

Aplicación de satélite SAR, mediante el método Cloude Pottier para la clasificación de suelos.

Application SAR satellite, using the Cloude Pottier method, for soil classification

Jose Luis Huayanay villar¹

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Brasil.
Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, UNSCH, Ayacucho, Perú

RESUMEN

Esta investigación cuyo propósito es aplicar del método de polarimetría Cloude_Pottier en una imagen de Radar de Apertura Sintética (SAR), Sentinel 1, para la clasificación de suelos con imágenes de radar Sentinel-1 en Banda C y que pertenece a la Agencia Espacial Europea (ESA). Los métodos y técnicas que se aplicaron a cada imagen de radar consistieron en clasificar el ángulo de incidencia, intensidad, retro-dispersión u otros para cada zona en estudio, se utilizó el método de clasificación como: H-Alpha, en el método de Cloude-Pottier también se utilizó algunos algoritmos de simulación para poder correlacionar y caracterizar los humedales como agua, lagunas, vegetales u otros. Los resultados en la clasificación como el parámetro de entropía polarimétricos y parámetro alfa polarimétrico, que son el grado aleatorio de los datos en una imagen de radar e los mecanismos de dispersión de las ondas de radar en una imagen Sentinel-1 respectivamente. Este método permite clasificar de manera eficiente y permite realizar pronósticos en el tiempo, asimismo las nueve clases poseen determinadas características de acuerdo al área de estudio.

Palabras claves: SAR, Sentinel, Cloude-Pottier, Polarimetria, Satélite.

ABSTRACT

This research whose purpose is to apply the Cloude_Pottier polarimetry method in a Synthetic Aperture Radar (SAR) image, Sentinel 1, for the classification of soils with Sentinel-1 radar images in Band C and which belongs to the European Space Agency (ESA). The methods and techniques that were applied to each radar image consisted of classifying the angle of incidence, intensity, backscatter or others for each area under study. The classification method was used as: H-Alpha, in the Cloude-Pottier method. Some simulation algorithms were also used to correlate and characterize wetlands as water, lagoons, vegetables or others. The classification results in the polarimetric entropy parameter and polarimetric alpha parameter, which are the randomness of the data in a radar image and the dispersion mechanisms of radar waves in a Sentinel-1 image respectively. This method allows efficient classification and allows forecasts to be made over time. Likewise, the nine classes have certain characteristics according to the area of study.

Keywords: SAR, Sentinel, Cloude-Pottier, Polarimetry, Satellite.

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Brasil. jose.villar@inpe.br, jose.huayanay@unsch.edu.pe

1. INTRODUCCIÓN

El 26 de abril del 2016 el lanza mediante una nave espacial el satélite Sentinel 1, en funcionamiento hasta la actualidad el cual se colocó en su órbita a una altura de 693 km con masa de lanzamiento de 2.164 kg (Olcoz Martínez, 2016). Sentinel-1 es la cuarta serie de satélites del programa europeo Copérnico, un proyecto conjunto de la CE (comisión Europea) y la Agencia Espacial Europea (ESA) ((DE EUROPA, 2007); (Cohnen, 2009)), “una de las ventajas que aporta este sistema es que se puede utilizar en cualquier momento del día, independientemente de las condiciones atmosféricas, climáticas y de la velocidad a la que se reciba la información” (Lopez, 2015). El proceso de análisis debido a la gran cantidad de información correspondiente a cada imagen, el procesamiento de los datos obtenidos por radares de apertura sintética (SAR) es muy complejo, los datos del radar de apertura son muy sensibles a los tipos de terreno observado, por lo que tiene un amplio posibilidades en la investigación de blancos o objetivos (Castillo & Arbiol, 1995).

Para el Radar de apertura sintética (SAR), la celda de resolución es mucho mayor que la longitud de onda a la que opera el sistema (Langman & Inggs, 1994). Para la aplicación del método de polarimetría Cloude_Pottier, el eco que se devuelve es el resultado del eco del objetivo, lo que significa que la interferencia de la información general puede ser constructiva o destructiva, y la imagen de radar adquirida puede mostrar información y ruido llamado speckle, es un hecho de medida real (S. R. Cloude & Pottier, 1996).

El fenómeno de ruido Speckle no permite predecir los valores reflectados en una celda de resolución determinada al momento de adquisición de información (S. R. Cloude & Pottier, 1997). Shan Cloude (2009) considera a este fenómeno de ruidos como un contaminante aleatorio de la señal recibida, pero existen diversas técnicas para eliminar este factor contaminante como los softwares de procesamiento llamado SNAP que brindan algoritmos de corrección de ruido Speckle y una mejora de identificación de las zonas de estudio ((Lee & Pottier, 2017); (Lee et al, 2004)).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

