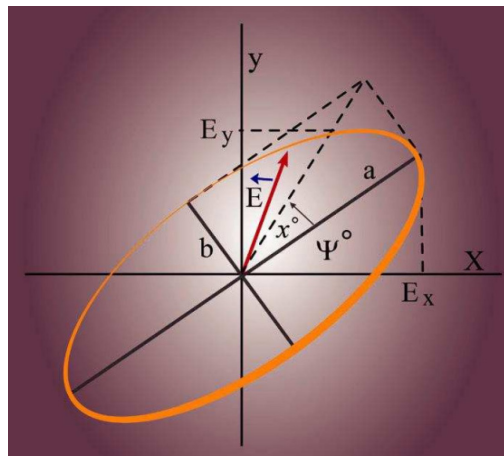
4.2 Estados de la polarización

4.2.1 Vector de Jones

Para una onda polarimétrica el vector \vec{E} describe el campo eléctrico, mostrado en color rojo en la ilustración 9. La polarización de la onda en una dirección particular dependerá de las amplitudes relativas de los componentes del vector en el plano X-Y en cada ciclo y de la fase relativa. La designación de los ejes X, Y es una convención descriptiva que repercute en la orientación resultante de la elipse (Fernández et al, 2015; Ríos, 2014; Andrade, 2012; Sánchez, 1999).

Ilustración 9

Elipse de polarización, mostrando la orientación de ángulo ψ y elipticidad χ° , las que están en función del semi-eje mayor a y del semi-eje menor b



Nota. Fuente: Fernández et al (2015).

|

La forma de la elipse depende de tres parámetros:

- El ángulo de orientación ψ entre el semieje mayor a y el eje horizontal x (variando entre -90° y $+90^\circ$).
- La elipticidad χ° o grado de ovalación de la elipse, con $\tan \chi^\circ = \pm b/a$, (variando entre -45° y $+45^\circ$), donde b es el semieje menor, a es el semieje mayor y de acuerdo con el signo se obtiene el sentido de la rotación de la elipse: $\chi^\circ < 0$ indica rotación derecha, $\chi^\circ > 0$ indica rotación izquierda.

- La amplitud de la onda A que indica la fuerza de la señal de SAR, que está dada por la ecuación 6.

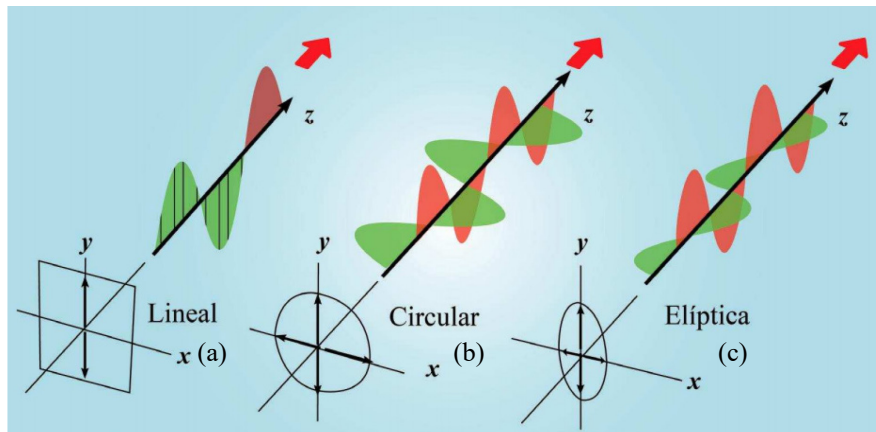
$$A = \sqrt{(E_x)^2 + (E_y)^2} \quad (6)$$

en donde, E_x es la proyección ortogonal de la tangente de la elipticidad de la elipse en el eje X y E_y es la proyección ortogonal de la tangente de la elipticidad de la elipse en el eje Y.

De acuerdo con los valores de los parámetros, la elipse de polarización puede transformarse en un círculo o aplanarse en una línea en razón de las características de fase de los componentes x, y del vector del campo eléctrico y la magnitud de la onda, como se observa en la ilustración 10 (Fernández et al, 2015; Ríos, 2014; Andrade, 2012; Sánchez, 1999).

Ilustración 10

Polarizaciones de una onda electromagnética plana



Nota. Fuente: Fernández et al (2015).

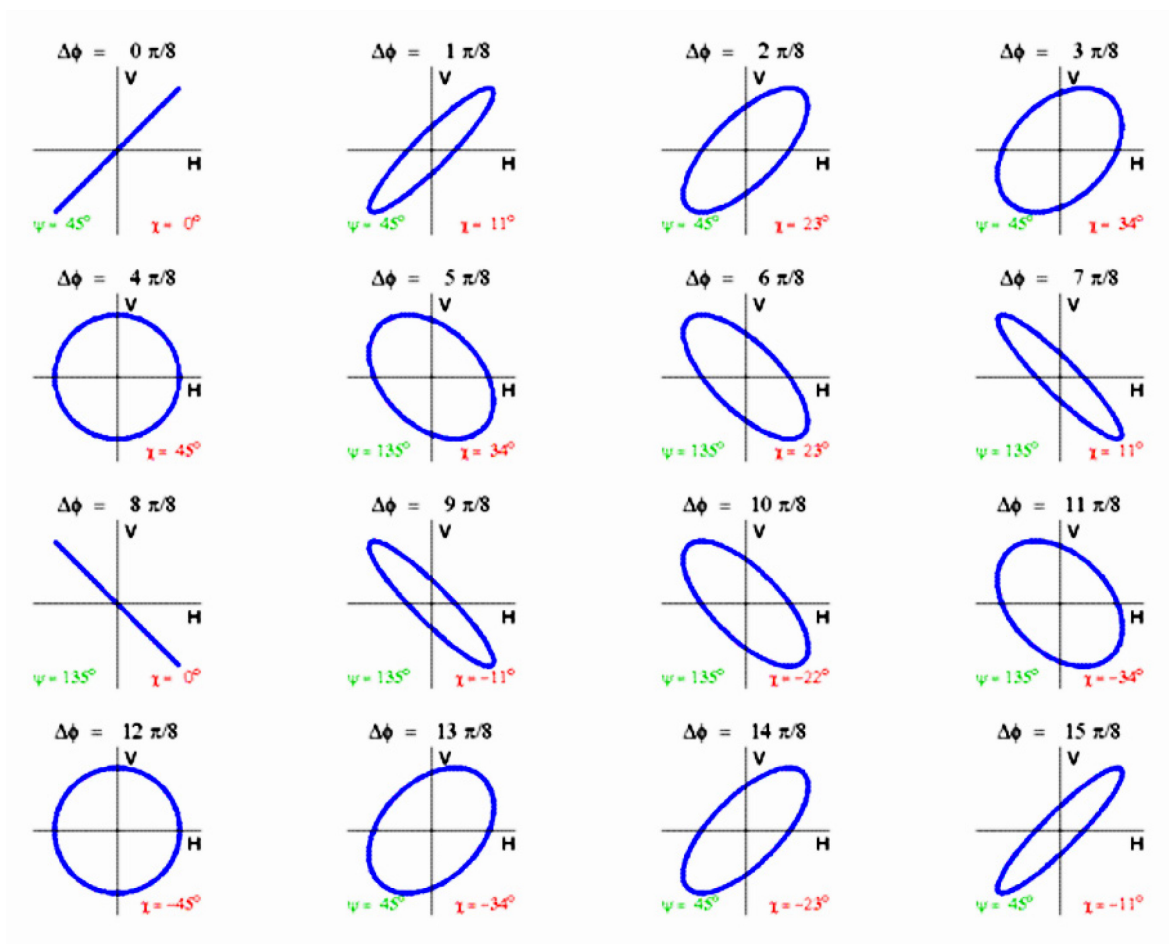
En el caso de la ilustración 10(a) los componentes están en fase, la amplitud es igual y la polarización es lineal a lo largo del eje z que es el de propagación de la onda; en la ilustración 10(b) los componentes están desfasados exactamente 90° , la amplitud de la onda es igual y el vector traza un círculo lo que hace que la polarización sea circular; finalmente la ilustración 10(c), que es el caso más frecuente, ocurre cuando los dos componentes x, y del vector \vec{E} están desfasados de manera arbitraria o desfasados 90° , los

que pueden ser en uno u otro sentido de rotación del vector, pero con diferentes amplitudes generando la polarización elíptica (Fernández et al, 2015; Ríos, 2014; Andrade, 2012; Sánchez, 1999).

En la ilustración 11 se dispone de manera específica, como la forma de la elipse se rige por las magnitudes y la fase relativa entre componentes horizontales y verticales del vector de campo eléctrico.

Ilustración 11

Formas de la elipse de polarización



Nota. La forma de la elipse de polarización cambia de acuerdo con la fase relativa entre los componentes horizontal y vertical del vector de campo eléctrico, se muestra en variación de 0 a $15\pi/8$ radianes en pasos de $\pi/8$. Fuente: Canada Center for Remote Sensing (2015).

Cuando los componentes están en fase, la polarización es lineal (elipticidad = 0), con una orientación de 45° . A medida que el ángulo de fase relativo aumenta a $\pi/2$ radianes, la orientación permanece en 45° ,

pero la elipticidad aumenta a 45° , lo que representa una polarización circular; La secuencia se muestra en la primera línea y la primera figura de la línea 2 en la ilustración 11 (Canada Center for Remote Sensing, 2015).

Luego, a medida que la fase relativa aumenta de $\pi/2$ a $3\pi/2$ radianes, la orientación cambia a 135° , y la elipticidad va de 45° a cero y luego de cero a -45° ; Esta secuencia se muestra en filas 2 y 3 más la primera figura en la cuarta fila de la ilustración 11 (Canada Center for Remote Sensing, 2015). Finalmente, en la fila 4 de la ilustración 11, la fase relativa va de $3\pi/2$ a $15\pi/8$, la orientación cambia a $+45^\circ$ y la elipticidad tiende a cero de nuevo (Canada Center for Remote Sensing, 2015).

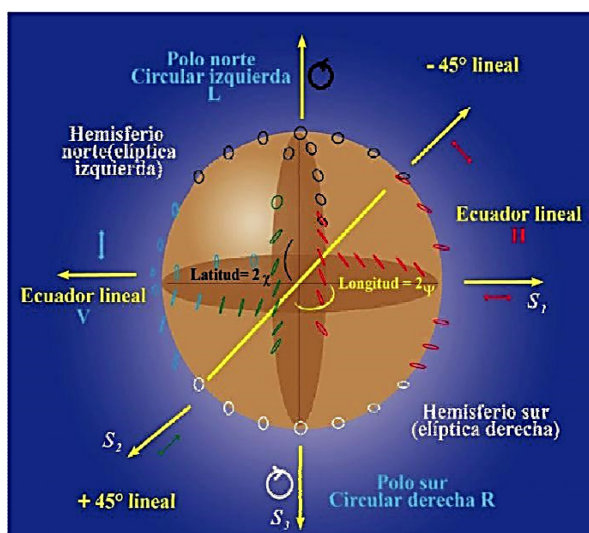
De lo anterior se deduce que se puede obtener información de los tipos de polarización a partir de parámetros de la elipse de polarización y del comportamiento de los componentes del vector \vec{E} .

4.2.2 Esfera de Poincaré

El matemático Henri Poincaré demostró que todos los estados posibles de polarización pueden ser representados por puntos en una esfera, la esfera de Poincaré, como se presenta en ilustración 12, en donde se observa que en una onda completamente polarizada el estado de polarización se describe por un punto en la superficie de la esfera donde el radio de la esfera es S_0 , y la latitud de un punto en la esfera corresponde a 2χ . A través del vector S se tiene una representación tridimensional de la polarización en coordenadas esféricas sobre la esfera de Poincaré en la que se puede visualizar el efecto de los ángulos de la elipse de polarización, ilustración 9: ψ^0 el ángulo de orientación y x^0 que define la elipticidad, en donde $\tan x^0 = \pm b/a$ (Fernández et al 2015; Ríos, 2014; Andrade, 2012; Sánchez, 1999).

Ilustración 12

Elementos de la esfera de Poincaré



Nota. Fuente: Fernández et al (2015).

La esfera de Poincaré constituye otra representación del estado de polarización de una onda que permite definir los tres tipos principales de dicho estado (Fernández et al 2015; Ríos, 2014; Andrade, 2012; Sánchez, 1999), como se dispone en la tabla 8.

Tabla 8

Principales estados de la polarización

Tipo de Onda	Ubicación en la Esfera de Poincaré	Grado de Polarización	Parámetros del vector de Stokes
Completamente polarizada	El punto está en la superficie de la esfera	1	$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$
Parcialmente polarizada	El punto está contenido en la esfera	$0 < d < 1$	$\langle s_0 \rangle_\epsilon \sqrt{\langle s_1 \rangle^2 + \langle s_2 \rangle^2 + \langle s_3 \rangle^2}$
No polarizada	El punto está en la superficie de la esfera	0	$s_0 = 2\langle E_x^0 _2 \rangle$ $s_1 = s_2 = s_3 = 0$

Nota. Fuente: Fernández et al (2015).

En términos de los parámetros del vector de Stokes, el grado de polarización d , se define como la razón la potencia polarizada sobre la potencia total (Fernández et al, 2015; Ríos, 2014; Andrade, 2012; Sánchez, 1999), como se muestra en la ecuación 7:

$$d = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (7)$$

en donde d es el grado de polarización

S_0 es el total de la potencia

S_1, S_2, S_3 razón de la potencia polarizada.

Es así que resulta conveniente ordenar los parámetros de Stokes en una matriz, como se muestra en la ecuación 8, lo que se conoce como vector de Stokes para la polarización elíptica (Galaterra, 2014; Collet, 2005)

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_v^2 + E_h^2 \\ E_v^2 - E_h^2 \\ 2 \operatorname{Re}\{E_v E_h^*\} \\ 2 \operatorname{Im}\{E_v E_h^*\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_0 \cos 2\psi \cos 2x \\ S_0 \sin 2\psi \cos 2x \\ S_0 \sin 2x \end{bmatrix} \quad (8)$$

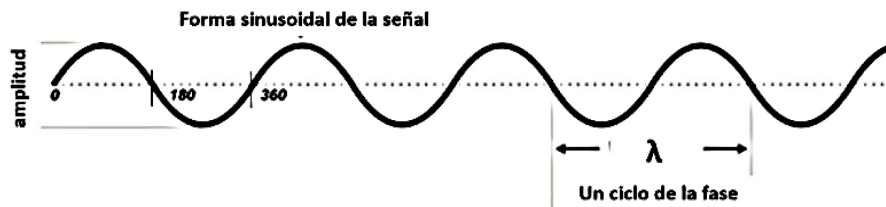
En consecuencia, una característica importante de la polarimetría es que, si se tiene la respuesta de un objeto de la superficie terrestre en una base vectorial de polarización, puede calcularse la respuesta en cualquier otra sin necesidad de mediciones adicionales (Fernández et al, 2015; Ríos, 2014; Andrade, 2012; Sánchez, 1999).

4.2.3 Fase y dispersión de la onda electromagnética

La fase es la fracción de un ciclo sinusoidal, Ilustración 13. Dos ondas sinusoidales están en fase cuando alcanzan sus valores máximos y mínimos al mismo tiempo y el desplazamiento de fase es nulo, $\theta = 0$, la ilustración 14 representa dos ondas desfasadas (Fernández et al, 2015).

Ilustración 13

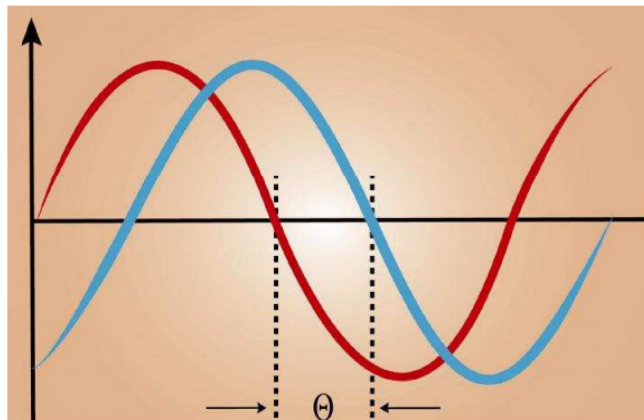
Amplitud y fase de una onda



Nota. Fuente: Fernández et al (2015).

Ilustración 14

Desplazamiento de fase de una onda



Nota. Fuente: Fernández et al (2015).

En el caso específico de SAR, la fase es el tiempo que le toma a la señal de radar desplazarse desde la antena, ser dispersada por los objetos sobre la superficie terrestre y regresar a la antena (Fernández et al, 2015), eso quiere decir que la fase está en función de la distancia del emisor al objeto terrestre y el número de longitudes de onda que se envían y las que retornan, lo que la hace importante en ciertos casos para la interpretación de datos, ya que permite comparar fases relativas correspondientes a la señal emitida y recibida (Oppenheim, 1981; Fernández et al, 2015).

La clasificación de rasgos en imágenes polarimétricas puede realizarse considerando la fase si se usa la opción de observaciones múltiples, técnica frecuentemente empleada en análisis de imágenes SAR (Lee et al, 1994; Fernández et al, 2015).

Los datos de fase junto con la frecuencia y estado de polarización se utilizan para numerosas aplicaciones en geodesia y en problemas de detección de cambios de la superficie terrestre (Wright et al, 2005).

En ese orden de ideas, la onda tiene tres parámetros descriptivos independientes: E_{x0} el valor máximo para el vector \vec{E} en la dirección x ; E_{y0} el valor máximo para el vector \vec{E} en la dirección y ; la fase relativa $\Delta\Phi$, expresada en grados o radianes que representa la fracción de la onda que recibe la antena. Sin el dato $\Delta\Phi$ no pueden realizarse análisis polarimétricos (Fernández et al, 2015).

4.3 Conceptos básicos de polarimetría

La polarimetría es la medición y análisis de la polarización de la energía electromagnética (Ríos, 2014; Cloude & Pottier, 1996; Boerner et al, 1998), a través de un conjunto de técnicas de análisis numérico utilizadas para obtener información física, cualitativa y cuantitativa, para aplicaciones territoriales a partir de imágenes polarimétricas y se basa en la naturaleza vectorial de las ondas electromagnéticas polarizadas, consideradas a través de sus componentes vectoriales.

El cálculo de la matriz de dispersión S se basa en métodos de medición sofisticados que realizan los sensores de RADAR, aislando la señal emitida de la que es recibida y que corresponde a cada elemento dispersor (Heijnen et al, 2002; Fernández et al, 2015), es así que S contiene los datos polarimétricos de la interacción de ambas señales, emitida y recibida por el sensor, correspondientes a las zonas barridas por el rayo del sensor y por ende se pueden extraer la información de: intensidad de cada polarización (HH, VV, HV y VH), la amplitud y la fase. En ese orden de ideas, se puede decir que el enfoque general del análisis polarimétrico es la determinación del mecanismo de dispersión y sus características por descomposición de la matriz S en otras representaciones vectoriales y matriciales (Fernández et al, 2015).

En el análisis polarimétrico o determinación de la matriz de dispersión S , se deben tener en cuenta tanto parámetros propios del sistema SAR como son: La polarización de las ondas electromagnéticas, la longitud de onda y el ángulo de incidencia, así como aquellos relacionados con la estructura y orientación del terreno, la morfología, la humedad y la rugosidad de los objetos sobre la superficie terrestre, los que se describirán a continuación; No obstante, el estudio del mecanismo de dispersión continúa investigándose ya que prevalece la necesidad de obtener interpretaciones cada vez más exactas de los datos

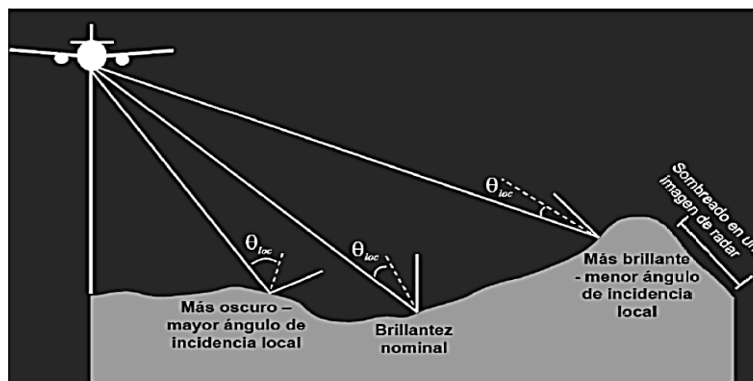
polarimétricos para una extracción satisfactoria de parámetros biofísicos y geofísicos de objetos y de coberturas de interés (Touzi et al, 2004; Duquenoy et al, 2006 ; Woodhouse, 2017).

4.3.1 Influencia del ángulo de incidencia

El ángulo de incidencia es aquel medido entre la dirección de iluminación del sensor y la vertical de la superficie del terreno, como se observa en la ilustración 15; Este varía dependiendo de la altura del radar, razón por la cual la geometría de la imagen cambia de punto a punto en la dirección del rango, lo que sumado a la inclinación local de la superficie influye directamente en la intensidad de cada píxel (Vásquez, 2019).

Ilustración 15

Ángulo de incidencia SAR



Nota. Fuente: CCRS (2001).

En las imágenes de radar el relieve modifica el ángulo de incidencia transformando la superficie real en la superficie proyectada sobre la imagen, lo que quiere decir que, si el ángulo de incidencia es mayor a la pendiente, en la imagen las distancias reales aparecen acortadas; por lo tanto, la pendiente tiene mayor influencia en los ángulos incidentes pequeños que en los grandes. Cada tipo de superficie puede tener diferentes respuestas dependiendo el ángulo de incidencia (Buemi, 2012; Vásquez, 2019).

4.3.2 Influencia de la constante dieléctrica

La constante dieléctrica mide el grado de permeabilidad del material al campo eléctrico en el cual se encuentra sumergido. De cierto modo, es la capacidad del material para absorber, reflejar y/o transmitir la energía de las microondas (CCRS, 2001; Vásquez, 2019).

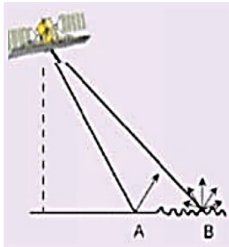
El contenido de agua afecta considerablemente el valor de la constante dieléctrica la cual aumenta de manera casi lineal; dicho valor también depende de la frecuencia de la onda; En el caso de las microondas la constante dieléctrica varía de 3 a 8 en superficies secas y puede ser de 80 para el agua (Henderson & Lewis, 1998; Vásquez, 2019).

4.3.3 Dispersión de las ondas

Las características de la superficie influyen en la respuesta de la retrodispersión, de acuerdo a la forma de interacción de la onda con los elementos sobre la superficie terrestre, lo que genera tres formas diferentes de dispersión, a saber: dispersión de la superficie o especular, dispersión volumétrica o difusa y dispersión de esquina (Posada et al, 2010), las que se describen en la tabla 9.

Tabla 9

Formas de dispersión de las ondas SAR

Forma de Dispersión	Representación Gráfica	Observaciones
Dispersión de Superficie		<p>Sucede cuando el haz de luz interactúa con una superficie lisa y se comporta como un espejo, donde la señal incidente tiene dirección opuesta a la dispersada y por lo tanto la energía que vuelve al radar es mínima, representándose en la imagen mediante tonos oscuros (Monela, 2014; Vásquez, 2019).</p> <p>Ocurre en los bordes de dos coberturas homogéneas contiguas. El retorno de señal es función de:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Constante dieléctrica ● Rugosidad del terreno <p>Ejemplos: cuerpos de agua y suelos desnudos</p>

Dispersión
volumétrica



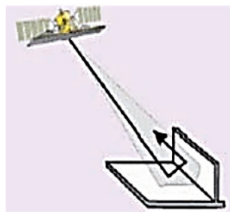
Se da cuando la superficie es áspera, el haz de luz incidente se refleja en diversas direcciones y se representa en la imagen mediante diferentes tonos de grises (Monela, 2014; Vásquez, 2019).

Resultado de múltiple reflexión dentro una cobertura homogénea. El retorno de señal es función de:

- Densidad de la cobertura
- Geometría de elementos de reflexión
- Propiedades dieléctricas de los elementos

Ejemplos: vegetación densa y nieve.

Dispersión
de esquina



Se presenta en el caso en que la señal emitida interactúa con dos superficies lisas perpendiculares entre sí, el resultado en la imagen es de intensidades muy altas por lo tanto tonos claros. Las áreas urbanas y los troncos de árboles sobre áreas inundadas son los ejemplos más conocidos de este tipo de dispersión (Monela, 2014; Vásquez, 2019).

El reflector de esquina de dos superficies perpendiculares origina una señal con un retorno reforzado. En las imágenes aparece con tonos muy claros o blancos.

Ejemplos: áreas urbanas, árboles rodeados por agua, barcos en el agua.

Nota. Fuente: RADAR Polarimetry – CCRS (2001).

4.4 Distorsiones geométricas de las imágenes SAR

Las imágenes SAR presentan diferentes distorsiones en su geometría, algunas se deben directamente al funcionamiento del sistema y otras dependen del terreno (Vásquez, 2019), entre ellas se encuentran:

4.4.1 Desplazamiento topográfico

Teniendo en cuenta que la captura de imagen SAR es oblicua por la iluminación lateral, se pueden presentar distorsiones debido al relieve, cuyos principales efectos sobre el desplazamiento topográfico son: escorzo o acortamiento de ladera, inversión por relieve y sombras. (Vásquez, 2019; ITC, 2004).

Escorzo o acortamiento de ladera: en las imágenes de radar consiste en la apariencia de compresión de aquellas características de la escena que están inclinadas hacia el sensor. (Vásquez, 2019; Henderson & Lewis, 1998).

Inversión por relieve: se presenta cuando el haz del radar alcanza la parte superior de una pendiente antes de la parte inferior, de tal manera que en la imagen la pendiente se forma al revés, presentando tonos muy brillantes (Vásquez, 2019; ITC, 2004)

Las sombras indican zonas del terreno que no son alcanzadas por el haz del radar debido a la geometría de visualización y topografía de la escena, y por lo tanto se representan en la imagen en tonos muy oscuros. Son más comunes si el terreno tiene pendientes pronunciadas y la imagen es adquirida con ángulos de incidencia relativamente grandes (Vásquez, 2019; CCRS, 2001).

4.4.2 Distorsiones en escala

El radar mide la distancia de los objetos en el rango oblicuo en lugar de la verdadera dimensión en el terreno, por esta razón, la imagen presenta diferentes escalas que varían desde el rango cercano al rango lejano, esto se traduce en que los objetos del rango lejano se comprimen en relación a los del rango cercano. Por tal motivo, para una adecuada interpretación, la imagen debe ser corregida transformando la geometría al rango en tierra (Vásquez, 2019; ITC, 2004).

4.4.3 Distorsiones radiométricas

Las distorsiones geométricas también afectan la imagen radiométricamente, esto debe a que la energía proveniente de una zona con altas pendientes, el sensor la almacena en un rango de información reducido, esto repercute en altos niveles digitales debido a la respuesta combinada de varios objetos. Las

caras de las pendientes en una imagen de radar se visualizan muy brillantes. Desafortunadamente, éste efecto aún no puede ser corregido, razón por la cual, la inversión por relieve y zonas de sombra no pueden ser utilizadas para interpretación, aunque son útiles para la comprensión de la topografía del terreno (Vásquez, 2019; ITC, 2004). La única calibración radiométrica que se aplica en SAR tiene como objetivo generar imágenes en magnitudes físicas en las que los valores del píxel puedan asociarse directamente con el coeficiente de retrodispersión (Vásquez, 2019).

4.4.4 Speckle

Las imágenes SAR se ven afectadas por un efecto inherente tipo “ruido” conocido como moteado o lo que traduce en inglés como speckle, que evidencia en las imágenes un aspecto granulado de sal y pimienta por una secuencia aleatoria de píxeles blancos y negros que degrada la calidad de las mismas. La señal total retrodispersada es el producto de la suma coherente de diversas señales devueltas aleatoriamente de los objetos contenidos en el área (Vásquez, 2019).

El efecto del speckle generalmente aumenta con la intensidad de la señal (Vásquez, 2019; Oliver & Quegan, 2004; Edrosa, 2011). Durante el procesamiento de los datos obtenidos con radar, pueden generarse varias imágenes de una misma región, cada una de las cuales se conoce como miradas o su traducción en inglés looks. Uno de los métodos para reducir el efecto del speckle en las imágenes SAR está basado en el promedio incoherente de la señal de azimut contenida en los looks y por lo tanto se conoce como multilooking (Vásquez 2019; Chan & Koo, 2008); Otro método utilizado es la aplicación de filtros adaptativos, los cuales buscan disminuir el moteado preservando los bordes y detalles, por ejemplo, el filtro Lee (Vásquez, 2019; Buemi, 2012; Lee, 1981)

4.5 Descomposición polarimétrica

En los radares de apertura sintética no hay posibilidad de separar del eco de un píxel, las distintas contribuciones y la ubicación de estas dentro del píxel mismo: el píxel es por definición la unidad gráfica más pequeña discernible de una escena (Zozaya, 2015), sin embargo, la extracción de las propiedades polarimétricas de un píxel puede hacerse a través de descomposiciones polarimétricas.

Las descomposiciones polarimétricas son técnicas utilizadas para generar discriminadores basados en las polarizaciones de la imagen con fines de análisis, interpretación y clasificación de datos SAR (Penta et al, 2013; Vásquez, 2019). Existen dos tipos de descomposiciones polarimétricas, una es la descomposición coherente que se basa en la matriz de dispersión, mientras que la otra conocida como descomposición incoherente es basada en las matrices de coherencia o covarianza (Zhang et al, 2008; Vásquez 2019). Algunos ejemplos de descomposición polarimétrica se muestran en la tabla 10.

Tabla 10

Ejemplos de descomposiciones polarimétricas

Descomposiciones Coherentes	Descomposiciones incoherentes
Pauli	H/A/ α "Cloude & Pottier"
Krogager	Freeman & Durden
Cameron	Huynen
Touzi	Barnes
	Eigenvector-Eigenvalue
	Van Zyl

4.5.1 Descomposiciones Incoherentes

Existen varios métodos de descomposición incoherente, no obstante, para efectos de este trabajo se hará la descripción de los métodos: H/A/ α "Cloude & Pottier", Freeman-Durden, Van Zyl y Huynen.

4.5.1.1 Descomposición polarimétrica e interpretación de H/A/ α Full-Polarización

La descomposición H- α es un método de descomposición incoherente basado en entropía para datos de polarización cuádruple propuesto por Cloude y Pottier en 1996. Este método se basa en la hipótesis de que las características de dispersión de polarización pueden ser representadas en el espacio

de la entropía H y un ángulo de dispersión promedio α , mediante el análisis de valores propios de las matrices generadas (Cloude & Pottier, 1996; Vásquez 2019).

En este caso, se utiliza un análisis de los autovalores de la matriz de coherencia T_3 ya que proporciona la información necesaria para las descomposiciones polarimétricas incoherentes que se buscan (Clemente, 2012; Montero, 2010), cuyo modelo estadístico se basa en la existencia de un mecanismo de la forma de dispersión¹⁸ o *scattering* dominante para cada celda o píxel.

Los autovalores y autovectores de la matriz de coherencia 3×3 T_3 puede ser calculada para generar una forma diagonal de dicha matriz, tal que, puede ser interpretada estadísticamente independiente entre un conjunto de vectores objetivos (Clemente, 2012; Montero, 2010). La matriz puede ser expresada como se muestra en la ecuación (9):

$$T_3 = U_3 \Sigma U_3^{-1} \quad (9)$$

donde Σ es una matriz diagonal 3×3 con elementos reales no negativos, y $U_3 = [u_1 \ u_2 \ u_3]$ es una matriz unitaria 3×3 , donde $[u_1 \ u_2 \ u_3]$, son tres autovectores ortogonales unitarios.

Si se obtienen los autovectores de la matriz de coherencia T_3 como un conjunto de tres blancos no correlacionados, se puede construir un modelo estadístico simple que consiste en la suma de tres blancos independientes T_{3i} , donde cada uno se representa como una matriz simple de dispersión (Clemente, 2012; Montero, 2010), como se muestra en la ecuación 10:

$$T_3 = \sum_{i=1}^{i=3} \lambda_i T_{3i} = \sum_{i=1}^{i=3} \lambda_i u_i u_i^{T*} \quad (10)$$

donde λ_i son los autovalores de T_3 y representan los pesos estadísticos para los tres componentes T_{3i} . Si solo uno de los autovalores es distinto de cero entonces la matriz de coherencia T_3 puede relacionarse con una matriz de dispersión simple. Por otro lado, si todos los autovalores son iguales, la matriz T_3 estará compuesta de tres mecanismos de dispersión ortogonales con igual amplitud, caso en el cual el blanco es denominado como aleatorio (Clemente, 2012; Montero, 2010).

¹⁸ En la tabla 9 se muestran las formas de dispersión o Scattering

La condición principal para que la matriz T_3 tenga una matriz de dispersión \mathbf{S} es tener un autovalor distinto de cero (λ_1), en este caso la matriz de coherencia es de rango igual a 1 y puede ser expresada como el producto exterior del vector k_1 , de manera que:

$$T_3 = \lambda_1 u_i u_i^T = k_i k_i^T \quad (11)$$

El vector k_1 se puede expresar así:

$$k_1 = \sqrt{\lambda_1} u_1 = \frac{e^{j\phi}}{\sqrt{2A_0}} \begin{bmatrix} 2A_0 \\ C + jD \\ H - jG \end{bmatrix} = e^{j\phi} \begin{bmatrix} \sqrt{2A_0} \\ \sqrt{B_0 + B} \cdot e^{+j\arctan(\frac{D}{C})} \\ \sqrt{B_0 - B} \cdot e^{-j\arctan(\frac{G}{H})} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Donde la fase $\phi \in [-\pi, \pi]$ y es físicamente equivalente a la fase absoluta del blanco.

Sin utilizar datos de ground-truth, la parametrización polarimétrica del vector k_1 involucra la combinación de tres mecanismos simples de dispersión como son: dispersión de superficie, dispersión de esquina o diédrica y dispersión de volumen, como se muestran en la tabla 9, y los que se pueden caracterizar de la siguiente forma:

- Dispersión de superficie (surface scattering): $A_0 \gg B_0 + B, B_0 - B$
- Dispersión de esquina o diédrica (dihedral scattering): $B_0 + B \gg A_0, B_0 - B$
- Dispersión de volumen (volume dihedral): $B_0 - B \gg A_0, B_0 + B$

Existe una parametrización de los autovectores de la matriz de coherencia T_3 , que se expresa como se muestra en la ecuación (13):

$$u = [\cos \alpha \cdot e^{j\phi} \quad \sin \alpha \cdot \cos \beta \cdot e^{j(\delta+\phi)} \quad \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot e^{j(\gamma+\phi)}]^T \quad (13)$$

De esta manera, la matriz U_3 correspondientes a los tres autovectores unitarios ortogonales,

$U_3 = [u_1 \ u_2 \ u_3]$ se representa como:

$$U_3 = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 \cdot e^{j\phi_1} & \cos \alpha_2 \cdot e^{j\phi_2} & \cos \alpha_3 \cdot e^{j\phi_3} \\ \sin \alpha_1 \cdot \cos \beta_1 \cdot e^{j(\delta_1+\phi_1)} & \sin \alpha_2 \cdot \cos \beta_2 \cdot e^{j(\delta_2+\phi_2)} & \sin \alpha_3 \cdot \cos \beta_3 \cdot e^{j(\delta_3+\phi_3)} \\ \sin \alpha_1 \cdot \sin \beta_1 \cdot e^{j(\gamma_1+\phi_1)} & \sin \alpha_2 \cdot \sin \beta_2 \cdot e^{j(\gamma_2+\phi_2)} & \sin \alpha_3 \cdot \sin \beta_3 \cdot e^{j(\gamma_3+\phi_3)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

La parametrización de la matriz unitaria 3x3 en términos de columnas de vectores con diferentes parámetros α_1, β_1 , etc., se hace con el fin de poder obtener una interpretación probabilística del proceso de dispersión. En general, las columnas de la matriz U_3 no sólo son unitarias, sino que también son mutuamente ortogonales. Eso significa que en la práctica los parámetros: $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$, $(\beta_1, \beta_2, \beta_3)$, $(\delta_1, \delta_2, \delta_3)$ y $(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ no son independientes. Por su parte, las tres fases (ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3) son físicamente equivalentes a las fases absolutas de los blancos y pueden ser considerados como parámetros independientes (Clemente, 2012, Montero, 2010).

En este caso, un modelo estadístico para el blanco puede ser representado como la suma de tres matrices S , compuesto por las columnas de la matriz unitaria 3x3 U_3 , las cuales tienen pseudo-probabilidades P_i , como se muestra en las ecuaciones 15 y 16.

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^3 \lambda_k} \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^3 P_k = 1 \quad (16)$$

En este sentido, cualquier parámetro del blanco que siguiera una secuencia aleatoria, podría estimarse mejor si se emplea la media de la secuencia, como se muestra en la ecuación 17:

$$\bar{x} = \sum_{k=1}^3 P_k x_k \quad (17)$$

De esta manera, la media de los parámetros de dispersión dominante son extraídos de la matriz de coherencia como la media del blanco unitario u_0 , ecuación 18

$$u_0 = e^{j\phi} \begin{bmatrix} \cos \bar{\alpha} \\ \sin \bar{\alpha} \cdot \cos \bar{\beta} \cdot e^{i\bar{\delta}} \\ \sin \bar{\alpha} \cdot \cos \bar{\beta} \cdot e^{i\bar{\gamma}} \end{bmatrix} \quad (18)$$

donde ϕ es físicamente equivalente a la fase absoluta del blanco y los parámetros α , β , δ y γ son definidos por:

$$\alpha = \sum_{k=1}^3 P_k \alpha_k \quad (19)$$

$$\beta = \sum_{k=1}^3 P_k \beta_k \quad (20)$$

$$\delta = \sum_{k=1}^3 P_k \delta_k \quad (21)$$

$$\gamma = \sum_{k=1}^3 P_k \gamma_k \quad (22)$$

Partiendo de la ecuación (18) es posible definir la media del blanco del vector K_0 como se muestra en la ecuación (23):

$$K_0 = \sqrt{\bar{\lambda}} \cdot u_0 = \sqrt{\bar{\lambda}} \cdot e^{j\phi} \begin{bmatrix} \cos \bar{\alpha} \\ \sin \bar{\alpha} \cdot \cos \bar{\beta} \cdot e^{i\bar{\delta}} \\ \sin \bar{\alpha} \cdot \cos \bar{\beta} \cdot e^{i\bar{\gamma}} \end{bmatrix} \quad (23)$$

donde $\bar{\lambda}$ corresponde a la potencia media del blanco (SPAN), y se define como:

$$\bar{\lambda} = \sum_{k=1}^3 P_k \lambda_k \quad (24)$$

4.5.1.1.1 Parámetro Entropía (H). Es un parámetro muy útil a la hora de describir la aleatoriedad del proceso de dispersión, y como se mencionó anteriormente, si solo uno de los autovalores es distinto de cero ($\lambda_1 \neq 0, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = 0$), entonces es posible obtener una matriz de dispersión S . Ahora, si todos los autovalores son distintos de cero ($\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 \neq 0$), entonces la matriz de coherencia T_3 representará una estructura de dispersión aleatoria, decorrelacionada y no polarizada (Clemente, 2012; Montero, 2010).

Con el objetivo de definir el grado de aleatoriedad del proceso de dispersión, también conocido como grado de desorden estadístico, se define un parámetro conocido con el nombre de Entropía (H), el que se puede expresar en la ecuación (25):

$$H = \sum_{k=1}^N -P_k \log_N P_k \quad (25)$$

donde P_i , representado en la ecuación (15), son las pseudo-probabilidades de cada autovalor λ_i y N es la base logarítmica y debe ser igual a la dimensión polarimétrica ($N=3$ para el caso monoestático y $N=4$ para el caso biestático).

Adicionalmente, la entropía está definida en el rango entre $0 \leq H \leq 1$ presentándose los siguientes casos:

$$H \rightarrow 0: \quad \lambda_1 = SPAN \quad \lambda_2 = 0 \quad \lambda_3 = 0$$

La matriz dispersión T_3 presenta un rango igual a 1 y el proceso de dispersión corresponde a un blanco puro.

$$H \rightarrow 0: \quad \lambda_1 = SPAN/3 \quad \lambda_2 = SPAN/3 \quad \lambda_3 = SPAN/3$$

La matriz de dispersión presenta un rango igual a 3, esto quiere decir, que el proceso de dispersión se debe a la combinación de tres blancos puros. Consecuentemente, T_3 representa a un blanco distribuido.

$$0 < H < 1$$

El mecanismo de dispersión dado por T_3 resulta de la combinación de tres blancos puros promediados por el correspondiente autovalor (Clemente, 2012).

