

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE  
HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS**



**Estimación de los diversos grados de dispersión dieléctrica para la  
caracterización del subsuelo de bofedal, mediante datos georadar, en la  
microcuenca Apacheta - Ayacucho.**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
LICENCIADO EN CIENCIAS FÍSICO - MATEMÁTICAS  
EN LA ESPECIALIDAD DE FÍSICA**

**PRESENTADO POR:**

**Bach. NATANAEL MALLQUI DIAZ**

**ASESOR**

**Mg. WILMER ENRIQUE MONCADA SOSA**

**Ayacucho - Perú**

**2023**

## **Dedicatoria**

A Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mis padres, por el amor y cariño que me demuestran, por el apoyo que me dieron tanto económico, académico y moral en toda mi formación, que, sin ustedes, mi motor y ejemplo a seguir, no hubiera sido posible este logro.

## **Agradecimientos**

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

A todos los que me acompañaron, enseñaron y confiaron en mí, en este largo camino. A mi familia que me apoyó. En especial a asesor por el apoyo, la colaboración y la confianza depositada en mi persona para el desarrollo de este trabajo.

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga  
Ayacucho, diciembre de 2022

Natanael Mallqui Díaz

## **Acrónimos**

B: Campo magnético

CW: Onda continua

EM: Electromagnética

E: Campo eléctrico

FDTD: Diferencia Finita en el Dominio del tiempo

GPR: Radar de Penetración Terrestre

HF: Frecuencia Alta

UHF: De ultra Alta Frecuencia.

UTM: Sistema de coordenadas universal transversal de Mercator

2D: Plano Bidimensional

3D: Plano Tridimensional

VHF: Frecuencia muy Alta.

## Índice

Declaración jurada de autenticidad.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Acrónimos.....	vi
Índice.....	vii
Índice de tablas.....	x
Índice de figuras.....	xi
Índice de anexos.....	xii
Resumen.....	xiii
Abstract.....	xv
Introducción.....	16
I. Planteamiento del problema.....	18
1.1. Descripción de la situación problemática.....	18
1.2. Formulación del problema.....	18
1.3. Formulación de objetivos.....	19
1.4 Justificación.....	19
II. Marco teórico.....	21
2.1. Antecedentes.....	21
2.2. Bases teóricas.....	23
2.2.1. Las ondas electromagnéticas.....	23
2.2.2. Características de las ondas EM.....	23

2.2.3. Propagación de ondas EM- Ecuaciones de Maxwell.....	26
2.2.4. Parámetros EM característicos del medio .....	28
2.3. Bases conceptuales.....	34
2.3.1. Introducción al georadar de penetración terrestre (GPR).....	34
2.3.2. Historia del uso de radar de penetración terrestre .....	35
2.3.3. Aplicaciones del GPR.....	38
2.3.4 Componentes del sistema GPR.....	39
2.2.5. Fundamentos de la prospección con radar de subsuelo.....	42
2.2.6. Reflexión y refracción de las ondas.....	45
2.2.7. Ubicación del área de estudio.....	49
2.2.8. Caracterización del subsuelo de bofedal .....	51
III. Metodología .....	54
3.1. Formulación de hipótesis .....	54
3.1.1 Hipótesis general .....	54
3.1.2 Hipótesis específicas .....	54
3.2. Variables.....	54
3.3. Operacionalización de variables.....	56
3.4. Tipo y nivel de investigación .....	57
3.5. Métodos.....	57
3.6. Diseño de investigación .....	58
3.7. Población y muestra .....	59
3.8. Técnicas e instrumentos .....	59
3.9. Validez y confiabilidad de instrumentos.....	60
3.10. Técnicas de procesamiento de datos .....	60

3.11. Aspectos éticos.....	61
IV. Resultados preliminares y discusión.....	62
4.2. Determinación de los diversos grados de dispersión dieléctrica del subsuelo de bofedal, a partir de datos radargrama medidos con el georadar Gepard, en la microcuenca Apacheta.....	62
4.3. Caracterización de la composición del subsuelo de bofedal según rango de valores de la constante dieléctrica estimada a partir de la amplitud de onda georadar reflejada, en la microcuenca Apacheta. ....	65
Conclusión .....	82
Recomendaciones .....	84
Referencias bibliográficas.....	85
<b>ANEXOS</b> .....	87

## Índice de tablas

<i>Tabla 1 Algunas Características Dieléctricas Típicas de Materiales Medidos a 100 MHz.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 2 Valores Teóricos de Permitividad del Subsuelo.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 3 Coordenadas de los puntos extremos UTM.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 4 Valores de Grados de Dispersión dieléctrica y Profundidad.....</i>	<i>62</i>



## Índice de figuras

<i>Figura 1 Líneas de Campo Eléctrico.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2 Líneas de Campo magnético.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3 Propagación de la Onda Electromagnética .....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 4 Componentes del Sistema de GPR.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 5 Ubicación geográfica del área de estudio.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 6 Ecosistema de bofedal .....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 7 Gráfica de Grados de Dispersión y Profundidad .....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 8 Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 0.63 m. ....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 9 Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 1.03 m. ....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 10 Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 1.5 m. ....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 11 Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 2.13m. ....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 12 Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 3 m.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 13 Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 4.02m. ....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 14 Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 5.05 m. ....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 15 Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 6 m. ....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 16 Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 7.10m. ....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 17 Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 7.50 m. ....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 18 Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 8.68 m. ....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 19 Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 9.7 m. ....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 20 Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 10.34 m. ....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 21 Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 15.31m. ....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 22 Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 20m. ....</i>	<i>80</i>

## Índice de anexos

<i>Anexo 1 Matriz de Consistencia</i> .....	87
<i>Anexo 2 Los 357 puntos en UTM de la Prospección</i> .....	89
<i>Anexo 3 Gepard con Antenas Triangulares</i> .....	90
<i>Anexo 4 Radargrama de Amplitud y Profundidad de Gepard</i> .....	90

## Resumen

La prospección geofísica con el uso del georadar de penetración terrestre (GPR) como técnica no invasiva o destructiva, facilitó la detección de anomalías de subsuelo hasta una profundidad de 20m aplicadas a zonas de diferentes texturas. El objetivo de la investigación fue estimar los diversos grados dispersión dieléctrica para la caracterización del subsuelo de bofedal, mediante datos del georadar Gepard, en la microcuenca Apacheta de la región Ayacucho. El método utilizado consistió en prospectar el subsuelo de una muestra de bofedal a través de 10 transectos de 2m de longitud separados, generando una grilla de 400 m<sup>2</sup>. Los radargramas obtenidos generaron una data de puntos de localización con valores de amplitud de onda reflejada, los mismo que se tradujeron a valores de permitividad dieléctrica correspondientes a diferentes texturas de suelo identificadas y caracterizadas en un mapa de interpolación de ponderación de distancia inversa (IDW) a diferentes profundidades. Los resultados obtenidos mostraron un comportamiento dispersivo de los grados de dispersión dieléctrica en un 70.18% de los datos analizados, logrando caracterizar la composición del subsuelo de bofedal según los rangos de valores de la constante dieléctrica fueron identificadas en el mapa de interpolación destacando texturas de suelo como suelo poroso orgánico-arenoso, limo seco-húmedo-saturado, arcilla seca-húmeda, grava seca-húmeda. De esta manera, los datos del georadar permitieron identificar texturas del subsuelo de bofedal en función de la constante dieléctrica como argumento científico para la toma de decisiones en la preservación y conservación de los ecosistemas de bofedales en el beneficio climático de la microcuenca Apacheta como zona de recarga hídrica, y principal fuente proveedora de agua a la presa Cuchoquesera- Apacheta.