S. R. Cloude y Erik pottier (1993) presentaron una revisión de la literatura realizada bajo un estudio financiado por la ESA titulada “Aplicaciones de SAR Polarimetría”. Este estudio fue realizado conjuntamente por Qineti Q, AEL, University of Rennes 1, SarVision y Vexcel UK. El objetivo general del estudio fue revisar, evaluar y validar los beneficios del uso de polarímetros para la clasificación de la cubierta de suelos y clasificación de hielo marino (Corr et al., 2003). “De conformidad con el artículo 99 de la ley N 28611, ley general del ambiente del Perú, el estado reconoce la importancia de los humedales como hábitat de especies vegetales y animales, en particular aves, dando prioridad a su conservación sobre otros usos, y ordenando que las autoridades públicas, en el ejercicio de sus funciones, tomen medidas especiales para proteger entre sí los ecosistemas frágiles, incluidos los humedales” (Ambiente, 2015,p.57). Por tal sentido esta investigación es realizado en la zona humedal de Apacheta, Ayacucho.

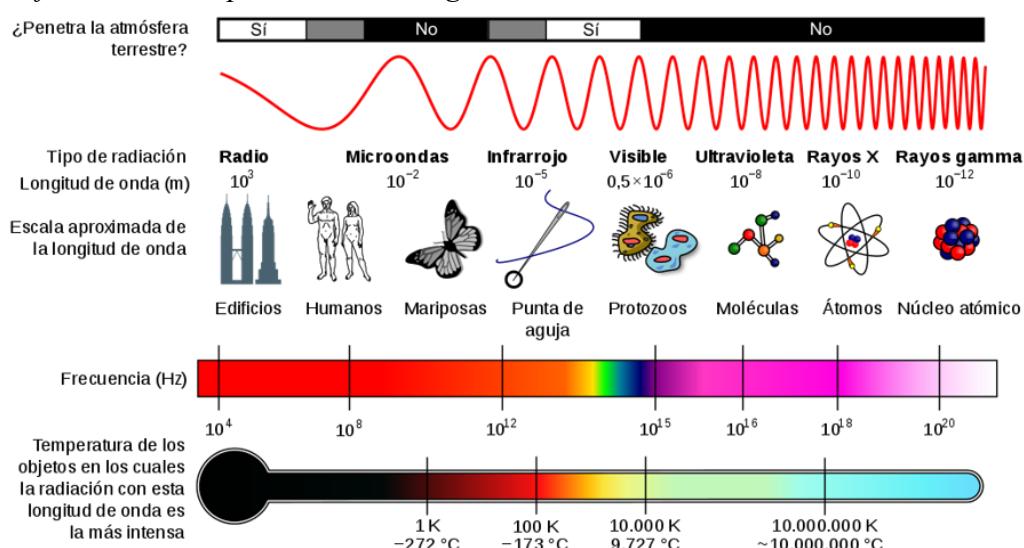
2.1. Fundamento físico de la teledetección y sistemas de radar

La superficie de la Tierra no puede ser observada por sensores visibles o infrarrojos, cuando hay nubes y vegetación muy espesa (Clark, 1999). Es necesario estudiar las aplicaciones de la teledetección en el campo de radares donde el espectro electromagnético juega un papel muy importante.

2.1.1. El espectro electromagnético

Así como el sensor óptico mide la luz solar dispersa y es limitada en condiciones meteorológicas y climáticas (Clemmow, 2013). Por otro lado, las microondas **figuran 2,1** pueden penetrar las nubes y la vegetación, son independientes de procesos naturales como la lluvia, tempestades y funcionan en el día o la noche. El uso conjunto del radar de apertura sintética (SAR) y sensores multiespectrales ha demostrado ser una herramienta poderosa para la observación de la Tierra (Bruder et al, 2003).

Figura 1.
Clasificación del Espectro electromagnético.



Nota. Los radares operan en frecuencia más largas entre 0.5 a 100 cm (Frenzel, 2003).

Radar es el acrónimo de radio Detección y Rango. El radar funciona como una cámara flash, pero a radiofrecuencia que consiste en transmisor, interruptor, antena, receptor y registrador de datos. El transmisor genera una alta potencia de onda electromagnética en longitudes de onda de radio (Chan & Lim, 2008). El interruptor dirige el pulso a la antena y devuelve el eco al receptor (Chan & Koo, 2008).

2.2. Definición de Radar

Según la Agencia Espacial Europea (2011), “el radar es un sistema activo que proyecta la superficie de la Tierra y mide las señales reflejadas **figura 2**. Por este motivo, las imágenes se pueden adquirir de día y de noche, con total independencia de la luz solar. Esto es especialmente importante en latitudes altas, donde el largo invierno polar impide que los satélites convencionales obtengan datos durante seis meses al año. Además, las señales de radar se transmiten fácilmente en las nubes, lo que permite tomar imágenes independientemente de las condiciones meteorológicas”.