4.5.1.1.2 Parámetro Anisotropía (A). Adicional a la entropía (H), se encuentra otro parámetro llamado Anisotropía (A) que permite describir la aleatoriedad del proceso de dispersión, basado en autovalores y se define como se muestra en la ecuación (26).

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (26)$$

Este parámetro indica la importancia del segundo y tercer autovalor de la descomposición. La anisotropía suele ser muy útil cuando se quiere discriminar entre mecanismos de dispersión con diferentes autovalores, pero con valores similares de entropía (principalmente cuando $H > 0.7$). La razón es que, para

entropías bajas, el segundo y tercer autovalor se encuentran muy afectados por el ruido (Clemente, 2012; Montero, 2010; Zozaya, 2015).

4.5.1.1.3 Parámetro Alpha (α). De los parámetros ($\alpha, \beta, \delta, \gamma$) del mecanismo de dispersión, que puede ser extraído de la matriz de coherencia T_3 , el parámetro más importante para identificar el mecanismo dominante de scattering es α , al ser un parámetro invariante por rotación; Los otros parámetros (β, δ, γ) se pueden utilizar para definir el ángulo de orientación de polarización del blanco (Clemente, 2012; Montero, 2010).

El estudio de los mecanismos de la ecuación (23) se lleva a cabo a través de la interpretación del parámetro α . Considerando la matriz de dispersión como un conjunto de partículas anisotrópicas idénticas, la matriz de dispersión S se representa como se muestra en la ecuación (27):

$$S = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix} \quad (27)$$

donde a y b son coeficientes complejos de dispersión. En este caso, el efecto de la rotación respecto a la línea de visión asociada a la matriz T_3 , puede ser generada de la siguiente manera:

$$T_3 = R_3(\theta) \begin{bmatrix} \varepsilon & \mu & 0 \\ \mu^* & \nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} R_3(\theta)^{-1} \quad (28)$$

donde $R_3(\theta)$ es la matriz de similitud de rotación unitaria, descrita como:

$$R_3(\theta) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ 0 & \sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (29)$$

de la misma manera, se definen los parámetros (ε, ν y μ), como se muestran en las ecuaciones (30, 31 y 32)

$$\varepsilon = \frac{1}{2} |a + b|^2 \quad (30)$$

$$v = \frac{1}{2}|a + b|^2 \quad (31)$$

$$\mu = \frac{1}{2}(a + b)(a - b)^* \quad (32)$$

Si se realiza el promedio del ángulo θ , asumiendo una distribución uniforme, la matriz T_3 estará dada por la ecuación (33)

$$\langle T_3 \rangle = \int_0^{2\pi} T_3(\theta) P(\theta) d\theta = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2\varepsilon & 0 & 0 \\ 0 & v & 0 \\ 0 & 0 & v \end{bmatrix} \quad (33)$$

A partir de esto, se puede definir el parámetro α como se muestra en la ecuación (34):

$$\alpha = \alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 + \alpha_3 P_3 = \frac{\pi}{2}(P_2 + P_3) \quad (34)$$

Donde

$$P_2 = P_3 = \frac{v}{\varepsilon + v^*} \quad (35)$$

4.5.1.2 Descomposición polarimétrica H/A/ α doble Polarización. A pesar de que la metodología inicial utiliza las cuatro polarizaciones, también se ha estudiado la descomposición H- α con dos polarizaciones (Cloude, 2007; Vásquez 2019).

4.5.1.2.1 Extracción de parámetros H- α . En la extracción de los valores de entropía (H) y ángulo alpha (α) es necesaria la matriz de coherencia, cada píxel de una imagen de doble polarización representa una matriz de coherencia 2 x 2, $[T_2]$ la cual es definida, hermitiana y no negativa (Vásquez, 2019).

$$[T_2] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (36)$$

La descomposición H- α se calcula mediante el análisis de los valores propios de la matriz de coherencia $[T_2]$ tal como se muestra a continuación (Cloude & Pottier, 1996):

$$[T_2] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} \lambda_1 & \\ & \lambda_2 \end{bmatrix} = U^H = \lambda_1 u_1 u_1^H + \lambda_2 u_2 u_2^H \quad (37)$$

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{bmatrix} = [u_1 \quad u_2] \quad (38)$$

$$u_i = e^{j\phi_i} [\cos \alpha_i \quad \sin \alpha_i \quad e^{j\delta_i}]^T \quad (39)$$

U^H denota la transpuesta, es decir es equivalente a U^{*T}

Teniendo los valores propios λ_1 y λ_2 y los vectores propios asociados u_1 y u_2 obtenidos de la matriz de coherencia, es posible calcular la entropía H ecuación (40), la cual define el grado de aleatoriedad de cada tipo de dispersión diferente dentro del conjunto, y el ángulo α ecuación (41), es el parámetro medio para identificar el mecanismo de dispersión dominante con mayor precisión, por ser un parámetro invariante por rotación, y puede ser utilizado para asociar los elementos con las propiedades físicas del medio (Zhang et al, 2008 ; Vásquez, 2019):

$$H = \sum_{i=1}^2 - P_i \log_2 P_i \quad (40)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^2 P_i \cos^{-1}(|u_{1i}|) \quad (41)$$

Donde, P_i ecuación (15), corresponde a las pseudo-probabilidades obtenidas de los valores λ_1 y λ_2 . Teniendo en cuenta que los valores propios son de rotación invariante, la entropía y α también son parámetros de rotación invariante:

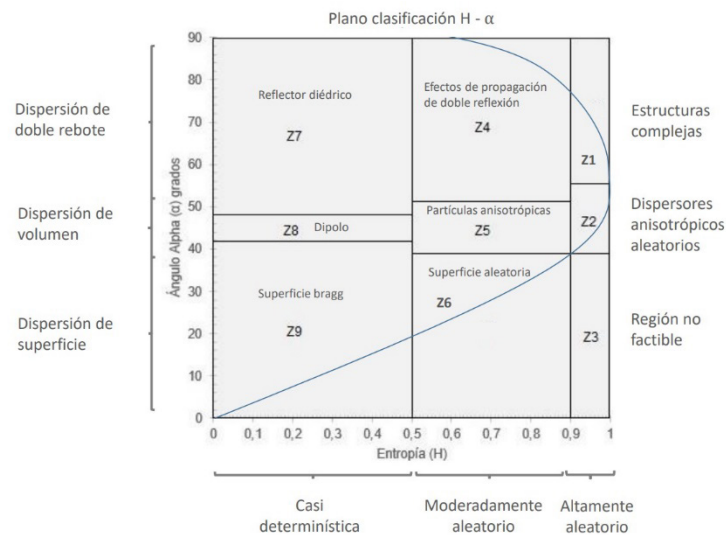
$$P_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^2 \lambda_k} \quad , \quad k = 1,2 \quad (42)$$

Los valores de entropía están entre 0 y 1, donde un valor alto indica una entropía mayor en el píxel y los valores de α varían entre 0 y 90 grados (Vásquez, 2019).

4.5.1.2.2 Interpretación del espacio H- α . Se divide en nueve regiones básicas las cuales caracterizan diferentes comportamientos de dispersión, como se muestra en la ilustración 16 (Cloude & Pottier, 1996). De esta manera es posible determinar el tipo de dispersión de un píxel en una imagen SAR polarimétrica comparando los parámetros de entropía y alpha con umbrales fijos. Los límites de las regiones están establecidos con base a los mecanismos de dispersión, pero pueden ser modificados para un conjunto de datos particular.

Ilustración 16

Plano clasificación H- α



Nota. Modificado. Fuente: Fang & Wen (2005), tomado de Vásquez (2019).

Cada zona se describe de la siguiente manera:

- Zona 1: Alta entropía y dispersión por doble rebote, en esta región aún es posible distinguir mecanismos que pueden darse en aplicaciones forestales o en la dispersión de vegetación que posee una estructura de ramas y coronas bien desarrolladas.
- Zona 2: Alta entropía y dispersión por volumen, se relaciona con la dispersión de las copas de los árboles en los bosques como también con algunos tipos de superficies con vegetación con alta probabilidad aleatoria. El comportamiento extremo de esta clase se debe al ruido aleatorio, es decir que es independiente de la polarización.
- Zona 3: Alta entropía y dispersión de superficie, es la región no factible o utilizable del plano H- α , en consecuencia, de la incapacidad de clasificar los tipos de dispersión con entropía alta y se incluye únicamente para reforzar la idea de que al aumentar la entropía se limita la capacidad de

usar el comportamiento polarimétrico para clasificar objetos, pues la polarimetría de radar se aplica con mayor éxito a los problemas de baja entropía.

- Zona 4: Entropía media y dispersión por doble rebote que ocurre en aplicaciones forestales donde se producen mecanismos de doble rebote en las bandas P y L después de la propagación a través de un dosel, el efecto de dosel aumenta la entropía del proceso de dispersión. Esto también ocurre en las áreas urbanas donde el agrupamiento denso de los centros de dispersión localizados puede generar el aumento de la entropía.
- Zona 5: Entropía media y dispersión por volumen, el aumento de la entropía se debe a una distribución estadística central del ángulo de orientación, esta zona incluye la dispersión de superficies con vegetación con dispersores anisotrópicos y una correlación moderada de las orientaciones del dispersor.
- Zona 6: Entropía media y dispersión por superficie, refleja un aumento de la entropía debido a los cambios en la rugosidad de la superficie y por los efectos de propagación de dosel, abarca cubiertas de superficies que comprenden dispersores esferoidales achatados como por ejemplo las hojas de los árboles o discos.
- Zona 7: Corresponde a eventos de dispersión por doble rebote y baja entropía como los proporcionados por dispersores aislados dieléctricos y dihédricos metálicos.
- Zona 8: Baja entropía y dispersión por volumen, en esta zona se producen mecanismos fuertemente correlacionados que tienen grandes desequilibrios entre HH y VV en amplitud, en esta zona aparecen los dispersores dipolo aislados, al igual que la dispersión de la vegetación con una orientación fuertemente correlacionada de los elementos de dispersión anisotrópicos, el ancho de esta zona depende de la capacidad del radar para medir la relación HH y VV, es decir la calidad de la calibración.
- Zona 9: Baja entropía y dispersión de superficie, incluye la dispersión de superficies de bragg y el mecanismo de retrodispersión especular que no implican inversiones de fase de 180° entre HH y VV. Las coberturas cuyas superficies son lisas ante longitud de onda del radar como el agua, el hielo marino, las pistas de aeropuertos, las vías, etc. se encuentran dentro de esta categoría (Doménech Oliví, 2015; PCI Geomatics, 2018; Boerner, 2019; Valencia, 2019).

Como se mencionó anteriormente el parámetro α permite la identificación del proceso de dispersión, si $\alpha=0$ la dispersión está relacionada con una superficie plana, si es aproximada a 45° se relaciona con un dipolo y se varía entre 45° y 90° la respuesta es un doble rebote. Los valores más bajos de entropía indican

que es más fácil extraer información de la dispersión, mientras que un valor alto de entropía significa que hay más de un mecanismo de dispersión y que son iguales en fuerza, por lo tanto, hay mayor dificultad en discriminar la dispersión a medida que aumenta la entropía (Sakshaug, 2013).

4.5.1.3 Descomposición de Freeman-Durden. Es una técnica basada en modelos que expresa la matriz de coherencia T_3 como una contribución de tres mecanismos de formas de dispersión o scattering, cuyas características se muestran en la tabla 9.

La dispersión de volumen puede ser modelado por la matriz de dispersión de un dipolo elemental, como se muestra en la ecuación (43)

$$[S] = \begin{bmatrix} R_h & 0 \\ 0 & R_v \end{bmatrix} \quad (43)$$

donde R_h y R_v son los coeficientes de dispersión complejos en el sistema de coordenadas de radar.

Se puede asumir que los dispersores están orientados al azar con respecto a la dirección de observación del radar, con un ángulo ϕ de la dirección de polarización vertical. La ecuación (44) describe la matriz de dispersión en el sistema de coordenadas del radar:

$$\begin{bmatrix} R_{vv} & R_{vh} \\ R_{hv} & R_{hh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi \\ -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_h & 0 \\ 0 & R_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (44)$$

Ahora, si se asume una nube de orientación al azar (dipolo horizontal muy fino ($R_v \rightarrow 0$) y dispersión cilíndrica, la matriz de covarianza para la dispersión de volumen sería:

$$(C_{3V})_V = f_v \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/3 \\ 0 & 2/3 & 0 \\ 1/3 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (45)$$

donde f_v corresponde a la contribución de la componente de dispersión de volumen. La matriz de covarianza $(C_{3V})_V$ tiene un rango igual a 3, esto quiere decir que la dispersión de volumen no puede ser caracterizada por una matriz de dispersión simple de un blanco puro (Clemente, 2012).

En la dispersión de esquina, que corresponde a un reflector en forma de diedro el cual puede estar hecho de distintos materiales dieléctricos, es utilizado para modelar el segundo proceso de Freeman.

En este caso se tiene en cuenta la posición del objeto sobre la superficie terrestre; es así como, para la cara vertical (por ejemplo, el tronco de un árbol) se tiene los coeficientes de reflexión R_{th} y R_{tv} para la polarización horizontal y vertical respectivamente. Para la cara horizontal (por ejemplo, el suelo) se tienen los coeficientes de reflexión de Fresnel R_{gh} y R_{gv} . Se puede generalizar más el modelo introduciendo coeficientes de propagación como: $e^{2j\gamma H}$ y $e^{2j\gamma V}$, donde los términos complejos de la fase, γ_H y γ_V son válidos para cualquier atenuación y efectos de cambio de fase; es así como, la matriz de dispersión para doble reflexión puede ser escrita de la siguiente manera:

$$S = \begin{bmatrix} e^{2j\gamma H} R_{th} R_{gh} & 0 \\ 0 & e^{2j\gamma V} R_{tv} R_{gv} \end{bmatrix} \quad (46)$$

Partiendo de la ecuación (46), se puede obtener la matriz de covarianza para la dispersión de doble rebote, luego de normalizar respecto a la componente S_{vv} , se tiene que:

$$[C_3]_d = f_d \begin{bmatrix} |\alpha|^2 & 0 & \alpha \\ 0 & 0 & 0 \\ \alpha^* & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (47)$$

donde f_d corresponde a la contribución del dispersión doble rebote a la componente $|S_{vv}|^2$, con:

$$f_d = |R_{tv} R_{gv}|^2 \quad (48)$$

$$\alpha = e^{2j(\gamma H - \gamma V)} \frac{R_{th} R_{gh}}{R_{tv} R_{gv}} \quad (49)$$

Como se puede observar, la matriz de covarianza $[C_3]_d$ es de rango 1, ya que puede ser representada por la matriz de scattering dada en la ecuación (46).

Por último, en la dispersión de superficie, Freeman utiliza una dispersión de Bragg de primer orden; Este mecanismo de dispersión puede ser representado con la misma matriz de la ecuación (43) de la cual se genera la matriz de covarianza $[C_3]_s$ expresada de la siguiente manera:

$$[C_3]_s = f_s \begin{bmatrix} |\beta|^2 & 0 & \alpha \\ 0 & 0 & 0 \\ \alpha^* & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (50)$$

donde f_s corresponde a la contribución de la dispersión de doble rebote a la componente $|S_{vv}|^2$, con:

$$f_s = |R_v|^2 \quad (51)$$

$$\beta = \frac{R_h}{R_v} \quad (52)$$

Igual que para el caso de dispersión de doble rebote, debido a que la matriz $[C_3]_s$ es de rango 1, la dispersión de superficie queda completamente representada por la matriz de dispersión de la ecuación (43).

Por lo tanto, asumiendo que tanto la dispersión de volumen, de doble rebote y de superficie no están correlacionadas entre sí, la estadística total de segundo orden será la suma de todas las estadísticas individuales de cada mecanismo. Por lo tanto, la descomposición de Freeman expresa la medida total de todas las covarianzas como:

$$[C_3] = \langle [C_3] \rangle_V + \langle [C_3] \rangle_d + \langle [C_3] \rangle_s \quad (53)$$

4.5.1.4 Descomposición de Van Zyl. Fue introducida usando una descripción general de una matriz de covarianza C_3 de dimensiones 3 x 3, para un terreno azimutal simétrico en el caso monoestático (Van Zyl, 1993). La hipótesis de reflexión simétrica establece que para medios naturales tales como suelo y bosques la correlación, entre los canales co-polarizados y aquellos con polarización cruzada, se asume igual a cero (Nghiem et al, 1992; Borgeaud & Kong, 1987; Clemente, 2012); De aquí se desprende la expresión de la matriz C_3 , como se muestra en la ecuación (54):

$$C_3 = \begin{bmatrix} \langle |s_{HH}|^2 \rangle & 0 & \langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle \\ 0 & \langle 2|s_{HV}|^2 \rangle & 0 \\ \langle S_{VV} S_{HH}^* \rangle & 0 & \langle |s_{VV}|^2 \rangle \end{bmatrix} = \alpha \begin{bmatrix} 1 & 0 & \rho \\ 0 & \eta & 0 \\ \rho^* & 0 & \mu \end{bmatrix} \quad (54)$$

donde: α , ρ , η , y μ dependen del tamaño, de la forma, de la distribución angular y de las propiedades eléctricas de los dispersores. En este caso es posible obtener las expresiones analíticas de los autovalores de la siguiente forma (Van Zyl, 1993; Clemente, 2012):

$$\lambda_1 = \frac{\alpha}{2} \left\{ 1 + \mu + \sqrt{(1 - \mu)^2 + 4|\rho|^2} \right\} \quad (55)$$

$$\lambda_2 = \frac{\alpha}{2} \left\{ 1 + \mu - \sqrt{(1 - \mu)^2 + 4|\rho|^2} \right\} \quad (56)$$

$$\lambda_3 = \alpha \eta \quad (57)$$

y sus correspondientes autovalores serán:

$$u_1 = \frac{1}{\sqrt{\frac{(\mu-1+\sqrt{\Lambda})^2+4|\rho|^2}{\mu-1+\sqrt{\Lambda}}}} \begin{bmatrix} \frac{2\rho}{\mu-1+\sqrt{\Lambda}} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (58)$$

$$u_2 = \frac{1}{\sqrt{\frac{(\mu-1-\sqrt{\Lambda})^2+4|\rho|^2}{\mu-1-\sqrt{\Lambda}}}} \begin{bmatrix} \frac{2\rho}{\mu-1-\sqrt{\Lambda}} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (59)$$

$$u_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ con } \Lambda = (1 - \mu) + 4|\rho|^2 \quad (60)$$

Se puede demostrar que una matriz 3x3 hermítica promedio de covarianza C_3 se puede expresar de la siguiente manera:

$$C_3 = \Lambda_1 \begin{bmatrix} |\alpha|^2 & 0 & \alpha \\ 0 & 0 & 0 \\ \alpha^* & 0 & 1 \end{bmatrix} + \Lambda_2 \begin{bmatrix} |\beta|^2 & 0 & \beta \\ 0 & 0 & 0 \\ \beta^* & 0 & 1 \end{bmatrix} + \Lambda_3 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (61)$$

con:

$$\Lambda_1 = \lambda_1 \left[\frac{\mu-1+\sqrt{\Lambda}}{(\mu-1+\sqrt{\Lambda})^2+4|\rho|^2} \right] \quad \alpha = \frac{2\rho}{\mu-1+\sqrt{\Lambda}} \quad (62)$$

$$\Lambda_2 = \lambda_2 \left[\frac{\mu-1-\sqrt{\Lambda}}{(\mu-1-\sqrt{\Lambda})^2+4|\rho|^2} \right] \quad \alpha = \frac{2\rho}{\mu-1-\sqrt{\Lambda}} \quad (63)$$

$$\Lambda_3 = \lambda_3 \quad (64)$$

La descomposición de Van Zyl muestra que los dos primeros autovectores representan matrices equivalentes de dispersión que pueden ser interpretadas en términos de la cantidad de reflexiones pares o impares. La ecuación(61) obtenida del análisis de los autovalores y autovectores de la matriz hermítica promedio de covarianza C_3 , corresponde al punto de partida para otro tipo de teorema de descomposición llamado descomposición basada en modelos (modelbased descompositions) (Clemente, 2012).

4.5.1.5 Descomposición de Huynen. La descomposición de Huynen considera el concepto de “dicotomía de onda” y se exporta al estudio de dispersores distribuidos. En la primera etapa, esta descomposición considera una parametrización particular de un dispersor distribuido (Huynen, 1965).

La parametrización se da en la matriz e covarianza, como se muestra en la ecuación (65)

$$\langle [T_3] \rangle = \begin{bmatrix} 2\langle [A_0] \rangle & \langle C \rangle - j\langle D \rangle & \langle H \rangle + j\langle G \rangle \\ \langle C \rangle + j\langle D \rangle & \langle B_0 \rangle + \langle B \rangle & \langle E \rangle + j\langle F \rangle \\ \langle H \rangle - j\langle G \rangle & \langle E \rangle - j\langle F \rangle & \langle B_0 \rangle - \langle B \rangle \end{bmatrix} \quad (65)$$

En donde:

A_0 , representa el total del poder disperso de las partes regulares, suaves y convexas del dispersador,
 B_0 , denota la potencia dispersa total para los componentes de despolarización irregulares, rugosos y sin conexión del objetivo,

$A_0 + B_0$, proporciona una aproximación a la potencia total dispersa,

$B_0 + B$, es la potencia despolarizada simétrica total,

$B_0 - B$, es la potencia despolarizada no-simétrica total,

C, D , son componentes de despolarización de objetos simétricos

- C : generador del objeto forma global (lineal)
- D generador del objeto forma local (Curvatura)

E, F , componentes de despolarización debido a no simetrías

- E , generador del giro local del objeto (torsión)
- F , generador del giro global del objeto (Helicidad)

G, H , términos de acoplamiento entre los términos simétricos y no simétricos del objeto

- G , generador del acoplamiento local de destino (pegamento)
- H generador del acoplamiento global objeto (Orientación)

4.5.2 Descomposiciones Coherentes

El objetivo de la descomposición coherente es la de expandir la matriz de Sinclair de un píxel en una combinación de procesos de dispersión más simples, lo que permite caracterizar, desde el punto de vista polarimétrico, solo blancos puros (Zozaya, 2015). En este trabajo describiremos brevemente la descomposición de Pauli, Touzi, Cameron y Krogager.

4.5.2.1 Descomposición de Pauli. En la descomposición de Pauli la matriz S es “descompuesta” en una suma de tres matrices elementales, cada una de las cuales representa un mecanismo estándar de dispersión polarimétrica distinto, de acuerdo a la ecuación (66):

$$\begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} = \alpha \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \beta \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} + \gamma \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (66)$$

De esta forma, cada píxel se caracteriza por una terna de parámetros (α, β, γ) , cuyos valores se obtienen resolviendo el sistema de ecuaciones representado por la ecuación (66).

$$\alpha = \frac{S_{HH} + S_{VV}}{\sqrt{2}} \quad (67)$$

$$\beta = \frac{S_{HH} - S_{VV}}{\sqrt{2}} \quad (68)$$

$$\gamma = \sqrt{2S_{HV}} \quad (69)$$

El parámetro α cuantifica la reflexión simple o impar, típica de superficies abiertas: los suelos desnudos suelen tener una respuesta S_{HH} y S_{VV} aproximadamente igual; el parámetro β cuantifica la doble reflexión o de tipo par, la cual produce un valor elevado de S_{HH} , este tipo de reflexión se produce típicamente por la interacción del suelo con paredes o troncos de los árboles. Finalmente, el parámetro γ cuantifica la dispersión de tipo volumétrico, la cual, por ejemplo, suele darse en el interior del follaje de los árboles (Zozaya, 2015). Las imágenes polarimétricas basadas en la descomposición de Pauli suelen hacerse codificando los parámetros (α, β, γ) en colores.

4.5.2.2 Descomposición de Touzi. El método de Touzi realiza una descomposición de dispersión del objetivo en un conjunto de datos completamente polarimétricos (de cuatro polarizaciones). Al igual que la descomposición de dispersión de blancos incoherente de Cloude & Pottier, la descomposición de Touzi se basa en la descomposición característica de la matriz de coherencia. Con objetivos recíprocos, la descomposición característica conduce a la representación de la matriz de coherencia como la suma incoherente de tres dispersores individuales, cada uno ponderado por su valor propio normalizado y positivo.

Touzi ha propuesto una técnica para identificar blancos puros en imágenes SAR, esta técnica determina la naturaleza de un objetivo en el componente simétrico máximo de la descomposición. Por un lado, blancos puros cuya respuesta ocupa solo un píxel y , por otro lado, los objetos cuya respuesta se extiende entre varios píxeles.

Se definió el llamado grado de coherencia de una distribución dispersa mediante la ecuación (70)

$$P_{sym} = \frac{\sqrt{(|\alpha|^2 - |\beta|^2)|^2 + 4|\alpha\beta|^2}}{(|\alpha|^2 + |\beta|^2)} \quad (70)$$

La descomposición de Touzi utiliza el modelo de vector de dispersión de Touzi para representar cada vector propio de coherencia con características únicas de cada objetivo. Cada vector de coherencia se caracteriza de manera únicamente por cinco parámetros independientes (PCI Geomatics, 2018; Touzi, 2004).

El tipo de dispersión se describe con una entidad compleja, cuya magnitud (α_{si}) y fase ($\Phi_{\alpha_{si}}$) caracterizan la magnitud y la fase de la dispersión del objetivo; la helicidad (τ_i) caracteriza la naturaleza simétrica-

asimétrica de la dispersión del objetivo y El ángulo de orientación (ψ_i) es el ángulo de inclinación convencional de Huynen. (PCIGeomatics, 2018; Touzy, 2004).

La descomposición de Touzi es similar a la descomposición de Cloude & Pottier excepto que:

- No procede a la suma ponderada de los parámetros de cada vector propio por sus respectivos valores propios
- Tiene en cuenta la fase polarimétrica ($\Phi_{\alpha si}$)
- Compensa la naturaleza simétrica-asimétrica de la dispersión del objetivo (τ_i)

4.5.2.3 Descomposición de Cameron. Realiza una factorización de la matriz de dispersión basada en dos propiedades de los objetivos de radar: reciprocidad y simetría.

Se considera que un objetivo de radar es recíproco cuando los términos diagonales de la dispersión es la misma, es decir, el teorema de aplicación de la reciprocidad. Para una matriz medida sobre una base lineal ortogonal (h,v) se tiene:

$$S_{hv} = S_{vh} \quad (71)$$

El supuesto de reciprocidad se aplica en el caso de los sistemas SAR monoestático, donde la antena transmisora y receptora se encuentran en la misma posición; por lo tanto, todos los esparcidores pueden (1990).

La dispersión se considera simétrica cuando el objetivo tiene un eje de simetría en el plano ortogonal a la dirección entre el radar y el objetivo, de igual manera puede ser considerada en el contexto de la descomposición de Pauli, como se muestra en la ecuación (66), por lo tanto, un dispersor puede ser considerado simétrico si hay una rotación que anula la proyección de la matriz (S) en el componente (S)_c de la descomposición de Pauli (Andrade, 2012).

Es así como, un dispersor simétrico arbitrario puede descomponerse de acuerdo con la ecuación (72):

$$\Psi \vec{S}_{sym} = \alpha e^{j\rho} [R(\Psi)] \Lambda(z) \quad (72)$$

Donde,

$$\alpha \in R^+$$

$$\rho, \Psi \in (-\pi, \pi)$$

α representa la amplitud de la matriz de dispersión,
 ρ representa la fase del ruido,
 Ψ representa el ángulo de orientación del dispersor,
 la matriz $[R(\Psi)]$ denota el operador de rotación y por último
 $\Lambda(z)$ representa el vector normalizado.

4.5.2.4 Descomposición de Krogager. Krogager ha propuesto una alternativa para factorizar la matriz de dispersión como la combinación de las respuestas de: una esfera, un diplano y un helicoide; Los dos últimos componentes presentan un ángulo de orientación ϑ

Si se considera la matriz de dispersión expresado como la base de polarización circular (r,l) , la descomposición de Krogager se representa de acuerdo a lo que se muestra en la ecuación 73 (Krogager, 1990; Matkan et al, 2013).

$$[S_{(r,l)}] = \begin{bmatrix} S_{rr} & S_{rl} \\ S_{rl} & S_{ll} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |S_{rr}|e^{j\varphi_{rr}} & |S_{rl}|e^{j\varphi_{rl}} \\ |S_{rl}|e^{j\varphi_{rl}} & -|S_{ll}|e^{j(\varphi_{rr}+\pi)} \end{bmatrix} \quad (73)$$

En donde

$$S_{rr} = \frac{(S_{hh} - S_{vv} + j2S_{hv})}{2} \quad (74)$$

$$S_{ll} = \frac{(S_{vv} - S_{hh} + j2S_{hv})}{2} \quad (75)$$

$$S_{rl} = \frac{j(S_{hh} + S_{vv})}{2} \quad (76)$$

4.6 Análisis basado en objetos de imagen (OBIA por su sigla en inglés)

Es una técnica utilizada para analizar las imágenes satelitales, en donde, el proceso cognitivo del mundo exterior o de una imagen, a pesar de ser complejo, puede ser idealizado o modelado mediante la identificación de regiones o áreas significativas dentro de la información (Burnett & Blaschke, 2003). Es así como el cambio de paradigma, en el cual las unidades básicas de información no corresponden ya a píxeles aislados sino a regiones homogéneas y significativas capaces de presentar de forma resumida y eficiente las entidades y relaciones presentes en la imagen, haciendo que los objetos corresponden en mayor grado con la realidad espacial y geográfica capturada en una imagen obtenida por sensores remotos (Blaschke & Hay, 2001).

El objeto generado en una imagen corresponde entonces a una estructura con atributos propios obtenido mediante el agrupamiento de píxeles con cierta homogeneidad de acuerdo a parámetros definidos (Blaschke & Hay, 2001).

El paso inicial para realizar la clasificación de una imagen por el método de análisis basado en objetos de la imagen es el proceso de segmentación, que consiste en realizar operaciones que hagan posible dividir la imagen en varias partes u objetos, utilizando técnicas de detección de regiones, identificación de bordes, umbrales, de acuerdo a ciertos parámetros se obtenga información lo más resumida pero simultáneamente lo más significativa posible (Díaz et al,2014).

4.7 Algoritmos Machine Learning

Los algoritmos de Machine Learning más empleados según (Kaehler & Bradski, 2014; Tso & Mather, 2009) son: Máquinas de Soporte Vectorial (SVM por su sigla en inglés), Árboles de Decisión (DT), Bosques Aleatorios (RF) y K-Vecinos más Cercanos (Knn). Cada uno de estos clasificadores no paramétricos de aprendizaje cuentan con diferentes conjuntos de características o parámetros, como la capacidad para gestionar las mediciones faltantes o variables de entrada categóricas. Sin embargo, no hay un "mejor" clasificador, pues promediando sobre todos los posibles tipos de distribuciones de datos, todos los clasificadores generarían el mismo resultado (Kaehler & Bradski, 2014).

Para el caso de la investigación propuesta, se hará la descripción de los métodos de: Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) y Boques Aleatorios (RF).

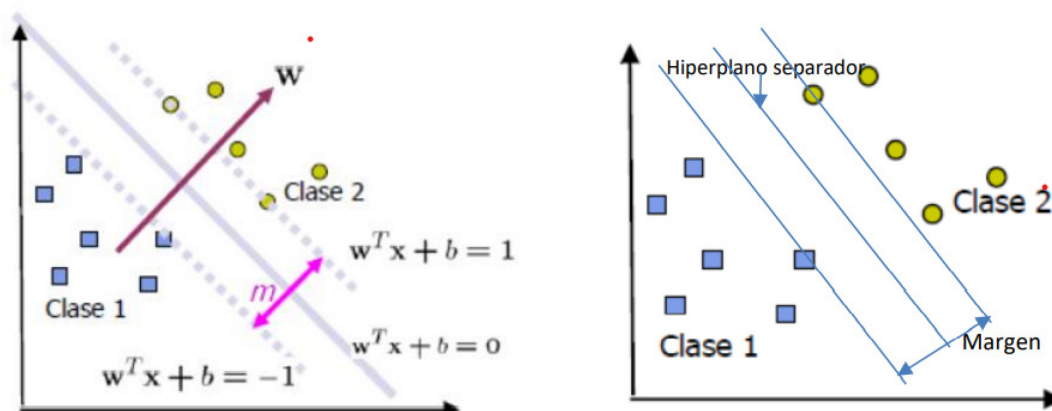
4.7.1 Máquinas de Soporte Vectorial (SVM por su sigla en inglés)

Las SVM son sistemas de clasificación supervisada basados en reglas lineales. En la fase de entrenamiento las SVM generan un modelo clasificador, que consiste en un hiperplano que separa los objetos según su clase con el máximo margen posible. Los objetos situados en los márgenes se llaman vectores de soporte y de aquí el nombre del clasificador. En los casos donde una separación lineal no es posible, las SVM emplean funciones llamadas kernels que transforman el espacio de entrada en otro de mayor dimensión (Ratta & Laciari, 2011).

La principal fortaleza de SVM es su capacidad de minimizar los errores de clasificación, creando un hiperplano entre cada par de clases, como se muestra en la ilustración 17, de tal manera que maximiza la distancia entre los vectores de soporte de cada clase (Buddhiraju & Rizvi, 2010; Chethan et al, 2009; Tso & Mather, 2009). Si no es posible construir ese hiperplano en el espacio espectral original, la separación se realiza en un espacio espectral de dimensión más alta (Addesso et al., 2012).

Ilustración 17

Construcción de los hiperplanos de separación para un conjunto de dos muestras



Nota.
La

ilustración de la izquierda corresponde a la frontera de decisión, y la de la derecha es el caso linealmente separable. Fuente: Betancourt (2005).

El algoritmo SVM es una alternativa de clasificación de imágenes, que permite obtener clasificaciones exactas a partir de un conjunto de muestras de entrenamiento reducidas (Addesso et al, 2012; Lizarazo, 2008).

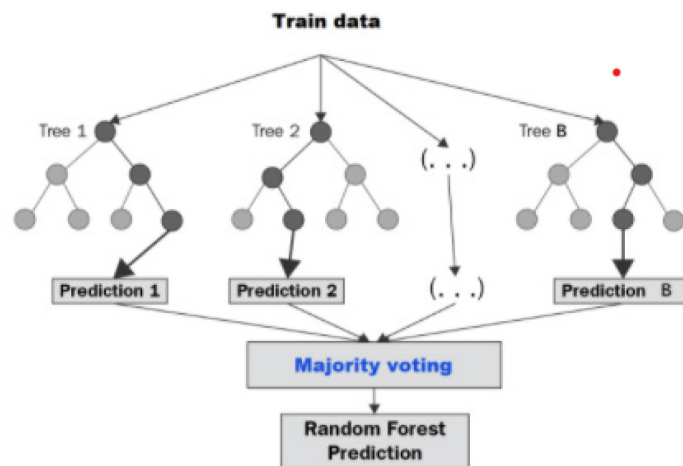
4.7.2 Bosques Aleatorios (RF por su sigla en inglés)

El algoritmo RF es una técnica de clasificación que se basa en la agregación de un gran número de árboles de decisión (Boulesteix et al, 2012), bajo la premisa de que la combinación de muchos árboles es a menudo más exacta que depender de tan solo un árbol (Lizarazo, 2010).

Este método emplea Gini como medida de impureza para seleccionar el corte de decisión con la impureza más baja en cada nodo, cada árbol emplea un conjunto diferente de m atributos para construir las reglas de partición, como se observa en la ilustración 18, y una agregación de las predicciones de cada árbol se utiliza como la predicción final. (Khalilia et al, 2011).

Ilustración 18

Simplificación ilustrada del concepto de Bosques Aleatorios (Random Forest)



Nota. Fuente: Breiman (2001).

4.8 Evaluación de la exactitud de una clasificación temática

Una manera de determinar la exactitud temática de una capa o mapa se realiza mediante la evaluación del porcentaje de coberturas clasificadas correctamente comparado con la verdad en terreno, es decir, que se analiza la exactitud tanto la capa o mapa en general como la de cada cobertura en particular; Para ello se utiliza el método de matriz de confusión (Vásquez, 2019; Story & Congalton, 1986), al igual que el coeficiente Kappa.

4.8.1 Matriz de confusión

La matriz de confusión tiene como objetivo representar los conflictos que se presentan entre las diferentes clases de una capa o mapa temático, es así como, en las columnas se establece la información de referencia de la verdad de terreno y en las filas el resultado de la clasificación a evaluar; Por su parte, la diagonal representa el número de puntos de validación en donde corresponden las dos fuentes (capa de la clasificación y verdad de terreno), mientras los datos marginales muestran los errores de clasificación. La relación entre el número de puntos correctamente clasificados y el total de puntos de validación, expresa la fiabilidad del resultado (Aronoff, 1982; Story & Congalton, 1986; Vásquez, 2019).

4.8.2 Coeficiente Kappa

Se utiliza para medir la exactitud de la clasificación expresando la concordancia entre el mapa o capa temática y la verdad en terreno extrayendo la contribución obtenida por el azar (Hudson, 1987; Vásquez, 2019) y está representado por la ecuación (77).

$$K = \frac{P(a) - P(e)}{1 - P(e)} \quad (77)$$

Donde, $P(a)$ es la porción de pixels correctamente clasificados y $P(e)$ es la probabilidad hipotética de clasificaciones correctas al azar (Vásquez, 2019).

Aunque no existe una interpretación directa intuitiva, (Landis & Koch, 1977) proponen una interpretación así:

- Valor Kappa ≤ 0.00 calidad pésima
- Valor Kappa $0.00 - 0.20$ calidad mala
- Valor Kappa $0.20 - 0.40$ calidad razonable
- Valor Kappa $0.40 - 0.60$ calidad buena
- Valor Kappa $0.60 - 0.80$ calidad muy buena
- Valor Kappa $0.80 - 1.00$ calidad excelente

5.2 Datos

5.2.1 Imagen SAR

La imagen SAR utilizada y analizada fue tomada con el sensor RADARSAT2, programa de la Agencia Espacial Canadiense, lanzado en diciembre de 2007 y está gestionado por la empresa MacDonald-Dettwiler and Associates Ltd. (MDA) y el gobierno de Canadá (Cuello et al, 2015). Las características de la imagen SAR utilizada se observan en la tabla 11 y la imagen en la ilustración 20.

Ilustración 20

Imagen SAR utilizada en la investigación

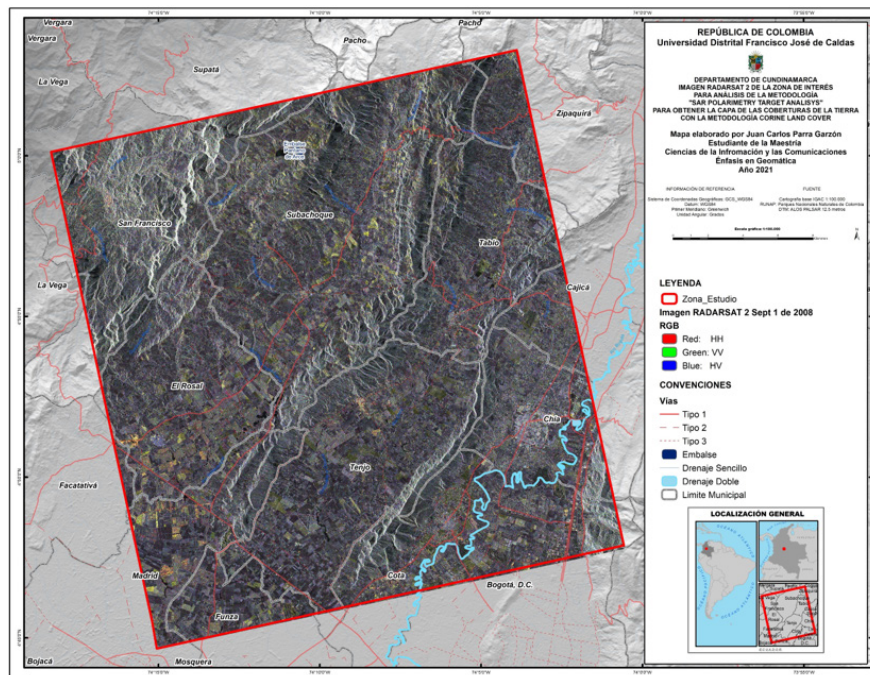


Tabla 11*Características Imagen RADARSAT 2 de la zona de estudio¹⁹*

Ítem	Características
Sensor	RADARSAT 2
ID imagen	15789
Frecuencia	5.405 GHz (banda C)
Tipo de Adquisición	Modo fino Quad Polarización
Polarización	HH + VV + HV + VH
Tamaño Pixel (Rango * Azimut) metros	5,2 * 7,6
Nivel Procesamiento	1B
Modo	Fino
Órbita	Ascendente
Ángulo de incidencia	35,5° - 37,0°
Fecha de toma	01 de septiembre de 2008
SWAT	25 Kilómetros
Resolución radiométrica	16 bit
Número de líneas (filas)	5.663
Número de Columnas	3.416
Formato	GeoTIFF
Sistema de Proyección	Geográficas Elipsoide WGS84

Nota. Fuente: Metadata imagen.