**Palabras Clave:** Subsuelo de bofedal, Permitividad dieléctrica, GPR, IDW, Apacheta.



## **Abstract**

Geophysical prospecting with the use of ground penetrating georadar (GPR) as a non-invasive or destructive technique, facilitated the detection of subsoil anomalies up to a depth of 20 m applied to areas of different textures. The objective of the research was to estimate the different degrees of dielectric dispersion for the characterization of the subsoil of bofedal, using Gepard georadar data, in the Apacheta micro-basin of the Ayacucho region. The method used consisted of prospecting the subsoil of a bofedal sample through 10 separate 2 m long transects, generating a 400 m<sup>2</sup> grid. The radargrams obtained generated a data of location points with reflected wave amplitude values, which were translated into dielectric permittivity values corresponding to different soil textures identified and characterized in an inverse distance weighting (IDW) interpolation map at different depths. The results obtained show a dispersive behavior of the dielectric dispersion degrees in 70.18% of the analyzed data, characterizing the composition of the wetland subsoil according to the ranges of values of the dielectric constant identified in the interpolation map, highlighting soil textures such as porous organic-sandy soil, dry-wet-saturated silt, dry-wet clay, dry-wet gravel, and dry-wet gravel. In this way, the geo-radar data allowed identifying bofedal subsoil textures according to the dielectric constant as a scientific argument for decision making in the preservation and conservation of bofedal ecosystems in the climatic benefit of the Apacheta micro-watershed as a water recharge area, and main source of water supply to the Cuchoquesera Apacheta dam.

**Keywords:** Wetland subsoil, Dielectric permittivity, GPR, IDW, Apacheta.

## Introducción

En la presente investigación exploramos la estimación de los diversos grados de dispersión dieléctrica para la caracterización del subsuelo en la presencia de cantidades moderadas a severas de dispersión dieléctrica del bofedal de la microcuenca Apacheta, región Ayacucho. La obtención de imágenes con el georadar es una técnica cada vez más popular para muchas investigaciones cercanas o lejanas a la superficie. Se tiene reportado aplicaciones exitosas de estudios en hidrología (Klotzsche et al., 2013; Tronicke et al., 2002; Xu et al., 2014) aplicaciones en minería (Fullagar et al., 2000) en la ingeniería civil (Carlsten et al., 1995; Valle et al., 1999), en la arqueología, en sismología (Ernst et al., 2007; Tarantola, 1984; Watanabe et al., 2004).

Las imágenes tomográficas en forma de onda de los datos del georadar fue un método capaz de proporcionar imágenes de las propiedades dieléctricas pertinentes cercanos a la superficie con un nivel de detalle sin precedentes. Para ello, la motivación general de la investigación fue la estimación de los grados de dispersión dieléctrica para la caracterización del subsuelo de bofedal con los datos del georadar, con el fin de entender la amplia gama de problemas del mundo real, ya que en la realidad se sabe que estos parámetros electromagnéticos del subsuelo son dispersivos, por lo que los datos registrados del georadar pudo mostrar un comportamiento dispersivo, esto se debió a la atenuación de la energía electromagnética, ya que la permitividad eléctrica y la conductividad eléctrica del subsuelo son complejos (Belina et al., 2012).

Las bases teóricas sobre esta prospección fueron: los conceptos de la óptica (la incidencia, la reflectancia, la transmitancia, la absorción de las ondas electromagnéticas), por otro lado, el análisis de la teoría de los electromagnética, con las ecuaciones básicas que fue formulado por J. C. Maxwell en 1867 donde relaciona el campo eléctrico ( $\vec{E}$ ) con el campo magnético ( $\vec{B}$ ). (Bergmann, 1998).

La aplicación de las ondas del radar, con el georadar de penetración terrestre (GRP), Gepard, permitió obtener información de zonas de subsuelo sin la necesidad de realizar excavaciones o intervenir el área de estudio destruyendo su entorno, de esta manera se pudo obtener los diferentes grados de dispersión dieléctrica del subsuelo de bofedal de la microcuenca Apacheta, caracterizando la composición del subsuelo mediante los valores de la constante dieléctrica del subsuelo del bofedal; los mapas de secciones de la composición del subsuelo de bofedal se obtuvieron mediante la interpolación IDW.

## I. Planteamiento del problema

### 1.1. Descripción de la situación problemática

Existen numerosos estudios sobre el análisis y caracterización de las propiedades de los materiales mediante el análisis de los datos de georadar con la atenuación de la energía electromagnética, es relativamente común en los estudios. Sin embargo, el desarrollo y la evaluación de análisis de los datos, de la reflexión basados en la superficie siguen siendo limitados (Bradford, 2007).

Las ondas electromagnéticas generadas GPR, están sujetas a una atenuación dependiente de la frecuencia que se emite, que depende de la permitividad tanto como de la conductividad eléctrica, las ondas EM al atravesar por la superficie terrestre, las energías incidente y refractado se atenúan, haciendo que tenga un comportamiento dispersivo. Se pretende realizar la caracterización del subsuelo que contiene los diversos grados de dispersión dieléctrica en relación a la constante dieléctrica del subsuelo de bofedal, de la microcuenca Apacheta, región Ayacucho.

### 1.2. Formulación del problema

#### 1.2.1 Problema General

¿En qué medida se estima los diversos grados dispersión dieléctrica para la caracterización del subsuelo de bofedal, mediante datos georadar, en la microcuenca Apacheta - Ayacucho?

#### 1.2.2 Problemas específicos

1.2.1. 1. ¿Cuáles son los diversos grados de dispersión dieléctrica para la caracterización del subsuelo de bofedal, a partir de datos del radagrama medidos con el georadar Gepard, en la microcuenca Apacheta - Ayacucho?



1.2.1.2. ¿Cuál es la caracterización de la composición del subsuelo de bofedal según rango de valores de la constante dieléctrica, en la microcuenca Apacheta?

### **1.3. Formulación de objetivos**

#### 1.3.1 Objetivo General

Estimar los diversos grados dispersión dieléctrica para la caracterización del subsuelo de bofedal, mediante datos georadar, en la microcuenca Apacheta - Ayacucho.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

1.3.2.1. Determinar los diversos grados de dispersión dieléctrica del subsuelo de bofedal, a partir de datos del radargrama medidos con el georadar Gepard, en la microcuenca Apacheta.

1.3.2.2. Caracterizar la composición del subsuelo de bofedal según rango de valores de la constante dieléctrica, en la microcuenca Apacheta.

### **1.4 Justificación**

La caracterización del subsuelo, nos permite una mejor comprensión de las propiedades del subsuelo de bofedal, mediante el análisis de la amplitud registrada por el georadar, longitud de onda, modelada en el radargrama del georadar de penetración terrestre, Gepard, el cual tiene poder de penetración de hasta 40 metros de profundidad. Este tratamiento tiene la teoría y desarrollo de las ecuaciones de Maxwell y la óptica geométrica, para la propagación de las ondas electromagnéticas en un medio dieléctrico como la composición del subsuelo de bofedal, cuyos parámetros constitutivos del medio son la permitividad eléctrica, conductividad eléctrica y permeabilidad magnética.

El presente trabajo de investigación pretende caracterizar el subsuelo de bofedal en relación a su composición, lo cual permitirá entender la importancia que tienen los ecosistemas de bofedales en el aporte de agua por escorrentías subsuperficiales hacia las zonas más bajas de la microcuenca a través de sus tributarios hacia el río apacheta. Este aporte, facilita a los ciudadanos de nuestra zona, incluyendo los responsables políticos, generar la toma de decisión en la preservación y conservación de los ecosistemas de bofedales en el beneficio climático de la microcuenca Apacheta como zona de recarga hídrica, y principal fuente proveedora de agua a la presa Cuchoquesera.