2.2.6. Radar de Apertura Sintética SAR

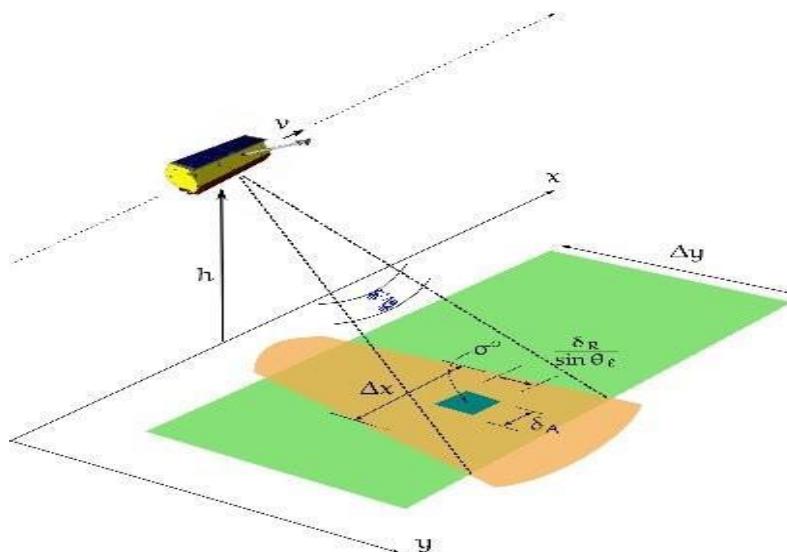
Se define como sistemas de proyección activos, autosostenidos que no dependen de procesos naturales como fenómenos meteorológicos, por lo que existe una gran ventaja en no tener estas limitaciones como los satélites ópticos (Curlander & McDonough,

1991).

La antena envía pulsos de ataque similares a un radar al objetivo de interés, luego esta retorna en forma de energía a la antena (Soumekh, 1999).

Figura 2.

Funcionamiento y modo de adquisición de las imágenes de radar.



Nota. Representación de una radar monitorizando la superficie terrestre de un objetivo para la adquisición de imágenes (Zozaya, 2016).

2.3. Ecuación de Maxwell

En el año 1968 el físico y matemático James Cleck Maxwell (Maxwell, 1890), y (Maxwell, 2013), unifica las leyes de Gauss para la electricidad (3) y las leyes de Gauss para el magnetismo (4) (Gauss, 1874), más adelante las leyes Faraday (6) (Faraday, 1991) y la de Ampere (5) (Ampere & Ampére, 1875). Quien introdujo con éxito los conceptos de corriente de desplazamiento y campos eléctricos y magnéticos en un solo concepto, el campo electromagnético. Las ondas electromagnéticas generadas por el sistema de radar se basan en las ecuaciones de Maxwell, que describen todos los aspectos de la radiación electromagnética y por un momento en el tiempo y el espacio. En términos matemáticos, el campo electromagnético está determinado vectorialmente por la siguiente ecuación.

$$\nabla \cdot E(r, t) = \frac{\rho(r, t)}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B(r, t) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times B(r, t) - \epsilon_0 \epsilon_r u_0 u_r \frac{\partial E(r, t)}{\partial t} = u_0 J(r, t) \quad (3)$$

$$\nabla \times E(r, t) = - \frac{\partial B(r, t)}{\partial t} \quad (4)$$

E: Representa el vector de campo eléctricos [$\frac{\text{voltio}}{\text{m}}$].

B=B(r,t): Vector de flujo del campos magnéticos [$\frac{\text{Weber}}{\text{tesla}}$].

ρ : Es la densidad de carga dado en [$\frac{\text{Voltios}}{\text{m}^3}$].

\mathbf{J} : Vector de densidad de corriente dado [$\frac{\text{Ampere}}{\text{m}}$].

ϵ_0 : Es la permitividad eléctrica en el vacío ϵ_r permisividad eléctrica relativa al medio.

μ_0 : Permeabilidad magnética al vacío.

μ_r : permeabilidad relativa al medio.

2.4. Ecuaciones de Onda

Dado que no hay carga ni corriente, las ecuaciones de Maxwell conducen a ecuaciones de onda para campos eléctricos y magnéticos. A partir de las ecuaciones (3) y (4) se obtiene

$$\nabla^2 E(r, t) - \frac{1}{c} \cdot \frac{\partial^2 E(r, t)}{\partial^2 t} = 0 \quad (5)$$

y partir de las ecuaciones (2.5) y (2.6) se obtiene

$$\nabla^2 B(r, t) - \frac{1}{c} \cdot \frac{\partial^2 B(r, t)}{\partial^2 t} = 0 \quad (6)$$

c representa la velocidad de la luz en un medio vacío y se expresa como

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (7)$$

En el campo eléctrico a partir de (2.7) de dependencia síncrona se puede describir así

$$E(r, t) = E_0(r) \cos(\omega t \pm kz + \varphi_0) \quad (8)$$

Las amplitudes de la onda E_0 , siempre va en la dirección de la polarización de la onda z , con velocidad angular ω y fase φ_0 . Por ello tenemos que analizar E_0 en (8), para saber qué tipo de polarización tiene. E_0 se puede descomponer como la suma de un vector paralelo al plano de incidencia y uno perpendicular al plano.

$$E_0 = E_{011} e^{-j\theta_{11}} \cdot \vec{u}_{||} + E_{0\pm} e^{-j\theta_{\pm}} \cdot \vec{u}_{\perp} \quad (9)$$

Donde la polarización es la orientación del campo eléctrico de la onda electromagnética, donde el símbolo $||$ se utiliza para componentes paralelos horizontales, mientras que \perp vertical para componentes perpendicular, para u son vectores unitarios en la dirección indicada por sus ramificaciones esto ya sea paralelas o perpendiculares al plano incidente.