¹⁹ Imagen donada por la empresa MacDonald-Dettwiler and Associates Ltd. (MDA) en convenio con la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

5.2.2 Imágenes Ópticas

5.2.2.1 Imagen ALOS. El satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite) fue lanzado el 24 de enero de 2006 por la Agencia Espacial Japonesa (JAXA) con tres sensores de imágenes: PRISM, PALSAR y AVNIR-2 (Antunes et al, 2012), las características de la imagen se disponen en la tabla 12 y en la ilustración 21.

Tabla 12

Características Imagen ALOS AVNIR de la zona de estudio

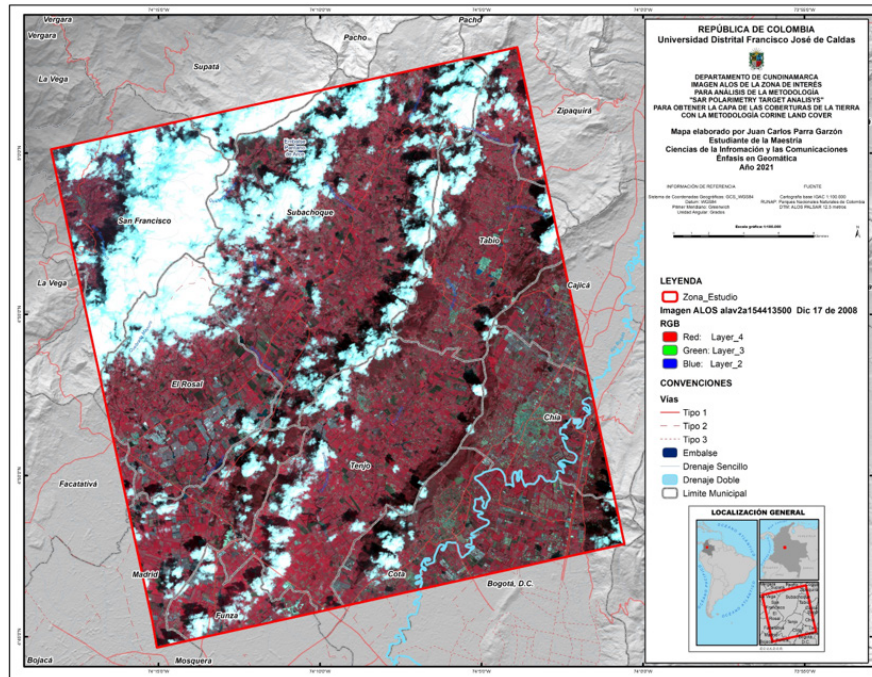
Ítem	Características
Sensor	ALOS
ID imagen	alav2a154413500
Bandas	1 Azul (0,42 – 0,50 micrómetros)
	2 Verde (0,52 – 0,60 micrómetros)
	3 Rojo (0,61 – 0,69 micrómetros)
	4 Infrarrojo cercano(0,76 – 0,89 micrómetros)
Tamaño Pixel	10 metros * 10 metros (100 metros ²)
Nivel Procesamiento	2 A
Fecha de toma	17 de diciembre de 2008
Resolución radiométrica	8 bit
Número de líneas (filas)	2.806
Número de Columnas	2.944
Formato	GeoTIFF
Sistema de proyección	Geográficas Elipsoide WGS84

Nota. Fuente²⁰: Antunes et al (2012); Metadata imagen.

²⁰ Imagen descargada de la página <https://search.asf.alaska.edu/#/> consultado 20 febrero 2021

Ilustración 21

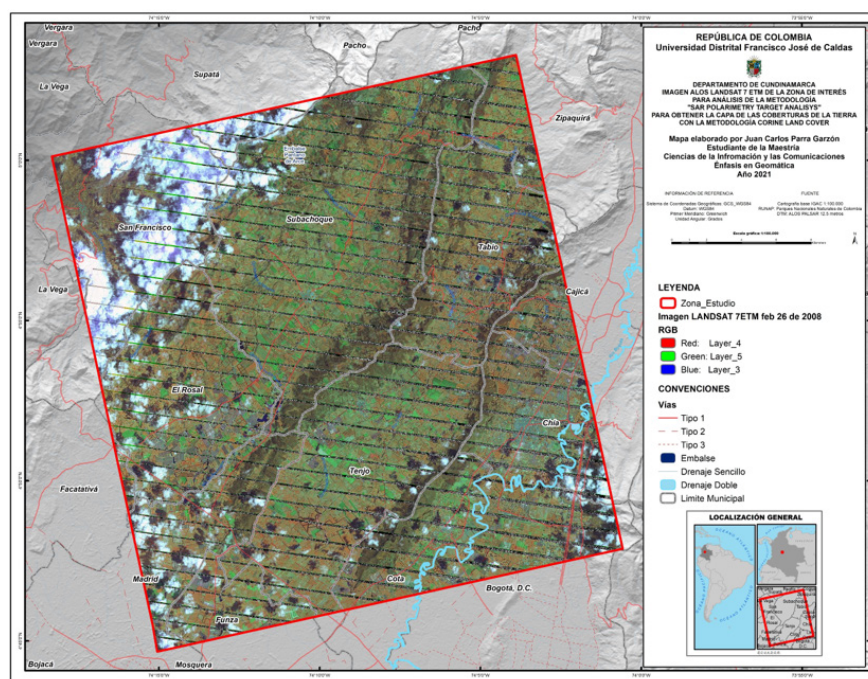
Imagen ALOS AVNIR utilizada en la investigación



5.2.2.2 Imagen Landsat 7 ETM. El satélite landsat 7 ETM (Enhanced thematic Mapper) fue lanzado por la NASA en 1999, constan de ocho bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las Bandas 1 a 5 y la 7. La resolución para la Banda 8 (pancromática) es de 15 metros. Todas las bandas pueden recopilar una de las dos configuraciones de ganancia (alta o baja) para aumentar la sensibilidad radiométrica y el rango dinámico, mientras que la Banda 6 recopila tanto la ganancia alta como la baja para todas las escenas²¹. En la tabla 13 se hace un resumen de las características principales y la ilustración 22 muestra un ejemplo de despliegue.

Ilustración 22

Imagen LANDSAT 7 ETM utilizada en la investigación



²¹https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products, consultado 28 de marzo de 2021

Tabla 13*Características Imagen Landsat 7 ETM de la zona de estudio*

Ítem	Características
Sensor	Landsat 7 ETM
ID imagen	LE07_L1TP_008057_20080226_20161230_01_T1
Bandas	1 Azul (0,45 – 0,52 micrómetros)
	2 Verde (0,52 – 0,60 micrómetros)
	3 Rojo (0,63 – 0,69 micrómetros)
	4 Infrarrojo cercano(0,76 – 0,90 micrómetros)
	5 Infrarrojo medio (1,55 – 1,75 micrómetros)
	6 Infrarrojo térmico (10,42 – 12,50 micrómetros)
	7 Infrarrojo medio (2,08 – 2,35 micrómetros)
	8 Pancromático (0,52 – 0, 90 micrómetros)
Tamaño Pixel Bandas Multiespectrales	30 metros * 30 metros (900 metros ²)
Tamaño Pixel Banda Térmica	60 metros * 60 metros (3600 metros ²)
Tamaño Pixel Banda Pancromática	15 metros * 15 metros (225 metros ²)
Nivel Procesamiento	1B
Fecha de toma	26 de febrero de 2008
Resolución radiométrica	8 bit
Formato	GeoTIFF
Sistema de proyección	Geográficas Elipsoide WGS84

Nota. Fuente²²: Metadata imagen.

²² Imagen descargada de la página <https://earthexplorer.usgs.gov/> consultado 20 de febrero de 2021

5.2.3 Modelo Digital de Elevación ALOS PALSAR

El satélite **ALOS** fue lanzado en enero del 2006 por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial en enero de 2006 y su nombre japonés es "DAICHI". El satélite ALOS durante su operación (mayo 16, 2006 – abril 22, 2011), colectó imágenes de Radar en escenas de 50 km x 70 km de todo el planeta cada 45 días aproximadamente a través de su sensor **PALSAR** (Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar)²³. La tabla 14 resume la información del archivo utilizado y la ilustración 23 su ubicación y cobertura.

Tabla 14

Características DEM ALOS PALSAR²⁴ de la zona de estudio

Ítem	Características
Sensor	ALOS PALSAR
ID imagen	AP_24945_FBD_F0080_RT1
Frecuencia	5.405 GHz (banda C)
Tipo de Adquisición	Modo fino Quad Polarización
Polarización	HH + VV + HV + VH
Tamaño Pixel (Rango * Azimut) metros	12,5 metros 12,5 metros
Fecha de toma	01 de septiembre de 2013
Resolución radiométrica	16 bit
Número de líneas (filas)	5.786
Número de Columnas	6.588
Formato	GeoTIFF
Sistema de Proyección	UTM Zona 18 N WGS84

Nota. Fuente²⁵: Metadata imagen.

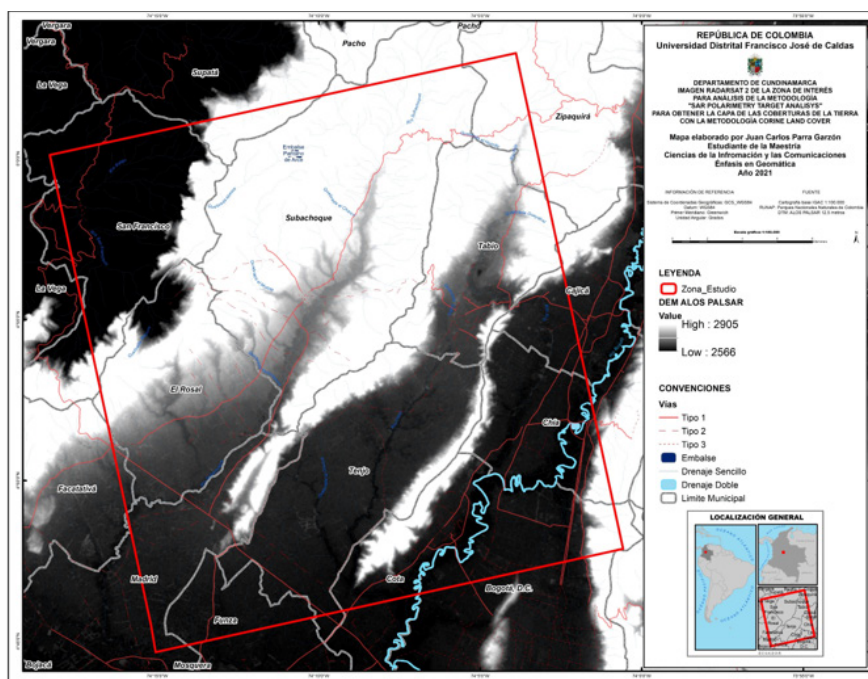
²³<https://asf.alaska.edu/data-sets/derived-data-sets/alos-palsar-rtc/alos-palsar-radiometric-terrain-correction/> consultado 25 marzo 2021

²⁴ Archivo descargado de la página web <https://search.asf.alaska.edu/#/>

²⁵<https://asf.alaska.edu/data-sets/derived-data-sets/alos-palsar-rtc/alos-palsar-radiometric-terrain-correction/> consultado 25 marzo 2021

Ilustración 23

Modelo de Elevación Digital ALOS PALSAR utilizado en la investigación



5.2.4 Herramientas

En el análisis y procesamiento de las imágenes SAR y Ópticas se utilizaron los programas para procesamiento de imágenes digitales CATALYST Profesional 2020²⁶ (anteriormente PCIGeomatics) el que cuenta con el módulo SAR Polarimetry Target Analysis (SPTA), ERDAS IMAGINE 2019²⁷ y el programa para Sistemas de Información Geográfica ARCGIS 10.8²⁸.

5.3 Metodología

Con el objeto de llevar a cabo la presente investigación, la metodología que se empleó se resume en los procesos que se presentan en la ilustración 24:

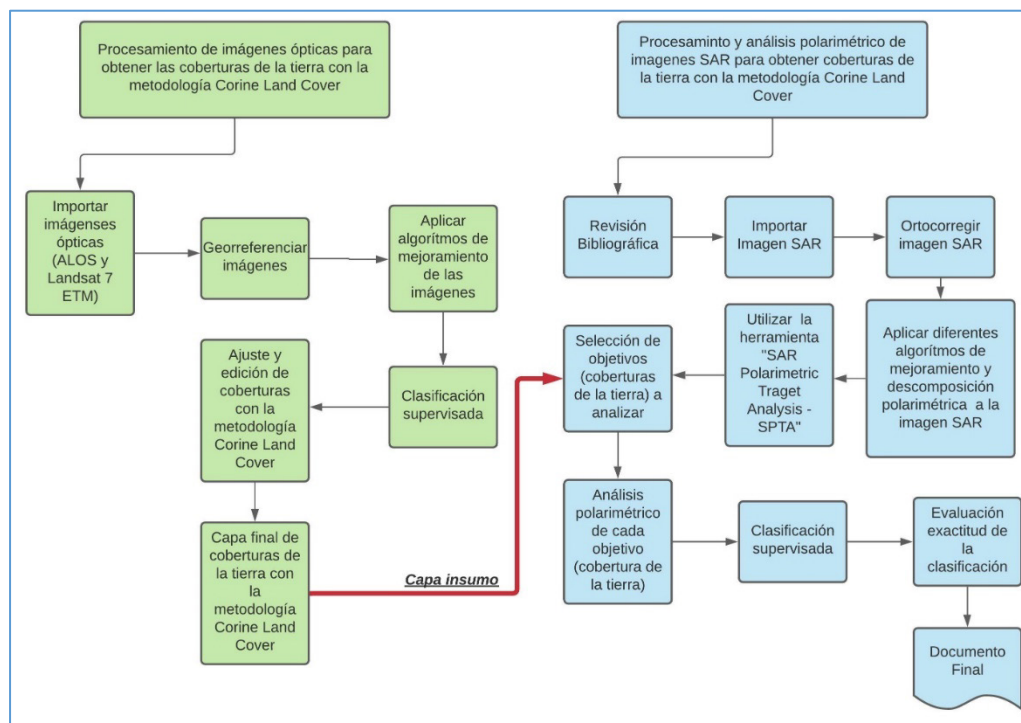
²⁶ La licencia de prueba fue gestionada por el grupo de investigación NIDE

²⁷ Se utilizó una de las licencias con las que cuenta la Universidad Distrital Francisco José de Caldas

²⁸ La licencia de prueba fue gestionada por el grupo de investigación NIDE

Ilustración 24

Metodología general propuesta para la investigación



5.3.1 Capa de coberturas de la tierra con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia (CLCC)

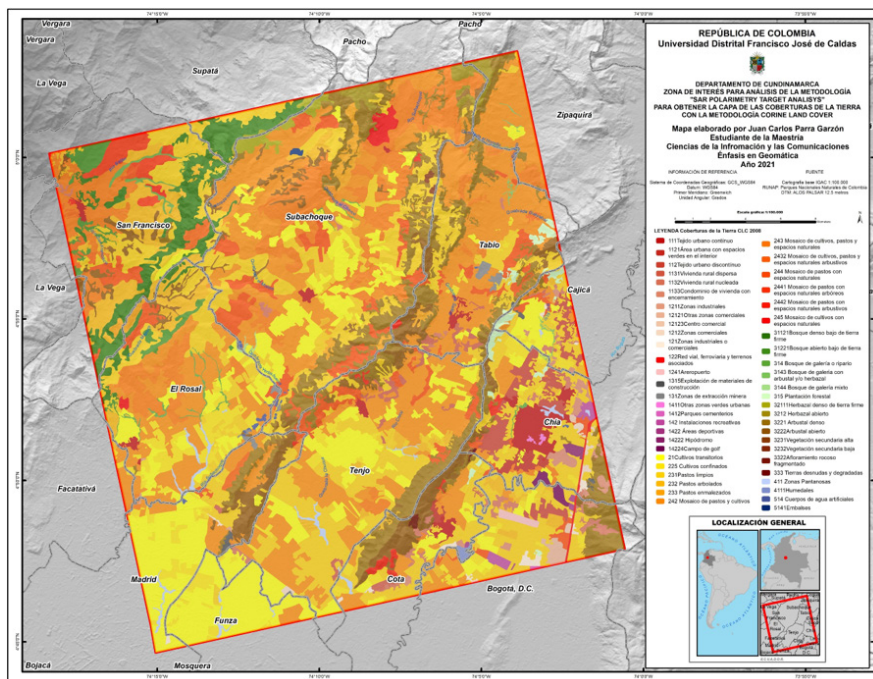
Como punto de partida se debe tener la capa de coberturas de la tierra con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia en la zona de estudio. Teniendo en cuenta la fecha de la imagen SAR que se utilizó para la investigación (1° de septiembre de 2008), se hizo necesario conseguir imágenes ópticas de la misma zona tomadas fechas cercanas (ver tablas 12 y 13) con las que se generó el mapa de coberturas de la tierra con la metodología CORINE Land Cover²⁹, el que se ajustó en su exactitud utilizando la capa de coberturas oficial generada por IDEAM del periodo 2005 – 2009, como se dispone en la ilustración 25; La leyenda que se implementó se muestra en la ilustración 26, llegando en la mayoría de los casos al nivel tres. La capa de coberturas de la tierra se toma como insumo base para el análisis visual

²⁹ Se utilizó la metodología que se muestra en la ilustración 2. El procesamiento digital de las imágenes ópticas (ALOS y Landsat 7 ETM) se realizó con el software ERDAS Imagine 2019 y la edición vectorial en ARCGIS 10.8.

inicial y la toma de muestras (objetivos) en la imagen SAR, así como para determinar la exactitud temática final.

Ilustración 25

Capa de coberturas de la tierra con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia



Nota. La capa de coberturas se obtuvo a partir de las imágenes ALOS y Landsat 7 ETM del año 2008.

Ilustración 26

Leyenda de coberturas de la tierra con la metodología CORINE Land Cover

LEYENDA NACIONAL DE COBERTURAS DE LA TIERRA - COLOMBIA	
1. TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS	3. BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES
1.1. Zonas urbanizadas	3.1. Bosques
1.1.1. Tejido urbano continuo	3.1.1. Bosque denso
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	3.1.1.1.1. Bosque denso alto de tierra firme
1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	3.1.1.1.2. Bosque denso alto inundable
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme
1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable
1.2.3. Zonas portuarias	3.1.2. Bosque abierto
1.2.4. Aeropuertos	3.1.2.1.1. Bosque abierto alto de tierra firme
1.2.5. Obras hidráulicas	3.1.2.1.2. Bosque abierto alto inundable
1.3. Zonas de extracción minera y escombreras	3.1.2.2.1. Bosque abierto bajo de tierra firme
1.3.1. Zonas de extracción minera	3.1.2.2.2. Bosque abierto bajo inundable
1.3.2. Zonas de disposición de residuos	3.1.3. Bosque fragmentado
1.4. Zonas verdes artificializadas, no agrícolas	3.1.4. Bosque de galería y ripario
1.4.1. Zonas verdes urbanas	3.1.5. Plantación forestal
1.4.2. Instalaciones recreativa	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva
2. TERRITORIOS AGRÍCOLAS	3.2.1.1. Herbazal denso
2.1. Cultivos transitorios	3.2.1.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado
2.1.1. Otros cultivos transitorios	3.2.1.1.1.2. Herbazal denso de tierra firme arbolado
2.1.2. Cereales	3.2.1.1.1.3. Herbazal denso de tierra firme con arbustos
2.1.3. Oleaginosas y leguminosas	3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado
2.1.4. Hortalizas	3.2.1.1.2.2. Herbazal denso inundable arbolado
2.1.5. Tubérculos	3.2.1.1.2.3. Arracachal
2.2. Cultivos permanentes	3.2.1.1.2.4. Helechal
2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	3.2.1.2. Herbazal abierto
2.2.1.1. Otros cultivos permanentes herbáceos	3.2.1.2.1. Herbazal abierto arenoso
2.2.1.2. Caña	3.2.1.2.2. Herbazal abierto rocoso
2.2.1.3. Plátano y banano	3.2.2.1. Arbustal denso
2.2.1.4. Tabaco	3.2.2.2. Arbustal abierto
2.2.1.5. Papaya	3.2.3. Vegetación secundaria o en transición
2.2.1.6. Amapola	3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	3.3.1. Zonas arenosas naturales
2.2.2.1. Otros cultivos permanentes arbustivos	3.3.2. Afloramientos rocosos
2.2.2.2. Café	3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
2.2.2.3. Cacao	3.3.4. Zonas quemadas
2.2.2.4. Viñedos	3.3.5. Zonas glaciares y nivales
2.2.2.5. Coca	4. AREAS HÚMEDAS
2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	4.1. Áreas húmedas continentales
2.2.3.1. Otros cultivos permanentes arbóreos	4.1.1. Zonas Pantanosas
2.2.3.2. Palma de aceite	4.1.2. Turberas
2.2.3.3. Cítricos	4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua
2.2.3.4. Mango	4.2. Áreas húmedas costeras
2.2.4. Cultivos agroforestales	4.2.1. Pantanos costeros
2.2.5. Cultivos confinados	4.2.2. Saltral
2.3. Pastos	4.2.3. Sedimentos expuestos en bajamar
2.3.1. Pastos limpios	5. SUPERFICIES DE AGUA
2.3.2. Pastos arbolados	5.1. Aguas continentales
2.3.3. Pastos enmalezados	5.1.1. Ríos (50 m)
2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales
2.4.1. Mosaico de cultivos	5.1.3. Canales
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	5.1.4. Cuerpos de agua artificiales
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	5.2. Aguas marítimas
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	5.2.1. Lagunas costeras
2.4.5. Mosaico de cultivos y espacios naturales	5.2.2. Mares y océanos
	5.2.3. Estanques para acuicultura marina

Nota. Fuente: IDEAM (2010).

5.3.2 Procesamiento de la imagen SAR

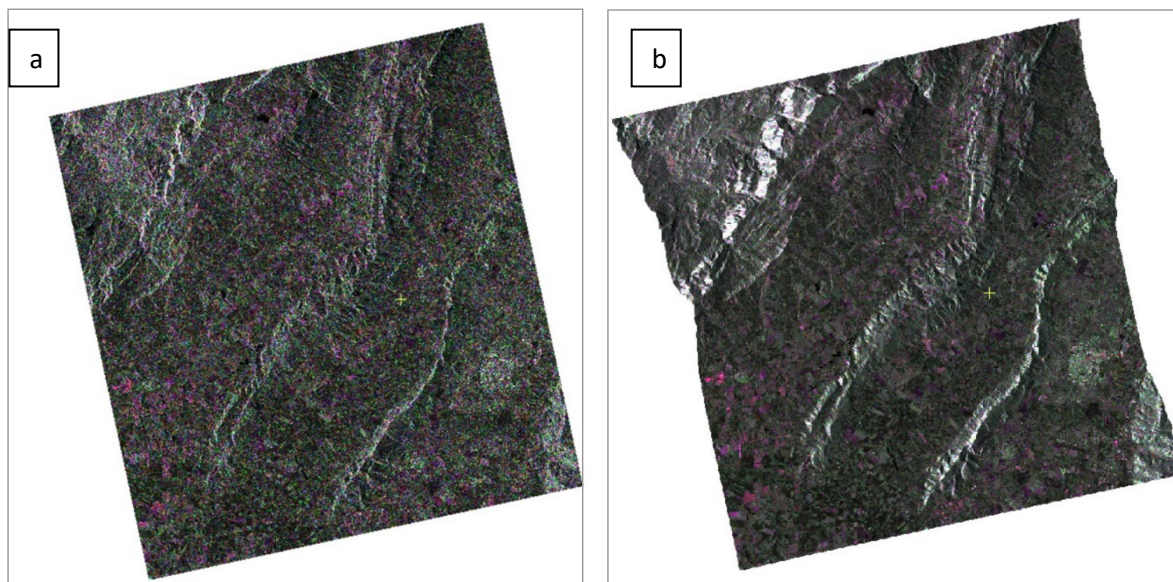
5.3.2.1 Importar la imagen SAR. La imagen SAR utilizada, ver tabla 11, se importó al formato .pix, el cual es nativo del programa CATALYST Profesional, utilizando el proceso llamado "SARINGEST".

5.3.2.2 Ortorección de la imagen SAR. El proceso de Ortorección de una imagen SAR permite eliminar las diferencias en los ángulos de incidencia y minimiza la desviación en las posiciones en terreno (Veljanovski et al, 2011), al mismo tiempo que permite geolocalizar la imagen (asociarla a un sistema de proyección cartográfica). Para realizar este proceso se requiere como mínimo tener un modelo de elevación digital y puntos de control (GCP de terreno tomados con GPS que va a bordo del satélite).

La ortorección de la imagen SAR utilizada, ver tabla 11, se realizó con el módulo de OrthoEngine que viene en el programa CATALYST Profesional, utilizando el modelo de elevación digital descrito en la tabla 14 y la metadata de la imagen SAR para obtener las ephemeris de los puntos GCP³⁰. La ilustración 27 muestra la imagen sin ortoregistrar y la imagen ortoregida.

Ilustración 27

Imagen SAR sin ortoregistrar y ortoregida



Nota. ^a. Imagen sin ortoregistrar, ^b. Imagen sin ortoregida

³⁰ Hoy en día, la mayoría de los sensores proporcionan información que describe la geolocalización de los datos adquiridos obtenidos por los receptores GPS a bordo del satélite. En su forma más simple, a información de geolocalización corresponde a las coordenadas geográficas de cada esquina.

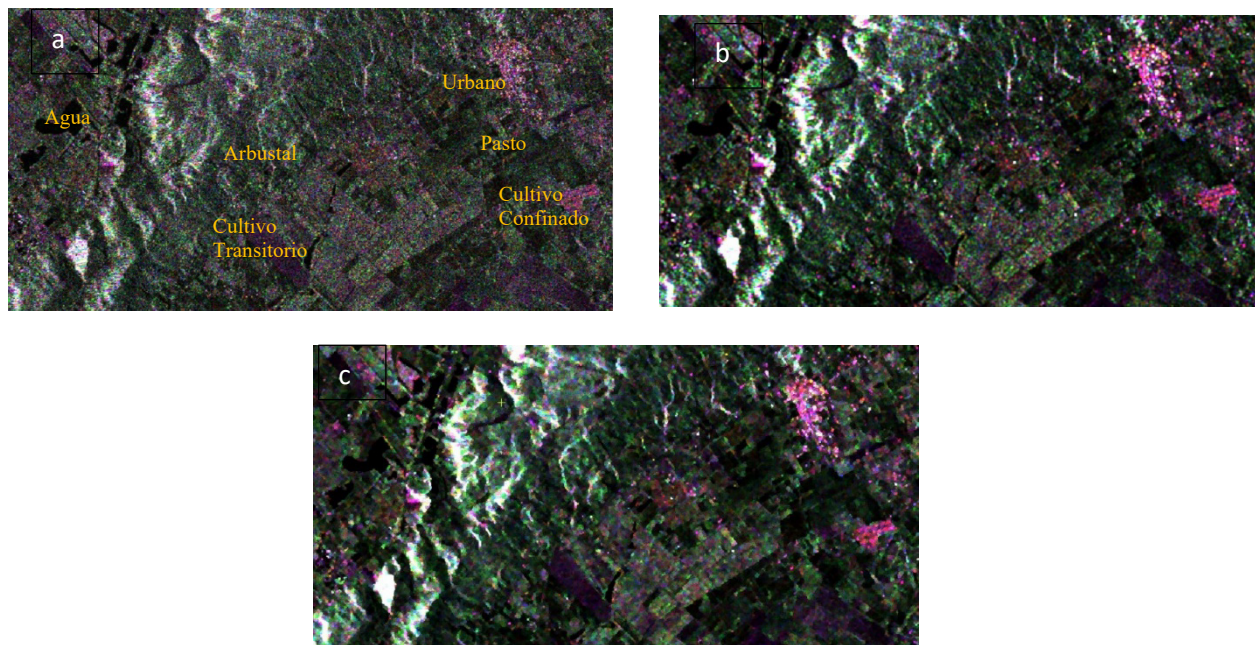
5.3.2.3 Algoritmos para mejorar la imagen SAR

5.3.2.3.1 Realce radiométrico. El objetivo del realce radiométrico es mejorar la interpretación de la información radiométrica en una imagen mediante el uso de filtros espaciales y de moteado. Estos filtros pueden reducir el moteado, detectar bordes, analizar texturas y mejorar visualmente la imagen.

La variación de la imagen, o moteado, es un ruido granular inherente a las imágenes SAR. El moteado da un aspecto granulado, sal y pimienta y tiende a ser un factor dominante en las imágenes de radar. Los filtros de moteado se utilizan principalmente con datos de radar para eliminar el ruido de alta frecuencia (moteado), al tiempo que conserva las características de alta frecuencia (bordes) (PCIGeomatics, 2018). Luego de ejecutar varios filtros que contiene el programa CATALYST Profesional, se determinó que los mejores resultados visuales se obtuvieron al aplicar los filtros polarimétricos que se muestran en la ilustración 28 y se describen en la tabla 15.

Ilustración 28

Comparación Imagen SAR sin filtro y con filtro



Nota. ^a. Imagen SAR sin filtro, ^b. Imagen SARPSBOXCAR de 3x3, ^c. Imagen SAR con filtro de Lee 5X5.

Tabla 15

Características de los filtros que se le aplicaron a la imagen SAR utilizada para la investigación

Nombre filtro	Descripción
Filtro de Lee de 5 X 5	Se utiliza principalmente en datos SAR para eliminar el ruido de alta frecuencia (moteado) y al mismo tiempo preservar las características de alta frecuencia (bordes).
PSBOXCAR de 3 X 3	Aplica un filtro a cualquier conjunto de datos SAR detectado o de valor complejo. Se utiliza comúnmente para aumentar el número efectivo de miradas (ENL) en los datos SAR de una o varias miradas. PSBOXCAR reduce el moteado inherente a las imágenes SAR mediante el promedio local, al tiempo que conserva la información polarimétrica.

Nota. Fuente: PCIGeomatics (2018).

5.3.2.3.2 Algoritmos de descomposiciones polarimétricas utilizados en la investigación.

En este aspecto, se le aplicaron a la imagen SAR, objeto de estudio, diferentes algoritmos de descomposiciones polarimétricas para poder determinar el comportamiento de las diferentes coberturas terrestres respecto a los parámetros que tiene cada descomposición polarimétrica, los que se relacionan en la tabla 16.

Tabla 16

Características de las descomposiciones polarimétricas que se le aplicaron a la imagen SAR utilizada para la investigación

Descomposición polarimétrica	Descripción
PSKROG Krogager decomposition ^a .	<p>Calcula una serie de discriminadores polarimétricos para un conjunto de datos SAR completamente polarimétrico (POLSAR), ver anexo A. Los parámetros son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Poder de dispersión esférica • Poder de dispersión dipole • Poder de dispersión helicoidal

Calcula una serie de discriminadores polarimétricos para un conjunto de datos SAR completamente polarimétrico (POLSAR). Los discriminadores polarimétricos son útiles para caracterizar las características de su imagen identificando los diferentes tipos de mecanismos de dispersión. Los discriminadores se basan en la síntesis polarimétrica y describen la respuesta polarimétrica de las características de la imagen, ver Anexo B.

Éstos incluyen:

PSPOLDIS

POLSAR discriminators^b

- Grado mínimo y máximo de polarización
- Componente mínimo y máximo completamente polarizado
- Componente mínimo y máximo completamente despolarizado
- Potencia recibida mínima y máxima
- Intensidad dispersa mínima y máxima
- Coeficiente de variación
- Polarización fraccionada

Los ángulos de orientación y elipticidad para los extremos del componente completamente polarizado también se escriben en el archivo de salida.

Divide la potencia total en cada píxel de la imagen, ver anexo C, en

PSFREDUR Freeman-

Durden decomposition^c

contribuciones de tres mecanismos de dispersión:

- Doble rebote, como elementos urbanos;
- Volumen, como el dosel de la vegetación; y
- Rugosidad de superficie, como el agua.

Estima la contribución de poder en:

PSPHDW

POLSAR

PHDW decomposition^d

- Dispersión diplane
- Dispersión helix
- Dispersión de plate
- Dispersión de wire

Ver anexo D.

PSTOUZIDEC POLSAR

Touzi decomposition^e

Realiza una descomposición incoherente de dispersión del objetivo en parámetros invariantes para un conjunto de datos SAR completamente polarimétrico (POLSAR). Crea una imagen de 15 parámetros de descomposición, ver anexo E. Para cada uno de los vectores propios

primarios, secundarios y terciarios, se calculan el ángulo de orientación (ψ), el valor propio dominante (λ), el ángulo alfa de Touzi, la fase de Touzi y la helicoidal (τ). Estos parámetros caracterizan las propiedades de la dispersión parcialmente coherente calculando la proporción y el tipo de mecanismo de dispersión para todas las características de su imagen. Esta información se puede utilizar más para la clasificación o interpretación de imágenes.

PSEABA

Entropy, alpha, beta,
and anisotropy^f

Genera una imagen de cuatro parámetros para un conjunto de datos SAR completamente polarimétrico (POLSAR): entropía, ángulo alfa, ángulo beta y anisotropía, ver anexo F. Estos parámetros caracterizan las propiedades de la dispersión parcialmente coherente calculando la proporción y el tipo de mecanismo de dispersión para todas las características de su imagen. Esta información se puede utilizar más para la clasificación de imágenes. Los autovalores y autovectores usados para calcular estos parámetros también se pueden generar, si es necesario.

PSVANZYL

Unsupervised
Van Zyl classification^g

Realiza una clasificación Van Zyl sin supervisión de un conjunto de datos SAR completamente polarimétrico (POLSAR), ver anexo G. Clasifica los píxeles de la imagen en el más dominante de los tres tipos de dispersión: superficie, diedro y volumen.

Nota. ^a Fuente: Krogager (1998)

^b Fuente: Touzi et al (1992)

^c Fuente: Freeman & Durden (1998)

^d Fuente: Yajima et al (2008)

^e Fuente: Touzi (2007)

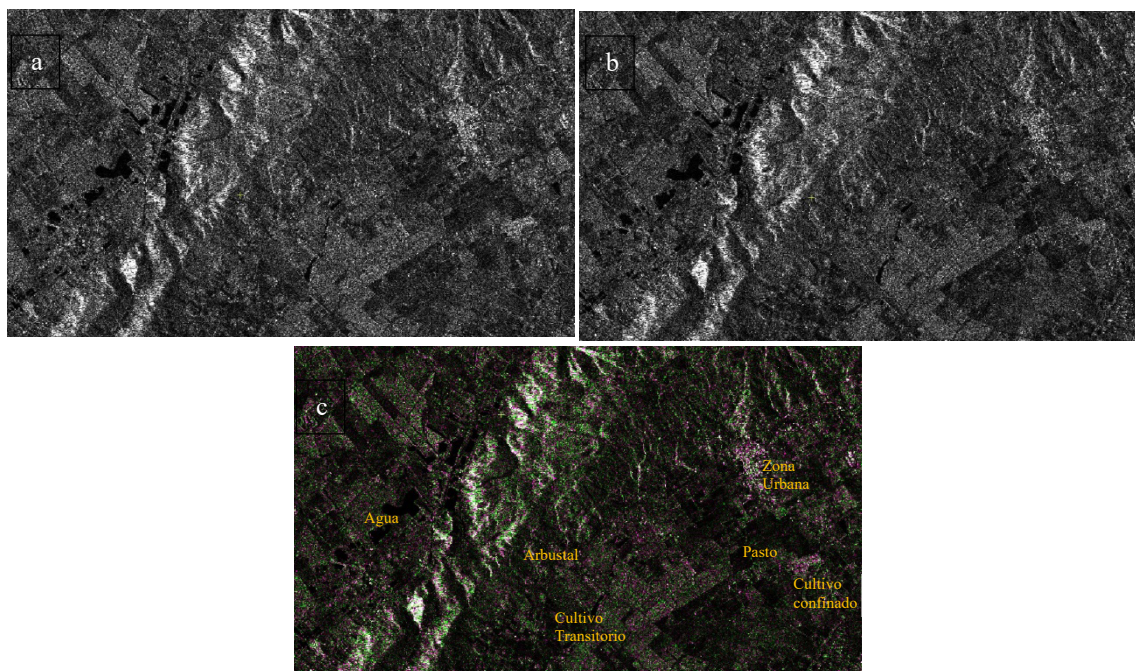
^f Fuente: Cloude- & Pottier (1997)

^g Fuente: Van Zyl (1989).

5.3.2.3.3 Algoritmos de síntesis de canal polarimétrico utilizados en la investigación. PSS2C es un algoritmo que genera un par de canales coherentes sintetizados basados en polarizaciones de transmisión y recepción definidas por el usuario, como se muestra en la ilustración 29, el archivo de entrada debe representar un conjunto de datos SAR completamente polarimétricos (cuádruple polarización) no simetrizados o simétricos en formato de matriz de dispersión (PCIGeomatics, 2018).

Ilustración 29

Algoritmo PSS2C aplicado a la imagen Radarsat de estudio



Nota. ^a. Componente complejo 1.1 de la matriz de dispersión, ^b. Componente complejo 1.2 de la matriz de dispersión, ^c. R: Componente complejo 1.1 de la matriz de dispersión G: Componente complejo 1.2 de la matriz de dispersión B: Componente complejo 1.1 de la matriz de dispersión.

Para una onda electromagnética totalmente polarizada, la punta del vector de campo eléctrico traza una elipse en un plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda. La elipse de polarización está definida por dos parámetros: orientación y elipticidad. La orientación de la elipse, PSI, se define como el ángulo formado por el eje mayor de la elipse con respecto a la horizontal, y puede oscilar entre -90 y +90 grados. El ángulo de elipticidad, CHI, se define como la arcotangente de la relación entre el eje menor y el eje mayor de la elipse, y puede oscilar entre -45 y +45 grados. Los valores de transmisión (TPSI, TCHI) y recepción (RPSI, RCHI) se registran como metadatos para cada capa de salida (PCIGeomatics, 2018).

Las polarizaciones circulares y lineales son los aspectos limitantes de la elipse. Con polarizaciones circulares, la orientación es de 0 grados y la elipticidad es de 45 grados. Una elipticidad de CHI de +45 grados corresponde a una polarización circular izquierda y -45 grados corresponde a una polarización circular derecha. Con polarizaciones lineales, la orientación del eje se define en grados con respecto al eje horizontal y la elipticidad se establece en cero. Establecer la orientación de PSI a cero corresponde a una polarización horizontal y 90 corresponde a una polarización vertical (PCIGeomatics, 2018).

La salida sintetizada para cada canal se define por la orientación y elipticidad del transmisor seguidas de la orientación y elipticidad del receptor. Se han predefinido varias polarizaciones estándar. Estos incluyen lineal-horizontal ($H = h = 0, 0$), lineal-vertical ($V = v = 90, 0$), circular a la izquierda ($L = l = 0, 45$) y circular a la derecha ($R = r = 0, -45$). Para polarizaciones no estándar, se requieren los valores de orientación y elipticidad para el transmisor y el receptor (PCIGeomatics, 2018).

Este método crea los vectores unitarios de polarización lineal para transmitir y recibir en la base horizontal-vertical. Los vectores se construyen a partir de los ángulos de elipticidad y orientación de las polarizaciones especificadas en los parámetros TPSI, TCHI, RPSI y RCHI (PCIGeomatics, 2018).

Para cada canal, la salida sintetizada se genera multiplicando el vector unitario de la polarización de transmisión por la matriz de dispersión cuádruple completa original, luego el resultado intermedio se multiplica por la transposición del vector unitario que representa la polarización de recepción. Para la entrada de dispersión (S3c o S4c) ver ilustración 30, la salida se escribe como dos canales de dispersión de valores complejos (tipo de matriz S2c) ver ilustración 30. Para todas las entradas de covarianza, coherencia o Kennaugh, la salida se escribe como una matriz de covarianza con dos canales reales que representan las intensidades y un canal de valor complejo que representa la covarianza compleja de las polarizaciones solicitadas, como se muestra en la ilustración 29.

5.3.2.3.4 Algoritmos de conversión de la representación matricial. Existen diferentes formas de caracterizar los datos SAR de acuerdo al tipo de matriz que lo determina, el tipo de canal (complejo “c” o detectado “r”) y configuración de transmisión/recepción de la señal, como se describen en la ilustración 30.

El número de canales en la imagen de salida se puede derivar del tipo de matriz de salida y es igual al número de elementos reales más el número de elementos complejos; por ejemplo, la matriz C4r6c se almacena en $4 + 6 = 10$ canales (PCIGeomatic, 2018).