## II. Marco teórico

### 2.1. Antecedentes

Belina et al. (2012), en el artículo “Evaluación de los límites de reconstrucción de un esquema de inversión de forma de onda de georadar de pozo cruzado independiente de la frecuencia en presencia de dispersión”, la evaluación sintética de los límites de reconstrucción de una forma de onda de georadar de pozo cruzado, de un esquema de inversión de formas de onda de georadar en presencia de diversos grados de dispersión dieléctrica, tuvo los resultados indican que, cuando se combina con un procedimiento de estimación de ondículas de origen que proporciona un medio de contabilizar parcialmente los efectos dependientes de la frecuencia a través de una ondícula "efectiva", el algoritmo de inversión de inversión se comporta notablemente bien en entornos de dispersión débil a moderada .

Según Tim Bergmann (1998), en su publicación “Modelado de diferencias finitas de la propagación de ondas electromagnéticas en medios dispersivos y atenuantes”. El modelado realista de la propagación de ondas electromagnéticas en la banda de frecuencia del radar requirió una solución completa de las ecuaciones de Maxwell, así como una descripción adecuada de las propiedades del material. Presentó una solución de diferencia finita en el dominio del tiempo (FDTD) de Maxwell ecuaciones que permiten tener en cuenta la dependencia de la frecuencia de la permitividad dieléctrica y la conductividad eléctrica típica de muchos materiales cercanos a la superficie. Sobre el campo de ondas espacial el muestreo se obtuvo a través de investigaciones sistemáticas de la influencia de varias combinaciones de parámetros en las curvas de dispersión numérica. Dado que el algoritmo modelo intrínsecamente la absorción de energía, la absorción eficiente.

Según, Greg Turner, (1994), en su artículo “Deconvolución de la propagación del radar subterráneo”. Se obtuvo en el estudio de estratos subterráneos que la atenuación es mucho mayor para las ondas de radar subterráneas que para las ondas sísmicas. Dado que esta dependencia de la frecuencia hace que la forma del pulso del radar subterráneo cambie a medida que se propaga a través de la tierra. Las pruebas preliminares con datos de levantamientos sobre un tanque de agua, un rebaje de una mina subterránea y granito fracturado sugieren que también se pueden lograr buenos resultados asumiendo que la atenuación es linealmente proporcional a la frecuencia.

De Coster et al., (2016), se investigó el impacto del número de frecuencias y las configuraciones multiestáticas en las capacidades de recuperación de información a través de las topografías de superficie de respuesta de las funciones objetivo. Hizo un procedimiento de inversión de onda y un modelo electromagnético. Mostrando con experimentos numéricos y de laboratorio la posibilidad de reducir el número de frecuencias de varios cientos a una o varias decenas de componentes sin afectar las capacidades de recuperación de información.

También mostró a través de varios escenarios que la presencia de un conductor eléctrico perfecto aumenta el número de frecuencias requeridas para asegurar una recuperación aceptable de las propiedades del subsuelo, mientras que la conductividad de la primera capa y la permitividad relativa de la segunda capa no la afectan. Los resultados destacaron que los análisis del contenido de la información son importantes para estudiar y optimizar los procedimientos de adquisición en la presencia de grados de dispersión dieléctrica.

## 2.2. Bases teóricas

### 2.2.1. Las ondas electromagnéticas OEM

Las OEM resulta por la combinación de los vectores de campo  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  que son perpendiculares entre sí y a su vez estos son ortogonales a la dirección en la que se propagan. La OEM se produce al acelerar las cargas en movimiento de un lado a otro que producirán campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  oscilantes, estas ondas viajan a la velocidad de la luz que transporta la energía EM.

Algo interesante de las OEM en general, es que no se requiere ningún medio para que la onda viaje. No como otras ondas, como las ondas sonoras, no pueden viajar a través del vacío.

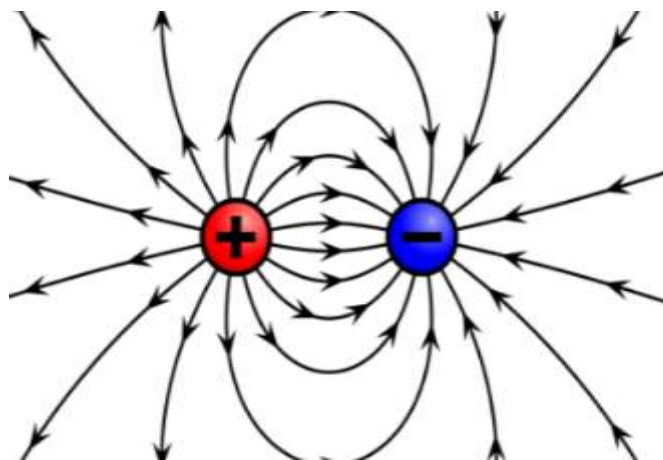
### 2.2.2. Características de las OEM

Existen las siguientes características de las ondas EM:

- **Campo Eléctrico ( $\vec{E}$ ):** Un campo eléctrico matemáticamente es un campo vectorial, se usa como una herramienta para describir la distribución de fuerza eléctrica, que ejerce sobre una carga q, el  $\vec{E}$  perturba el espacio que les rodea, el  $\vec{E}$  se define como  $\vec{E} = q\vec{F}$ .

#### Figura 1

*Líneas de Campo Eléctrico*

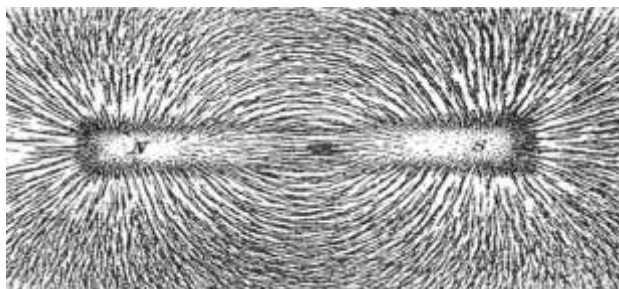


*Nota.* Presentación del campo eléctrico mediante vectores por línea de campo de dos cargas, carga positiva y carga negativa.

- **Campo Magnético ( $\vec{B}$ ):** Un campo magnético matemáticamente es un campo vectorial, se usa como herramienta para describir la distribución de la fuerza magnética generado de algo magnético. Este  $\vec{B}$  podemos representar como un conjunto de vectores que apuntan en dirección al  $\vec{B}$  que es generado por algún material magnético o ferromagnético, la otra forma de representar el  $\vec{B}$  mediante vectores es por líneas de campo, donde los vectores están en las líneas de campo.

## Figura 2

*Líneas de Campo magnético*



*Nota.* Presentación del campo magnético mediante vectores por línea de campo en un imán

Las líneas de campo no se intersecan, forma una curva cerrada, la dirección que denotamos por contextos históricos por norte (N) y sur (S), la dirección de los campos es de N a S.

Las características de las ondas electromagnéticas se diferencian entre sí: como la velocidad de propagación, longitud de onda y la frecuencia que son más importantes.

- **La velocidad de propagación (v):** Es la velocidad que se propaga la OEM, que depende medio físico, en el vacío su valor es  $c = 3 * 10^8 \frac{m}{s}$ , mientras en un medio está dada por:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

donde  $\epsilon_r$  es la permitividad relativa del medio, y  $c$  es la velocidad en el vacío.