Un estado de polarización puede ser descrito mediante la fase φ_0 de una onda electromagnética. En el caso de polarización elíptica ocurre cuando $\varphi_0 \neq 0$, por lo que el vector de campo eléctrico describe una elipse.

3. RESULTADOS

En (S. R. Cloude & Pottier, 1996) sugirieron un nuevo método para extraer dichos parámetros promedio de datos experimentales usando datos que utilizan un algoritmo de suavizado basado en estadísticas de ordenamiento. Luego (S. R. Cloude & Pottier, 1997) calcularon una entropía (H) y el ángulo Alpha (α) para separar linealmente el plano $H -$

α en nueve zonas dentro de una región factible para determinar los mecanismos básicos de dispersión. En los últimos años, la descomposición de Cloude-Pottier se ha analizado, mejorado y aplicado ampliamente en sistemas de segmentación, clasificación y detección (Cable, Kovacs, Shang, & Jiao, 2014).

3.1. Descomposición de Cloude-Pottier

La descomposición de Cloude - Pottier estan basados en autovectores y autovalores que descomponen la matriz de coherencia (S. R. Cloude & Pottier, 1997), que utiliza un análisis del vector propio de la matriz de coherencia 3x3 [T], ya que proporciona una descripción invariable de la base del dispersor y también proporciona una descomposición en los tipos de proceso de scattering (los vectores propios) y sus magnitudes relativas (los valores propios). “Seguidamente métodos basados en el análisis de los valores propios de una matriz de coherencia, utiliza un modelo estadístico de Bernoulli de 3 niveles para generar estimaciones de los parámetros de la matriz de dispersión objetivo. Los datos del polarímetro son una matriz de dispersión compleja de 2x2 denotada por S ” (S. Cloude & Papathanassiou, 1997, p.02) dada por la siguiente ecuación (Huayanay, 2021).

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Asumimos que dichos estados son la polarización lineal horizontal H y la polarización lineal vertical V y los campos incidentes que está compuesto por las componentes E_H^i y E_V^i . A partir (8), (9) y (10) podría obtenerse una relación importante (Huayanay, 2021).

$$\begin{bmatrix} E_H^S \\ E_V^S \end{bmatrix} = \frac{e^{-jkr}}{r} \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_H^i \\ E_V^i \end{bmatrix} \quad (11)$$

donde r indica la distancia entre el objeto de interés y la antena receptora y k es el número de la onda incidente, con valor igual a $\frac{2\pi}{\lambda}$. El superíndice s hace referencia al campo reflejado, scattered. En la representación vectorial, la matriz de dispersión compleja S (11) está representada en la base de Pauli para la descomposición por el vector (Huayanay, 2021).

$$\bar{K} = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV} \ S_{HH} - S_{VV} \ S_{HV} + S_{VH} \ j(S_{HH} + S_{VV})]^T \quad (12)$$

T es la operación de transpuesta, para encontrar los parámetros H y α , es necesario construir la base de la matriz de coherencia [T], que es la señal del SAR recibida. Por lo tanto, la matriz de coherencia calculada mediante las bases de Pauli (12) es de la siguiente forma (Huayanay, 2021).

$$[T] = \langle \vec{K} \cdot \vec{K}^T \rangle = \begin{bmatrix} \langle |S_{HH} + S_{VV}|^2 \rangle & \langle (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & 2\langle (S_{HH} + S_{VV})S_{HV} \rangle \\ \langle (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle & \langle |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle & 2\langle S_{HH} - S_{VV} \rangle S_{HV} \\ 2\langle S_{HV}(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle & 2\langle S_{HV}(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & 4\langle |S_{HV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (13)$$

* Significa conjugación y $\langle \rangle$ significa el promedio. Todos los 9 elementos de la matriz [T] son calculados para cada pixel en la imagen, asimismo T es semidefinido hermítico

positivo, significa que sus autovalores λ_i son reales y que la matriz de autovectores es posible encontrar mediante su diagonal (J. A. Richards et al, 2009). En (Ji & Wu, 2015) proponen modificaciones para la descomposición de Cloude-Pottier un SAR totalmente polarizado, para analizar el rendimiento de extracción del mecanismo de dispersión de los SAR de polarización dual. La matriz de dispersión con $HH-VV$, SAR es.