Ilustración 30

Tipos de matrices que representan las imágenes SAR

Table 5. **Matrix types: complex data**

Symbol	Full name	Total no. of channels
s4c	Nonsymmetrized scattering matrix (single-look only)	4
S3c	Symmetrized scattering matrix	3
s2c	Incomplete scattering matrix (dual-pol, single-look only)	2
s1c	Incomplete scattering matrix (single-pol, single-look only)	1
c4r6c	Nonsymmetrized covariance matrix (best for multilook)	10
C3r3c	Symmetrized covariance matrix	6
c2r1c	Incomplete covariance matrix (best for dual-pol, multilook)	3
t4r6c	Nonsymmetrized coherence matrix (best for multilook)	10
T3r3c	Symmetrized coherence matrix	6
k16r	Nonsymmetrized Kennaugh matrix (best for multilook)	16
K9r	Symmetrized Kennaugh matrix	9

The following table describes the matrix types for **detected data**.

Table 6. **Matrix types: detected data**

Symbol	Full name	Total no. of Channels
c4r	Incomplete nonsymmetrized covariance matrix (fully polarimetric detected, single-look, or multilook)	4
c3r	Incomplete symmetrized covariance matrix (fully polarimetric detected, single-look, or multilook)	3
c2r	Incomplete covariance matrix (dual-pol, detected, single-look, or multilook)	2
c1r	Incomplete covariance matrix (single-pol, detected, single-look, or multilook)	1

Nota. Fuente: PCIGeomatics (2018).

El conjunto de datos de SAR polarimétrico de entrada debe representar un conjunto de datos completamente polarimétrico (cuádruple polarización, complejo) no simétrico o simétrico en el formato de matriz de covarianza (c4r6c o C3r3c), coherencia (t4r6c o T3r3c) o Kennaugh (k16r o K9r), ver ilustración 30. Para el análisis, la matriz de entrada se convierte internamente al formato de covarianza simetrizado, C3r3c (PCIGeomatics, 2018).

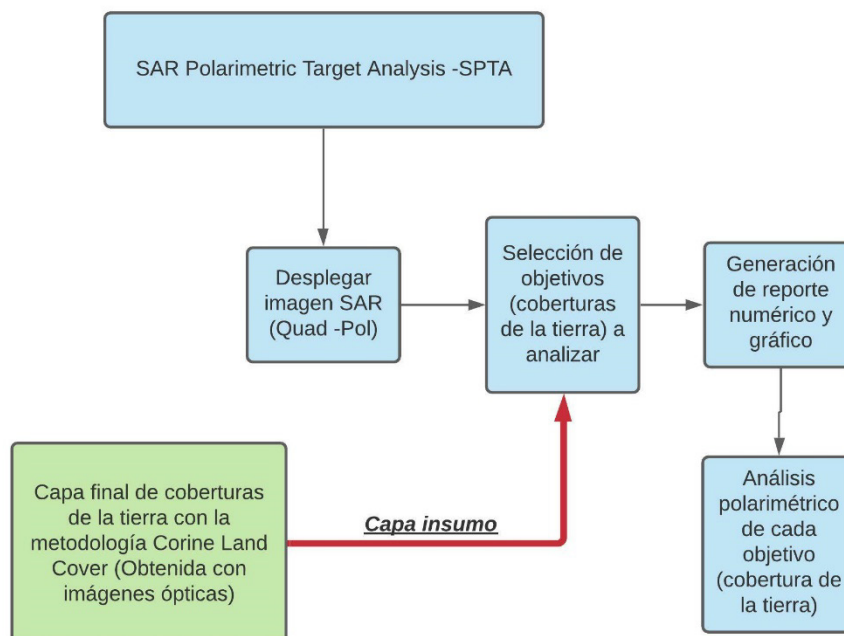
En el caso de la presente investigación se ejecutaron los procesos: PSCONV – c4r6c, ver anexo H, y PSCONV – c3r3c, ver anexo I.

5.3.3 Análisis polarimétrico de objetivos en imágenes SAR (SPTA) por su sigla en inglés

Es un módulo, presente en el programa CATALYST Profesional, que permite realizar análisis polarimétricos a datos complejos provenientes de imágenes SAR completamente polarizadas (Quad-Pol); Se utiliza para seleccionar objetivos o grupos de pixels de los que se puede obtener información que se muestra en formato numérico o gráfico para su análisis. La ilustración 31 resume el proceso con el módulo SPTA.

Ilustración 31

Procesos con el módulo SPTA



5.3.3.1 Despliegue de imágenes SAR. Inicialmente se intentó desplegar todas las imágenes o capas que resultaron al aplicar diferentes algoritmos para mejorar la imagen SAR, descritos en el aparte “5.3.2.3.”, no obstante, aquellas que SPTA dejó desplegar teniendo en cuenta la característica de ser totalmente polarimétricas (Quad –Pol), fueron las que se relacionan en la tabla 17.

Tabla 17

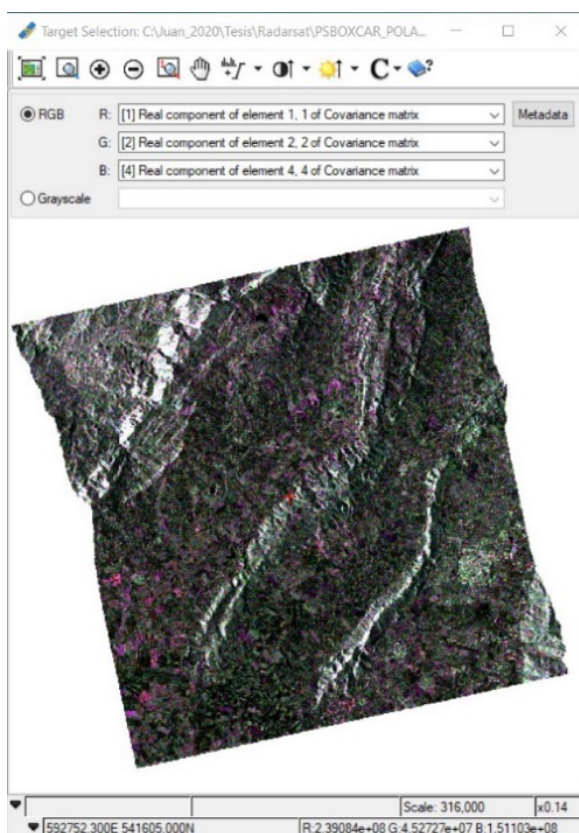
Imágenes que cumplieron con las características para despliegue en SPTA

Algoritmos de mejoramiento aplicados a la imagen SAR
PSBoxcar 3 x 3
Filtro de Lee 5 x 5
PSCONV C4R6C
PSCONV C3R3C

Un ejemplo de despliegue de una imagen SAR en SPTA se muestra en la ilustración 42, en donde la herramienta de despliegue de imágenes del módulo PSTA, permite realizar composiciones a color RGB y mejoramientos de brillo y contraste o manejo de histogramas (stretch), acercamientos, entre otros.

Ilustración 32

Ejemplo de despliegue de imagen SAR con mejoramiento PSBOXCAR de 3 x 3 con el módulo SPTA



5.3.3.2 Selección de objetivos (coberturas de la tierra). En el caso de estudio específico, a partir de la capa de coberturas de la tierra que se realizó con imágenes ópticas utilizando la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia y teniendo en cuenta la complejidad de la zona para determinar coberturas de la tierra homogéneas, se seleccionaron nueve clases de coberturas terrestres, las que se relacionan en la tabla 18, con el objeto de determinar las características polarimétricas, a través de diferentes algoritmos que se han desarrollado en SPTA.

Tabla 18

Coberturas de la tierra seleccionadas³¹ para analizar con SPTA

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
1. Territorios Artificializados	1.1. Zonas Urbanizadas	1.1.1. Tejido Urbano Continuo	
2. Territorios Agrícolas	2.1. Cultivos Anuales o Transitorios		
	2.2. Cultivos Permanentes	2.2.9. Cultivos Confinados	
	2.3. Pastos	2.3.1. Pastos Limpios	
3. Bosques y Áreas Seminaturales	3.1. Bosques	3.1.1. Bosque Natural Denso 3.1.5. Bosque Plantado	
	3.2. Áreas con Vegetación Herbácea o Arbustiva	3.2.1. Pastos Naturales o Sabanas 3.2.2. Arbustos y Matorrales	3.2.1.1. Herbazal Denso 3.2.2.1 Arbustal Denso
5. Superficies de Agua	5.1. Aguas Continentales		

Nota. Fuente: Elaboración Propia, tomado de la leyenda CORINE Land Cover IDEAM(2010).

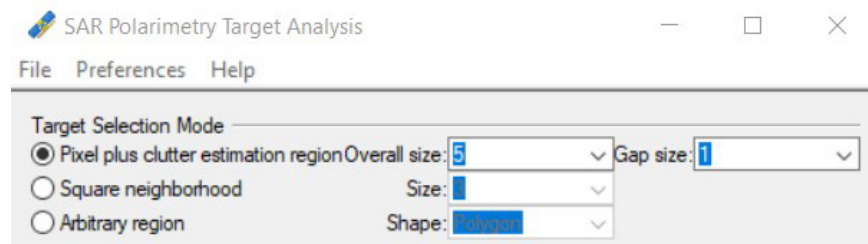
Los objetivos se tomaron en cada una de las imágenes SAR relacionadas en la tabla 17. En resumen, se utilizaron cuatro imágenes y nueve objetivos por cada imagen.

SPTA tiene tres maneras para seleccionar los objetivos, como se muestra en la ilustración 33.

³¹ Las coberturas seleccionadas son las que se encuentran sombreadas en la tabla

Ilustración 33

Maneras disponibles en SPTA para toma de objetivos



Luego de realizar varias pruebas, se determinó que la manera de selección de objetivos que arrojó mejor resultado para la investigación fue la de “Pixel plus clutter estimation region Overall” con size de 9 y Gap size de 1. La ilustración 34 presenta la ubicación de los objetivos tomados y la ilustración 35 el ejemplo de la toma del objetivo de cultivo confinado.

Ilustración 34

Ubicación de los objetivos tomados con SPTA

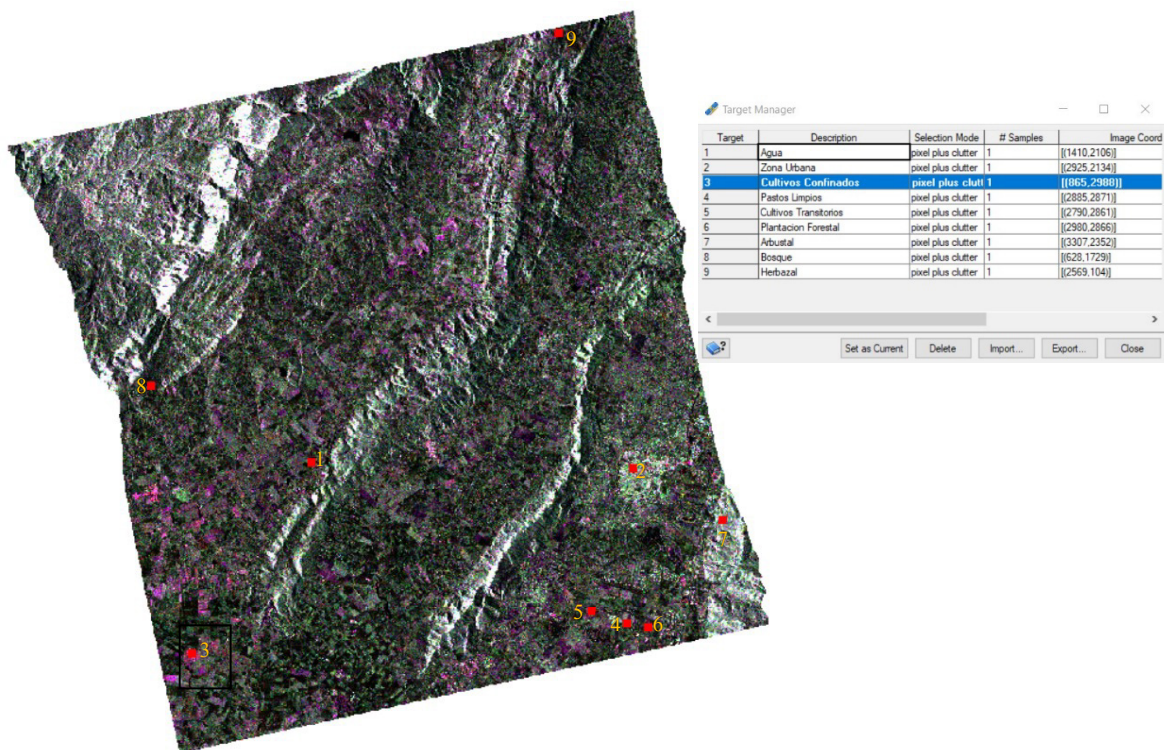
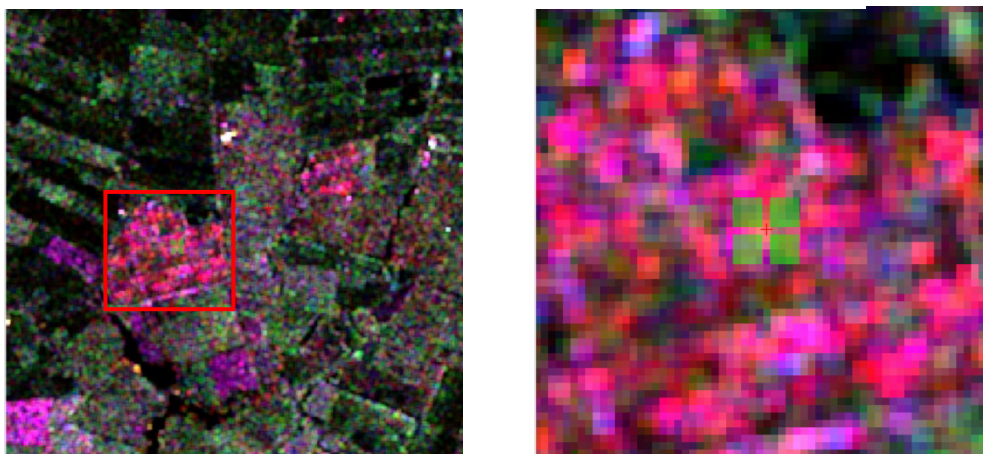


Ilustración 35

Ejemplo toma de objetivo (cultivo confinado) en SPTA



Los objetivos quedan guardados en un archivo vectorial, el que se puede cargar a cada una de las imágenes SAR, objeto de análisis polarimétrico en SPTA, a través del “Target Manager”, lo que estandariza la ubicación de los objetivos para obtener los reportes numéricos y gráficos.

5.3.3.3 Generación de reporte numérico y gráfico. SPTA tiene la capacidad de realizar reportes numéricos y gráficos de cada objetivo seleccionado (nueve objetivos) en cada una de las imágenes SAR (cuatro imágenes SAR), las que se utilizaron para la investigación.

5.3.3.3.1 Reporte numérico. Las opciones para obtener reporte numérico se muestran en la ilustración 36, en donde, para un objetivo incoherente como lo son las coberturas de la tierra, se encuentran habilitadas las siguientes opciones:

- Representaciones matriciales (recuadro A)
- Parámetros y discriminadores (recuadro B)
- Comparaciones de canales (recuadro C)

Finalmente, para obtener el reporte de los resultados numéricos (recuadro D), se ejecuta calcular (cuadro E). (PCIGeomatics, 2018)

Ilustración 36

Opciones de reporte numérico en SPTA

The image shows the 'Numerical Output' dialog box in SPTA software. It is divided into several sections, with specific options highlighted by red boxes and labeled A through E:

- A:** Matrix Representations section. The 'Kennaugh matrix' checkbox is checked.
- B:** Parameters and Discriminators section. 'Total power', 'Pedestal height', 'van Zyl classification', 'Freeman-Durden parameters', 'Cloude-Pottier classification', 'Polarimetric discriminators', 'Touzi decomposition', and 'H\A\B' are all checked.
- C:** Channel Comparisons section. 'Intensity ratio' is checked. The polarization channels are set to 'HH' and 'HV'.
- D:** Results section. The output text is visible, including:


```

      Minimum of the scattered intensity: 0.125658 (linear)
      Coefficient of variation: 0.292106
      Fractional Power: 0.54786

      ==== Pedestal Height ====
      0.0581325 (linear)

      ==== Freeman Durden Parameters ====
      Power contributions due to double-bounce: 0.0020259 (linear) (0.800392%)
      Power contributions due to volume scattering: 0.229974 (linear) (90.858%)
      Power contributions due to rough surface: 0.0211138 (linear) (8.34163%)
      
```
- E:** The 'Compute' button is highlighted.

Nota. Fuente: PCleomatics (2018).

En la presente investigación, se ejecutaron todas las opciones de reporte numérico para cada objetivo en cada imagen utilizada.

5.3.3.3.2 Reporte gráfico. SPTA tiene tres opciones para generar gráficos de los datos, cada uno se puede configurar de varias formas, como se observa en la ilustración 37:

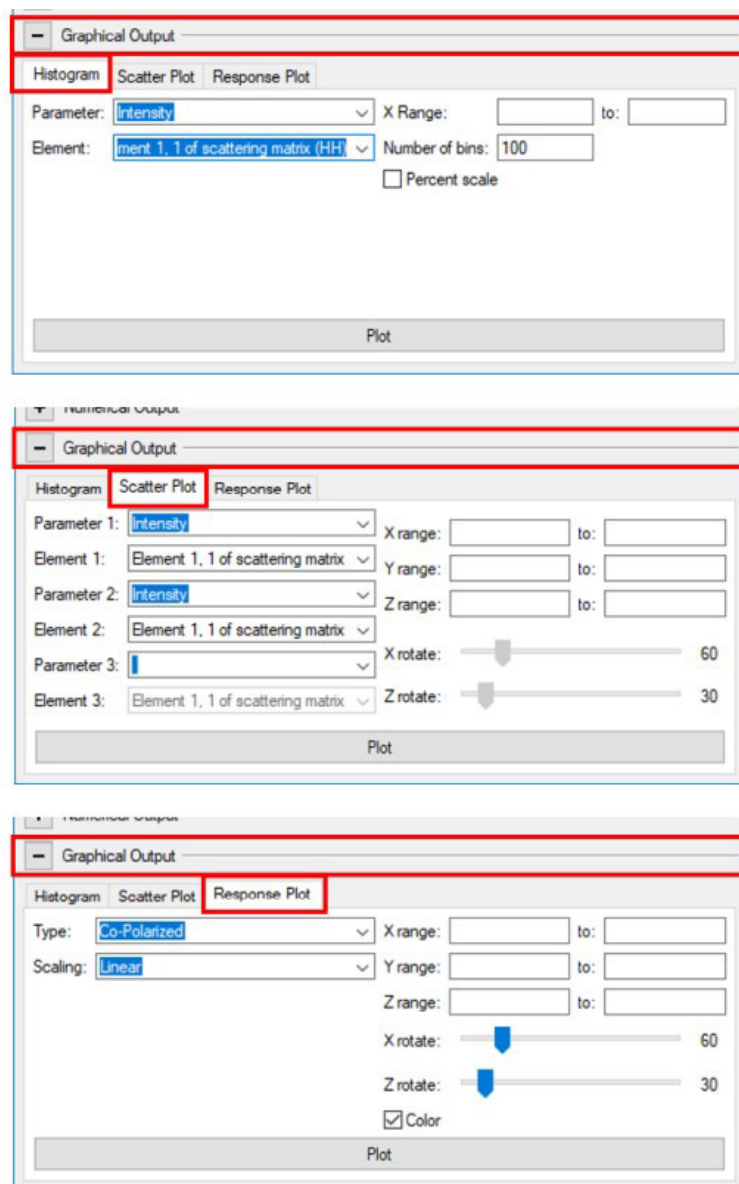
- Histograma: examina la distribución de un elemento (objetivo) en un canal
- Diagrama de dispersión: examine la relación entre dos (2-D) o tres (3-D) elementos
- Gráfico de respuesta: examina las propiedades polarimétricas de un objetivo (PCIGeomatics, 2018).

Para efectos de la investigación se generaron los reportes gráficos con la opción “Response Plot” de tipo “Co-Polarizado” y Escala “normalizada”, que se fundamenta en la representación canónica de los objetivos, lo que corresponde a una estructura geométrica simple cuya interpretación se hace más sencillo

por la presencia de planos simétricos en las matrices usadas para representarlos (PCIGeomatics, 2018), ver anexo J.

Ilustración 37

Opciones de reporte gráfico en SPTA



Nota. Fuente: PCIGeomatics (2018).

Una vez realizado el proceso de análisis polarimétrico de los objetivos seleccionados (coberturas de la tierra), se procede a realizar la extracción de información o clasificación supervisada.

5.3.4 Clasificación utilizando análisis de objetos de imágenes (OBIA por su sigla en inglés)

En este aparte de la investigación, se realizó la clasificación supervisada a la imagen RADARSAT ortocorregida, a la que se le ejecutaron los algoritmos de mejoramiento descritos en el aparte “5.3.2.3.”, las que se relacionan en la tabla 19, siguiendo el flujo de trabajo que se presenta en la ilustración 38, utilizando el programa CATALYST (PCIGeomatics) con el módulo “Object Analyst”.

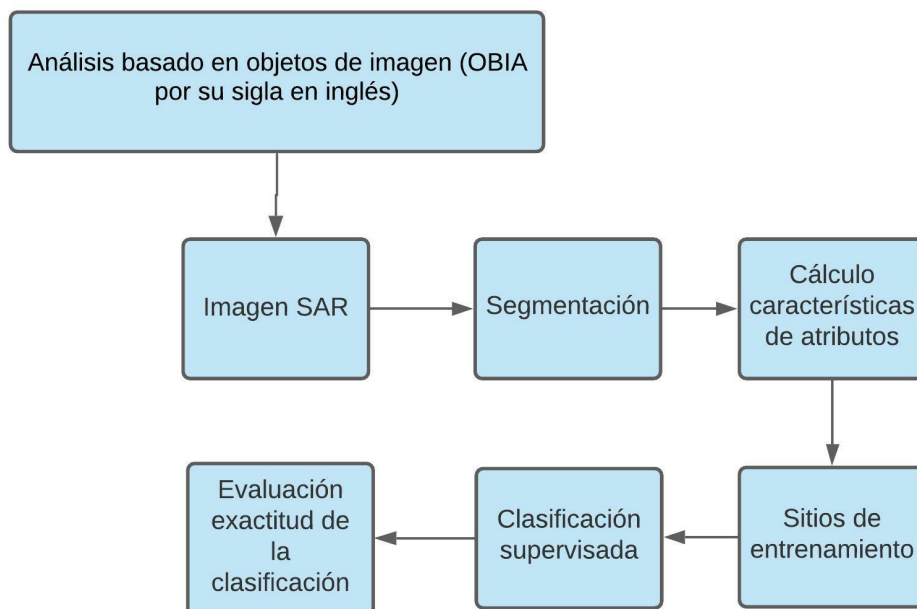
Tabla 19

Imágenes a las que se les realizó clasificación supervisada por el método de OBIA

Algoritmo	Tipo de Procesamiento	Filtro
Krogager	Descomposición	3x3
PoSAR PHDW	Descomposición	3x3
Touzi	Descomposición	3x3
PoSAR	Descomposición	3x3
Cloude & Pottier	Descomposición	3x3
Freeman & Durden	Clasificación	3x3
Filtro de Lee	Filtro	5x5
PSBoxcar	Filtro	3x3
C4R6C	Convertir Matriz de Representación	3x3
C3R3C	Convertir Matriz de Representación	3x3
PSS2C-HH-VV	Síntesis de un par de canales	3x3

Ilustración 38

Procesos para realizar análisis basado en objetos a las imágenes



5.3.4.1 Proceso de Segmentación. Luego de determinar la (s) imagen (es) a las que se les va a realizar el proceso de OBIA, el primer paso es realizar la segmentación, cuyos parámetros se observan en la ilustración 39.

Ilustración 39

Parámetros para segmentación de la imagen SAR, utilizando OBIA del programa CATALYST

The image shows two screenshots from the CATALYST software interface. The left screenshot is the 'Object Analyst' window, showing the 'Segmentation' operation. The 'Source Channels' are set to 'PSBOXCAR_POLSAR_3X3_ORTH'. The 'Segmentation Parameters' are set to Scale: 50, Shape: 0.5, and Compactness: 0.5. The right screenshot is the 'Layer Selection' window, showing a list of layers for selection. The layers are:

Layer	Select	Description
1	<input checked="" type="checkbox"/>	1 [32R] Real component of element 1, 1 of 0
2	<input checked="" type="checkbox"/>	2 [32R] Real component of element 2, 2 of 0
3	<input checked="" type="checkbox"/>	3 [32R] Real component of element 3, 3 of 0
4	<input checked="" type="checkbox"/>	4 [32R] Real component of element 4, 4 of 0
5	<input checked="" type="checkbox"/>	5 [C32R] Complex component of element 1,
6	<input checked="" type="checkbox"/>	6 [C32R] Complex component of element 2,
7	<input checked="" type="checkbox"/>	7 [C32R] Complex component of element 1,
8	<input checked="" type="checkbox"/>	8 [C32R] Complex component of element 2,
9	<input checked="" type="checkbox"/>	9 [C32R] Complex component of element 2,
10	<input checked="" type="checkbox"/>	10 [C32R] Complex component of element 3
L1		First eigenvalue of covariance matrix
L2		Second eigenvalue of covariance matrix
L3		Third eigenvalue of covariance matrix

La operación de segmentación requiere de la imagen de entrada, en donde se deben seleccionar los layers o canales que se tendrán en cuenta para el análisis, determinar un área de interés (AOI) el que es opcional, un archivo de salida y lo más importante, los parámetros de segmentación:

- Escala: Determina el tamaño o generalización de los polígonos, ejemplo si se pone 100 genera polígonos grandes (menos cantidad de polígonos) pero tiende a mezclar más características de análisis de los objetos, mientras que escala 25, genera polígonos más pequeños (mayor cantidad de estos), subdividiendo aún más las características de los objetos. Dependiendo de la escala a la que se requiere la capa de salida, se determina la escala para segmentación más adecuada.
- Forma: Es una variable que permite preservar la forma de los objetos. Si se quiere alta preservación de la forma, los valores deben tender a 1; si no es tan necesario, los valores deben tender a cero.
- Compacidad: Tiene que ver con la relación entre volumen de un objeto en la superficie que se encuentra, los valores altos nos generan mayor compacidad.

Luego de realizar varias pruebas cambiando los tres parámetros, se determinó que para el caso de estudio los parámetros que mejor resultado dieron fueron:

- Escala: 50
- Forma: 0.5
- Compacidad: 0.5

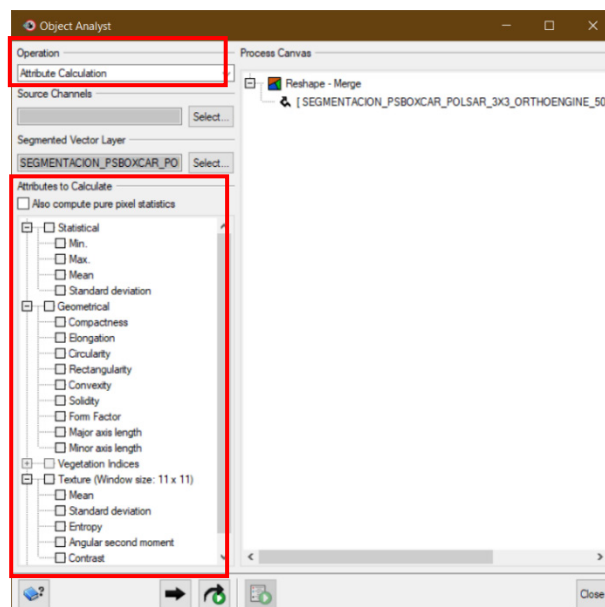
El archivo que se obtiene es una capa vectorial con un conjunto de polígonos.

5.3.4.2 Cálculo características de atributos. Este proceso permite calcular atributos a cada polígono de la segmentación tomando como base las características (retrodispersión, textura y otros) de los canales o layers de la imagen. Los atributos que se calculan, se muestran en la ilustración 40 y son:

- Estadísticos: Mínimo, máximo, media y desviación estándar.
- Geométricos: Compacidad, elongación, circularidad, rectangularidad, convexidad, factor de forma, medida del eje mayor, medida del eje menor.
- Textura: Media, desviación estándar entropía, segundo momento angular, contraste.

Ilustración 40

Cálculo características de atributos para los polígonos de la segmentación de la imagen SAR, utilizando OBIA del programa CATALYST



5.3.4.3 Sitios de entrenamiento. Una vez a los polígonos de la segmentación se les ha calculado los atributos relacionados con los parámetros inherentes de la imagen SAR (retrodispersión, textura, entre otros), se realiza el proceso de toma de muestras de entrenamiento con la operación “Training Sities Editing”. En la toma de muestras interactúa la interface “Object Analyst” con la operación “Training Sities Editing” y Focus, como se muestra en la ilustración 41.

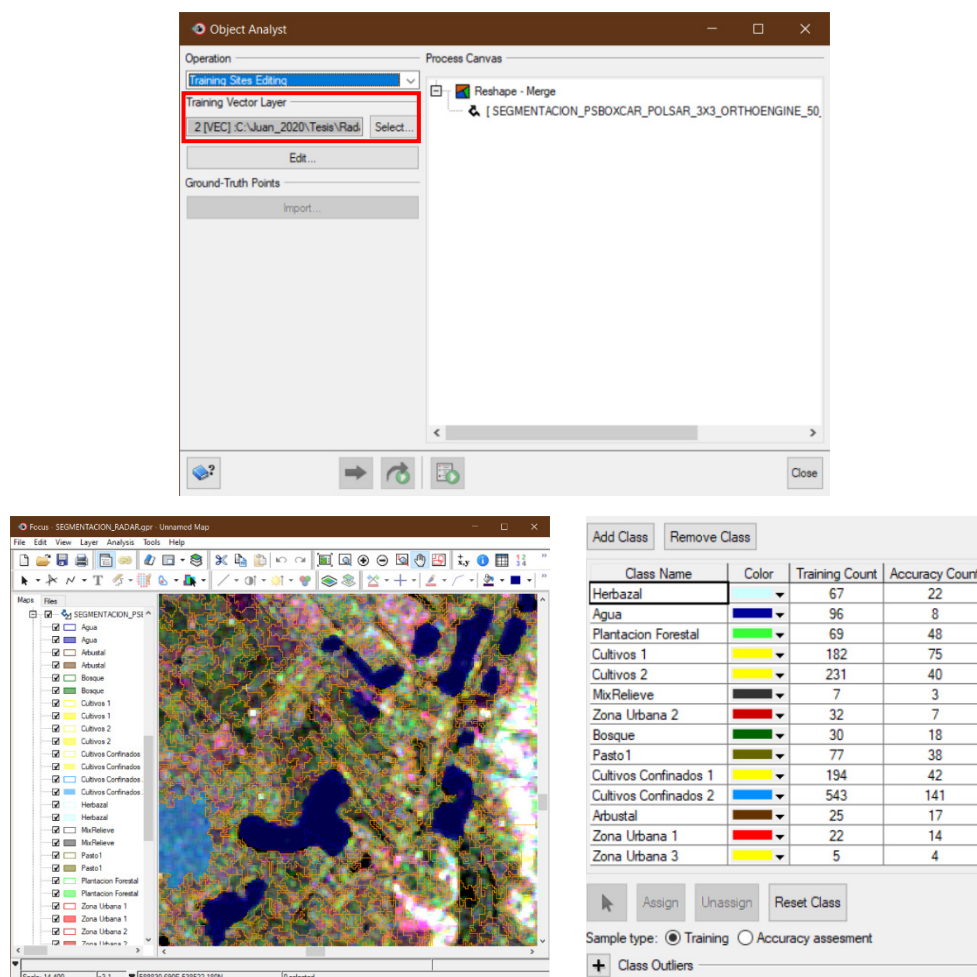
En el editor de “Training Sities Editing” se adicionan o remueven las clases de las que se quieren tomar muestras; Una vez generada la clase, se realiza un acercamiento a la zona de interés desplegada en “Focus”, se toma la muestra y se asigna. En la medida que se van asignando sitios de entrenamiento, se observa que existe una columna llamada “Training count” que muestra la cantidad de polígonos que componen la muestra.

Las muestras se tomaron teniendo en cuenta las nueve coberturas de interés (objetivos) relacionadas en la tabla 18 y que fueron objeto del análisis polarimétrico, las que son almacenadas en la capa vectorial de segmentación en un campo llamado “Training”. Es necesario precisar que debido a la diferencia de

retrodispersión que presentan las coberturas de: Zona urbana, cultivos confinados y cultivos transitorios, se debieron generar subclases, ej: (Zona urbana 1, Zona urbana 2, Zona urbana 3). Adicionalmente, se generó una cobertura llamada MixRelieve, la que representa el misceláneo de coberturas que se encuentran en las zonas con relieve abrupto (cerros encontrados en el área de estudio) teniendo en cuenta que la intensidad de la señal en estas zonas es alta debido a las distorsiones por la topografía generando los efectos de *layover* y *foreshortening*, por lo que no es posible diferenciar las coberturas presentes.

Ilustración 41

Sitios de entrenamiento para los polígonos de la segmentación de la imagen SAR, utilizando OBIA del programa CATALYST



Class Name	Color	Training Count	Accuracy Count
Herbazal		67	22
Agua		96	8
Plantacion Forestal		69	48
Cultivos 1		182	75
Cultivos 2		231	40
MixRelieve		7	3
Zona Urbana 2		32	7
Bosque		30	18
Pasto1		77	38
Cultivos Confinados 1		194	42
Cultivos Confinados 2		543	141
Arbustal		25	17
Zona Urbana 1		22	14
Zona Urbana 3		5	4

Como opción, en este proceso se pueden ir tomando las muestras que permitan medir la exactitud temática “Accuracy”, insumo que permite obtener la matriz de confusión y determinar el coeficiente Kappa.

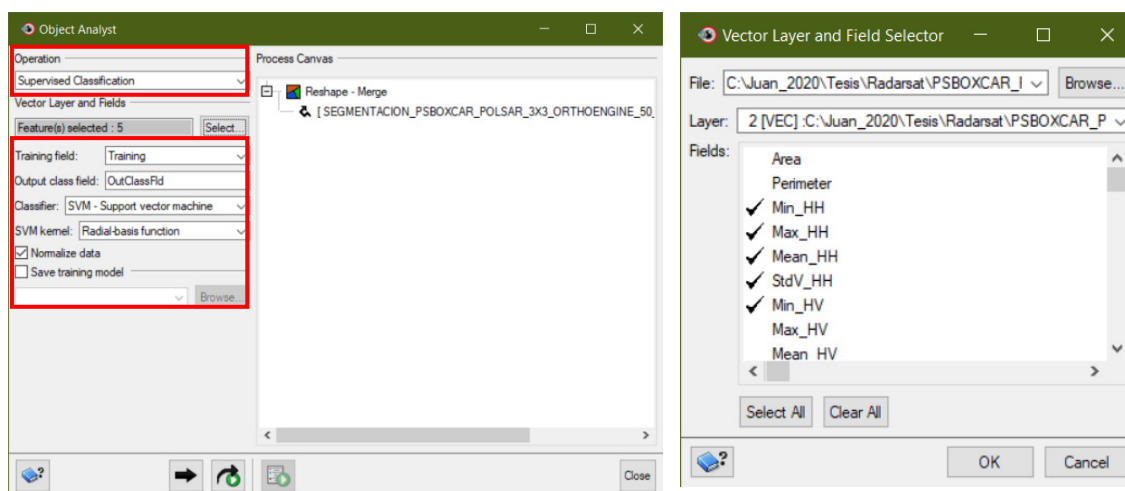
5.3.4.4 Clasificación supervisada. Terminado el proceso de tomar los sitios de entrenamiento, se ejecuta la operación de clasificación supervisada; Los parámetros se presentan en la ilustración 42. Al abrir el archivo de la capa vectorial de segmentación a la que se le va a ejecutar la operación de la clasificación supervisada, se abre una ventana emergente, en donde se deben seleccionar los campos que contienen los cálculos de atributos que se desean para que se tengan en cuenta en el proceso.

Los principales parámetros en la operación de la clasificación supervisada son:

- Campo de entrenamiento: Es aquel campo dentro de la capa vectorial de segmentación llamado “Training” que contiene los atributos de las muestras que se tomaron.
- Campo de salida de la clase: Es un campo que se genera en el archivo vectorial de la segmentación, en donde a cada polígono se le asigna el nombre de la cobertura de salida o como quedó clasificado.
- Algoritmo de clasificación “Classifier”: las alternativas que se encuentran son Máquina de Soporte Vectorial (SVM) por su sigla en inglés y Árboles aleatorios (RT) por su sigla en inglés.

Ilustración 42

Parámetros de la clasificación supervisada, utilizando OBIA del programa CATALYST

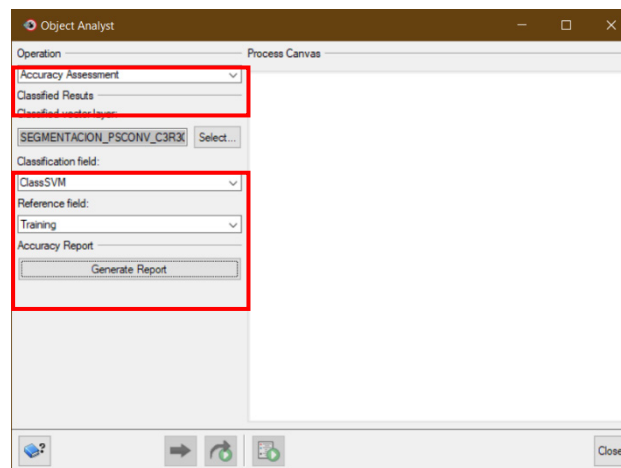


Para el caso de la investigación, se realizaron clasificaciones supervisadas utilizando los dos algoritmos de clasificación en las 11 imágenes SAR relacionadas en la tabla 19, para un total de 22 clasificaciones supervisadas.

5.3.4.5 Evaluación de la exactitud de la clasificación. Como se propuso en el aparte de “Sitios de entrenamiento”, se puede ir tomando los puntos de verificación para calcular la exactitud temática de la clasificación, los cuales pueden ser puntos tomados en terreno (verificación de campo) o, como en el caso de esta investigación, se tomaron a partir de la capa de coberturas de la tierra con la metodología CORRINE Land Cover adaptada para Colombia, realizada con imágenes ópticas ALOS y Landsat 7 ETM. La interface de CATALYST profesional para el cálculo de los reportes que muestran la exactitud temática se observan en la ilustración 43.

Ilustración 43

Parámetros para la evaluación de la exactitud temática, utilizando OBIA del programa CATALYST



El archivo de entrada corresponde al de segmentación vectorial, el que contiene los campos a comparar: la clasificación supervisada y el de referencia, en donde se encuentran las muestras o puntos de validación; Al ejecutar, se genera el reporte que contiene:

- Un listado simple
- Una matriz de confusión
- Unas estadísticas de exactitud.
-

Los reportes se obtuvieron para las 22 clasificaciones supervisadas que se generaron de la zona de estudio.

6 Resultados y Análisis

Después de efectuar la metodología propuesta, la que se expuso en las ilustraciones 31 y 38 con sus respectivas explicaciones, se muestran los resultados obtenidos del Análisis Polarimétrico de Objetivos en imágenes SAR y la clasificación supervisada obtenida por el método OBIA, así como el análisis de los mismos.

6.1 Resultados del análisis polarimétrico utilizando el módulo SPTA

Luego de aplicar filtros, descomposiciones polarimétricas, algoritmos de síntesis de canales polarimétricos y algoritmos de conversión de representación matricial a la imagen SAR orthocorregida utilizada para esta investigación, como se describió en el aparte “5.3.2.3”, se seleccionaron las imágenes que se muestran en la tabla 19 para observar las características polarimétricas de las coberturas de la tierra propuestas y sombreadas en la tabla 18.

Con la finalidad de realizar un análisis ordenado y sencillo, la información resultado al aplicar el análisis polarimétrico con el módulo SPTA, se organiza en las tablas 20 a 28 por tipo de cobertura terrestre propuesta, de acuerdo con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, en cada una de las imágenes RADARSAT mejoradas, en la que se muestra:

- En la primera fila, la imagen RADARSAT mejorada con la muestra de la cobertura tomada sobre la imagen, lo que permite dar respuesta al primer objetivo de esta propuesta de investigación.
- En la segunda fila, la gráfica de co - polarización en base H – V que se obtuvo, para dar cumplimiento al segundo objetivo propuesto.
- En la tercera fila, la gráfica que se obtiene con el método de Cloude & Pottier ($H/A/\alpha/\beta$), con lo que se busca responder el tercer objetivo.
- En la cuarta fila, la gráfica que representa el porcentaje de la contribución de potencia debido al tipo de dispersión resultante, por el método de los parámetros de Freeman & Durden, y así responder el cuarto objetivo propuesto.