- **Frecuencia:** Se define como el número de repeticiones que oscila la onda EM por unidad de tiempo, su unidad es Hertzios (Hz)

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (2)$$

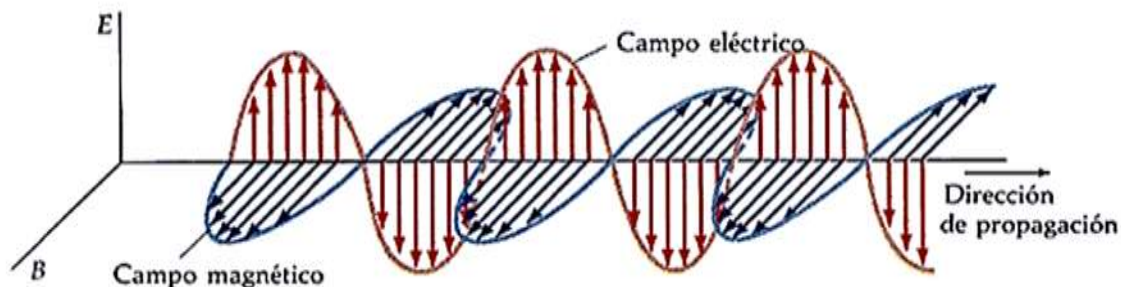
- **Longitud de onda ( $\lambda$ ):** Se define como la distancia que recorre entre dos valles o crestas máximos uno después de otro de manera consecutiva, la  $\lambda$  depende del valor de la velocidad de propagación y frecuencia, su unidad está en m.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3)$$

- **Amplitud de onda:** Es la medida de la distancia de valle a cresta.

### Figura 3

*Propagación de la Onda Electromagnética*



*Nota.* La OEM polarizada plana. Los  $(\vec{E})$  y  $(\vec{B})$  en fase, son perpendiculares entre sí y  $(\vec{E})$  y  $(\vec{B})$  es también perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

### 2.2.3. Propagación de ondas EM- Ecuaciones de Maxwell

Las bases teóricas para explicar este fenómeno de la propagación de la OEM, corresponden a las ecuaciones desarrolladas por J. C. Maxwell en el año 1867 donde relaciona los campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$ , que son denominadas las ecuaciones constitutivas, las mismas que involucra la intensidad de los campos eléctricos y magnéticos ( $\vec{E}$  y  $\vec{B}$ ), a través del desplazamiento eléctrico  $\vec{D}$  y la inducción magnética  $\vec{H}$ , cabe mencionar principio de superposición las ecuaciones de Maxwell son lineales, la suma de dos soluciones a estas ecuaciones es también una solución. A continuación, se presentamos las ecuaciones de J.C. Maxwell.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + M \quad (\text{Ley de Faraday}) \quad (4)$$

$$\nabla \times \vec{H} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + J \quad (\text{Ley de Ampere - Maxwell}) \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (7)$$

Donde:



$\vec{E}$  vector de intensidad de campo eléctrico

$\vec{B}$  vector de densidad de flujo magnético

$\vec{D}$  vector desplazamiento eléctrico

$\vec{H}$  intensidad de campo magnético

$\rho$  densidad de carga eléctrica

$\vec{j}$  vector de densidad de corriente eléctrica

$\vec{M}$  vector de densidad magnética

Las ecuaciones anteriores junto con las ecuaciones de continuidad nos ayudan comprender sobre las interacciones de las OEM y los medios por donde se propaga la OEM.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (8)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (9)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (10)$$

Donde  $\epsilon$ ,  $\mu$ , y  $\sigma$  son los parámetros indispensables que describe un medio determinado por donde viaja la OEM. El parámetro físico  $\sigma$  se define como la capacidad inherente que tiene un material de conducir la corriente eléctrica. El parámetro físico  $\epsilon$  se define como capacidad de polarización que tiene un material en presencia de un  $\vec{E}$  y  $\mu$  es un parámetro que mide la capacidad de un medio en atraer los  $\vec{B}$ .

Con las ecuaciones de Maxwell y la propagación de las OEM se obtienen las relaciones de la propagación de una OEM en función de los parámetros pertinentes del medio. Con estas relaciones

podemos determinar la  $\nu$ , la  $\lambda$  y la atenuación  $\alpha$ , que desarrolla la energía EM en su trayecto por el medio. Los procesos de atenuación y dispersión dependen de la  $\varepsilon$  y de la  $\sigma$  del medio, que pueden describirse como magnitudes complejas dependientes de la frecuencia, mientras que la permeabilidad magnética es esencialmente independiente de la frecuencia (Turner, 1994).

#### **2.2.4. Parámetros EM característicos del medio**

Los parámetros EM característicos del medio son la  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  y  $\mu$  conductividad eléctrica, permitividad eléctrica y permeabilidad eléctrica respectivamente, estos tres parámetros EM definen las propiedades con los que se desplaza una OEM.

##### **2.2.3.1. Conductividad eléctrica $\sigma$**

La  $\sigma$  mide la capacidad que un material pueda conducir una corriente eléctrica. Según la ecuación (8), nos hace entender la medida de la respuesta de cargas libres que tiene un cuerpo cuando está sometido a una corriente eléctrica o de un  $\vec{E}$  externo, el factor de proporcionalidad entre el  $\vec{E}$  y la densidad de volumen de la corriente debido al movimiento de estas cargas libres es la respuesta de las cargas libres de un medio en presencia de un  $\vec{E}$  externo, es decir, que la densidad de corriente  $\vec{J}$  es debido a las cargas libres que existen en un material, al  $\vec{E}$  aplicado, y a  $\sigma$  la conductividad del material.

Cuando hablamos sobre la conductividad eléctrica de la composición del subsuelo, hay muchos factores que determinan su existencia, los principales son la humedad y la temperatura, los contenidos de las sales minerales que están disueltas en la humedad. El factor que es la temperatura, esta favorece a la ionización y la movilidad de los iones en líquidos, de esta manera da incremento de la conductividad eléctrica. En las superficies que contienen porosidades, la

conductividad eléctrica es muy variables, pues si el suelo contiene humedad hay la facilidad la conducción eléctrica en los poros que contienen aire no conducen la corriente eléctrica.

Los materiales pueden clasificar de la forma de conductividad eléctrica como: materiales conductores, semiconductores y aislantes. Los materiales conductores su conductividad mayor al valor de  $10^5 \frac{1}{\Omega m}$ , los materiales aislantes tiene su conductividad menor a  $10^{-8} \frac{1}{\Omega m}$  y los materiales que se encuentra entre los valores  $10^{-8} \frac{1}{\Omega m}$  y  $10^5 \frac{1}{\Omega m}$  son llamados materiales semiconductores (Gracia & Vega, 2001).

La conductividad eléctrica en la mayoría de las rocas es electrolito, mientras en los materiales metálicos (minerales) o arcillas son en mayor cantidad materiales aislantes, la conducción son por las porosidades o fisuras donde fluye la humedad (Gracia & Vega, 2001).

Los conductores pueden ser buenos conductores y conductores perfectos, el conductor perfecto es un medio idealizado donde  $\sigma \rightarrow \infty$ , es decir que no hay colisiones ya que la velocidad de los electrones es infinita, el buen conductor se define cuando en un medio, la conductividad es predominante frente a la constante dieléctrica (Otín, 1998).

La conductividad se expresa en su forma compleja como:

$$\sigma = \sigma' + i\sigma'' \quad (11)$$

Donde  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\sigma'$  es la parte real es la fase de la intensidad eléctrica con la amplitud de la corriente eléctrica, y  $\sigma''$  es la conductividad compleja, determina el desfase entre la amplitud de la corriente con respecto al  $\vec{E}$  y explica el retardo en la respuesta de conducción eléctrica de un material en presencia de  $\vec{E}$  que varía con el tiempo (Gracia & Vega, 2001).