$$S = [S_{HH} \ 0 \ 0 \ S_{VV}] \quad (14)$$

Donde el vector de dispersión correspondiente basado en las matrices de Pauli (14) sería de la forma siguiente (Ji & Wu, 2015).

$$\vec{K} = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV} \ S_{HH} - S_{VV} \ 0 \ 0]^T \quad (15)$$

Entonces (2.24) se reescribe

$$\vec{K} = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV} \ S_{HH} - S_{VV}]^T \quad (16)$$

Luego la matriz de coherencia \mathbf{T} es

$$\langle \mathbf{T}_{HH-VV} \rangle = \frac{1}{L} \sum_1^L \vec{K}_i \vec{K}_i^H \quad (17)$$

Esta ecuación (16) puede descomponerse a la forma siguiente

$$\langle \mathbf{T}_{HH-VV} \rangle = \frac{1}{L} \sum \sum_i^2 \lambda_i \vec{u}_i \vec{u}_i^H \quad (18)$$

con λ_i ($i = 1, 2$) son los autovalores de $\langle T_{HH-VV} \rangle$ cuando $\lambda_1 \geq \lambda_2$, u son los autovectores. A partir de (16) y (17) la matriz de coherencia $\langle \mathbf{T} \rangle$ para un SAR totalmente polarizado es (Huayanay, 2021).

$$\langle \mathbf{T} \rangle = \begin{bmatrix} |S_{HH} + S_{VV}|^2 & (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* & (S_{HH} + S_{VV})S_{VV}^* \\ (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^* & |S_{HH} - S_{VV}|^2 & (S_{HH} - S_{VV})S_{VV}^* \\ S_{VV}(S_{HH} + S_{VV})^* & S_{VV}(S_{HH} - S_{VV})^* & |S_{VV}|^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Supongamos que

$$\langle \mathbf{T} \rangle = \begin{bmatrix} n & z_1 & z_2 \\ z_1^* & m & z_3 \\ z_2^* & z_3^* & p \end{bmatrix} \quad (20)$$

Analizando cálculos algebraicos obtenemos los autovalores siguientes

$$\lambda_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} Tr(\langle \mathbf{T} \rangle) + \frac{\frac{1}{23}B}{3C^{\frac{1}{3}}} + \frac{\frac{1}{C^{\frac{1}{3}}}}{3 \cdot 2^{\frac{1}{3}}} \right)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} Tr(\langle \mathbf{T} \rangle) - \frac{(1-j\sqrt{3})B}{3.2^{\frac{1}{3}}.3C^{\frac{1}{3}}} - \frac{(1-j\sqrt{3})C^{\frac{1}{3}}}{6.2^{\frac{1}{3}}} \right) \quad (21)$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} Tr(\langle \mathbf{T} \rangle) - \frac{(1-j\sqrt{3})B}{3.2^{\frac{1}{3}}.3C^{\frac{1}{3}}} - \frac{(1+j\sqrt{3})C^{\frac{1}{3}}}{6.2^{\frac{1}{3}}} \right)$$

Donde A, B y C son

$$A = mn + np + mp - z_1z_1^* - z_2z_2^* - z_3z_3^*$$

$$B = m^2 - mn + n^2 - mp - np + p^2 + 3z_1z_1^* + 3z_2z_2^* + 3z_3z_3^*$$

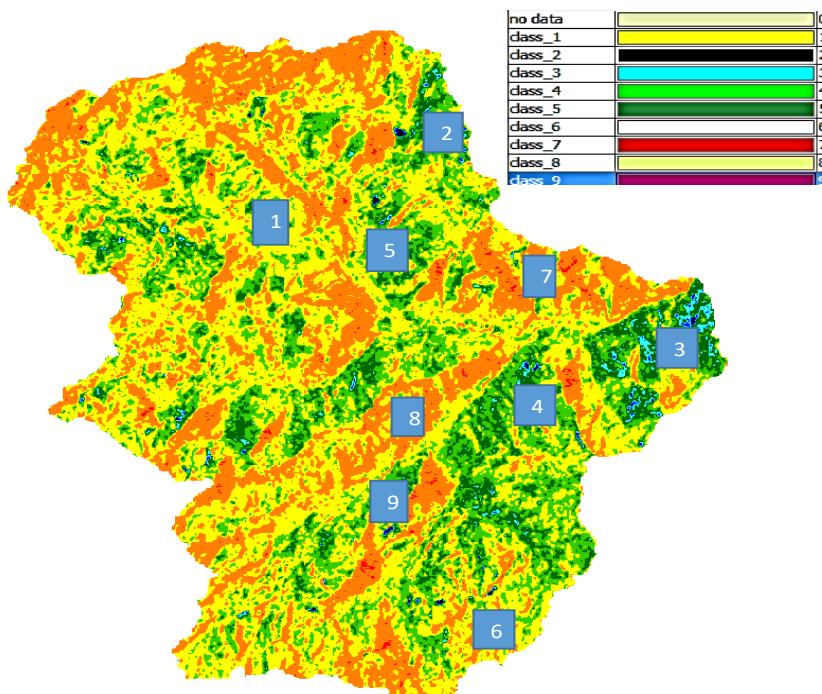
$$C = 27|\langle \mathbf{T} \rangle| - 9Tr(\langle \mathbf{T} \rangle) + 2(Tr(\langle \mathbf{T} \rangle))^3 + \sqrt{(|\langle \mathbf{T} \rangle| - 9Tr(\langle \mathbf{T} \rangle) + 2(Tr(\langle \mathbf{T} \rangle))^3)^2 - 4B^3}$$