Posteriormente, se realiza la descripción de los hallazgos relevantes que permita caracterizar el comportamiento polarimétrico de cada cobertura de la tierra seleccionada, organizada en la tabla 29, siguiendo los siguientes lineamientos:

La gráfica de co-polarización se analizará de acuerdo al vector de Jones, definido en el aparte "4.3.1." y las gráficas canónicas mostradas en la ilustración 60, en el apéndice J; La gráfica $H/A/\alpha/\beta$ se analizará de acuerdo con la interpretación del plano $H - \alpha$, descrito en el aparte "4.1.6.2.2." y la ilustración 16; y la gráfica del porcentaje de la contribución de potencia debido al tipo de dispersión resultante se analizará de acuerdo a los datos obtenidos con el módulo "SPTA" del programa CATALYST Profesional.

Tabla 20

Resultados análisis polarimétrico para la cobertura “tejido urbano continuo”

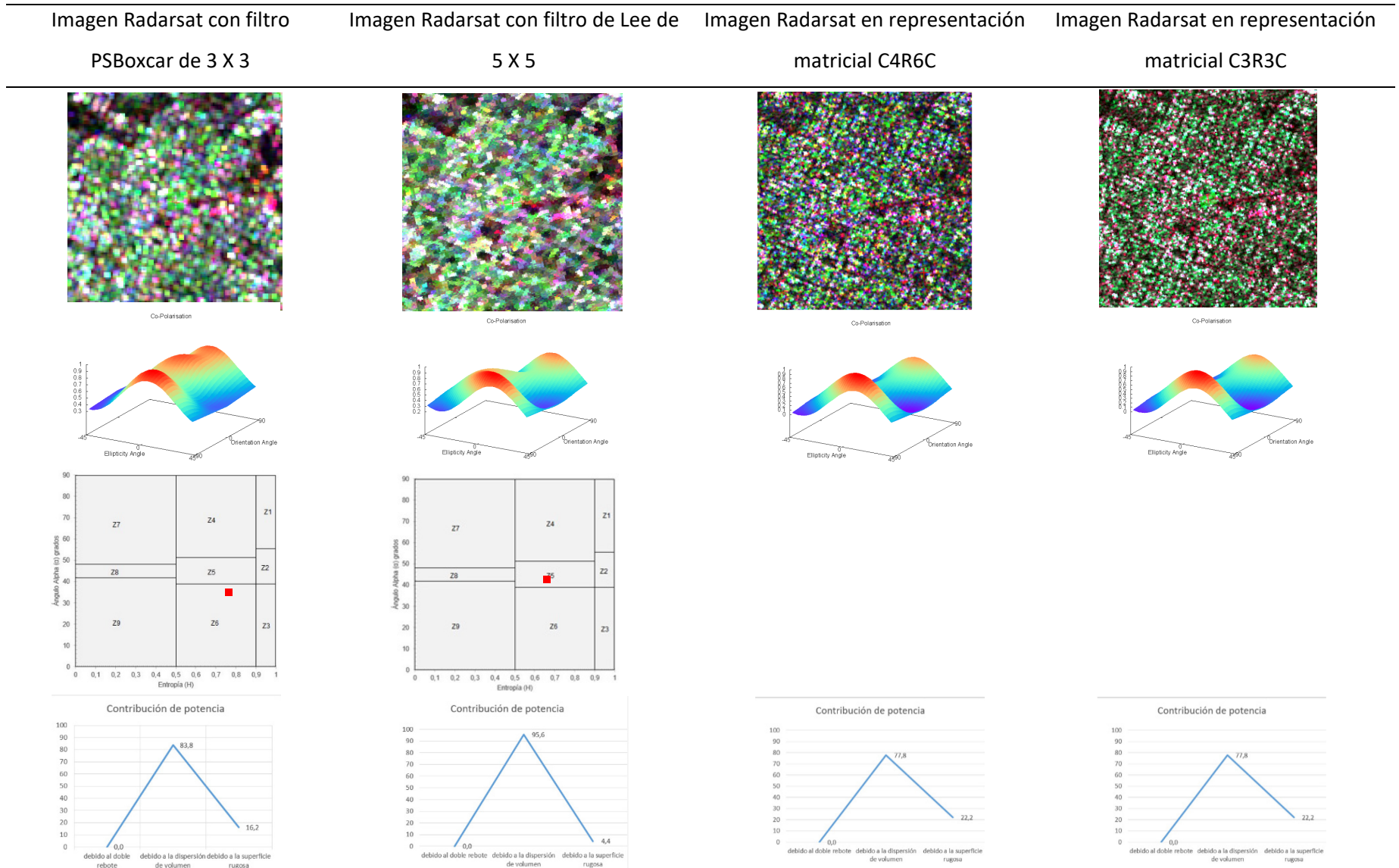


Tabla 21

Resultados análisis polarimétrico para la cobertura “cultivos anuales o transitorios”

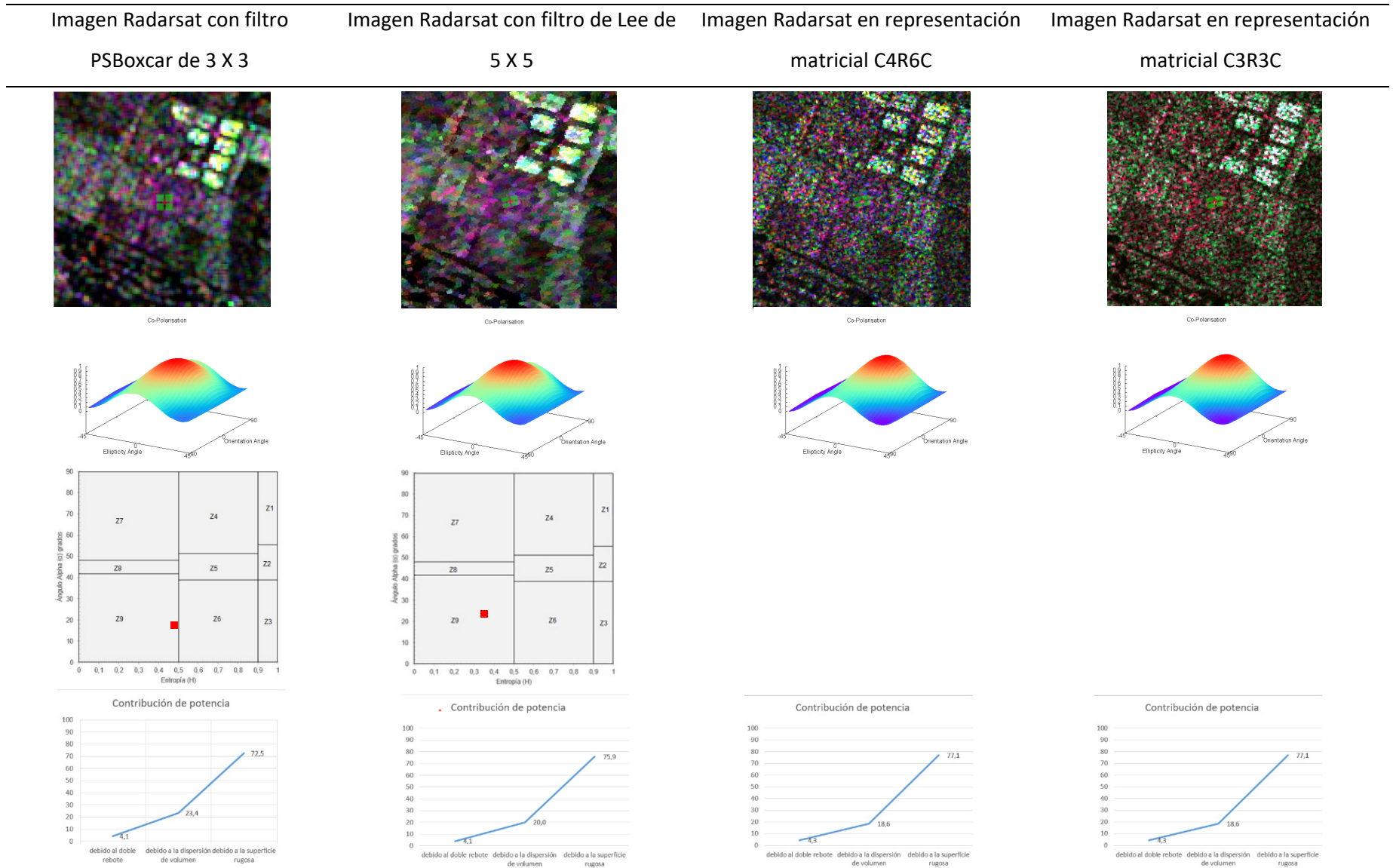


Tabla 22

Resultados análisis polarimétrico para la cobertura “cultivos confinados”

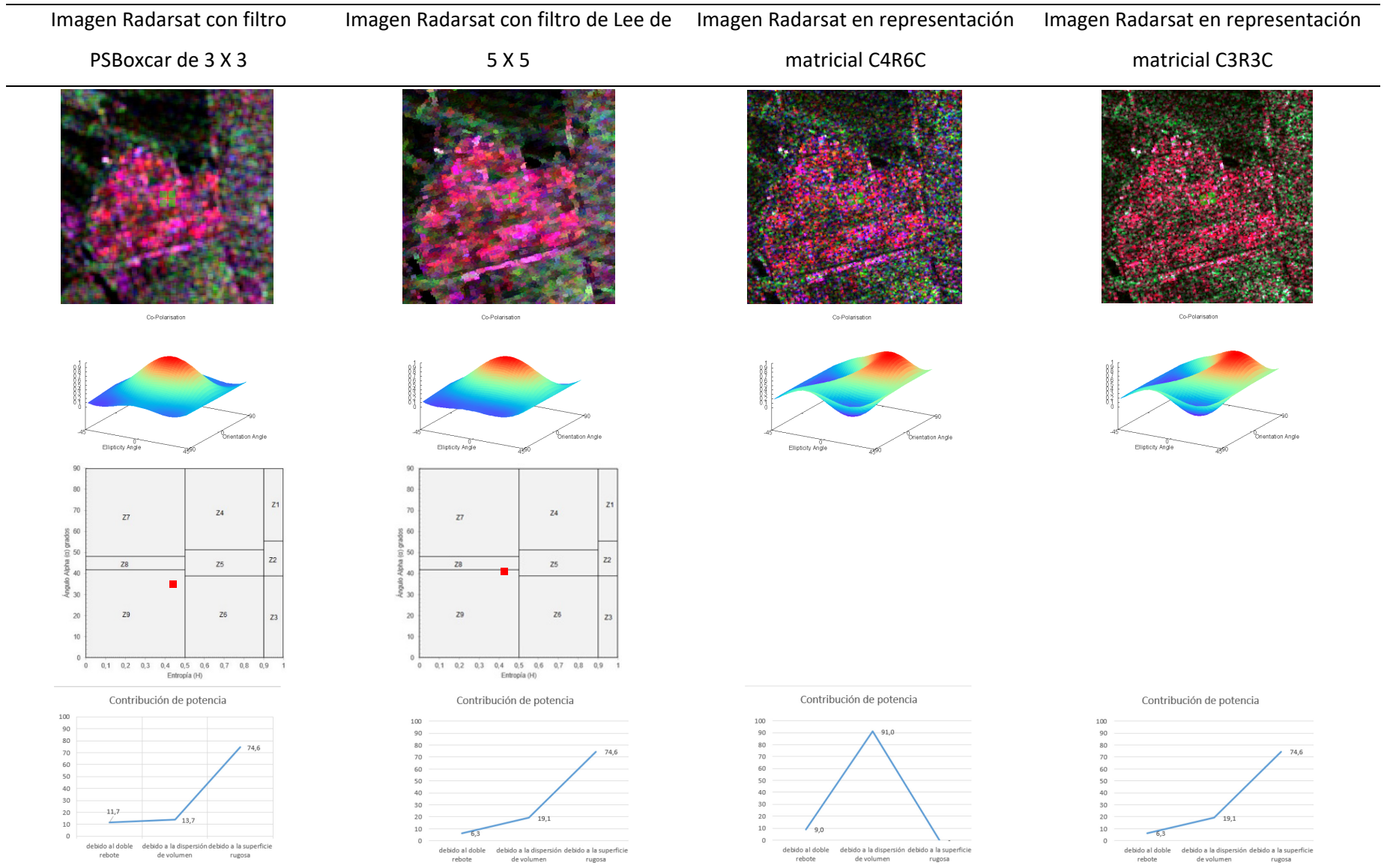


Tabla 23

Resultados análisis polarimétrico para la cobertura “pastos limpios”

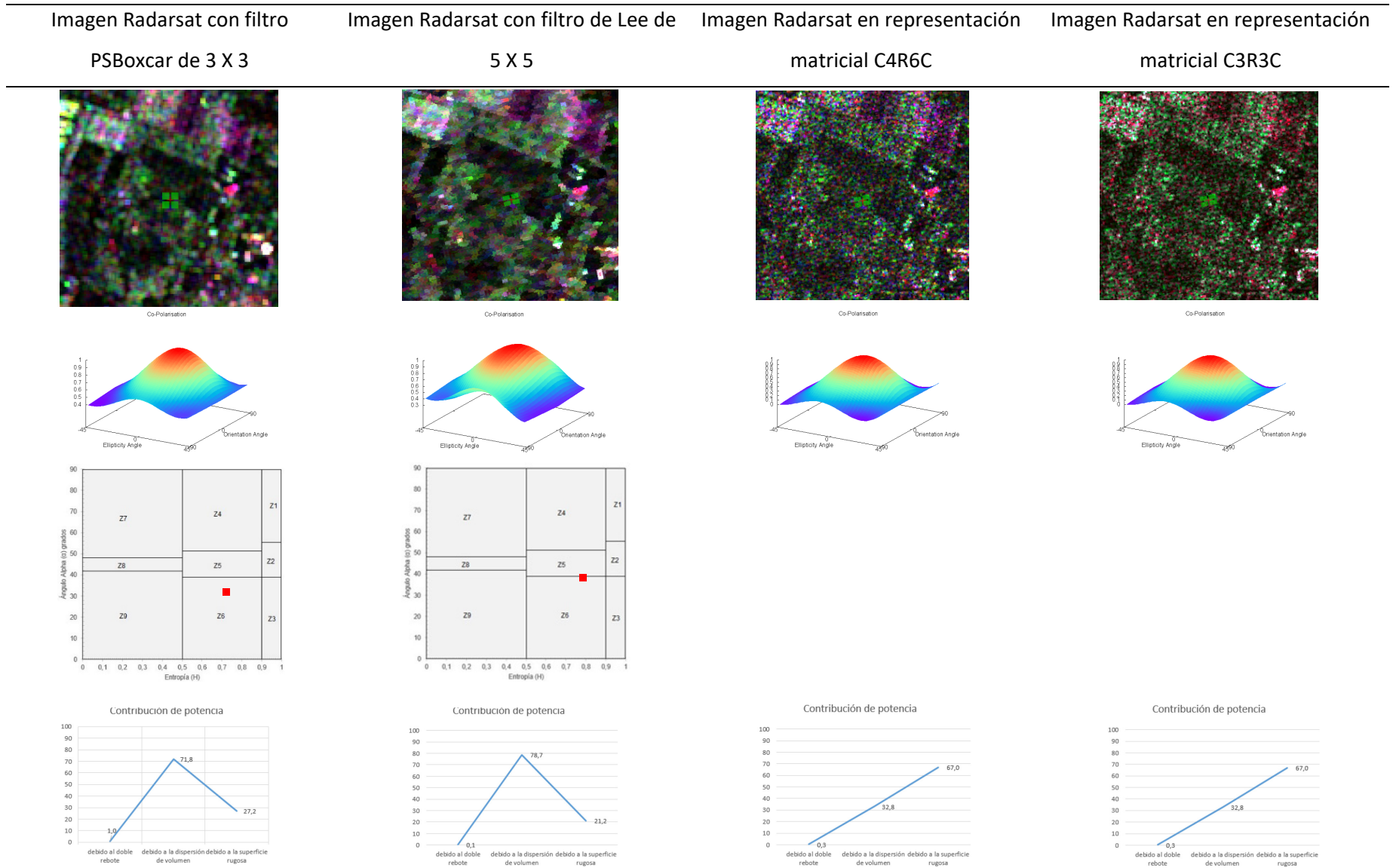


Tabla 24

Resultados análisis polarimétrico para la cobertura “bosque natural denso”

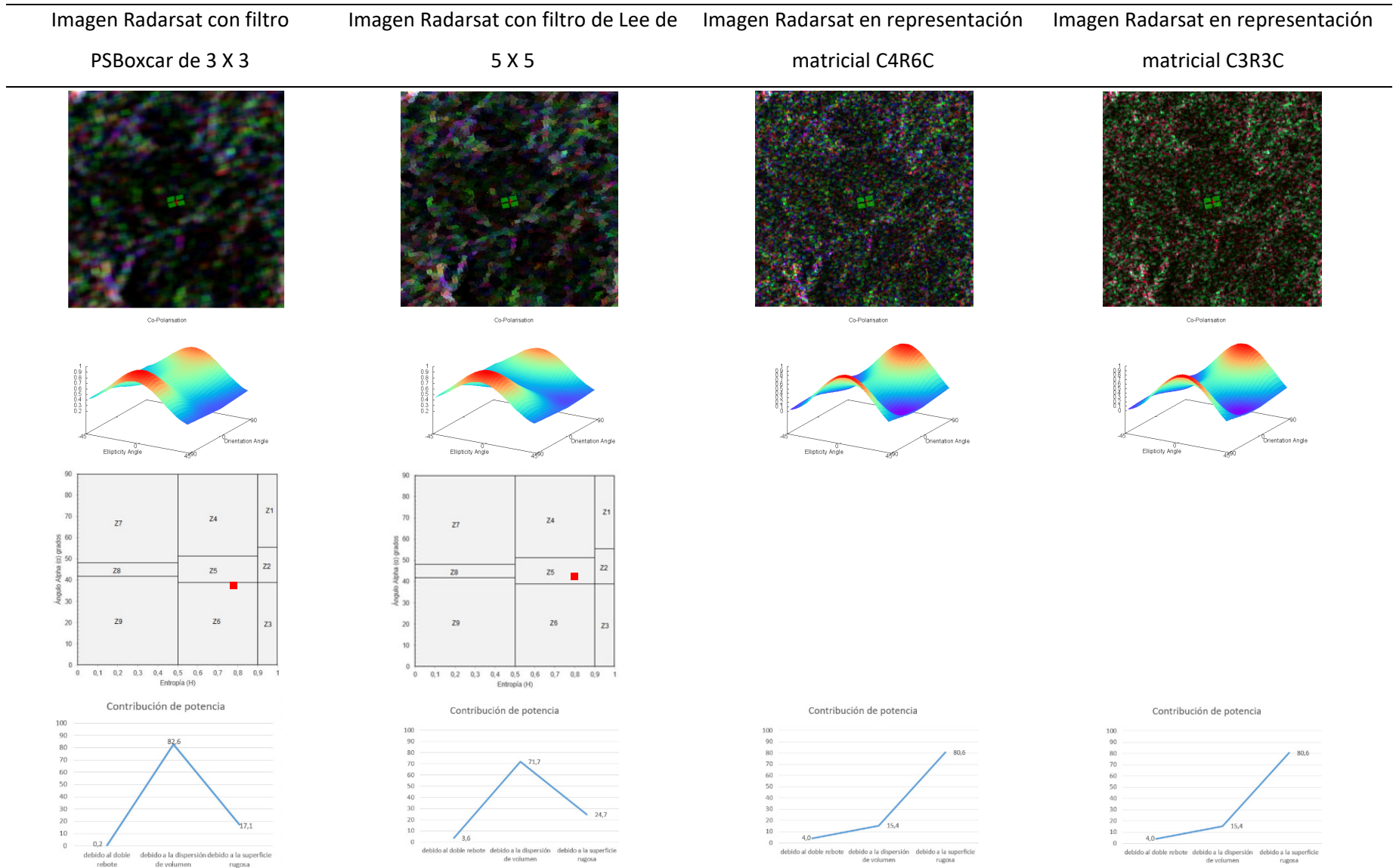


Tabla 25

Resultados análisis polarimétrico para la cobertura “bosque plantado”

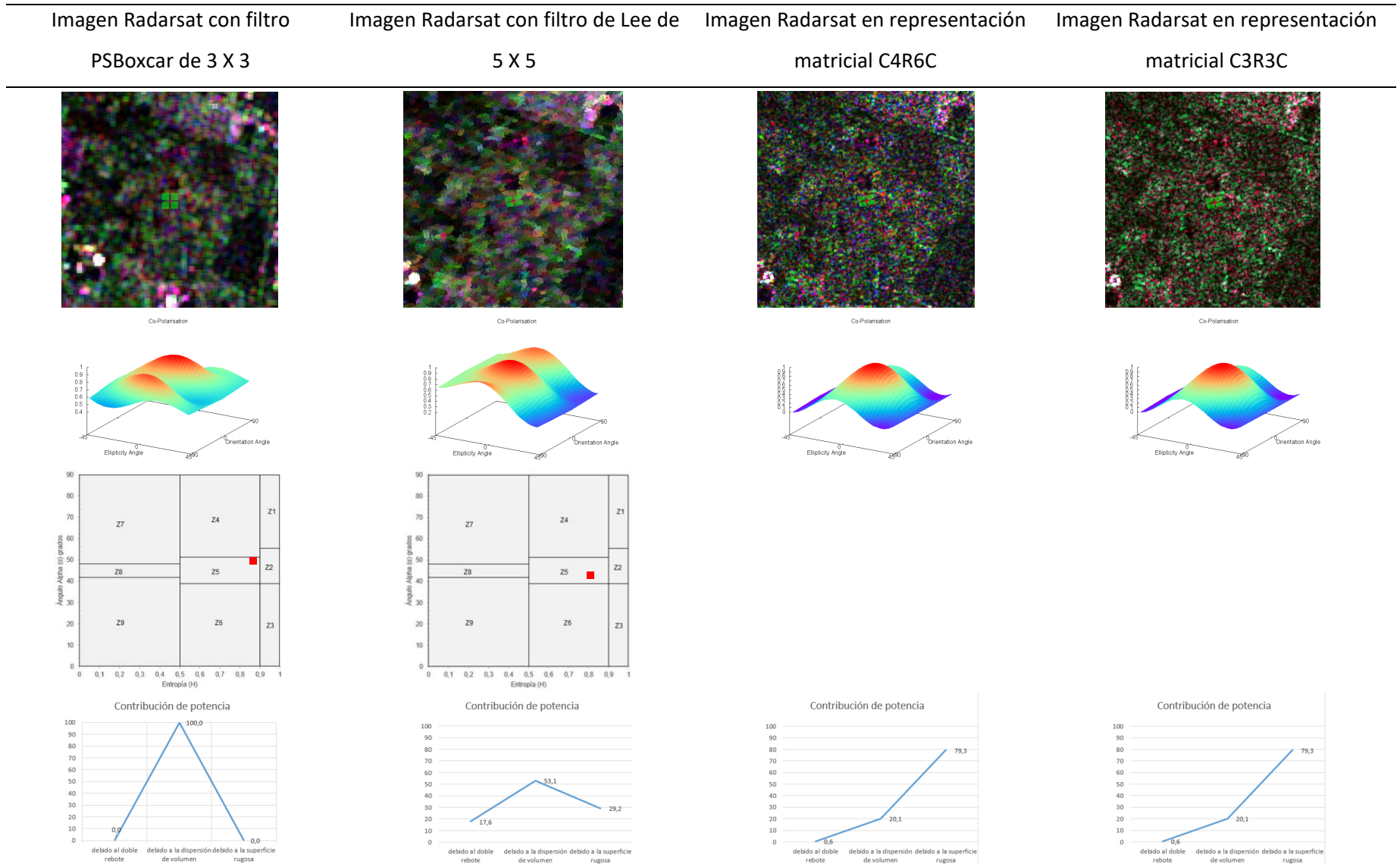


Tabla 26

Resultados análisis polarimétrico para la cobertura “herbazal denso”

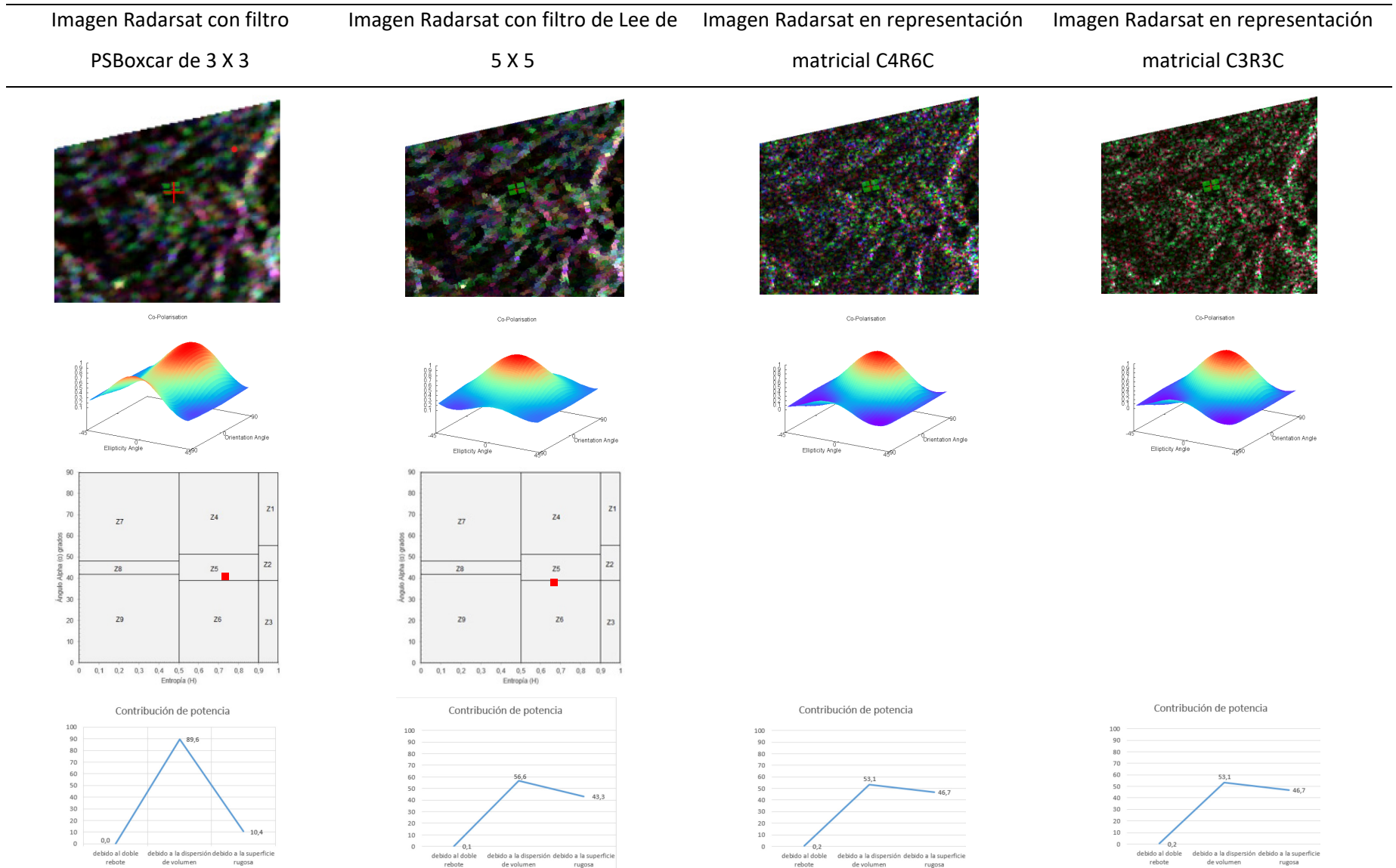


Tabla 27

Resultados análisis polarimétrico para la cobertura “arbustal denso”

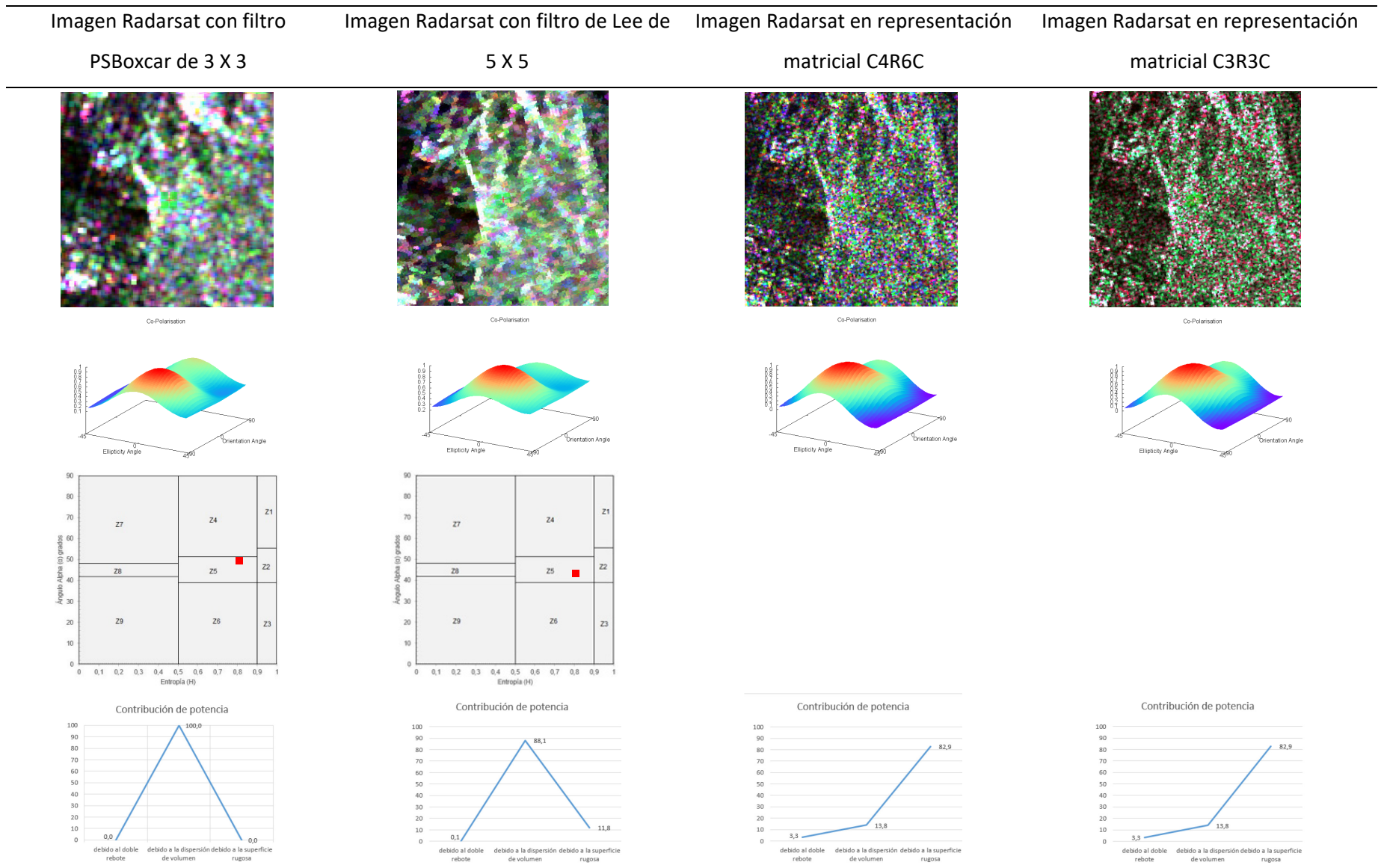


Tabla 28

Resultados análisis polarimétrico para la cobertura "aguas continentales"

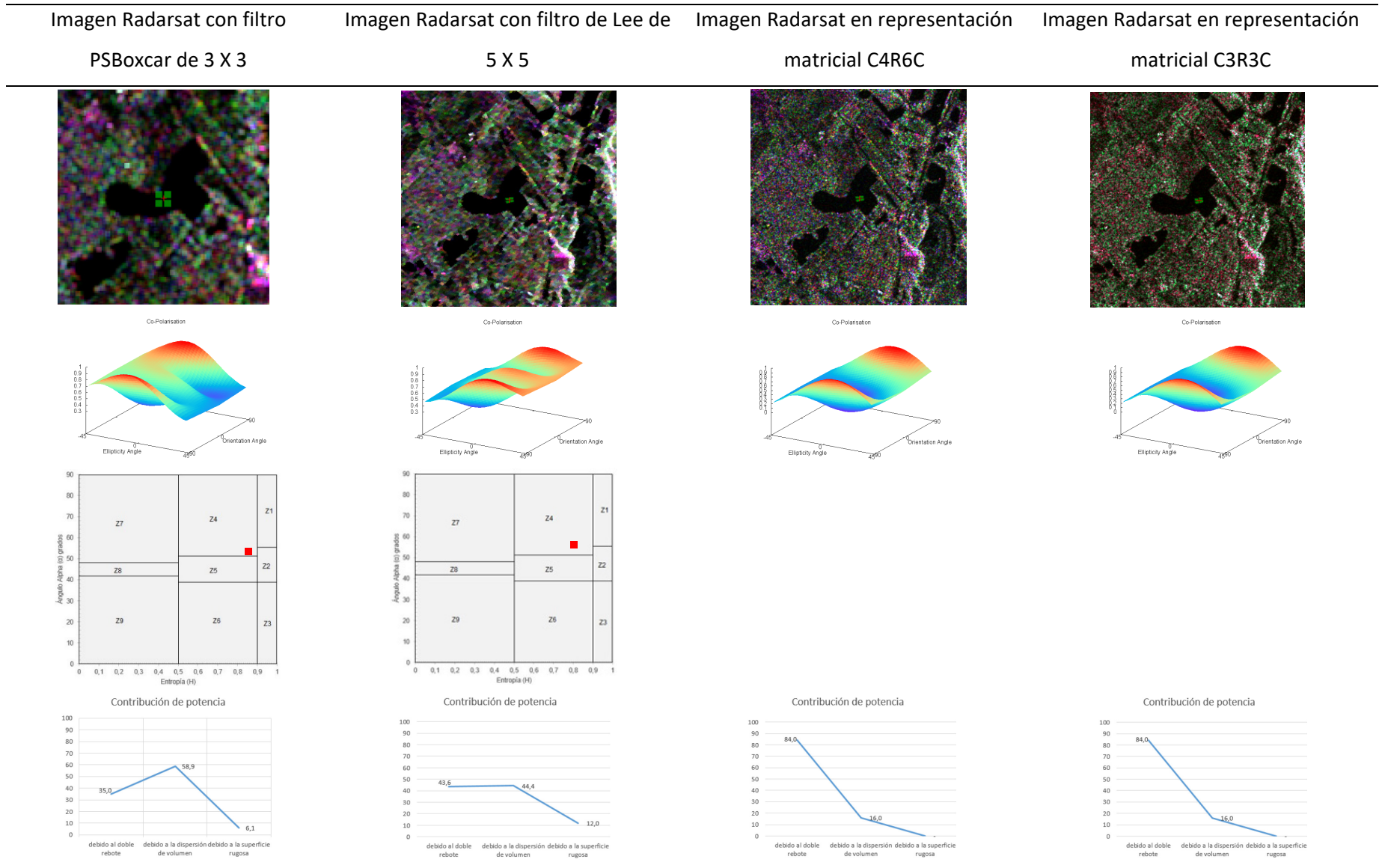


Tabla 29

Análisis de los resultados polarimétricos obtenidos con SPTA, para cada cobertura de la tierra propuesta

Cobertura de la tierra, metodología CLC adaptada para Colombia	Análisis gráfica de co-polarización	Análisis método Cloude & Pottier H/A/ α / β	Análisis método Freeman & Durden
<p>Tejido urbano continuo, tabla 20: Son espacios conformados por edificaciones y los espacios adyacentes a la infraestructura edificada. Las edificaciones, vías y superficies cubiertas artificialmente cubren más del 80% de la superficie del terreno. La vegetación y el suelo desnudo representan una baja proporción del área del tejido urbano. La superficie de la unidad debe ser superior a 5 ha (IDEAM, 2010).</p>	<p>Como se observa en la tabla 20, la respuesta de co-polarización del tejido urbano continuo en la imagen SAR con filtro PSBoxcar de 3X3 muestra una gráfica canónica que corresponde a una esfera o un trihedro caracterizado por un número impar de rebotes de la onda, lo que representa una diferencia de fase cercana a cero grados en la alineación de la retrodispersión, generando una dispersión en donde la polarización HH tiende a ser igual a la polarización VV, según el vector de Jones descrito en el aparte "4.3.1.". Esto indica que los valores son altos tanto en el plano horizontal como en el plano vertical indicando características aleatorias de la cobertura.</p> <p>En el caso de la co-polarización del tejido urbano continuo en la imagen SAR con filtro de</p>	<p>El método de Cloude & Pottier (H/A/α/β), ubica la muestra tomada en la imagen con filtro PSBoxcar en la zona 6, superficie aleatoria concordando con la gráfica de co-polarización, cuyas características son: Entropía media y dispersión por superficie, refleja un aumento de la entropía debido a los cambios en la rugosidad de la superficie, abarca cubiertas de superficies que comprenden dispersores esferoidales achatados; Mientras que, en la imagen con filtro de Lee, la ubica en la zona 5, Entropía</p>	<p>La gráfica de la contribución de potencia debido al tipo de dispersión resultante por el método de los parámetros de Freeman & Durden, muestra en las cuatro imágenes que se utilizaron para el análisis que la dispersión de volumen es la predominante para el tejido urbano continuo, seguido en menor escala por la dispersión de superficie rugosa.</p>

Lee 5 X 5, y las de representación matricial C4R6C y C3R3C, las gráficas presentan un comportamiento similar entre ellas mostrando un comportamiento dipolo, lo que se traduce en una fuerte retrodispersión en un solo canal de polarización, para este caso VV teniendo en cuenta que la mayor intensidad de la señal se encuentra cuando la orientación está en 90° y en -90°.

media y dispersión por volumen, el aumento de la entropía se debe a una distribución estadística central del ángulo de orientación, esta zona incluye la dispersión de superficies con dispersores anisotrópicos y una correlación moderada de las orientaciones del dispersor acuerdo con la ilustración 16.

Cultivos anuales o transitorios, tabla 21: Comprende las áreas ocupadas con cultivos cuyo ciclo vegetativo dura un año o menos, llegando incluso a ser de unos pocos meses; tienen como característica fundamental, que después de la cosecha es necesario volver a

La respuesta de co-polarización del cultivo anual o transitorio en las cuatro imágenes SAR analizadas, muestra que las gráficas canónicas resultantes, como se observa en la tabla 21, corresponden al comportamiento de un dipolo, lo que se traduce en una fuerte retrodispersión en un solo canal de polarización, para este caso HH teniendo en cuenta que la mayor intensidad de la señal se encuentra cuando la orientación está en 0°; sin embargo, existe una pequeña variación que se

El método de Cloude & Pottier (H/A/ α/β), ubica la muestra de tomada en la imagen con filtro PSBoxcar y en la imagen con filtro de Lee 5X5 en la zona 9, baja entropía y dispersión de superficie, incluye la dispersión de superficies de bragg y el mecanismo de retrodispersión especular que no implican

La contribución de potencia debido al tipo de dispersión resultante por el método de los parámetros de Freeman & Durden, muestra en las cuatro imágenes que se utilizaron para el análisis que el método de dispersión de superficie o rugosidad es el que más aporta para determinar los cultivos transitorios, seguido

<p>sembrar o plantar para seguir produciendo (IDEAM, 2010).</p>	<p>muestra en las gráficas de las imágenes C4R6C y C3R3C, en donde la intensidad de la señal es mayor en el ángulo de orientación cercano a 45°.</p>	<p>inversiones de fase de 180° entre HH y VV.</p>	<p>por la dispersión de volumen y en menor escala la dispersión de doble rebote.</p>
<p>Cultivos confinados, tabla 22: Comprenden las tierras ocupadas por cultivos bajo infraestructuras de invernaderos, principalmente dedicadas al cultivo de flores, frutales y hortalizas. Incluye toda aquella estructura cerrada cubierta por materiales transparentes, dentro de la cual es posible obtener unas condiciones artificiales de microclima, y con ello cultivar plantas en condiciones óptimas (IDEAM, 2010).</p>	<p>La respuesta de co-polarización del cultivo confinado en las imágenes SAR con filtro PSBoxcar 3 x 3 y filtro de Lee 5 X 5 analizadas, muestra que las gráficas canónicas resultantes corresponden al comportamiento de un dipolo, como se observa en la tabla 22, lo que se traduce en una fuerte retrodispersión en un solo canal de polarización, para este caso HH teniendo en cuenta que la mayor intensidad de la señal se encuentra cuando la orientación está en 0°; sin embargo, en las gráficas de las imágenes C4R6C y C3R3C la respuesta es dihedral, en donde se presenta un número par de rebotes generando una diferencia de fase de 180 grados entre las polarizaciones HH Y VV, haciendo que los canales HH y VV tengan igual intensidad.</p>	<p>El método de Cloude & Pottier (H/A/α/β), ubica la muestra de tomada en la imagen con filtro PSBoxcar 3X3 y en la imagen con filtro de Lee 5X5 en la zona 9, tendiendo más a ser dipolo con características de: baja entropía y dispersión de superficie, incluye la dispersión de superficies de Bragg y el mecanismo de retrodispersión especular que no implican inversiones de fase de 180° entre HH y VV.</p>	<p>La contribución de potencia debido al tipo de dispersión resultante por el método de los parámetros de Freeman – Durden, muestra en las imágenes con filtro PSBoxcar de 3 X 3, con filtro de Lee 5X5 y C3R3C que el método de dispersión de superficie o rugosidad es el que más aporta para determinar los cultivos confinados, seguido por la dispersión de volumen y en menor escala la dispersión de doble rebote.</p> <p>No obstante, en la imagen con matriz C4R6C, el mayor</p>

aporte está en la dispersión de volumen seguido por la dispersión de doble rebote.