### 2.2.3.2. Permitividad dieléctrica $\varepsilon$

La permitividad dieléctrica se entiende como el campo eléctrico afecta y es afectado en la propagación en el medio, está determinada por la tendencia de un material a polarizarse ante la aplicación de un campo eléctrico y de esa forma anular parcialmente el campo interno del material. (Dios Otín et al., 2004). La constante de proporcionalidad entre  $\vec{E}$  y  $\vec{D}$  es la ecuación (9), donde es  $\varepsilon$  que es la permitividad dieléctrica absoluta (Dios Otín et al., 2004).

Donde  $\varepsilon$  es el producto de la permitividad relativa  $\varepsilon_r$  y  $\varepsilon_0$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (12)$$

Donde:

$\varepsilon_r$  es la constante adimensional que define la capacidad que tiene un material de polarizarse de un en presencia del  $\vec{E}$ , será igual a 1 cuando se trata del vacío (Dios Otín et al., 2004).

$\varepsilon_0$  es la permitividad dieléctrica en el vacío tiene un valor de  $10^{-9}/36\pi [F/m]$ .

La permitividad dieléctrica se expresa en un componente complejo, esta es:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (13)$$

De donde  $\varepsilon'$  provoca una corriente en fase respecto al  $\vec{E}$  externo y la componente imaginaria  $\varepsilon''$  provoca una corriente en desfase respecto al  $\vec{E}$ , está relacionado con las pérdidas asociadas a la conductividad y a la frecuencia. La parte imaginaria se expresa de la siguiente manera. (Dios Otín et al., 2004)

$$\varepsilon'' = \varepsilon''_d + \frac{\sigma_{dc}}{\omega} \quad (14)$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia angular que es la pulsación del campo eléctrico externo,  $\varepsilon''_d$  se llama el factor que determina las pérdidas dieléctricas cuando las ondas se propagan en el medio, está relacionado con la respuesta frente a diferentes fenómenos de relajación que están asociados con las moléculas de agua y  $\sigma_{dc}$  se le denomina la conductividad estática. Por lo tanto, la ecuación (14) se expresa de la siguiente forma:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i(\varepsilon''_d + \frac{\sigma_{dc}}{\omega}) \quad (15)$$

Para las frecuencias entre 10 MHz y 1000 MHz, en los materiales del subsuelo, el fenómeno de la polarización es predominante sobre los fenómenos de conductividad eléctrica, significa que los medios del subsuelo suelen caracterizarse a partir de la constante dieléctrica. Para menores frecuencias ( $< 100$  Hz) no se observa que el parámetro dependa de la frecuencia de la pulsación, en cambio para las frecuencias altas hay una dependencia entre ambos, la parte real y la parte imaginaria de la permitividad dieléctrica dependen de la frecuencia (Gracia & Vega, 2001).

Para la caracterización de la dependencia de la frecuencia de la permitividad dieléctrica, hay dos modelos que se usa más, son los modelos de Debye (1929) y Maxwell-Wagner o también son llamados modelo de Cole Cole (1941), estos son:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (i\omega\tau)} - i \frac{\sigma(0)}{\omega\varepsilon_0} \quad (16)$$

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (i\omega\tau)^{1-\xi}} - i \frac{\sigma(0)}{\omega\varepsilon_0} \quad (17)$$

Donde  $\xi$  es coeficiente que cumple:  $0 \leq \xi \leq 1$ , donde  $\varepsilon_s$  es la baja frecuencia y  $\varepsilon_\infty$  es la alta frecuencia de  $\varepsilon_r$ ,  $\omega$  es la frecuencia angular, de medición y  $\tau$  del periodo de relajación. Si la relajación es Debye entonces  $\sigma = 0$  y la dispersión es pequeña (Xu et al., 2014).

### 2.2.3.2. Permeabilidad magnética $\mu$

Se define como la capacidad que tienen los materiales de atraer y transportar un  $\vec{B}$  aplicado, donde se incluye a la intensidad de campo magnético  $\vec{H}$ , y la inducción magnética  $\vec{B}$  que se encuentran en el interior del material, de acuerdo con la ecuación (10).

El producto de la permeabilidad magnética relativa  $\mu_r$  y la permeabilidad en el vacío  $\mu_0$  se denomina la permeabilidad absoluta.

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (18)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} \quad (19)$$

La  $\mu_r$  depende de la susceptibilidad magnética  $\chi_m$  que es la constante de proporcionalidad de la intensidad de  $\vec{H}$  externo y la imanación del material  $\vec{M}$ , de acuerdo con la ecuación (20).

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (20)$$

La  $\mu_r$  se escribe en su forma compleja, se usa la ecuación (21).

$$\mu_r = \mu' - i\mu'' \quad (21)$$

Según la ecuación 21 el significado físico de la parte real e imaginaria es el almacenamiento y ya la pérdida de la energía magnética, debido a corrientes turbillonarias (corriente de Foucault o corriente parásita también conocida como corriente torbellino), histéresis, viscosidad magnética del material, etc. y se denomina permeabilidad magnética viscosa.

En la mayoría de los estudios con georadar se cumple que la permeabilidad magnética se aproxima a 1, con excepción de aquellos que contienen materiales ferromagnéticos, no dependen de la frecuencia del  $\vec{B}$ . En la mayoría de los materiales su comportamiento es isotrópico respecto a la permeabilidad magnética (Gracia & Vega, 2001).

La relación entre la permeabilidad magnética en el vacío y la permitividad dieléctrica en el vacío se expresa como la velocidad de propagación de la onda EM.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 2.9 * 10^8 \frac{m}{s} \quad (22)$$

La tabla 1 muestra los valores de la conductividad eléctrica ( $\sigma$ ), la permitividad dieléctrica relativa ( $\epsilon_r$ ) y la atenuación ( $\alpha$ ) de las características dieléctricas típicas de los distintos tipos o texturas de los suelos más relevantes medidos a 100 MHz (Daniels, 2004).

**Tabla 1**

*Algunas Características Dieléctricas Típicas de Materiales Medidos a 100 MHz*

<b>Materiales</b>	$\sigma(S.m)$	$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$	$\alpha(Db.m^{-1})$
Aire	0	1.00059	0
Asfalto seco	$10^{-2}: 10^{-1}$	2-4	2-15
Asfalto húmedo	$10^{-3}: 10^{-1}$	6-12	2-15
Barro seco	$10^{-1} : 10^0$	2-6	10-50
Barro húmedo	$10^{-1} : 10^0$	5-40	20-100
Carbón seco	$10^{-1} : 10^0$	3.5	1-10
Carbón húmedo		8	2-20
Concrete dry	$10^{-3} - 10^{-1}$	4-10	2-12
Hormigón húmedo	$10^{-2} - 10^{-1}$	10-20	10-25
Agua dulce	$10^{-6}: 10^{-2}$	81	0.01
Hielo de agua dulce	$10^{-4}: 10^{-3}$	4	0.1-2 4
Granito seco	$10^{-8}: 10^{-6}$	5	0.5-3
Granito húmedo	$10^{-3}: 10^{-2}$	7	2-5
Caliza seca	$10^{-8} : 10^{-1}$	7	0.5-10
Caliza húmeda	$10^{-4}: 10^{-1}$	8	1-20