Onde la $\text{Tr}()$ y $|\cdot|$ se obtiene de la matriz de coherencia (20) o (21) (Huayanay,2021).

3.1. Resultados de distribución de zonas de clasificación para la microcuenca Apacheta

Figura 3

Distribución de las 9 zonas de clasificación vs objetivo de estudio.

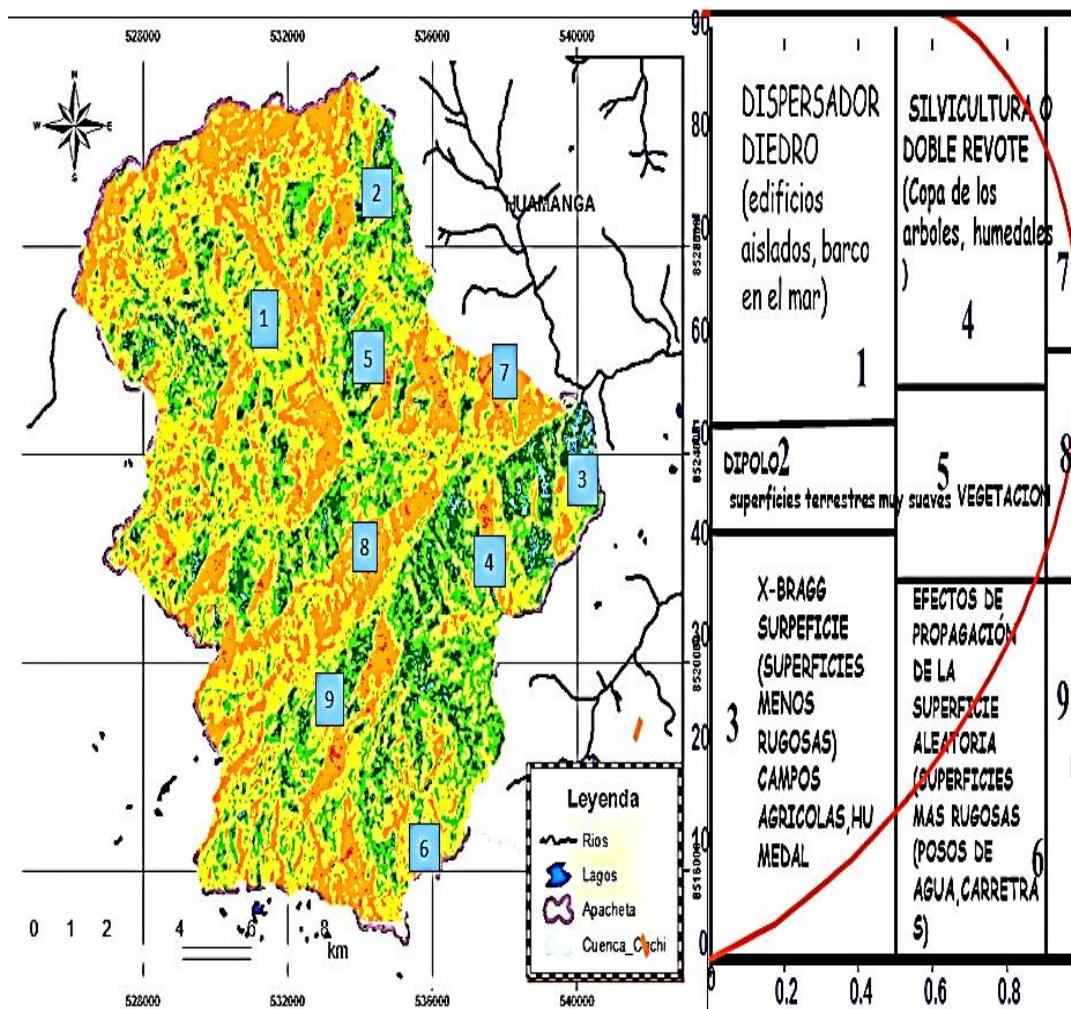


Nota. Las cuadriculas indican la respectiva zona de clasificación de suelo, podemos resaltar que la zona 4 y zona 5 de color verde **figura 3**, muestra un alto porcentaje de 80% que representaría los humedales o copas de arbustos, mientras la zona 1 de color amarillo con 14.412% que representaría suelos degradados con poca vegetación.