Pastos limpios, tabla 23: Esta cobertura comprende las tierras ocupadas por pastos limpios con un porcentaje de cubrimiento mayor al 70%; la realización de prácticas de manejo (limpieza, escalamiento y/o fertilización, etc.) y el nivel tecnológico utilizados impiden la presencia o el desarrollo de otras coberturas(IDEAM, 2010)

La respuesta de co-polarización del pasto limpio en las cuatro imágenes SAR analizadas, muestra que las gráficas canónicas resultantes, como se observa en la tabla 23, corresponden al comportamiento de un dipolo, lo que se traduce en una fuerte retrodispersión en un solo canal de polarización, para este caso HH teniendo en cuenta que la mayor intensidad de la señal se encuentra cuando la orientación está en 0°.

El método de Cloude & Pottier (H/A/ α/β), ubica la muestra de tomada en la imagen con filtro PSBoxcar 3X3 en la zona 6: Entropía media y dispersión por superficie, refleja un aumento de la entropía debido a los cambios en la rugosidad de la superficie y por los efectos de propagación de dosel, abarca cubiertas de superficies que comprenden dispersores esferoidales achatados y en la imagen con filtro de Lee 5X5 en la zona 5: Entropía media y dispersión por volumen, el aumento de la entropía se debe a una distribución estadística central

La contribución de potencia debido al tipo de dispersión resultante por el método de los parámetros de Freeman & Durden, muestra en las imágenes con filtro PSBoxcar de 3 X 3 y con filtro de Lee 5X5, que el método de dispersión de volumen es el que más aporta para determinar los pastos limpios, seguido por la dispersión de superficie o rugosidad y en menor escala la dispersión de doble rebote.

Sin embargo, en las imágenes con matriz C4R6C y C3R3C, el mayor aporte está en la

del ángulo de orientación, esta dispersión de superficie o zona incluye la dispersión de rugosidad seguido por la superficies con dispersores dispersión de volumen. anisotrópicos y una correlación moderada de las orientaciones del dispersor.

<p>Bosque natural denso, tabla 24: Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbóreos, los cuales forman un estrato de copas (dosel) más o menos continuo, con altura superior a 5 metros. Estas formaciones vegetales no han sido intervenidas o su intervención ha sido selectiva y no ha alterado su estructura original y las características funcionales (IDEAM, 2010).</p>	<p>La respuesta de co-polarización para el bosque denso en la imagen SAR con filtro PSBoxcar de 3X3 muestra una figura canónica que corresponde al comportamiento trihedral o esférico, como se observa en la tabla 24, la que se caracterizan por un número impar de rebotes de la onda, lo que resulta en una diferencia de fase de cero grados en la alineación de la retrodispersión, produciendo una dispersión uniforme para todas las polarizaciones lineales ($X=0^\circ$) lo que hace que $HH = VV$.</p> <p>En las imágenes SAR con filtro de Lee 5X5, C4R6C y C3R3C, las figuras muestran tendencia a ser de dipolo, el producirá fuerte</p>	<p>El método de Cloude & Pottier ($H/A/\alpha/\beta$), ubica la muestra de tomada en la imagen con filtro PSBoxcar 3X3 en la zona 6: Entropía media y dispersión por superficie, refleja un aumento de la entropía debido a los cambios en la rugosidad de la superficie y por los efectos de propagación de dosel, abarca cubiertas de superficies que comprenden dispersores esferoidales achatados, y en la imagen con filtro de Lee 5X5 en la zona 5: Entropía media y dispersión</p>	<p>La contribución de potencia debido al tipo de dispersión resultante por el método de los parámetros de Freeman & Durden, muestra en las imágenes con filtro PSBoxcar de 3 X 3 y con filtro de Lee 5X5, que el método de dispersión de volumen es el que más aporta para determinar el bosque natural denso, seguido por la dispersión de superficie o rugosidad y en menor escala la dispersión de doble rebote.</p>
---	--	--	---

retrodispersión en un solo canal de polarización de acuerdo a su orientación, para este caso VV, teniendo en cuenta que la intensidad es alta en las zonas con orientación de -90° y 90° .

por volumen, el aumento de la entropía se debe a una distribución estadística central del ángulo de orientación, esta zona incluye la dispersión de superficies con dispersores anisotrópicos y una correlación moderada de las orientaciones del dispersor).

A pesar de ello, en las imágenes con matriz C4R6C y C3R3C, el mayor aporte está en la dispersión de superficie o rugosidad seguido por la dispersión de volumen.

Bosque plantado, tabla 25: Son coberturas constituidas por plantaciones de vegetación arbórea, realizada por la intervención directa del hombre con fines de manejo forestal. En este proceso se constituyen rodales forestales, establecidos mediante la plantación y/o la siembra durante el proceso de

La gráfica de co-polarización resultante sobre las imágenes SAR con filtro PSBoxcar de 3X3 y filtro de Lee de 5x5, las que se muestran en la tabla 25, generan una figura canónica que corresponde al dihedro, en donde se presenta un número par de rebotes presentando una diferencia de fase de 180 grados entre las polarizaciones HH Y VV, es así que, $-HH = VV$, no obstante, los canales HH y VV tienen igual intensidad. En el caso del filtro de Lee, se evidencia una variación en el ángulo de elipticidad con giro hacia 45° . Adicionalmente, en ambas gráficas se ven dos picos de alta

El método de Cloude & Pottier ($H/A/\alpha/\beta$), ubica la muestra de tomada en la imagen con filtro PSBoxcar 3X3 y en la imagen con filtro de Lee 5X5 en la zona 5: Entropía media y dispersión por volumen, el aumento de la entropía se debe a una distribución estadística central del ángulo de orientación, esta zona incluye la dispersión de superficies con dispersores anisotrópicos y una correlación

La contribución de potencia debido al tipo de dispersión resultante por el método de los parámetros de Freeman – Durden, muestra en la imagen con filtro PSBoxcar de 3 X 3 que el método de dispersión de volumen aporta en su totalidad para determinar el bosque plantado, mientras que en la imagen SAR con filtro de Lee 5X5, el método de dispersión de volumen es

<p>forestación o reforestación, para la producción de madera o bienes no madereros. Las coberturas pueden estar formadas por especies exóticas o nativas que son sometidos a ordenación forestal (protección, conservación, producción) (IDEAM, 2010).</p>	<p>intensidad en la señal, en el caso de PSBoxcar los picos se encuentran en la orientación -90° y 0°, mientras que en la de filtro de Lee se encuentran en 0° y 90°.</p> <p>En el caso de las imágenes C4R6C y C3R3C, las figuras muestran tendencia a ser de dipolo, el que producirá fuerte retrodispersión en un solo canal de polarización de acuerdo a su orientación, para este caso HH, teniendo en cuenta que el valor de alta intensidad de la señal se concentra en la zona de 0°.</p>	<p>moderada de las orientaciones del dispersor.</p>	<p>el que más aporta (53%), seguido por la dispersión de superficie o rugosidad (29%) y en menor escala la dispersión de doble rebote (18%).</p> <p>Pero, en las imágenes con matriz C4R6C y C3R3C, el mayor aporte está en la dispersión de superficie o rugosidad (79%) seguido por la dispersión de volumen (20%).</p>
<p>Herbazal, tabla 26: Esta unidad se caracteriza por presentar una cobertura vegetal de bajo porte que se localiza en las zonas de alta montaña, está compuesta principalmente por gramíneas (familia Poaceae) del tipo pajonal</p>	<p>Las gráficas de co-polarización resultante sobre las imágenes SAR con filtro PSBoxcar de 3X3, con filtro de Lee 5X5, con representación matricial C4R6C y C3R3C, que se muestran en la tabla 26, generan una figura canónica con tendencia a ser de dipolo, la que produce fuerte retrodispersión en un solo canal de polarización de acuerdo a su orientación.</p>	<p>El método de Cloude & Pottier ($H/A/\alpha/\beta$), ubica la muestra de tomada en la imagen con filtro PSBoxcar 3X3 y en la imagen con filtro de Lee 5X5 en la zona 5: Entropía media y dispersión por volumen, el aumento de la entropía se debe a una distribución estadística central</p>	<p>La contribución de potencia de dispersión resultante por el método de los parámetros de Freeman & Durden, muestra en las que el método de dispersión de volumen, seguido por la dispersión de superficie rugosa son las que aportan en la señal recibida</p>

<p>(<i>Calamagrostis</i> sp.), entremezclada con plantas arrosetadas como los frailejones (<i>Espeletia</i> sp.) y otras especies (IDEAM, 2010).</p>	<p>Para el caso de las imágenes con filtro PSBoxcar 3X3, C4R6C y C3R3C es de polarización VV, si se observa que la mayor intensidad de la señal se presenta en la orientación cercana a 90; mientras que en las gráficas de las imágenes con filtro de Lee 5X5, es de polarización HH teniendo en cuenta que la intensidad de la señal es alta en la orientación 0°.</p>	<p>del ángulo de orientación, esta zona incluye la dispersión de superficies con dispersores anisotrópicos y una correlación moderada de las orientaciones del dispersor.</p>	<p>para determinar la cobertura del herbazal.</p>
<p>Arbustal denso, tabla 27: Corresponde a las coberturas constituidas por vegetación natural de porte bajo, con un dosel irregular en donde predominan los elementos arbustivos, pero que puede presentar elementos arbóreos dispersos. Esta vegetación puede ser producto de las condiciones naturales o de la acción antrópica. Un arbusto es una planta</p>	<p>La gráfica de co-polarización resultante sobre las imágenes SAR con filtro PSBoxcar de 3X3, filtro de Lee de 5x5, C4R6C y C3R3C, las que se muestran en la tabla 27, generan una figura canónica que corresponde al dihedro, en donde se presenta un número par de rebotes presentando una diferencia de fase de 180 grados entre las polarizaciones HH Y VV, es así que, -HH = VV. En todos los casos, se evidencia que la intensidad de la señal es alta en el ángulo de orientación de -45°.</p>	<p>El método de Cloude & Pottier (H/A/α/β), ubica la muestra de tomada en la imagen con filtro PSBoxcar 3X3 y en la imagen con filtro de Lee 5X5 en la zona 5: Entropía media y dispersión por volumen, el aumento de la entropía se debe a una distribución estadística central del ángulo de orientación, esta zona incluye la dispersión de superficies con dispersores anisotrópicos y una correlación</p>	<p>La contribución de potencia debido al tipo de dispersión resultante por el método de los parámetros de Freeman & Durden, muestra en la imagen con filtro PSBoxcar de 3 X 3 que el método de dispersión de volumen aporta en su totalidad para determinar el arbustal denso, mientras que en la imagen SAR con filtro de Lee 5X5, el método de dispersión de volumen es el que más aporta (88%),</p>

perenne, con una altura entre 0.5 y 5 m y sin una copa definida (IDEAM, 2010).

moderada de las orientaciones del dispersor.

seguido por la dispersión de superficie o rugosidad (12%).

A pesar de lo anterior, en las imágenes con matriz C4R6C y C3R3C, el mayor aporte está en la dispersión de superficie o rugosidad (83%) seguido por la dispersión de volumen (14%) y por último el de doble rebote (3%).

Aguas continentales, tabla 28: Son cuerpos de aguas permanentes, intermitentes y estacionales que comprenden lagos, lagunas, ciénagas, depósitos y estanques naturales o artificiales de agua dulce (o sea no salino), embalses y cuerpos de agua en

La gráfica de co-polarización resultante sobre las imágenes SAR con filtro PSBoxcar de 3X3 y filtro de Lee de 5x5, las que se muestran en la tabla 28, generan una figura canónica que corresponde al dihedro, en donde se presenta un número par de rebotes presentando una diferencia de fase de 180 grados entre las polarizaciones HH Y VV, es así que, -HH = VV. En todos los casos, se evidencia que la intensidad de la señal es alta en los ángulos de orientación -90°, 0° y 90°, la diferencia evidente

El método de Cloude & Pottier (H/A/α/β), ubica la muestra de tomada en la imagen con filtro PSBoxcar 3X3 y en la imagen con filtro de Lee 5X5 en la zona 4: Entropía media y dispersión por doble rebote.

La contribución de potencia debido al tipo de dispersión resultante por el método de los parámetros de Freeman & Durden, muestra en la imagen con filtro PSBoxcar de 3 X 3 que el método de dispersión de volumen es el que más aporta (59%) para determinar el cuerpo de agua continental, seguido por la dispersión de

movimiento, como los ríos y canales (IDEAM, 2020). está en el ángulo de elipticidad, en donde la imagen con filtro PSBoxcar de 3X3 tiene a girar hacia 45° mientras que la de filtro de Lee de 5X5 tiende hacia -45.

En el caso de las imágenes con representación matricial C4R6C y C3R3C, las figuras canónicas muestran tendencia a ser de dipolo, el que producirá fuerte retrodispersión en un solo canal de polarización de acuerdo a su orientación, para este caso VV, teniendo en cuenta que el valor de alta intensidad de la señal se concentra en la zona de 90° y -90°.

doble rebote (35%) y por último la dispersión de rugosidad de superficie (6%), mientras que en la imagen SAR con filtro de Lee 5X5, el método de dispersión de doble rebote y volumen aportan de manera similar (44%) aproximadamente cada uno, seguido por la dispersión de superficie o rugosidad (12%).

En el caso de las imágenes con matriz C4R6C y C3R3C, el mayor aporte está en la dispersión de doble rebote (84%) seguido por la dispersión de volumen (16%), coincidiendo con el reporte de zona dado por el método de Cloude & Pottier.

6.2 Resultados de la clasificación supervisada

Como se mencionó anteriormente, durante el desarrollo de la presente investigación, se llevó a cabo el proceso descrito en la ilustración 38 sobre las imágenes SAR con procesamientos relacionadas en la tabla 19 utilizando los métodos de: Máquina de Soporte Vectorial (SVM) por su sigla en inglés y Árboles aleatorios (RT) por su sigla en inglés ; sin embargo, para efectos del análisis, solo se tuvieron en cuenta aquellos resultados, antes de realizar algún post-proceso o edición para ajuste temático por parte del experto en interpretación de coberturas, con coeficiente Kappa mayor a 0.6, que para este caso corresponden a las clasificaciones de las imágenes SAR con descomposición de: Krogager, Freeman & Durden y PHDW. Adicionalmente se debe realizar una inspección visual del resultado de la clasificación supervisada para poderla contrastar con los resultados del coeficiente kappa.

6.2.1 Resultado de la segmentación de las imágenes SAR con descomposición polarimétrica

En el proceso de segmentación de las imágenes con los parámetros propuestos en el aparte “5.3.4.1”, se obtuvieron tres archivos vectoriales con la cantidad de polígonos a partir de los canales polarimétricos que tiene cada imagen SAR utilizada, como se muestra en tabla 30.

Tabla 30

Resultado de la segmentación de las Imágenes SAR con descomposición polarimétrica

Imagen SAR con descomposición Polarimétrica	Canales polarimétricos de la imagen SAR	Cantidad de polígonos generados
Krogager	<ul style="list-style-type: none"> • Poder de dispersión esférica. • Poder de dispersión dipolo. • Poder de dispersión helicoidal 	22.013
Freeman & Durden	<ul style="list-style-type: none"> • Contribución de doble rebote. • Contribución de Volumen. • Contribución de Rugosidad de superficie. • Dispersión diplane • Dispersión helix 	23.450
PHDW	<ul style="list-style-type: none"> • Dispersión de plate • Dispersión de wire 	20.171

A los archivos vectoriales, resultado de la segmentación, se le realizó el proceso del cálculo de atributos, como se mencionó en el aparte “5.3.4.2”.

6.2.2 Resultado de la toma de muestras sobre las imágenes SAR con descomposición polarimétrica para la clasificación supervisada

Una vez determinadas las coberturas de la tierra presentes en la zona de estudio de acuerdo con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, como se mostró en la tabla 18, posteriormente realizarles el análisis polarimétrico cuyos resultados se mostraron en la tabla 29 y efectuar un análisis visual del comportamiento de cada cobertura en cada una de las imágenes con descomposición polarimétrica que se muestran en la tabla 30, se comenzó a tomar las muestras o áreas de entrenamiento. Se debe tener en cuenta que la capa de segmentación para tomar dichas muestras es un archivo vectorial con geometría de polígonos, para cada una de las imágenes analizadas, cuyas áreas cambian, razón por la que se intentó tomar las muestras en las mismas zonas de las diferentes imágenes.

El proceso permite ir tomando muestras tanto para la clasificación supervisada como para determinar la exactitud temática del resultado en cada uno de los archivos de segmentación obtenidos, como se muestra en la tabla 31.

Es necesario precisar que los archivos de segmentación, al ser una capa vectorial de polígonos, no tiene un arreglo sistemático, como lo tendría un arreglo de imagen por pixels, que permita determinar la cantidad de muestras mínimas o máximas para cada tipo de coberturas, esto depende del tamaño del polígono y la cantidad de área que tiene cada cobertura en la zona de estudio; por ejemplo, en la zona de estudio la presencia de bosque denso se limita a algunos relictos de bosque de galería o ripario y algunas zonas pequeñas de bosque denso bajo, razón por la cual, la cantidad de muestras es baja.

Tabla 31

Información de las muestras que se tomaron sobre las imágenes SAR con descomposición polarimétrica

Nombre de la cobertura	Krogager	Krogager	Freeman &	Freeman &	PHDW	PHDW
	(1)	(2)	Durden (1)	Durden (2)	(1)	(2)
Tejido urbano continuo 1	32	9	22	11	14	7
Tejido urbano continuo 2	16	8	10	8	23	9
Tejido urbano continuo 3	7	4	9	5	12	9
Cultivos anuales o transitorios 1	8	6	14	8	16	6
Cultivos anuales o transitorios 2	17	5	19	4	17	5
Cultivos confinados 1	14	16	17	8	18	4
Cultivos confinados 2	21	7	4	12	14	13
Pastos limpios	10	5	10	9	11	5
Bosque natural denso	3	2	3	2	2	2
Bosque plantado	13	5	7	4	9	4
Herbazal denso	7	3	4	3	6	2
Arbustal denso	3	3	9	3	3	4
Aguas continentales	11	3	10	3	11	3
MixRelieve	42	19	21	17	14	13

(1) Cantidad polígonos de muestra para clasificación

(2) Cantidad polígonos de muestra para medir exactitud temática.

6.2.3 Resultado de la clasificación supervisada, por el método de Máquinas de Soporte Vectorial, de las imágenes SAR con descomposición polarimétrica

Teniendo como entrada los archivos vectoriales de segmentación, los que almacenan en su tabla de atributos las principales características (retrodispersión, textura y otros) de la imagen SAR, como se describió en el aparte “5.3.4.2”, se ejecutaron en el programa CATALYST Profesional los procesos de clasificación supervisada, con los algoritmos de Árboles Aleatorios (RT) por su sigla en inglés y Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) por su sigla en inglés; No obstante, como se ha mencionado anteriormente,

se muestran los resultados de las clasificaciones obtenidas por el método de SVM realizadas a las imágenes listadas en la tabla 30, las que se pueden observar en las ilustraciones 57, 58 y 59.

Ilustración 44

Resultado clasificación supervisada, método SVM sobre la imagen SAR con descomposición polarimétrica de Krogager

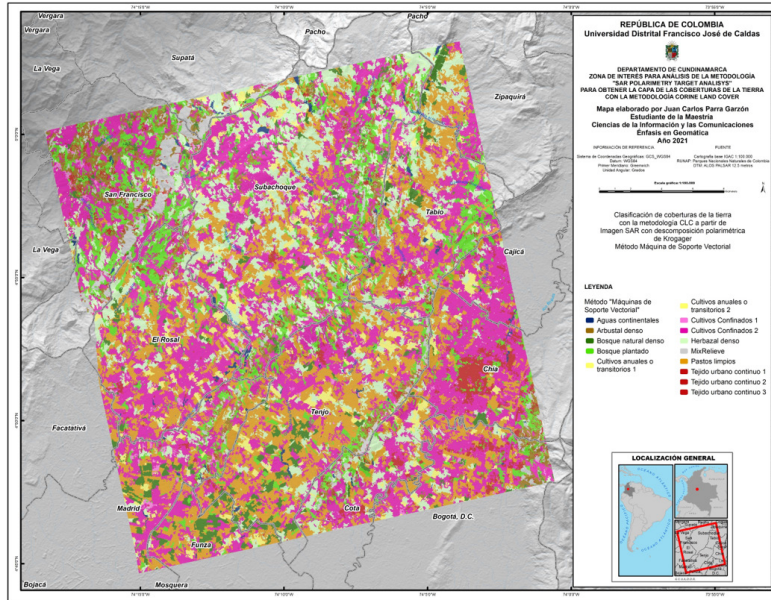
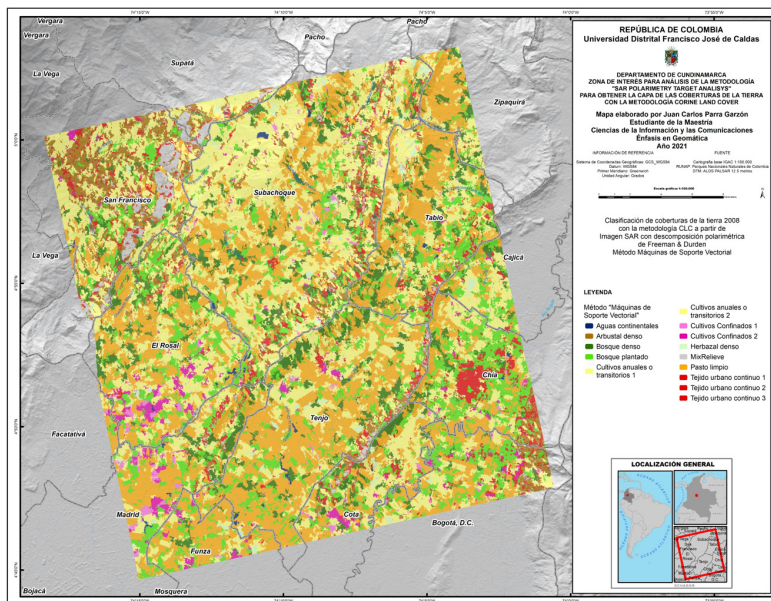


Ilustración 45

Resultado clasificación supervisada, método SVM sobre la imagen SAR con descomposición polarimétrica de Freeman & Durden



6.2.4 Resultado de la validación de la exactitud de las clasificaciones supervisadas

En el proceso de validación de la exactitud de la clasificación, se tomó como referencia la capa de coberturas de la tierra elaborada a partir de las imágenes ópticas ALOS y Landsat 7 ETM, con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia.

El módulo “Object Analyst” del programa CATALYST Profesional tiene una aplicación que genera la matriz de confusión, la que permite analizar evaluar la exactitud de cada cobertura de la tierra examinada, como se muestra en la tablas 32, 33 y 34, en donde las columnas corresponden a la información de referencia de la verdad del terreno, que para este caso sería la capa de coberturas de la tierra mencionada en el párrafo anterior, y las filas a las asignaciones dadas por el algoritmo de clasificación. Los datos que se muestran en la diagonal principal, hacen referencia a la coincidencia entre la verdad de terreno y la información clasificada, en este caso, serían los polígonos bien clasificados.

Partiendo de la matriz de confusión, se pueden calcular algunos índices relativos a la clasificación como son:

- Índice de exactitud del usuario (EU%), hace referencia a el porcentaje de exactitud que existe en la clasificación de cada clase o cobertura de la tierra.
- Índice de exactitud del productor (EP%), muestra que tan bien han sido clasificados los polígonos de referencia.
- El porcentaje de exactitud general, es aquel que está dado por el coeficiente entre la suma de los polígonos bien clasificados (datos de la diagonal de la matriz) y el total de los polígonos evaluados.

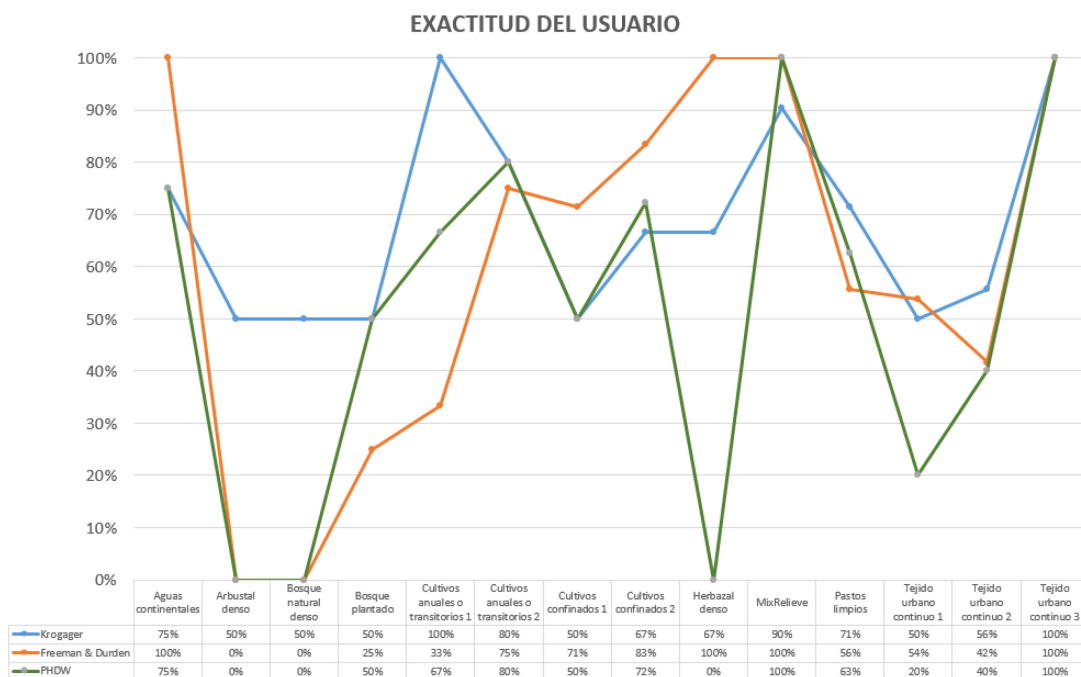
La ilustración 47 muestra que la de exactitud de usuario (EU) está por encima de 50 % para todas las coberturas cuando se utiliza la imagen SAR con descomposición de Krogager, incluso llegando al 100 % en el caso de los cultivos anuales o transitorios 1 y el tejido urbano continuo 3; los cultivos anuales o transitorios 2 presentan una exactitud del 80% y los pastos limpios el 71%.

En el caso de las coberturas obtenidas con la imagen SAR con descomposición de Freeman & Durden, la mejor exactitud de usuario se presenta en las coberturas de aguas continentales, herbazal denso y tejido urbano continuo 3, con el 100 % cada una; los cultivos confinados son los que mejor resultado de exactitud presentaron respecto a los demás métodos de descomposición polarimétrica.

La exactitud de usuario (EU) de la clasificación obtenida a partir de la imagen SAR con descomposición PHDW, presenta buenos resultados en zonas con cultivos anuales o transitorios 2, cultivos confinados 2 y tejido urbano continuo 3.

Ilustración 47

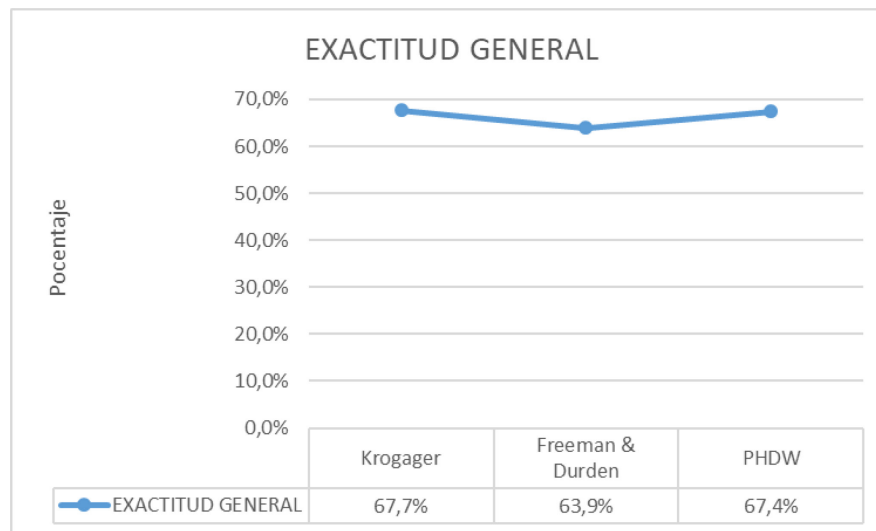
Exactitud de usuario obtenida en cada clasificación supervisada



porcentaje de exactitud general para cada clasificación obtenida se muestra en la ilustración 48, en donde se observa que la clasificación obtenida sobre la imagen SAR con descomposición de Krogager es la que mejor resultado obtiene, seguido por la imagen SAR con descomposición PHDW y por último la que utiliza descomposición de Freeman & Durden; no obstante, al mirar bien los porcentajes, estos no están tan distantes entre ellos, todos están por encima del 64 % y la diferencia es aproximadamente de 4 puntos porcentuales.

Ilustración 48

Exactitud general obtenida en cada clasificación supervisada

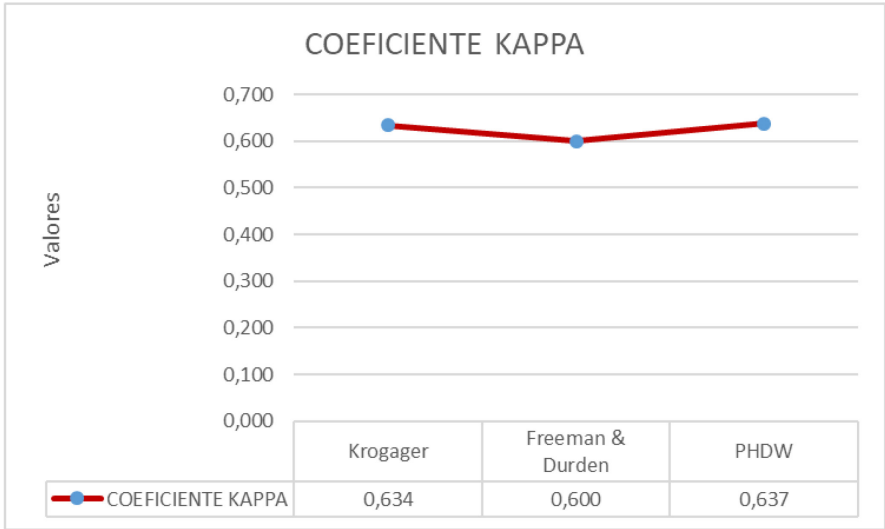


Los análisis de exactitud anteriores se han fundamentado en los parámetros individuales que arroja la matriz de confusión, no obstante, existe un mecanismo de análisis estadístico, llamado coeficiente Kappa, que permite no incurrir en resultados aparentemente correctos por distribuciones totalmente aleatorias de los polígonos. Dicho coeficiente mide la exactitud de la clasificación a la concordancia entre el mapa o capa de coberturas de la tierra y la verdad del terreno, extrayendo la contribución obtenida por el azar (Hudson, 1987; Vásquez, 2019)

En la ilustración 49 se aprecia los resultados del coeficiente Kappa para cada una de las clasificaciones que se vienen analizando, mostrando que el mejor resultado se obtiene con la clasificación sobre la imagen SAR con descomposición PHDW (0,637), seguido por la que tiene descomposición de Krogager(0,634) y por últimos la que se tiene descomposición de Freeman & Durden (0,600), sin embargo, todas entran en el rango de clasificación de calidad muy buena, aunque está en el límite inferior del rango, de acuerdo con la escala propuesta por (Landis & Koch, 1977).

Ilustración 49

Coefficiente Kappa obtenido en cada clasificación supervisada



7 Conclusiones

Teniendo en cuenta que los términos uso y cobertura de la tierra tiene una estrecha relación llevando a confusiones, como se explicó en el contexto del problema, y que la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia combina los dos conceptos en su leyenda clasificándolas por niveles, sumado a la complejidad que presenta la zona de estudio escogida, en donde la mezcla de coberturas de la tierra es alto, se hizo necesario determinar con precisión aquellos niveles que hacen referencia solo a coberturas de la tierra lo más homogéneas posibles presentes en la zona de estudio, lo que llevó a obtener las siguientes coberturas de la tierra para realizar el análisis polarimétrico:

- Tejido urbano continuo
- Cultivos anuales o transitorios
- Cultivos confinados
- Pastos limpios
- Bosque natural denso
- Bosque plantado
- Herbazal denso
- Arbustal denso
- Aguas continentales

Se observó que al utilizar la imagen RADARSAT 2 con polarización completa, sin pre-procesamiento, con el módulo “*SAR Polarimetry Target Analysis –SPTA*” del programa CATALYST Professional para realizar el análisis polarimétrico de cada una de las nueve coberturas de la tierra seleccionadas y mencionadas anteriormente, los resultados de las gráficas de co-polarización y los reportes numéricos no tenían coherencia, razón por la que se debió realizar el proceso de ortorectificación y aplicar los diferentes algoritmos como: filtros, descomposiciones polarimétricas y conversión de representación matricial, las que se describieron a lo largo de la presente investigación, de las cuales únicamente la imagen SAR con filtro PSBoxcar de 3X3 y filtro de Lee de 5X5, así como las de arreglo matricial C4R6C y C3R3C cumplieron con las condiciones polarimétricas que exige SPTA para poder ser desplegadas y analizadas de acuerdo con los objetivos propuestos en la presente investigación.

Las gráficas de co-polarización determinan, en el caso particular de la zona de estudio, que las coberturas de tejido urbano continuo y bosque denso tienden a tener el comportamiento de un dipolo, lo que se

traduce en una fuerte retrodispersión en un solo canal de polarización, para este caso VV teniendo en cuenta que la mayor intensidad de la señal se encuentra cuando la orientación está en 90° y en -90° ; No obstante, la diferencia se puede determinar en ciertas variaciones en el ángulo de orientación, en donde la señal es más intensa. De igual manera sucede con las gráficas de co-polarización de los cultivos transitorios o anuales, cultivos confinados y pastos limpios, que muestran el comportamiento de un dipolo, pero en este caso HH teniendo en cuenta que la mayor intensidad de la señal se encuentra cuando la orientación está en 0° ; sin embargo, al igual que el caso anterior, se observan pequeñas variaciones en el ángulo de observación que permite diferenciarla. Las gráficas de co-polarización del bosque plantado, herbazal denso, arbustal denso y aguas continentales generan una figura canónica que corresponde al dihedro, en donde se presenta un número par de rebotes presentando una diferencia de fase de 180 grados entre las polarizaciones HH Y VV.

Al examinar el comportamiento polarimétrico de las coberturas seleccionadas a través del método de Cloude & Pottier, que tiene que ver con la entropía, anisotropía, ángulo α , se obtuvo información valiosa acerca de los tipos de dispersión dominante en cada una de ellas, es así como el tejido urbano continuo, pastos limpios, bosque denso, bosque plantado, herbazal denso y arbustal denso presentan de manera general entropía media y dispersión por volumen, el aumento de la entropía se debe a una distribución estadística central del ángulo de orientación; En el caso de los cultivos anuales o transitorios y cultivos confinados presentan entropía baja y dispersión de superficie, no obstante, a pesar de presentar características similares, se diferencian porque existen variaciones en los valores resultado.

Al evaluar el comportamiento polarimétrico de las coberturas de la tierra por el método de Freeman & Durden, la contribución de potencia predominante en el tipo de dispersión, determinó que en el tejido urbano continuo, pastos limpios, bosque natural denso, bosque plantado, herbazal denso, arbustal denso, la dispersión predominante es de volumen, mientras que en los cultivos transitorio o anuales y cultivos confinados predomina la dispersión de superficie, ratificando el comportamiento polarimétrico obtenido por el método de Cloude & Pottier.

Los resultados de los análisis polarimétricos realizados para las coberturas de la tierra en la zona de estudios permiten determinar en primera instancia características relevantes, como si fuera una firma polarimétrica para cada cobertura, lo que ayuda a tomar decisiones en el momento de realizar una interpretación de coberturas de la tierra con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia.

Finalmente, al realizar la clasificación supervisada bajo un enfoque de orientado a objetos y empleando los algoritmos de máquinas de soporte vectorial y bosques aleatorios sobre la imagen SAR a la que se le aplicó diferentes filtros, descomposiciones polarimétricas y arreglo matricial, se obtuvieron diferentes resultados; de estos, se tomaron los tres mejores respecto a su exactitud temática en términos del coeficiente Kappa, es así como, la clasificación obtenida sobre la imagen SAR con descomposición de Krogager arrojó un coeficiente Kappa de 0.634, la imagen SAR con descomposición de Freeman & Durden arrojó un coeficiente Kappa de 0.600 y la imagen SAR con descomposición PHDW arrojó un coeficiente Kappa de 0.637, que de acuerdo con la escala propuesta por (Landis & Koch, 1977), todas entran en el rango de clasificación de calidad muy buena, aunque están en el límite inferior del rango.

En todo caso, a pesar que la comunidad científica ha investigado y mejorado los algoritmos de clasificación supervisada, todos los resultados requieren, en mayor o menor escala, de un proceso de edición por parte del intérprete de imágenes, que permita ajustar aquellas coberturas de la tierra que fueron clasificados de manera errónea, o si se desea, para el caso de la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, llegar a mejor nivel de detalle agregando inclusive el uso del suelo.

8 Recomendaciones

Es importante tener lo más claro posible los conceptos teóricos acerca de las imágenes SAR, lo mismo que las descomposiciones polarimétricas para poder realizar un flujo de trabajo que permita obtener información acerca de los objetivos de interés a estudiar y poder realizar un análisis adecuado de los mismos.

Es indispensable que al realizar el proceso de análisis polarimétrico de una imagen SAR utilizando el módulo “*SAR Polarimetry Target Analysis –SPTA*” del programa CATALYST Professional, la imagen tenga un pre-procesamiento como es la ortorectificación y aplicación de algún filtro que permita reducir el ruido o speckle.

Como se hizo en este estudio, es necesario ejecutar varios métodos de descomposiciones polarimétricas a los objetivos, en este caso coberturas de la tierra, que permitan contrastar los resultados y así ir definiendo características particulares o firmas polarimétricas de los mismos.

Antes de comenzar a realizar los procesos que conllevan a obtener una capa temática, como es el caso de la capa de coberturas de la tierra, es preciso que el intérprete haga una investigación, verificación de campo o revisión bibliográfica de las coberturas de la tierra que puede encontrar en la zona y así ir patronando las muestras que le servirán tanto para la clasificación supervisada como para los procesos que permitan determinar la exactitud temática.

Se hace necesario realizar este tipo de investigación en diferentes regiones del país, teniendo en cuenta la heterogeneidad de coberturas de la tierra que se presentan debido a los pisos térmicos, topografía, tipos de suelos, entre otros.

9 Alcances e impactos

A pesar de lo complejo que puede resultar el uso de imágenes SAR, teniendo en cuenta que la conceptualización cambia respecto a las imágenes ópticas, éstas son de gran utilidad en zonas con condiciones atmosféricas adversas, como sucede en gran parte del territorio colombiano, convirtiéndose en una alternativa viable para obtener capas temáticas de coberturas de la tierra y, de manera particular como se demostró en esta investigación, utilizando la leyenda CORINE Land Cover adaptada para Colombia, con buena precisión o exactitud temática a partir de la información polarimétrica obtenida, el uso del enfoque de clasificación supervisada orientada a objetos y la aplicación del algoritmo de máquinas de soporte vectorial o árboles aleatorios.