Permafrost	$10^{-3}: 10^{-2}$	4-8	0.1-5
Sal de roca seca	$10^{-4}: 10^{-2}$	4-7	0.01-1
Arena seca	$10^{-7}: 10^{-3}$	2-6	0.01-1
Arena húmeda	$10^{-3}: 10^{-2}$	10-30	0.5-5
Arenisca seca	$10^{-6}: 10^{-5}$	2-5	2-10
piedra arenisca	$10^{-4} : 10^{-2}$	5-10	4-20
Agua de mar	$10^2$	81	100
Hielo marino	$10^{-2} 10^{-1}$	4-8	1-30
Esquisto seco	$10^{-3}: 10^{-2}$	4-9	1-10
Esquisto saturado	$10^{-3}: 10^{-1}$	9-16	5-30
Nieve	$10^{-6}: 10^{-5}$	6-12	0.1-2
Suelo arcilloso seco	$10^{-2}: 10^{-1}$	4-10	0.3-3
Suelo arcilloso húmedo	$10^{-3}: 10^{-0}$	10-30	5-50
Suelo arcilloso y seco	$10^{-4}: 10^{-3}$	4-10	0.5-3
Suelo arcilloso húmedo	$10^{-2} 10^{-1}$	10-30	1-6
Suelo arenoso y seco	$10^{-4}: 10^{-2}$	4-10	0.1-2
Suelo arenoso y húmedo	$10^{-2}: 10^{-1}$	10-30	1-5

*Fuente:* Daniels (2004), valores de parámetros constitutivos y atenuación de algunas materiales

## 2.3. Bases conceptuales

### 2.3.1. Introducción al georadar de penetración terrestre (GPR)

Desde la antigüedad el ser humano quiso saber que hay por debajo del suelo o como está compuesto el subsuelo, además detectar objetos enterrados a profundidades significativas ha fascinado a la humanidad durante siglos. Una técnica única que pudiera hacer claramente visibles el suelo y sus compuestos pertinentes es más atractiva que se han dedicado muchos científicos, ingenieros, arqueólogos entre otros a idear métodos de exploración adecuados para satisfacer su búsqueda. Hasta el momento, no se ha encontrado ningún método que proporcione una respuesta completa.

El radar de penetración terrestre (GPR), resultó ser una opción tan atractiva para los ingenieros, científicos, arqueólogos, etc. Ya que abarca una serie de propagación de ondas electromagnéticas en medios con pérdidas electromagnéticas, tecnología de antenas de banda ultra ancha y diseño de sistemas de radar, procesamiento de señales de forma de onda y procesamiento de imágenes a



partir de los datos adquiridos por el GPR. La mayoría de los radares de penetración en el suelo son una realización particular de la tecnología de radar de impulsos de banda ultra ancha considera que "la tecnología del radar de impulsos crea un reto apasionante para el investigador "innovador" y que el radar de sondeo del suelo ha sido una empresa comercial de éxito, aunque a menor escala que las aplicaciones de radar convencionales (Daniels, 2004).

El (GPR), es un dispositivo que sirve para transmitir señales u ondas electromagnéticas y recibir ecos o la reflexión de la onda transmitida de objetos de interés dentro de su volumen de cobertura decir de otra forma, es una técnica de resolución de prospección geofísica que proporciona un perfil continuo del subsuelo, emplean frecuencias de ondas electromagnéticas de 10 a 200MHz dependiendo el objeto de investigación, la teoría de la prospección de radar de penetración terrestre de basa en la misma teoría de electromagnetismo del radar convencional que son transmitidos dentro de la tierra en vez que en el aire (Blancas et al., 1996).

Esta técnica de prospección geofísica refiere a una serie de técnicas EM diseñadas principalmente para localizar objetos o interfaces enterrados situados dentro de una estructura del subsuelo obteniéndose mapas detallados del subsuelo.

### **2.3.2. Historia del uso de radar de penetración terrestre**

El principio del radar fue descubierto por Heinrich Hertz en la década de 1880, quien descubrió que las ondas de radio son reflejadas por los objetos de manera similar a la luz. Hiilmeyer en 1904 usa las señales electromagnéticas, quien obtuvo patentes en varios países (por ejemplo, la patente alemana núm. 165546) que describe un sistema que utiliza onda continua (CW) para detectar el reflejo ondas de radio de objetos metálicos remotos (Noon, 1996). La primera forma de tecnología de radar de penetración terrestre entró en desarrollo apenas seis años después de la invención del radar de Christian Hülsmeier. En 1910, Gotthelf Leimbach y Heinrich Löwy idearon

un sistema que usaba antenas de superficie y radar de ondas continuas para localizar objetos enterrados. Su técnica consistía en enterrar antenas dipolares en unas perforaciones verticales y comparar la magnitud de las señales reflejadas.

De este modo, se podía obtener una imagen aproximada de cualquier región dentro del conjunto que, por su mayor conductividad que el medio circundante, absorbía preferentemente la radiación electromagnética. Las principales características de este trabajo, a saber, es el funcionamiento en onda continua, el uso de efectos de apantallamiento o difracción debido a las características del subsuelo, y la dependencia de las variaciones de conductividad para producir de la conductividad para producir la dispersión, estaban presentes en otras patentes, incluyendo algunas destinadas a aplicaciones totalmente sumergidas en las minas (Daniels, 2004).

El trabajo de Hiilsenbeck en 1926 parece ser el primer uso de las técnicas pulsadas para determinar la estructura de los elementos enterrados. Observó que no siempre una variación dieléctrica en el material, debe relacionarse con la conductividad eléctrica, dado que en algunos caso se produciría reflexiones y que la técnica mediante la realización sencilla de fuentes direccionales tiene la ventaja de ser utilizada por métodos sísmicos.

Las técnicas de pulsación se desarrollaron a partir de los años 1930 como medio para sondear profundidades considerables en el hielo, el agua dulce, los depósitos de sal, la arena del desierto y las formaciones rocosas. El sondeo en las rocas por Cook ha realizado mediciones de laboratorio de la permitividad del complejo de RF en una variedad de rocas encontradas en trabajos de minería, túneles e ingeniería (Cook, 1975).

Un relato más extenso de La historia del GPR y su crecimiento hasta mediados de la década de 1970 se encuentra en Nilsson su obra Dos temas en la prospección de campos de radiación

electromagnética, que es 1 Prospección geofísica por radar, se estudian las posibilidades de utilizar frecuencias HF, VHF y UHF Estas frecuencias se encuentran en el extremo superior del espectro electromagnético, desde un punto de vista geofísico y el otro 2 Nueva instrumentación para prospección de campos de radiación VLF" se presentan los detalles técnicos de los sistemas de prospección VLF-72/73 y WIMP-30 (Daniels, 2004).

A principios de los años setenta, cuando se realizaban investigaciones y alunizajes en la Luna, se renovó el interés por el tema. y aterrizajes lunares. Para estas aplicaciones, una de las ventajas de los radares de penetración en el suelo sobre las técnicas sísmicas, a saber, la capacidad de utilizar transductores remotos, sin contacto, de la energía radiada, en lugar de los de contacto con el suelo necesarios para las investigaciones sísmicas. Los transductores remotos son posibles porque la relación de impedancia dieléctrica entre el espacio libre y los materiales del suelo, normalmente de 2 a 4, es muy inferior a la relación correspondiente para las impedancias acústicas, por un factor que suele ser del orden de 100 (Daniels, 2004).

Desde la década de 1970 hasta nuestra actualidad, el avance de la electrónica, la informática, las técnicas de detección y amplificaciones de las señales electromagnéticas, además del procesado de datos por ordenador, lo que contribuyó a mejorar la resolución del radar, el avance y la gama de aplicaciones se ha ido aumentando exponencialmente, y ahora incluye los ensayos no destructivos de edificios y estructuras geológicas, la arqueología evaluación de la calidad de carreteras y túneles, localización de huecos y contenedores, y pozos mineros, detección de tuberías y cables, así como teledetección por satélite.