3.2. Resultados de funcionalidad del método de Cloude-Pottier para la clasificación de suelos para la microcuenca Apacheta.

Figura 4

Método de Cloude Pottier vs objetivo de estudio.

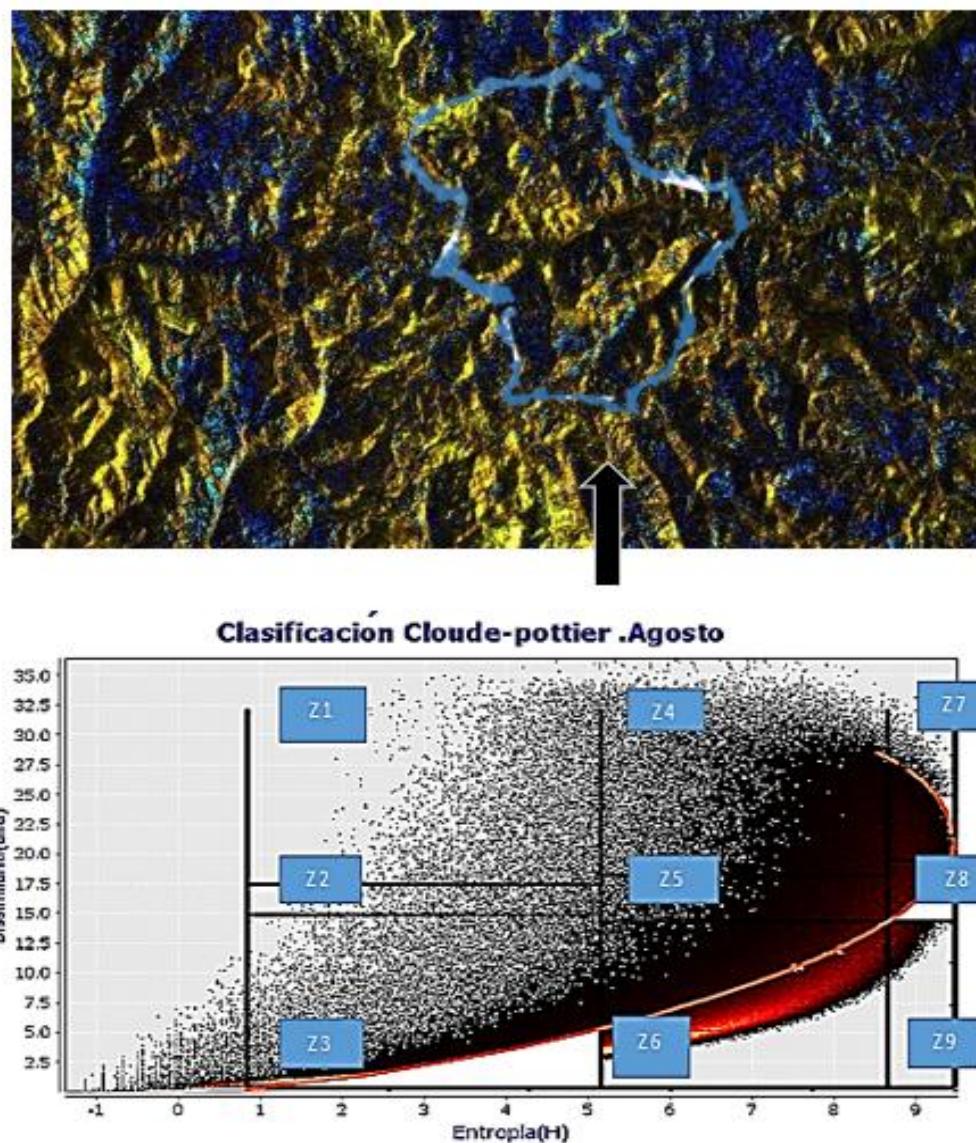


Nota. Las flechas coloridas indican la respectiva zona de clasificación de suelo en la **figura 4**, podemos resaltar el método de Cloude_Pottier, con sus respectivas características y la línea paraboloides imaginaria, para la clasificación de suelos en la microcuenca Apacheta, región Ayacucho.

Los procesamientos fueron realizados de manera minuciosa y guiados con diferentes fuentes como se puede observar en la **figura 5** se realiza un breve resumen general de la investigación para la clasificación de suelos en la Microcuenca de Apacheta, Ayacucho.

Figura 5

Resultado de clasificación para la fecha Agosto, 2019.



Nota. Resultado de la clasificación Cloude-Pottier en Apacheta ($H - \alpha$) para la fecha agosto-2019.