Referencias

- Addesso, P., Conte, R., Longo, M., Restaino, R., & Vivone, G. (2012). *SVM-based cloud detection aided by contextual information*. En *Advances in Radar and Remote Sensing (TyWRRS)*, 2012 Tyrrhenian Workshop on (pp. 214–221). IEEE.
- Alva, M. E. & León, A. A. (2014). *Diseño e implementación de un catálogo de objetos geográficos para la cobertura de la tierra usando la leyenda CORINE Land Cover, para el departamento de Ancash*. XVI Seminario Internacional SELPER, 29 de septiembre al 3 de octubre de 2014, Medellín - Colombia.
- Andrade, A. (1994). *El ordenamiento territorial en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Comisión de ordenamiento territorial*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Andrade, N. S. D. O. (2012). *Radar de abertura sintética polarimétrico do R-99B: análise e aplicações*. Tesis de doctorado, Universidad de Brasilia.
- Antunes, M. A. H., Debiasi, P., da Costa, A. R., & Gleriani, J. M. (2012). *Correção atmosférica de imágenes ALOS*. *Revista Brasileira de Cartografia*, 63(4).
- Aronoff, S. (1982). *The map accuracy report: A user's view*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48, 1309–1312.
- Betancourt (2005). *Las máquinas de soporte vectorial*. Universidad Tecnológica de Pereira. Artículo.
- Blaschke, Thomas, & Hay, G. J. (2001). *Object-oriented image analysis and scale-space: theory and methods for modeling and evaluating multiscale landscape structure*. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 34(4), 22–29.
- Boerner, W. M., Mott, H., Luneburg, E., Livingstone, C., Brisco, B., Brown, R. J., ... & Pottier, E. (1998). *Polarimetric in radar remote sensing: Basic and applied concepts in "principles and applications of IMAGING RADAR"*. En: Ryerson, R. A., editor. *Manual of Remote Sensing: Principles and Applications of Imaging Radar*, John Wiley and Sons, 3(5): 271–356.
- Borgeaud, M., Shin, R. T., & Kong, J. A. (1987). *Theoretical models for polarimetric radar clutter*. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 1(1), 73-89.
- Boulesteix, A.-L., Janitza, S., Kruppa, J., & König, I. R. (2012). *Overview of random forest methodology and practical guidance with emphasis on computational biology and bioinformatics*. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 2(6), 493–507.
- Breiman, L. (2001). *Random forests*. *Machine learning*, 45(1), 5–32.
- Buddhiraju, K. M., & Rizvi, I. A. (2010). *Comparison of CBF, ANN and SVM classifiers for object based classification of high resolution satellite images*. En *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2010 IEEE International (pp. 40–43). IEEE.
- Buemi, M. E. (2012). *Tratamiento de imágenes de radar de apertura sintética mediante filtros stack* (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales). Universidad de Buenos Aires.

- Burnett, C., & Blaschke, T. (2003). *A multi-scale segmentation/object relationship modelling methodology for landscape analysis*. *Ecological modelling*, 168(3), 233-249.
- Cameron, W. L., & Leung, L. K. (1990, May). *Feature motivated polarization scattering matrix decomposition*. In IEEE International Conference on Radar (pp. 549-557). IEEE.
- Canada Center for Remote Sensing. (2015). <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-and-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/microwave-remote-sensing/radar-polarimetry>. Consultado 31 marzo 2021.
- CCRS. (2001). Programa GlobeSAR: *Material educativo para teledetección mediante radares*. Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada. Retrieved from <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/tekrd/internat/glbsar2/indexe.html>. Consultado 25 de enero de 2021.
- Clemente, V. (2012). *Análisis de mecanismos de dispersión polarimétricos para el estudio y caracterización de cultivos agrícolas*. Universidad Politécnica de Cataluña. Tesis.
- Cloude, S. R., & Pottier, E. (1996). *A review of target decomposition theorems in radar polarimetry*. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 34(2), 498-518.
- Cloude, SR & Pottier, E. (1997). *An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR*, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 35 (1), 68-78.
- Cloude, S. (2007). *The dual polarization entropy/alpha decomposition: a PALSAR case study*. In *Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry* (Vol. 644).
- Collett, E. (2005). *Field guide to polarization*. Bellingham, WA: Spie. September, p. 12.
- Corredor Gil, L. P., Cárdenas Quiroga, E. A., & Ordóñez López, J. C. (2011). *Aplicación de la metodología corine land cover en la determinación de los cambios de cobertura en el parque natural los flamencos*. Artículo, *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina* Vol 22-2, PP 153-167. Bogotá, diciembre de 2011.
- Cuello, A. R., Antes, M. E., Raed, M. A., Sedeño, A. A., Delise, L. E., Gari, J. M., & Di Franco, L. A. (2015). *Mapeo de ambientes en el parque nacional los Glaciares, provincia de Santa Cruz–Argentina (Glaciar Upsala y Perito Moreno), mediante datos ópticos y radar e integración en un SIG*. *Ciencias Espaciales*, 8(1), 327-343.
- Curlander, J. & McDonough, R. (1991). *Synthetic aperture radar* (Vol. 396). New York, NY, USA: John Wiley & Sons.
- Chan, Y. K., & Koo, V. (2008). *An introduction to synthetic aperture radar (SAR)*. *Progress In Electromagnetics Research B*, 2, 27-60.
- Chethan, H. K., Kumar, G. H., & Raghavendra, R. (2009). *Texture based approach for cloud classification using SVM*. In *Advances in Recent Technologies in Communication and Computing*, 2009. ARTCom'09. International Conference on (pp. 688–690). IEEE.
- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de teledetección espacial*. Vol. 453. Madrid: Ediciones Rialp
- Chuvieco, E. (1998). *Fundamentos de teledetección espacial*. *Estudios Geográficos*, 59, 135.

- Díaz González, F. A., Quintero Torres, S. V., Triana Correa, J. S., & Morón Hernández, D. C (2014). *Aproximación a los sistemas de percepción remota en satélites tequeños*. Universidad Sergio Arboleda. libro desarrollado en el marco de la ejecución del proyecto contrato RC No. 368- 2013, financiado por Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, Francisco José de Caldas de Colciencias.
- Domènech Olivie, J. (2015). *H- α decomposition and unsupervised Wishart classification for dual-polarized polarimetric SAR data*. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona. Recuperado el 2019 de Junio de 13, de https://ddd.uab.cat/pub/trerepro/2015/hdl_2072_252351/TFM_JoanDomenechOlivie_pa rt01.pdf.
- Duquenoy, M., Ovarlez, J. P., Ferro-Famil, L., Vignaud, L., & Pottier, E. (2006). *Study of dispersive and anisotropic scatterers behavior in radar imaging using time-frequency analysis and polarimetric coherent decomposition*. In 2006 IEEE Conference on Radar (pp. 6-pp). IEEE Conference on Radar, 24-27 April. 180-185.
- Edrosa, M. (2011, November). *Aplicación de la teledetección para el monitoreo de eventos hídricos superficiales mediante imágenes Cosmo SkyMed*. Córdoba Argentina.
- El-Darymli, K., McGuire, P., Power, D., & Moloney, C. (2012). *Understanding the significance of radiometric calibration for SAR imagery: a radar equation perspective*. In Proc. IEEE Newfoundland Electrical and Computer Engineering Conf (pp. 1-6). En: NECEC 2012, Newfoundland, Canada.
- Fang, C., & Wen, H. (2005). *A new classification method based on Cloude Pottier eigenvalue/eigenvector decomposition*. In Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS'05. (Vol. 1, pp. 4-pp). IEEE.
- FAO. (2010). *Evaluación de los recursos naturales mundiales 2010*. Informe. Nacional Colombia, FRA2010/043 Roma,2010.
- Fernández, Y., Escalona, M. & Valdez, J. (2015). *Imágenes de radar de apertura sintética y conceptos básicos de polarimetría*. Avances y perspectivas de geomática con aplicaciones ambientales, agrícolas y urbanas, primera edición, 2015. <https://www.researchgate.net/publication/301247047>. Consultado 16 junio de 2020
- Freeman, A., & Durden, S. L. (1998). *A three-component scattering model for polarimetric SAR data*. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 36(3), 963-973.
- Galarreta, A. P. (2014). *Automatización de la medición de fase geométrica por la polarimetría*.
- Hawkins, R., Touzi, R., Wind, A., Murnaghan, K., & Livingstone, C. (2000). *Polarimetric calibration results and error budget for SAR-580 system*. CEOS Committee on Earth Observation Satellites; Working Group on Calibration and Validation, Proceedings of Conference Oct. 26-29, 1999, Toulouse, France. Eds: Robert A. Harris & L. Ouwehand. European Space Agency – Paris. ESA-SP vol. 450, ISBN: 9290926414, 699-704 pp.
- Heijnen, S. H., Ligthart, L. P., & Khlusov, V. (2002). *COMESA: concurrent measurements of the elements of the scattering matrix*. In 14th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications. MIKON-2002. Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 02EX562) (Vol. 1, pp. 179-182). IEEE. May.

- Henderson, F. & Lewis, A. (1998). *Principles and applications of imaging radar*. Manual of remote sensing: Volume 2.
- Hernández, Y. T. (2010). *El ordenamiento territorial y su construcción social en Colombia: ¿un instrumento para el desarrollo sustentable?*. Artículo de reflexión crítica sobre las posibilidades del ordenamiento territorial como herramienta para la construcción de un orden social deseado y para alcanzar el desarrollo sustentable Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, (19), 97-109.
- Hudson, W. D. (1987). *Correct formulation of the kappa coefficient of agreement*. Photogrammetric engineering and remote sensing, 53(4), 421-422
- Huynen, JR (1965). *Measurement of the target scattering matrix*". Procedimientos del IEEE, 53 (8), 936-946
- IDEAM, IGAC & CORMAGDALENA (2008). *Mapa de cobertura de la tierra cuenca Magdalena-Cauca*. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena. Bogotá, D.C
- IDEAM (2010). *Leyenda nacional de coberturas de la tierra*. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C.
- ITC. (2004). *Principles of remote sensing (Third)*. The Netherlands: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation.
- Kaehler, A., & Bradski, G. R. (2014). *Learning openCV., computer vision with the OpenCV. library* (2nd).
- Khalilia, M., Chakraborty, S., & Popescu, M. (2011). *Predicting disease risks from highly imbalanced data using random forest*. BMC medical informatics and decision making, 11(1), 1.
- Kerle, N., Janssen, L. L., & Huurneman, G. C. (2004). *Principles of remote sensing*. ITC, Educational textbook series, 2, 250.
- Krogager, E. (1990). *New decomposition of the radar target scattering matrix*. Electronics Letters, 26(18), 1525-1527.
- Krogager, E. (1998). *Comparison of various POL-RAD and POL-SAR image feature sorting and classification algorithms*. In Fourth international workshop on radar polarimetry (Nantes, 13-17 July 1998) (pp. 77-86).
- Lamprea, F. A. (2017). *Zonificación de las coberturas de la tierra mediante la aplicación de herramientas SIG para la revisión y ajuste del POT en el marco del crecimiento urbano y la conurbación norte: caso Municipio de Zipaquirá*. Tesis de Grado, Centro de Investigación y Desarrollo en la Información Geográfica-CIAF-Convenio IGAC - Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Landis & Koch (1977). Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). *The measurement of observer agreement for categorical data*. biometrics, 159-174.
- Leblon, B., La Rocque, A., & Gil, M. (1999). *A new online course on radar polarimetry and PolSAR image processing*. European Space Agency, (Special Publication) ESA SP, 668 pp.

- Lee, J. S. (1981). *Refined filtering of image noise using local statistics*. Computer graphics and image processing, 15(4), 380-389.
- Lee, J. S., Hoppel, K. W., Mango, S. A., & Miller, A. R. (1994). *Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 32(5), 1017-1028.
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- Lizarazo, I. (2008). *SVM-based segmentation and classification of remotely sensed data*. International Journal of Remote Sensing, 29(24), 7277–7283.
- Lizarazo, I. (2010). *Fuzzy image regions for quantitative land cover analysis*. GEOBIA 2010.
- Lusch, D. P. (1999). *Introduction to microwave remote sensing*. Center for Remote Sensing and Geographic Information Science Michigan State University.
- Martin, C. & Aguilar, D. (2012). *Metodología para la actualización del mapa de cobertura de la tierra*. IDEAM.
- Martinis, S. (2010). *Automatic near real-time flood detection in high resolution Xband synthetic aperture radar satellite data using context-based classification on irregular graphs*. (Doctoral dissertation, Imu).
- Matkan, A. A., Hajeb, M., & Azarakhsh, Z. (2013). *Oil spill detection from SAR image using SVM based classification*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, SMPR, 1, W3.
- Melo, H. & Camacho, M. (2005). *Adaptación de la metodología CORINE Land Cover para Colombia*. IGAC. En: Revista Análisis Geográficos No 29 (2005). 22-36 p.
- Minambiente (2016). *Orientaciones a las autoridades ambientales para la definición y actualización de las determinantes ambientales y su Incorporación en los planes de ordenamiento territorial municipal y distrital*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Dirección General de Ordenamiento Ambiental Territorial y Coordinación del SINA. Grupo de Ordenamiento Ambiental Territorial.
- Moncayo, P. (2017). *Estimación desde satélites de la fracción de área inundada en humedades fluviales de un sector de la planicie de inundación del Bajo Paraná, Argentina* (Master's thesis).
- Monella, S. L. (2014). *Estudio de modelos electromagnéticos para la obtención de mapas de humedad superficial de suelo*. (Tesis Maestría en Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias). Nacional de Córdoba, Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich, CONAE, Córdoba Argentina.
- Montero Muñoz, I. (2010). *Análisis de datos SAR polarimétricos para el estudio y caracterización de zonas agrícolas*. Universidad Politécnica de Cataluña, Tesis.
- MOPU (1990). *El programa CORINE de la CEE*. Monografías de la Secretaría General de Medio Ambiente. Madrid.
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. P. (2013). *A tutorial on synthetic aperture radar*. IEEE Geoscience and remote sensing magazine, 1(1), 6-43.

- Moreno Cuesta, E., González Algarra, E., & Otero Pastor, I. (2001). *Caracterización del paisaje y su posible impacto ambiental a partir de la clasificación de usos de suelo CORINE Land Cover y la utilización de Sistemas de información geográfica*. Informes de la construcción, 53(476), 11–20. <https://doi.org/10.3989/ic.2001.v53.i476.644>.
- Nghiem, S. V., Yueh, S. H., Kwok, R., & Li, F. K. (1992). *Symmetry properties in polarimetric remote sensing*. Radio Science, 27(05), 693-711.
- Novoa, C. M. & Aguilar, D. A. (2012). *Metodología para la actualización del mapa de coberturas de la tierra*. IDEAM.
- Oliver, C., & Quegan, S. (2004). *Understanding synthetic aperture radar images*. SciTech Publishing.
- Olmsted, C. (1993). *Alaska SAR Facility scientific SAR user's guide*. ASF-SD-003.
- Oppenheim, A. & Lim, J. S (1981), *The importance of phase in signals*. Proceedings of the IEEE, 69(5) :529-541. Pierce, J. R., 2006. Almost all about waves. Dover Publications.240 p. Relative Dielectric Permittivity. 2013. <http://mysite.du.edu/~lconyers/SERDP/RDP.htm> SAR 2002. <http://www.csre.iitb.ac.in/ksrao/insar.html> .
- PCIGeomatics. (2018). *SAR Processing whit Geomatics*. Training Guide.
- Penta, B., Varghese, A. O., Rao, K. N., & Joshi, A. K. (2013). *Analysis of synthetic aperture radar polarimetric decomposition methods for land cover interpretation*. In Conference: ISRS and ISG National Symposium on Remote Sensing and GIS for Environment with Special Emphasis on Marine and Coastal Dynamics, At Vishakhapatnam, India.
- Pérez López, C. (2013). *Usos del suelo en Lanzarote mediante TIGs: revisión y análisis del CORINE Land Cover y actualización de clases*. Universidad Complutense de Madrid, Maestría en Tecnologías de la Información Geográfica.
- Posada, E., Daza, H., & Díaz, I. (2010). *Aplicación de la polarimetría de radar en observación de la tierra*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia – IDEAM “Experiencias en el Uso y Aplicación de Tecnologías Satelitales para Observación de la Tierra”, Comisión Colombiana del Espacio / El Instituto. –Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia. Edición Especial 2010.
- Posada, E., & Salvatierra, H. C. (2018). *Análisis comparativo de las metodologías de los sistemas de clasificación de la cobertura de la Tierra LCCS y CORINE, para mapeo de coberturas terrestres*. Revista Geográfica., Instituto Panamericano de Geografía e Historia, p 135 -160.
- Raney, R. (1998). *Radar fundamentals: technical perspective*. Principals and Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing, 2, 9-130.
- Ratta & Laciari (2011). *Estimación de daño de miocardio producido por el mal de Chagas mediante técnicas no invasivas*. V Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB 2011, May 16- 21. La Habana, Cuba, 33, 870-873.
- Richards, J. A. (2009). *Remote sensing with imaging radar* (Vol. 1). Berlín: Springer.
- Ríos, V. H. (2014). *Una revisión de la polarimetría y los efectos ionosféricos sobre los sistemas SAR, INSAR y PALSAR: requerimientos y métodos de corrección*.

- Roa, Y. L. B. (2020). *Evaluación de las capacidades interferométricas y polarimétricas de los datos adquiridos por el Instrumento Aerotransportado SARAT (banda-L)* (Doctoral dissertation, Consiglio Nazionale delle Ricerche).
- Rodríguez, J. & Peña, V. (2013). *Análisis de dinámicas de cambio de las coberturas de la tierra en Colombia, Escala 1:100.000 Periodos 2000-2002 y 2005-2009*. Publicación aprobada por el Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM, noviembre de 2013, Bogotá D.C., Colombia.
- Sakshaug, S. E. H. (2013). *Evaluation of polarimetric SAR decomposition methods for tropical forest analysis* (Master's thesis, University of Tromso).
- Salvatierra, C., Escudero, É., Jiménez, M., & Weidmann, G. (2015). *Técnicas de interpretación visual de la cobertura y uso de la tierra con metodologías basadas en sistemas de clasificación CORINE Land Cover*. Revista Jornadas de Investigación.
- Sánchez, J. (1999). *Análisis y estimación de parámetros físicos de vegetación mediante polarimetría radar* (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Valencia).
- Story, M., & Congalton, R. G. (1986). *Accuracy assessment: a user's perspective*. Photogrammetric Engineering and remote sensing, 52(3), 397-399.
- Tomiyasu, K. (1978). *Tutorial review of synthetic-aperture radar (SAR) with applications to imaging of the ocean surface*. Proceedings of the IEEE. Vol 66 No, 5.
- Toro, M., & Julio, C. (2000). *Estado del arte y análisis de perspectivas sobre la producción de frutas en el occidente de Colombia*.
- Torres, T. M. (2011). *Uso de Interferometría SAR (Synthetic Aperture Radar) en Ladera Occidental de Cerro Iguazo*. Ecuador. Córdoba
- Tso, B., & Mather, P. M. (2009). *Classification methods for remotely sensed data*. CRC Press Llc.
- Touzi, R., Goze, S., Le Toan, T., Lopes, A., & Mougin, E. (1992). *Polarimetric discriminators for SAR images*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30(5), 973-980.
- Touzi, R., Boerner, W. M., Lee, J. S., & Lueneburg, E. (2004). *A review of polarimetry in the context of synthetic aperture radar: Concepts and information extraction*. Can. J. Remote Sensing 30:380-407. Twomey S. 1197. Introduction to the Mathematics of Inversion in Remote Sensing and Indirect Measurements. Dover. 237 p.
- Touzi, R. (2007). *Speckle effect on polarimetric target scattering decomposition of SAR imagery*. Canadian Journal of Remote Sensing, 33(1), 60-68.
- Ulaby, F. T., & Elachi, C. (1990). *Radar polarimetry for geoscience applications*. Norwood.
- Valencia Mora, B. S (2019). *Seguimiento a la inundación ocurrida durante la ola invernal en el año 2010 sobre las coberturas vegetales identificables en el Municipio de Santa Cruz de Mompós utilizando imágenes del sensor PALSAR del satélite ALOS*.
- Veljanovski, T., Lamovec, P., Pehani, P., & Oštir, K. (2011). *Comparison of three techniques for detection of flooded areas on Envisat and Radarsat-2 satellite images*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.

- Van Zyl, J. J. (1989). *Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 27(1), 36-45.
- Van Zyl, J.J., Zebker, H. A., Elachi, C., & Ulaby, F. T. (1990). *Polarimetric radar system design. Radar polarimetry for geoscience applications*. Norwood, Ma, Artech House, 273-313.
- Van Zyl, J. J. (1993, February). *Application of Cloude's target decomposition theorem to polarimetric imaging radar data*. In Radar polarimetry (Vol. 1748, pp. 184-191). International Society for Optics and Photonics.
- Vargas, E. (1992). *Análisis y clasificación del uso y cobertura de la tierra con interpretación de imágenes de satélite*. Bogotá: IGAC-CIAF, 8-45.
- Vásquez, L. (2019). *Diseño de una metodología de clasificación de coberturas de manglar empleando imágenes SAR polarimétricas*. Tesis de Maestría, Universidad Católica de Manizales, Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
- Veljanovski, T., Lamovec, P., Pehani, P., & Oštir, K. (2011). *Comparison of three techniques for detection of flooded areas on ENVISAT and RADARSAT-2 satellite images*. V: Geoinformation for disaster management, Gi4DM.
- Vink, A. P. A. (1975). *Land use, in advancing agriculture*, APA Vink. Advances Series in Agricultural Sciences. 1.
- Wilches, H. M., & Ch, M. C. (2005). *Adaptación de la metodología CORINE Land Cover para Colombia*. Adjustment OF Corine Land Cover Methodology FOR Colombia.
- Woodhouse, I. H. (2017). *Introduction to microwave remote sensing*. CRC press. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group. 370 pp.
- Wright, P., Macklin, T., Willis, C., & Rye, T. (2005). *Coherent change detection with SAR*. In European Radar Conference, 2005. EURAD 2005. (pp. 17-20). IEEE. October.
- Yajima, Y., Yamaguchi, Y., Sato, R., Yamada, H., & Boerner, W. M. (2008). *POLSAR image analysis of wetlands using a modified four-component scattering power decomposition*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 46(6), 1667-1673.
- Zéner, M. P. (2013). *Focalización de imágenes SAR utilizando el algoritmo omega-k. simulación y validación* (Tesis Maestría). UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA, Argentina
- Zhang, L., Zhang, J., Zou, B., & Zhang, Y. (2008). *Comparison of methods for target detection and applications using polarimetric SAR image*. Piers online, 4(1), 140- 145.
- Zozaya, A. J. (2015). *Simulador básico de un radar de apertura sintética*. Revista IEE. Universidad Tecnológica Metropolitana, Departamento de Electricidad. Artículo: <https://www.researchgate.net/publication/280287287>
- Zozaya, A. J. (2015). *Electromagnetic interaction models for the characterization of targets in SAR scenes: preliminary literature review*. Revista Ingeniería UC, 22(1), 26-63. Descomposiciones polarimétricas

Anexo

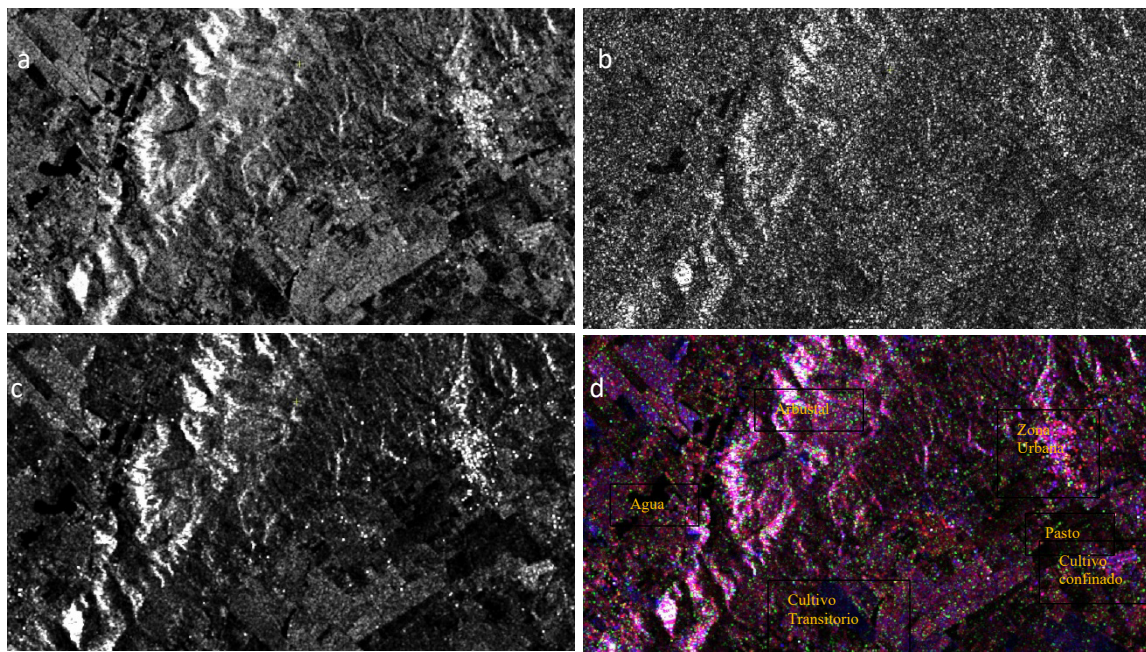
Anexo A. PSKROG - Krogager decomposition

En la ilustración 50 se observa que la zona urbana tiene mayor intensidad en las dispersiones dipole y esférica, el cultivo confinado (invernaderos) presenta mayor intensidad en la dispersión esférica seguida de la dispersión dipole, el cultivo transitorio tiene media intensidad en la dispersión esférica, los pastos muestran intensidad media en la dispersión dipole y disminuye un poco en la dispersión esférica y el agua tiene un comportamiento similar en las tres maneras de dispersión.

La dispersión helicoidal es muy difusa para los diferentes tipos de coberturas terrestres presentes, mostrando como si fuera ruido (speckle).

Ilustración 50

Descomposición polarimétrica de Krogager



Nota. ^a Poder de dispersión dipole, ^b Poder de dispersión helicoidal, ^c Poder de dispersión esférica, ^d R: dipole G: helicoidal B: esférica

Anexo B. PSPOLDIS - POLSAR discriminators

La ilustración 51 muestra alta intensidad de señal en la zona urbana en los canales: a. Máximo grado de polarización, c. Máximo componente completamente polarizado, f. Mínimo componente completamente polarizado, i. Máximo componente completamente no polarizado, k. Máxima potencia recibida, m. Máxima intensidad de dispersión, n. Mínima intensidad de dispersión y p. Coeficiente de variación.

El cultivo transitorio presenta alta señal en los canales: a. Máximo grado de polarización, b. Mínimo grado de polarización y p. Poder fraccional, mientras que el pasto muestra media intensidad en los canales: c. Máximo componente completamente polarizado, f. Mínimo componente completamente polarizado, i. Máximo componente completamente no polarizado, k. Máxima potencia recibida, m. Máxima intensidad de dispersión, n. Mínima intensidad de dispersión.

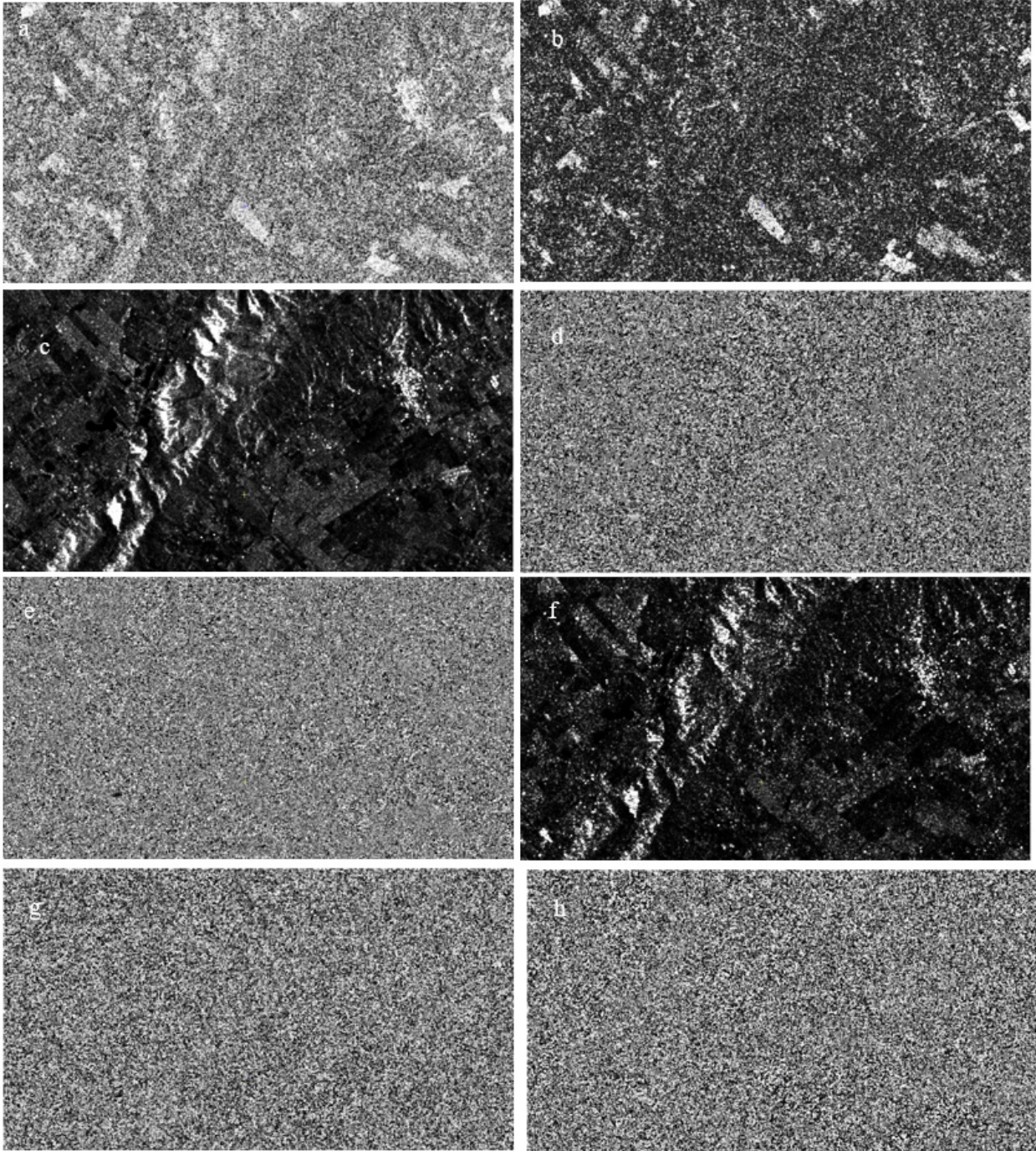
Los canales c. Máximo componente completamente polarizado, f. Mínimo componente completamente polarizado, k. Máxima potencia recibida, m. Máxima intensidad de dispersión y p. Coeficiente de variación muestran alta intensidad en cultivos confinados (invernaderos).

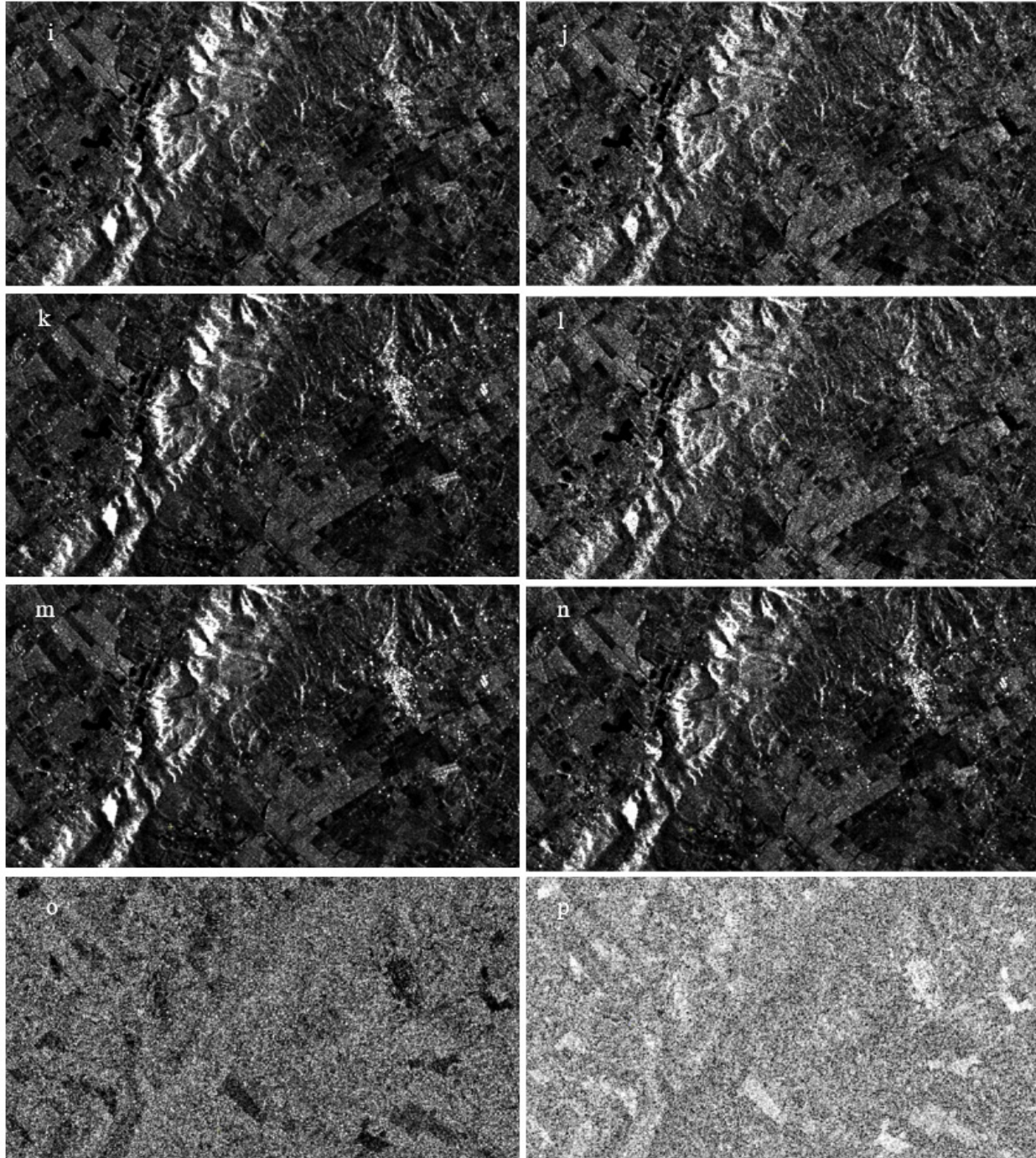
Los cuerpos de agua se comportan de manera similar en los canales: c. Máximo componente completamente polarizado, i. Máximo componente completamente no polarizado, j. Mínimo componente completamente no polarizado, k. Máxima potencia recibida, l. Mínima potencia recibida, m. Máxima intensidad de dispersión, n. Mínima intensidad de dispersión.

La ilustración 52 presenta ejemplos de composiciones a color con los canales resultado de aplicar la descomposición POLSAR.

Ilustración 51

Descomposición polarimétrica POLSAR



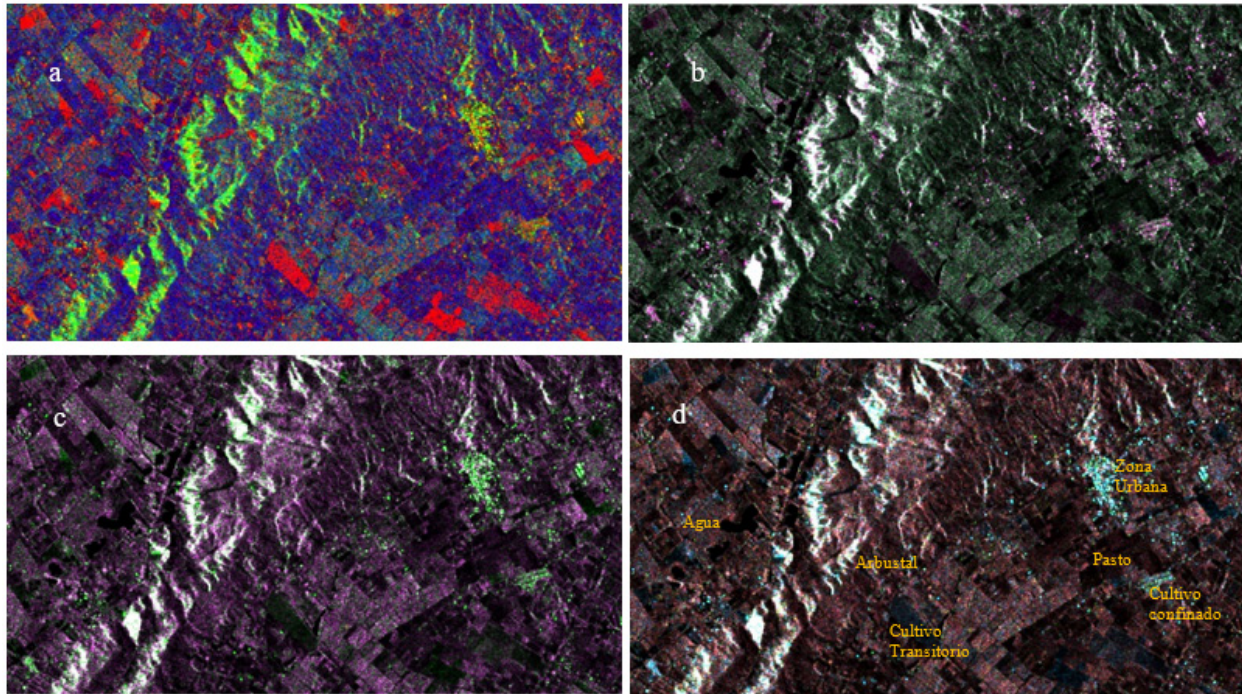


Nota. ^aMáximo grado de polarización, ^bMínimo grado de polarización, ^cMáximo componente completamente polarizado, ^dPSI ángulo máximo del componente completamente polarizado, ^eCHI ángulo máximo del componente completamente polarizado, ^fMínimo componente completamente polarizado, ^gPSI ángulo mínimo del componente completamente polarizado, ^hCHI ángulo mínimo del componente completamente polarizado, ⁱMáximo componente completamente no polarizado, ^jMínimo componente

completamente no polarizado, ^kMáxima potencia recibida, ^lMínima potencia recibida, ^mMáxima intensidad de dispersión, ⁿMínima intensidad de dispersión, ^oCoeficiente de variación, ^pPoder fraccional.

Ilustración 52

Ejemplo de composiciones a color con canales de descomposición polarimétrica POLSAR



Nota. ^a R: Máximo grado de polarización, G. componente completamente no polarizado, B: Coeficiente de variación.

^b R: Máximo componente completamente polarizado, G: Máximo componente completamente no polarizado, B: Máxima intensidad de dispersión.

^c R: Mínimo componente completamente no polarizado, G: Máxima potencia recibida, B: Mínima potencia recibida.

^d R: Máximo componente completamente polarizado, G: Máximo componente completamente no polarizado, B: Máxima intensidad de dispersión

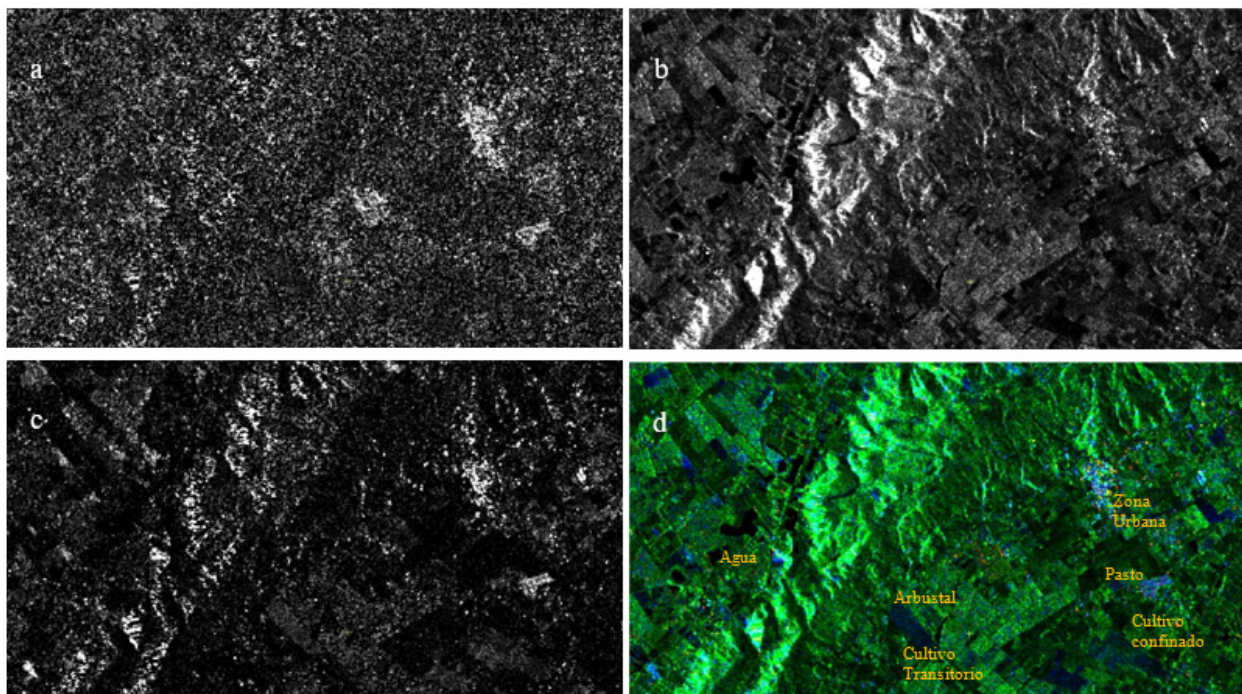
Anexo C. PSFREDUR – Freeman & Durden decomposition

Las zonas urbanas, construcciones y cultivos confinados (invernaderos) presentan alta dispersión de doble rebote, como se observa en la ilustración 53, no obstante, también se observa alta dispersión en rugosidad de superficie; mientras que los cultivos transitorios, dependiendo del tipo de cultivo y estado vegetativo, presentan media dispersión de rugosidad de superficie.