Para cada una de estas aplicaciones se está construyendo un equipo y el usuario dispone ahora de una mejor selección de equipos y técnicas. Además, dada la necesidad de obtener un método no destructivo para el estudio de zonas superficiales, provocó el desarrollo del georadar y sus aplicaciones.

### **2.3.3. Aplicaciones del GPR**

El avance de la tecnología del GPR y el avance en gran medida por las aplicaciones, también se han desarrollado y perfeccionado, las técnicas y los métodos de procesamiento de datos para una mejor interpretación que exige dada investigación en un campo determinado (Daniels, 2004), Siendo una técnica no destructiva con una resolución tomográfica extremadamente alta (Belina et al., 2012) y de buen rendimiento, la aplicación de la prospección tomográfica del radar de penetración terrestre, está en los diferentes campos como la ingeniería civil, la geología, estudios medio ambientales, la geotecnia, la arqueología, la minería , entre otras. El GPR se ha utilizado en las siguientes aplicaciones:

- Detección de objetos metálicos y no-metálicos.
- Detección de zonas mineras.
- Inspección de puentes, túneles, muros, etc.
- Determinación de cavidades.
- Inspección del pavimento de autopistas y ferrocarril.
- Determinación de espesores en zonas de relleno o aluvial
- Mapeo de lagos y lagunas.
- Investigaciones arqueológicas.
- Investigaciones forenses
- Nieve, hielo y glaciares

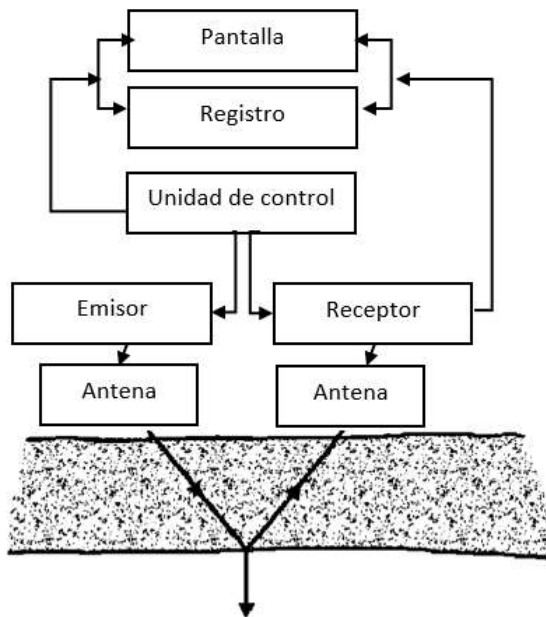
- Investigación de terrenos contaminados, etc.

### 2.3.4 Componentes del sistema Radar de Penetración Terrestre (GPR)

El GPR, es un sistema EM que se utiliza en una prospección geológica, es un método no invasivo y no destructiva de la superficie terrestre y están compuestos básicamente por una antena transmisora, lo cual genera ondas electromagnéticas incidentes del medio prospectado, la antena receptora es la que detecta las OEM resultantes y la unidad de control es la encargada de procesar y visualizar los perfiles verticales conocidos como “Radargrama”, para su posterior tratamiento de los datos adquiridos (Fonseca-Benítez, 2006).

#### Figura 4

*Componentes del Sistema de GPR*



*Fuente.* Elaboración propia, representación de los componentes de GPR, en una prospección geofísica.

#### ***2.2.4.1. Unidad de control del GPR del Gepard***

La función principal es el control, almacenamiento, visualización y la coordinación de los diferentes elementos que compone el GPR. Controla los tiempos de envío de señales electromagnéticas, la antena emisora es el que recibe las señales y luego genera un radargrama, es decir, la unidad de control es el que coordina de la emisión de las ondas electromagnéticas y la recepción de las ondas electromagnéticas reflejadas a través las antenas emisor y receptor respectivamente. El tiempo de control de la emisión de las señales electromagnéticas se da en pulsaciones, está controlada por un reloj interno en un rango de  $2 \cdot 10^{-5}$  s, cuando se hace la prospección el equipo permanece en silencio para no tener interferencias al tomar los datos de interés, la demora de las reflexiones de los señales electromagnéticas, está en una proporción directa de la profundidad, esta permite una adquisición continua por la cantidad de trazas realizadas por las pulsaciones (Fonseca-Benítez, 2006)

En el georradar de penetración terrestre Gepard, la recopilación de los datos se da en la tableta Android.

#### ***2.2.4.2. Antenas del GPR***

Las antenas de GRP es la parte fundamental, son los encargados de generar pulsos u ondas electromagnéticas y captar las señales reflejadas que regresa a la superficie. Tiene dos funciones una es la emisión de las señales electromagnéticas y la recepción de estas señales electromagnéticas, la irradiación de la energía que se les suministra son en forma de ondas electromagnéticas, con la direccionalidad y las características adecuadas a la aplicación pensada, y deben captar la parte de la energía reflejada para su posterior análisis (Fonseca-Benítez, 2006).

Las antenas del GPR de Gepard, son triangulares, la antena transmisora es de color rojo mientras la antena receptora es de color negro, estas están conectadas por un cable a la unidad central.

En una prospección de radar de penetración terrestre es importante tener en cuenta, que la energía irradiada por la antena haga una única dirección de propagación, esta permite mejorar la relación de ruido/señal, obteniendo registros de alta resolución, para disminuir el ruido se tiene que evitar las reflexiones en objetos externos. (Daniels, 2004).

**Polarización.** Es la polarización de la energía EM en la dirección objetiva, la polarización de la onda puede estar polarización horizontalmente o verticalmente, al estar polarizado verticalmente se rota en  $90^\circ$  en donde el vector del campo eléctrico es también vertical. Según la teoría el campo eléctrico es siempre perpendicular con el campo magnético, de igual forma la dirección de la propagación es perpendicular a los campos eléctrico y magnético (Daniels, 2004).

La antena de radar de penetración terrestre usa antenas linealmente polarizadas, los campos eléctricos de las antenas emisora y receptora estarán alineados en paralelo uno al otro y la superficie y con la dirección del desplazamiento perpendicular a la dirección del campo eléctrico. (Daniels, 2004).

#### ***2.2.4.3 Ordenador Tablet***

Está conformado por un software que registra la señal EM, esta procesa y permite representar en tiempo real conocido como radargrama.

**Radargrama:** es la representación graficas en perfil del subsuelo prospectado con el georadar de penetración terrestre (GPR), estas imágenes de franja de colores son producto de las reflexiones que son obtenidas en cada una de las profundidades y en el tiempo. Los puntos prospectados se

recogen en un archivo de datos conteniendo los valores de la onda de campo eléctrico reflejada en el subsuelo.

Los radargrama pueden ser representados de las siguientes formas: Equivalente en una traza 2D y 3D. (Daniels, 2004). De esta manera caracterizamos físicamente los materiales, como la representación estratificada de la estructura de los perfiles de estudio.

### **2.2.5. Fundamentos de la prospección con radar de subsuelo.**

Los principios teóricos del georadar de penetración terrestre se basa en el marco de la teoría electromagnética, que es básicamente muy simple, que consiste en emitir ondas electromagnéticas corto de radiofrecuencias a través del medio en prospección, onda emitida viaja en el interior del medio, hasta llegar a una interface entre medios, en esta interface ocurre que una parte de la energía electromagnética será reflejada mientras el resto será refractada (Blancas et al., 1996).