4. CONCLUSIONES

Los resultados exhibidos en el capítulo anterior demuestran que el método de polarimétrica de Cloude-Pottier ha cumplido con los objetivos de la clasificación de suelos en la Micro-Cuenca Apacheta, región Ayacucho, mediante el empleo de técnicas realizadas en el software SNAP 6.0. Se han usado la aplicación de estadística descriptiva e inferencial para la presentación de la clasificación de suelos en la microcuenca Apacheta, mediante el uso de imágenes de radar Sentinel-1. Asimismo, se aplican criterios de análisis de correlación para establecer la existencia de una relación entre los

factores de regresión con el fin de describir las propiedades de las variables de investigación. Se logró determinar el grado aleatoriedad de los datos en imágenes de SAR Sentinel-1, correspondiente a los suelos de la microcuenca Apacheta, mediante la aplicación del parámetro de entropía y alpha polarimétrico, con productos SCL de las imágenes de radar Sentinel-1 obtenidas de la Agencia Espacial Europea (ESA), del año 2019, siendo lo más importante la identificación de datos expresada en números aleatorios en la escala de Z1 al Z9 que expresan las 9 zonas de Cloude –Pottier , donde la zona (Z1, Z4, Z5) representa el 72.838 % -82.305 % que luego representarán una extensión de 31.48 ha. de lagunas y zonas con agua 3679.92 ha. de vegetación, zona Z4 principalmente en pixeles encontrado (396172, 529847.09684 m², 7652.98 ha). Estas estimaciones se realizaron utilizando el método de polarización Cloude_Pottier para clasificar de suelos en la subcuenca de Apacheta, región de Ayacucho. que permite obtener un banco de información que permite monitorizar la variación de humedales en los próximos años. Se logró determinación del mecanismo de dispersión de ondas de radar utilizando datos de productos SCL de las imágenes de radar Sentinel-1, del año 2019 solamente debido a su alta información y procesamiento que demanda mucho tiempo, correspondiente a los humedales de la microcuenca Apacheta, mediante la aplicación del parámetro alfa polarimétrico.

REFERENCIAS

- Ampere, A.-M., & Ampère, J. J. (1875). Andre-marie ampere et jean-jacques ampère correspondance et souvenirs (de 1805 a 1864) (Vol. 1). J. Hetzel.
- Baptista, M. C. (2003). Uma análise do campo de vento de superfície sobre o oceano atlântico tropical e sul usando dados do escaterometro do ers. Sao Jose dos Campos.
- Belchansky, G. I., & Douglas, D. C. (2002). Seasonal comparisons of sea ice concentration estimates derived from ssm/i, okean, and radarsat data. *Remote Sensing of Environment*, 83(2), 171–182.
- Boerner, W.-M., Yan, W.-L., Xi, A.-Q., & Yamaguchi, Y. (1992). Basic concepts of radar polarimetry. In *Direct and inverse methods in radar polarimetry* (pp. 155–245). Springer.
- Bruder, J., Carlo, J., Gurney, J., & Gorman, J. (2003). IEEE standard for letter designations for radar-frequency bands. *IEEE Aerospace & Electronic Systems Society*, 1–3.
- Cable, J. W., Kovacs, J. M., Shang, J., & Jiao, X. (2014). Multi-temporal polarimetric radarsat-2 for land cover monitoring in northeastern Ontario, Canada. *Remote Sensing*, 6 (3), 2372–2392.
- Caceres, M. (2013). Protección y conservación de los bofedales y humedales en el perú,bolivia, espaa, paraguay y venezuela.
- Cassidy, D. C., Holton, G. J., & James, F. (2002). Rutherford understanding physics, birkhäuser. pp. 339.

- Castillo, M., & Arbiol, R. (1995). Obtención de modelos numéricos de elevaciones con interferometría sar. Revista de la Asociación Española de Teledetección, 4, 4–11.
- Chan, Y. K., & Koo, V. C. (2008). An introduction to synthetic aperture radar (sar). Progress In Electromagnetics Research, 2, 27–60.
- Chan, Y. K., & Lim, S. Y. (2008). Synthetic aperture radar (sar) signal generation. Progress In Electromagnetics Research, 1, 269–290.
- Clark, R. (1999). Spectroscopy and principles of spectroscopy, manual of remote sensing. John Wiley and Sons, Inc. Aguas subterraneas. Engenharia Hidrologica-Coleção ABRH de Recursos Hídricos, Editora da UFRJ, 2, 404.
- Clemmow, P. C. (2013). The plane wave spectrum representation of electromagnetic fields: International series of monographs in electromagnetic waves. Elsevier.
- Cloude, S. (2009). Polarisation: applications in remote sensing. OUP Oxford.
- Cloude, S., & Papathanassiou, K. (1997). Polarimetric optimization in radar interferometry. Electronics Letters, 33 (13), 1176–1178.
- Cloude, S. R., Goodenough, D. G., & Chen, H. (2012). Compact decomposition theory for l-band satellite radar applications. In 2012 ieee international geoscience and remote sensing symposium (pp.5097–5100).
- 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, S. R., & Pottier, E. (1997). An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric sar. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 35 (1), 68–78.
- Huayanay Villar, J. L. (2021). Aplicación del método de polarimetría Cloude_Pottier en una imagen de radar Sentinel 1, para la clasificación de suelos en la microcuenca Apacheta, región Ayacucho.