La mayor parte de las coberturas presentes en la zona de estudio, presentan dispersión de volumen; los cuerpos de agua presentan dispersión de superficie especular, razón por la que su tono es oscuro.

Ilustración 53

Descomposición polarimétrica de Freeman & Durden



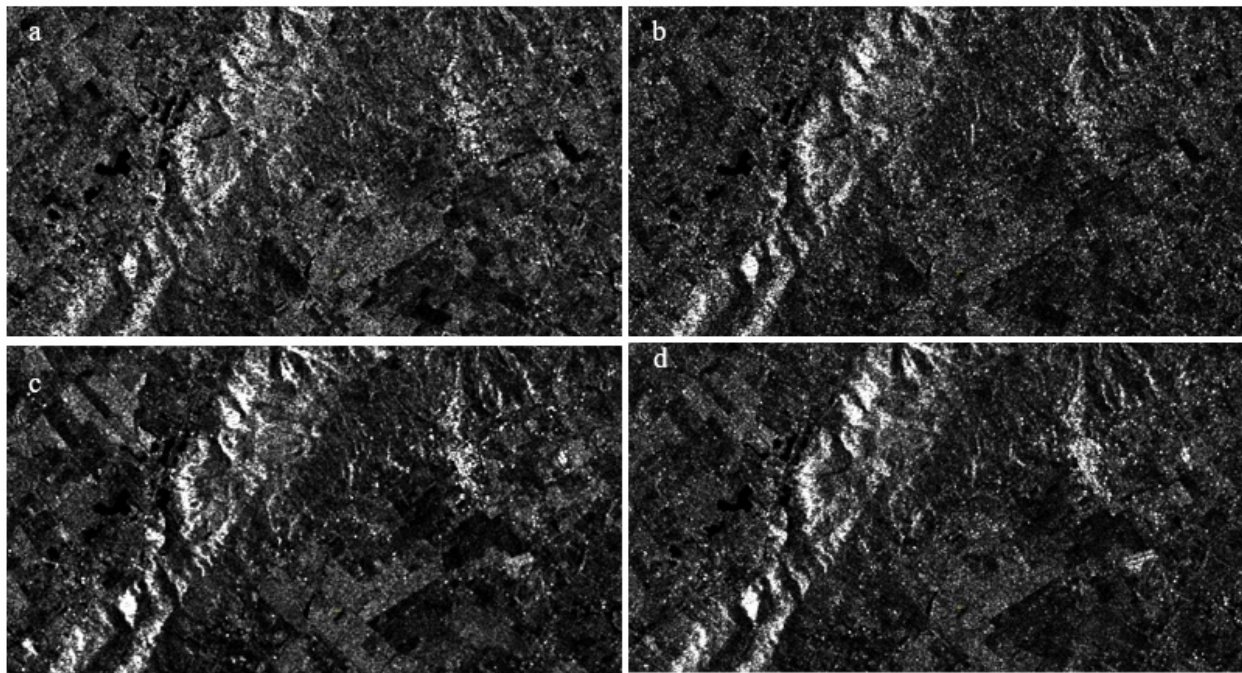
Nota. ^a. Dispersión de doble rebote, ^b. Dispersión de volumen, ^c. Dispersión de rugosidad de superficie, ^d. R: doble rebote G: volumen B: rugosidad de superficie.

Anexo D. PSPHDW –POLAR PHDW decomposition

El comportamiento de las coberturas terrestres respecto a las diferentes maneras de dispersión que presenta el método PHDW son muy similares, como se observa en la ilustración 54; Las zonas urbanas presentan mayor intensidad en la dispersión plate mientras que los cultivos confinados (invernaderos) lo hacen en la dispersión wire. Los pastos tienen mayor intensidad en la dispersión diplane y los cultivos transitorios en la dispersión plate; no obstante, estas intensidades son medias, lo que hace que se presente confusión al intentar separar estas coberturas; Los cuerpos de agua presentan baja intensidad de dispersión en todos los métodos.

Ilustración 54

Descomposición polarimétrica PHDW



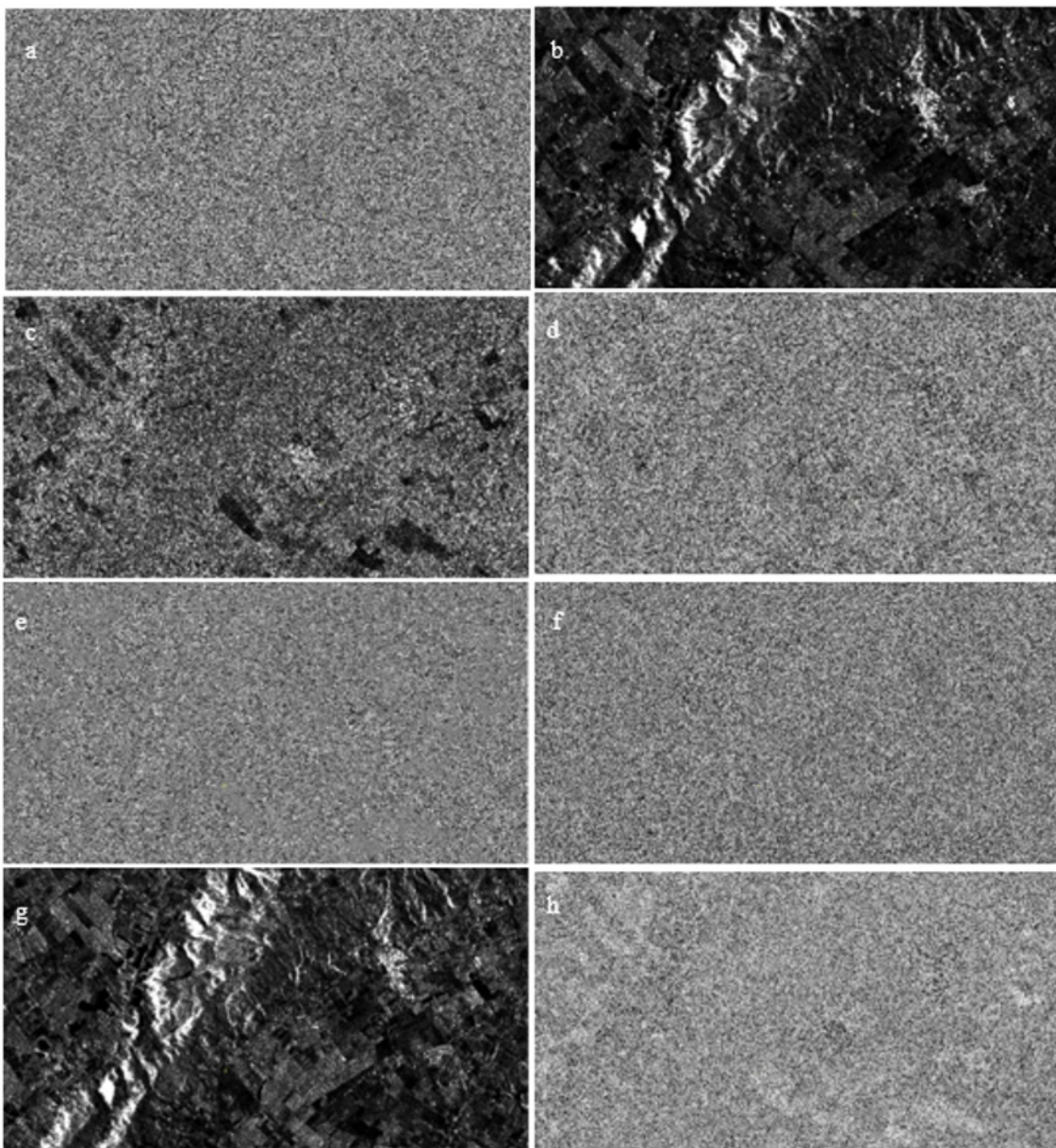
Nota. ^a. Dispersión diplane, ^b. Dispersión helix, ^c. Dispersión plate, ^d. Dispersión wire.

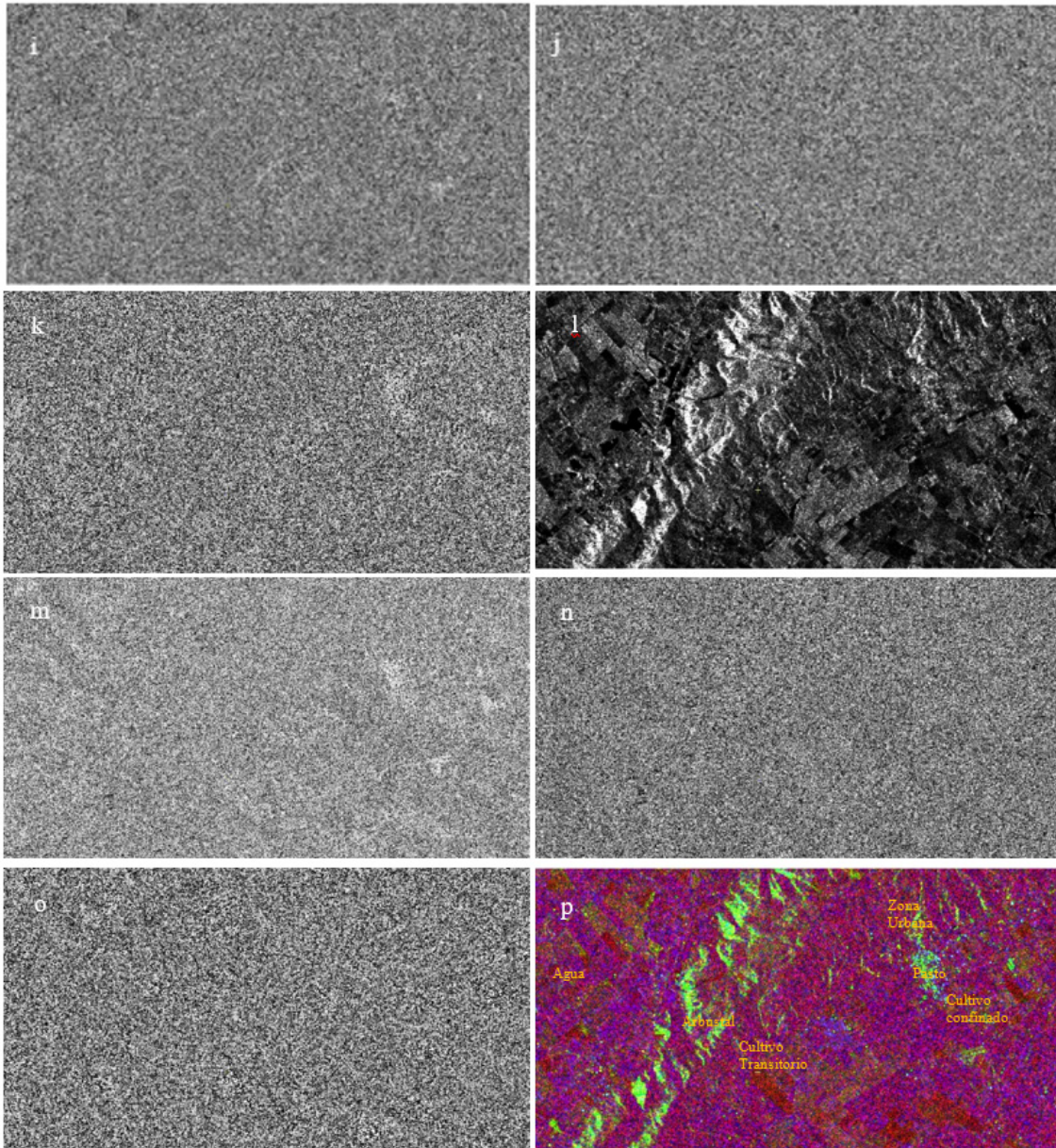
Anexo E. PSTOUZIDEC - Touzi decomposition

La descomposición de Touzi se comporta de manera analógica a las componentes principales que se obtienen en imágenes ópticas, es así como se generan diferentes capas como se muestra en la ilustración 55: a. Ángulo PSI dominante, b. Eigenvalue dominante, c. Touzi alpha dominante, d. Touzi phase dominante, e. Ángulo tau.

Ilustración 55

Descomposición polarimétrica de Touzi





Nota. ^a. Ángulo PSI dominante, ^b. Eigenvalue dominante, ^c. Touzi alpha dominante, ^d. Touzi phase dominante, ^e. Ángulo tau dominante, ^f. Ángulo PSI secundario, ^g. Eigenvalue secundario, ^h. Touzi alpha secundario, ⁱ. Touzi phase secundario, ^j. Ángulo tau secundario, ^k. Ángulo PSI terciario, ^l. Eigenvalue terciario, ^m. Touzi alpha terciario, ⁿ. Touzi phase terciario, ^o. Touzi tau terciario, ^p. R: Ángulo PSI dominante G: Ángulo PSI dominante B: Touzi alpha dominante.

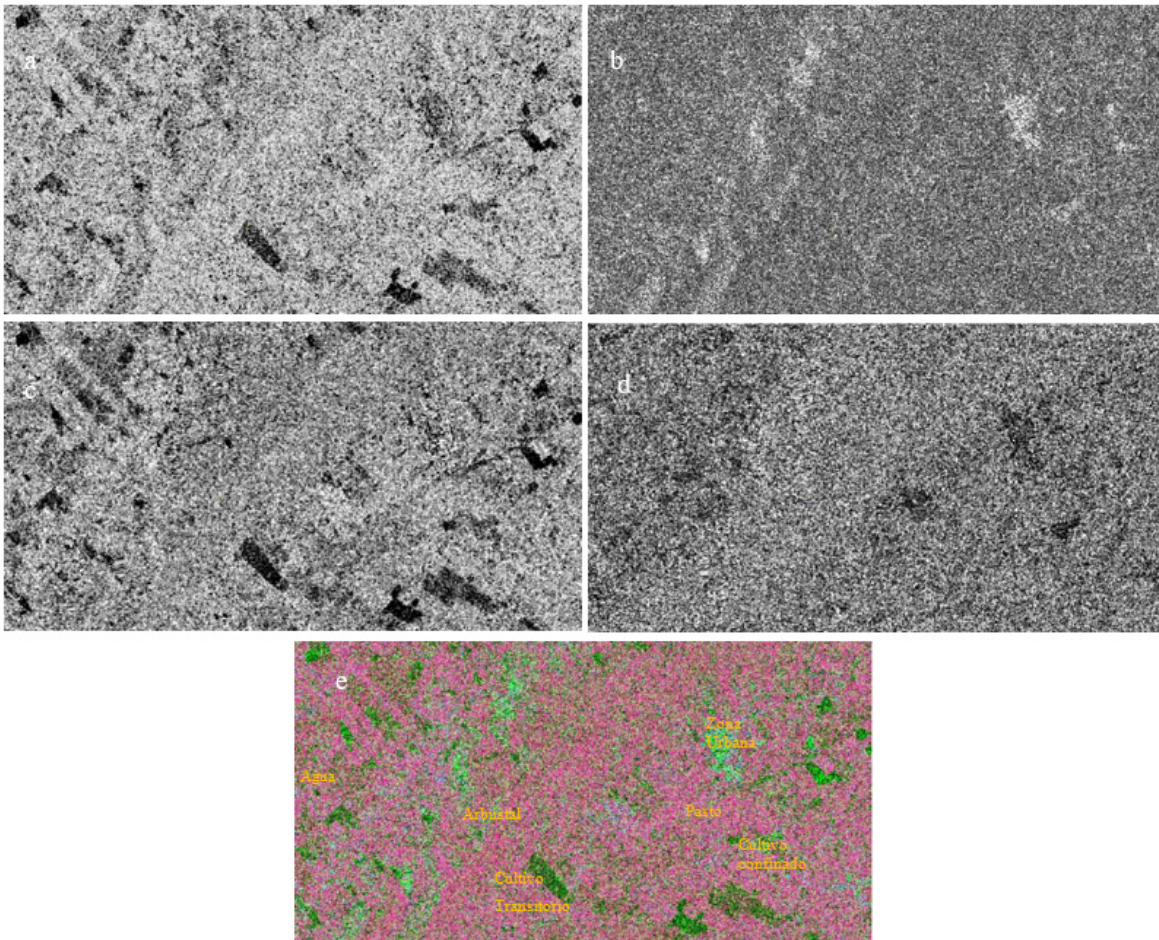
De manera visual se observa que las capas Eigenvalue dominante y Touzi alpha, ilustraciones 55 b y 55 c respectivamente, muestran mayores diferencias entre las coberturas terrestres como: Zonas urbanas, cultivo confinado (invernaderos) y cultivo transitorio. El resto de capas generadas son muy difusas.

Anexo F. PSEABA - Entropy, alpha, beta, and anisotropy Cloude & Pottier decomposition

De acuerdo con el análisis visual de las capas generadas por este método, las que se presentan en la ilustración 56, se puede observar en la composición a color RGB que las zonas urbanas y algunos tipos de cultivos transitorios domina principalmente la anisotropía (color verde), la mayor parte de coberturas encontradas en la zona como: cuerpos de agua, arbustales, pastos y otros cultivos transitorios presentan alta entropía en la dispersión de las ondas, razón por la que toma tonos rojizos en la ilustración 56(e).

Ilustración 56

Descomposición polarimétrica de Cloude & Pottier



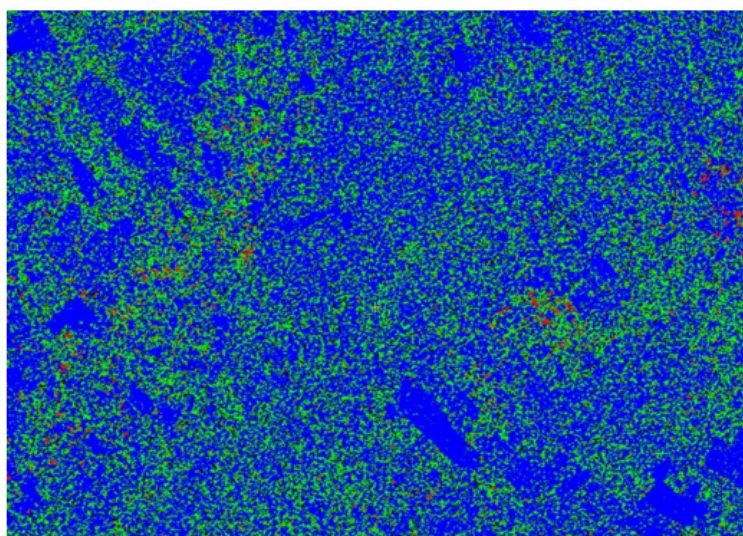
Nota. ^a. Entropía, ^b. Anisotropía, ^c. Ángulo alpha, ^d. Ángulo beta, ^e. R: Entropía G: Anisotropía, B: Ángulo alpha.

Anexo G. PSVANZYL - Unsupervised Van Zyl classification

Realiza una clasificación no supervisada de un conjunto de datos de SAR polarimétrico. La clasificación asigna píxeles a uno de los tres tipos de dispersores: una dispersión impar (superficie), par (diedro o de esquina) y difusa (volumen), como se observa en la ilustración 57.

Ilustración 57

Clasificación no supervisada de Van Zyl



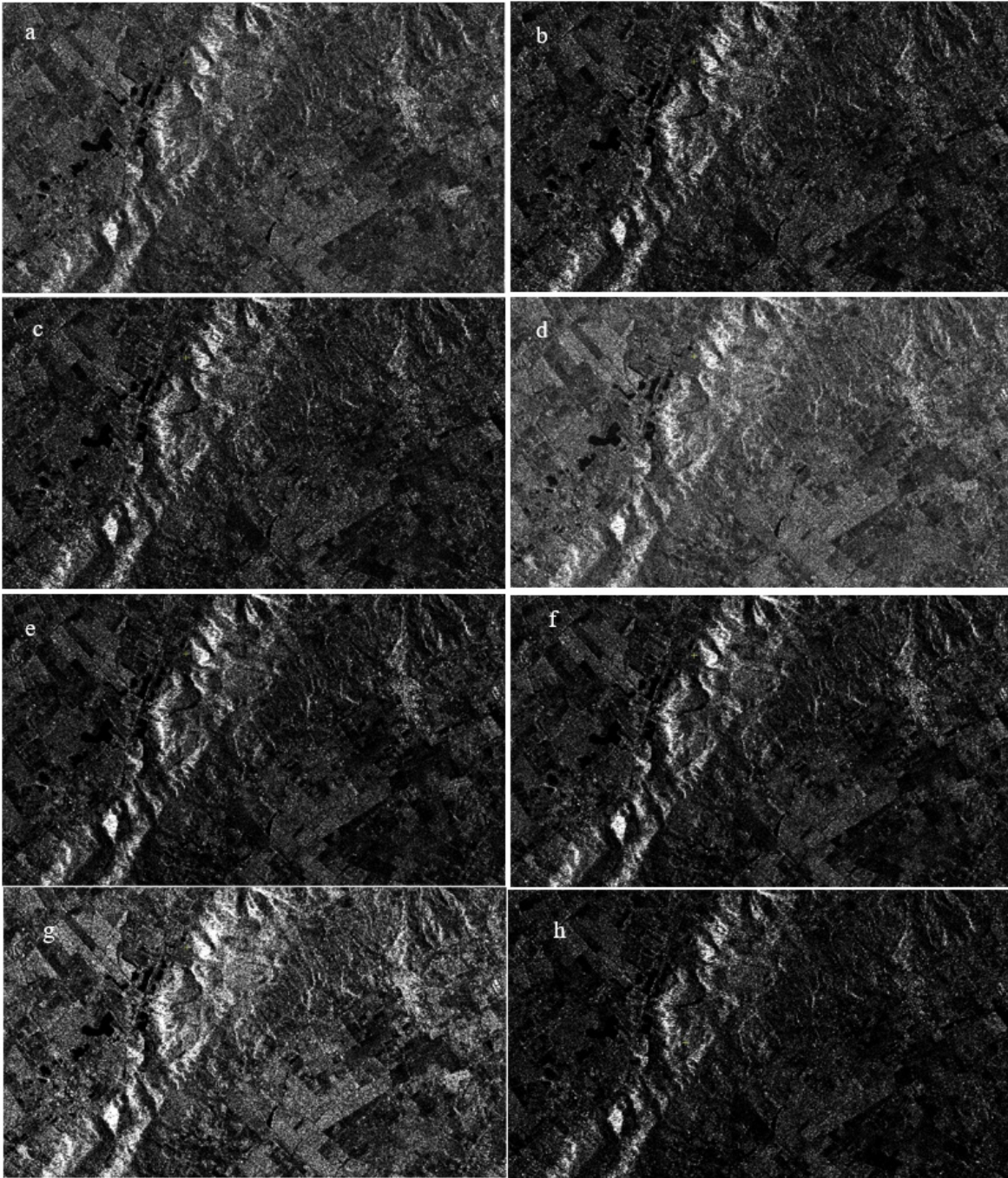
Nota. Color azul (Odd number of reflections, dispersión de superficie), Color rojo (Even number of reflections, dispersión de esquina), Color verde (Diffuse scattering, dispersión de volumen).

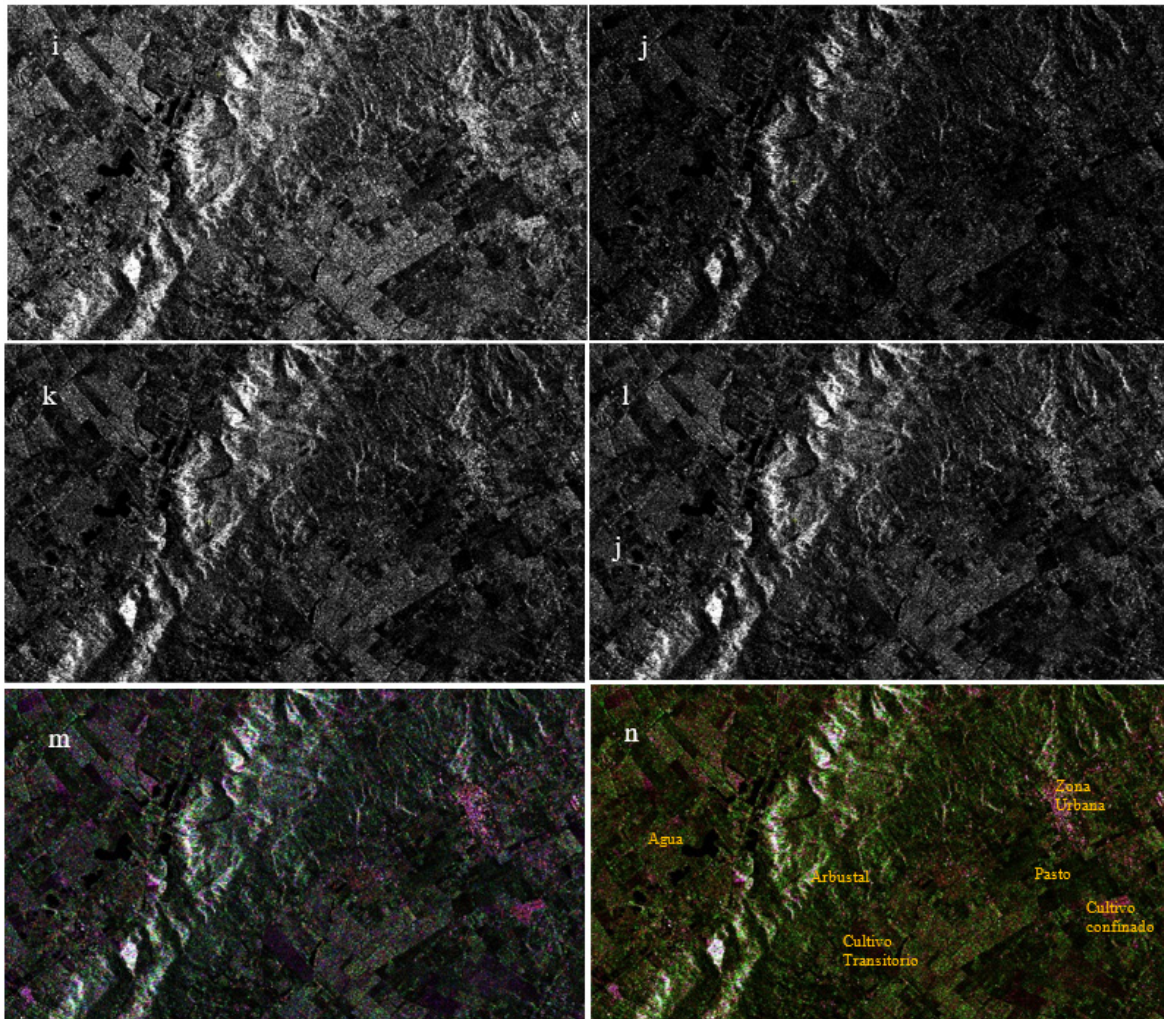
Las clasificaciones no supervisadas de van Zyl y Freeman & Durden son similares. La principal diferencia es que mientras PSVANZYL encuentra el tipo de dispersor dominante único para cada píxel, las clasificaciones de Freeman & Durden dividen la potencia dispersada total en contribuciones de los tres mecanismos de dispersión y devuelven la contribución de cada mecanismo de dispersión a la potencia total de cada píxel (PCIGeomatics, 2018).

En la zona de estudio se encuentran parcelas de cultivos transitorios que son bien definidas por la dispersión de superficie (color azul), otras coberturas como pasto, arbustal, cultivos confinados y zonas urbanas presentan mayormente dispersión de volumen (color verde), son pocas las coberturas como algunas zonas de Cascos Urbanos o construcciones que presenta dispersión de esquina (color rojo).

Anexo H. PSCONV – c4r6c Matriz de covarianza normalizada***Ilustración 58***

Algoritmo PSCONV c4r6c



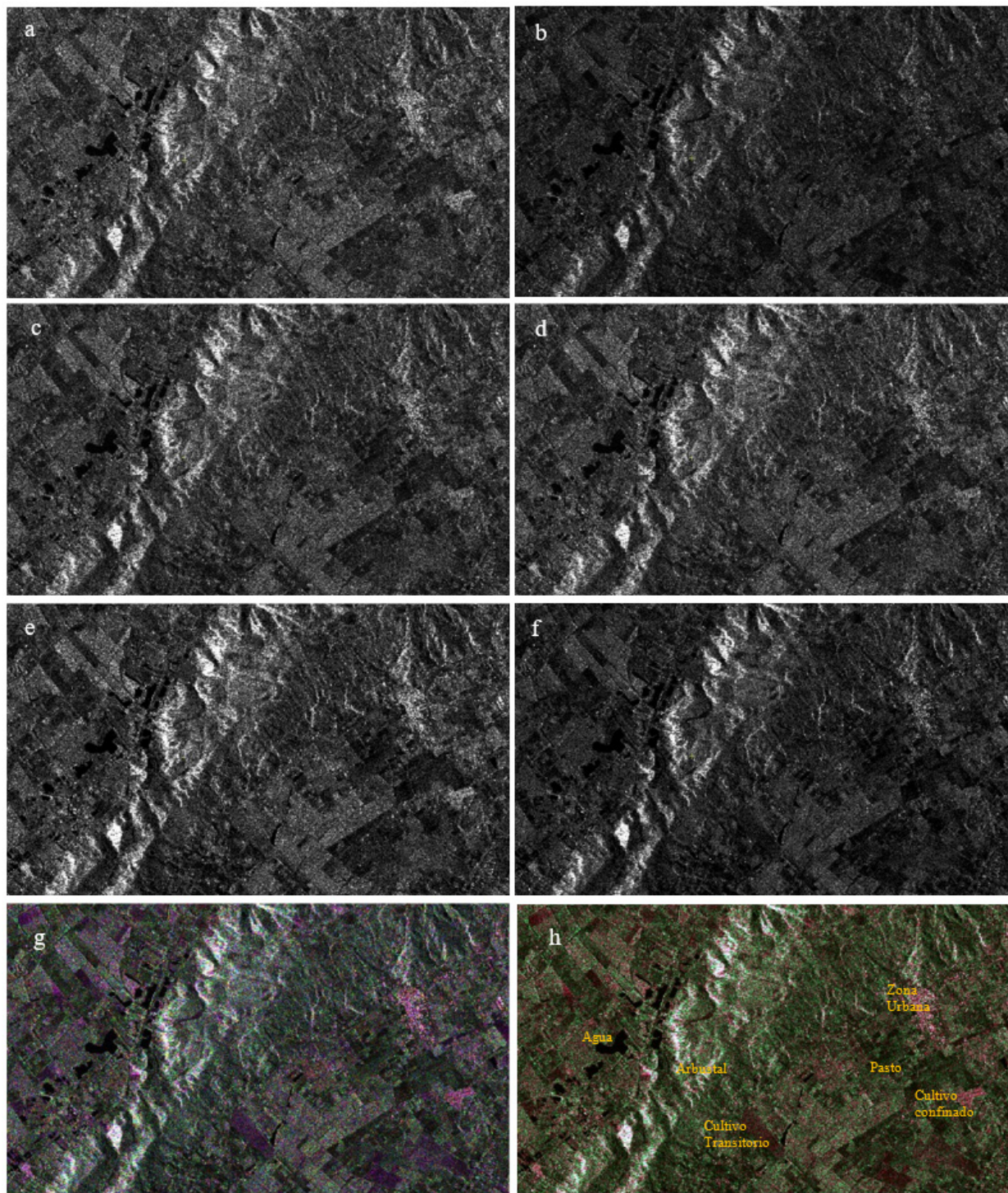


Nota. ^a Componente real 1.1 de la matriz de covarianza, ^b Componente real 2.2 de la matriz de covarianza, ^c Componente real 3.3 de la matriz de covarianza, ^d Componente real 4.4 de la matriz de covarianza, ^e Componente complejo 1.2 de la matriz de covarianza, ^f Componente complejo 1.3 de la matriz de covarianza, ^g Componente complejo 1.4 de la matriz de covarianza, ^h Componente complejo 2.3 de la matriz de covarianza, ⁱ Componente complejo 2.4 de la matriz de covarianza, ^j Componente complejo 3.4 de la matriz de covarianza, ^k R: Componente real 1.1 de la matriz de covarianza G: Componente real 2.2 de la matriz de covarianza B: Componente real 4.4 de la matriz de covarianza, ^l R: Componente real 1.1 de la matriz de covarianza G: Componente real 2.2 de la matriz de covarianza B: Componente complejo 1.4 de la matriz de covarianza.

Se generan 10 capas con componentes reales y componentes complejos de la matriz de covarianza, como se muestra en la ilustración 58, en donde las zonas urbanas y los cultivos confinados presentan mayor intensidad de respuesta en las capas de Componente real 1.1 de la matriz de covarianza y Componente complejo 1.4 de la matriz de covarianza; Algunos cultivos transitorios se destacan con media intensidad de respuesta en las capas Componente real 4.4 de la matriz de covarianza y Componente complejo 1.4 de la matriz de covarianza; Los cuerpos de agua, por la manera de dispersión se observan con baja intensidad de señal (color negro) en todas las capas generadas, mientras que los pastos presentan intensidad media en la capa Componente real 4.4 de la matriz de covarianza. Al realizar la composición a color: R: Componente real 1.1 de la matriz de covarianza G: Componente real 2.2 de la matriz de covarianza B: Componente real 4.4 de la matriz de covarianza, como se muestra en la ilustración 58 (k), se observan cultivos transitorios en color morado con textura rugosa; la zona urbana lo mismo que los cultivos confinados en color magenta y blancos con textura rugosa; los pastos en tonos verde oscuro y negro con textura moderadamente rugosa.

Anexo I. PSCONV – c3r3c Matriz de covarianza normalizada

Ilustración 59

Algoritmo PSCONV c3r3c

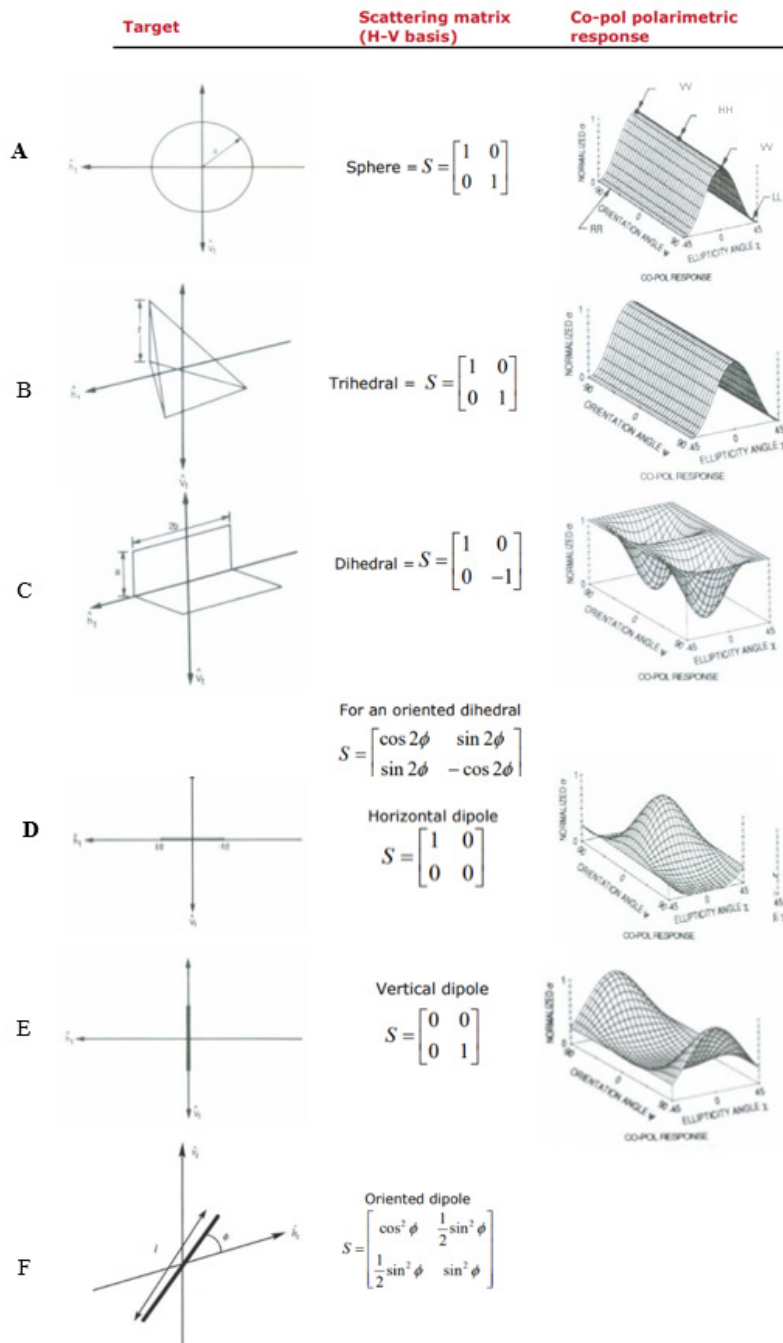
Nota. ^a Componente real 1.1 de la matriz de covarianza, ^b Componente real 2.2 de la matriz de covarianza, ^c Componente real 3.3 de la matriz de covarianza ^d Componente complejo 1.2 de la matriz de covarianza ^e Componente complejo 1.3 de la matriz de covarianza, ^f Componente complejo 2.3 de la matriz de covarianza, ^g R: Componente real 1.1 de la matriz de covarianza G: Componente real 2.2 de la matriz de covarianza B: Componente real 3.3 de la matriz de covarianza h. R: Componente real 1.1 de la matriz de covarianza G: Componente real 2.2 de la matriz de covarianza B: Componente complejo 1.2 de la matriz de covarianza.

Se generan 6 capas con componentes reales y componentes complejos de la matriz de covarianza, como se observa en la ilustración 59, en donde las zonas urbanas y los cultivos confinados presentan mayor intensidad de respuesta en las capas de Componente real 1.1 de la matriz de covarianza y Componente complejo 1.3 de la matriz de covarianza; Algunos cultivos transitorios se destacan con media intensidad de respuesta en las capas Componente real 3.3 de la matriz de covarianza y Componente complejo 1.3 de la matriz de covarianza; Los cuerpos de agua, por la manera de dispersión se observan con baja intensidad de señal (color negro) en todas las capas generadas, mientras que los pastos presentan intensidad media en la capa Componente real 3.3 de la matriz de covarianza. Al realizar la composición a color: R: Componente real 1.1 de la matriz de covarianza G: Componente real 2.2 de la matriz de covarianza B: Componente complejo 1.2 de la matriz de covarianza, como se muestra en la ilustración 59 (h), se observan cultivos transitorios en color morado con textura rugosa; la zona urbana lo mismo que los cultivos confinados en color magenta y blancos con textura rugosa; los pastos en tonos verde oscuro y negro con textura moderadamente rugosa.

Anexo J. Representación canónica de los objetivos en base H-V

Ilustración 60

Representación canónica de los objetivos en base H-V



Nota. Fuente: Van Zyl et al (1990).

La ilustración 60 A y B, que corresponden a la esfera y al trihedro respectivamente, se caracterizan por un número impar de rebotes de la onda, lo que resulta en una diferencia de fase de cero grados en la alineación de la retrodispersión, produciendo una dispersión uniforme para todas las polarizaciones lineales ($X=0^\circ$) lo que hace que $HH = VV$.

El caso de la ilustración 60C (dihedro) se presenta un número par de rebotes presentando una diferencia de fase de 180 grados entre las polarizaciones HH Y VV, en donde, $HH = -VV$, no obstante, los canales HH y VV tienen igual intensidad. Para el caso en donde el plano es rotado, se introduce una despolarización de la señal y los canales HV y VH ya no son igual a cero.

Para el dipolo, ilustración 60 (D, E y F), producirá fuerte retrodispersión en un solo canal de polarización de acuerdo a su orientación. Como en el diedro, es posible cancelar el efecto del ángulo Φ en los casos que no sean igual a cero (HH) o 90° (VV) (PCIGeomatics, 2018).