La antena transmisora de GPR de las ondas de radar se pueden aproximar como ondas planas de la energía electromagnética monocromática que viajan en la dirección del eje Z, y se tiene por ecuación

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - kz)} \quad (23)$$

Donde  $\vec{E}$  es el vector de campo eléctrico complejo y  $\vec{E}_0$  es la amplitud compleja que contiene la polarización y la fase de onda:

$$k = \frac{\omega}{v} - i\alpha \quad (24)$$

Es el número de onda



La propagación de las ondas electromagnéticas en un medio está controlada por la permitividad eléctrica  $\varepsilon$  y la conductividad eléctrica, componentes inseparables de la propagación electromagnética en medios.

Cuando hablamos de la naturaleza dispersiva de la propagación de las ondas electromagnéticas de alta frecuencia en el rango de los georadares está estrechamente relacionado a la naturaleza compleja que describe la pérdida de la energía y la dependencia de la frecuencia de  $\varepsilon$  y  $\sigma$ , aquí adoptaremos la conversión de Fuller y definiremos las dos propiedades que rigen la propagación de las ondas electromagnéticas en la superficie terrestre como la permitividad y conductividad (Fuller y Ward, 1970).

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) \quad (25)$$

$$\sigma(\omega) = \sigma'(\omega) - j\sigma''(\omega) \quad (26)$$

De  $j = \sqrt{-1}$ , donde  $\omega$  es la frecuencia angular,  $\varepsilon'(\omega)$  es la parte real que relaciona con la propagación de la energía electromagnética y  $\varepsilon''(\omega)$  con la parte compleja se relaciona con la dispersión o disipación o absorción de la energía electromagnética y con la dispersión de la atenuación, entendiendo que la permitividad eléctrica depende de  $\omega$  y es compleja, pero en las frecuencias del radar de penetración terrestre se supone que la conductividad eléctrica es un valor fijo y real e independiente de la frecuencia angular, es decir para GPR se suele considerar que  $\sigma'(\omega) = dc$  y  $\sigma''(\omega) = 0$ . En las aproximaciones de bajas pérdidas  $\sigma_e \ll \varepsilon_e(\omega)$  'esta es la condición necesaria para que GPR opere efectivamente (Gary R. Olhoeft y Ernest T. Selig, 2002; Keller, 2012).

Decimos que  $\sigma'(\omega)$  y  $\sigma''(\omega)$  no tienen en cuenta la dependencia de la propagación de la onda electromagnética de la permeabilidad magnética, puesto que la mayoría de los materiales

geológicos no contienen cantidades significativas de materiales magnéticas por lo cual la permeabilidad magnética será constante es decir será igual al valor en el espacio libre  $\mu = \mu_0$  (Hollender y Tillard, 1998; Xu et al., 2014).

La velocidad de fase  $v$  y la atenuación  $\alpha$  están dadas por:

$$\alpha = \omega \left[ \frac{\varepsilon_{ef} \mu_0}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma_{ef}}{\omega \varepsilon_{ef}} \right)^2} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

$$v = \left[ \frac{\varepsilon_{ef} \mu_0}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma_{ef}}{\omega \varepsilon_{ef}} \right)^2} + 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

Donde  $\varepsilon_{ef}$  y  $\sigma_{ef}$  son permitividades dieléctricas efectiva de valor real y la conductividad eléctrica dadas como sigue:

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon'(\omega) \quad (29)$$

$$\sigma_{ef} = \sigma_{dc} + \omega \varepsilon''(\omega) \quad (30)$$

otro parámetro muy importante es las aplicaciones de la energía electromagnética es la tangente de la pérdida, dada por.

$$\tan \delta = \frac{\sigma_{ef}}{\omega \varepsilon_{ef}} \quad (31)$$

Para que el GPR sea una herramienta eficaz para la obtención de las imágenes tomográficas de alta resolución del subsuelo, la tangente de pérdida debe ser inferior a 1 (Irving 2003).

Introducimos el factor de calidad  $Q$  esta cuantifica el número de longitudes de la onda EM monocromática, o también es una medida de la relación el almacenamiento de energía.  $Q$  tiene la expresión que es la inversa de tangente de pérdida de la ecuación (31).

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{\omega \varepsilon_{ef}}{\sigma_{ef}} \quad (32)$$

La naturaleza de la propagación de OEM dentro de un medio, está siempre controlado por la permitividad dieléctrica,  $\varepsilon$ , la conductividad eléctrica,  $\sigma$ , y la permeabilidad magnética,  $\mu$ . En general, estos parámetros constitutivos son complejos y dependen de la frecuencia debido a varios fenómenos de relajación y por lo tanto la propagación de ondas electromagnéticas es intrínsecamente dispersiva, que quiere decir que hay una pérdida de energía electromagnética emitida por el georadar (la absorción y la dispersión), sin embargo, las relajaciones asociadas con la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética son en gran medida despreciables para suelos y rocas superficiales comunes. Como resultado, estas propiedades del material se pueden aproximar como valores reales e independientes de la frecuencia (Hollender y Tillard, 1998).

### **2.2.6. Reflexión y refracción de las ondas**

Cuando la propagación de la OEM en un medio, hasta alcanzar una discontinuidad en los parámetros pertinentes del medio se producen el fenómeno de refracción y reflexión.

Por teoría cuando la interface sea plana los fenómenos de la onda reflejada y refractada es la misma que la onda incidente, además los ángulos de incidencia y reflexión son siempre iguales.

Según la ley de Snell conduce a una relación de los ángulos de refracción, reflexión y incidencia con la velocidad con que se propaga la onda EM entre dos materiales distintos, se produce la incidencia de la onda EM plana en contacto entre dos materiales distintos, Además cuando

hablamos del porcentaje de la energía reflejada nos referimos a toda dependencia del contraste que existe en los parámetros constitutivos del medio. Dicho porcentaje define el coeficiente de la energía transmitida y reflejada (Gracia y Vega, 2001).

La relación entre el  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  se llama impedancia, definiendo  $\eta_1$  como la impedancia del campo incidente que coincide con el campo magnético reflejado y  $\eta_2$  el campo refractado.

$$\eta_1 = \left\{ \frac{\vec{E}_i}{\vec{H}_i} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \right\} = \left\{ \frac{\vec{E}_r}{\vec{H}_r} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \right\} \quad (32)$$

$$\eta_2 = \left\{ \frac{\vec{E}_t}{\vec{H}_t} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_{r2}}{\epsilon_0 \epsilon_{r2}}} \right\} \quad (33)$$

A partir de esto se obtiene los coeficientes de transmisión y reflexión de Fresnel, cociente entre el campo incidente y el campo refractado, y el cociente entre el campo incidente y el campo reflejado respectivamente (Gracia & Vega, 2001).

$$R_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_r}{\vec{E}_i} = \frac{\eta_2 \cos \theta_t - \eta_1 \cos \theta_i}{\eta_1 \cos \theta_i + \eta_2 \cos \theta_t} \quad (35)$$

$$T_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_t}{\vec{E}_i} = \frac{2\eta_2 \cos \theta_t}{\eta_1 \cos \theta_i + \eta_2 \cos \theta_t} \quad (36)$$

Con  $\theta_t$  y  $\theta_i$  ángulo de refracción y ángulo de incidencia respectivamente,  $R_{1 \rightarrow 2}$  se llama el coeficiente de reflexión en el intrefas de los medios discontinuos,  $T_{1 \rightarrow 2}$  es coeficiente de refracción en dicha discontinuidad (Gracia & Vega, 2001).

Para los estudios con GPR se simplifica la expresión, puesto que la aplicación los ángulos de incidencia y reflexión son de ángulos muy pequeños, puesto que se trabaja con la incidencia

normal, la transmisión depende de la relación entre las impedancias, para medios no magnéticos la aproximación de da de la siguiente manera:

$$R = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (37)$$

$$T = \frac{2\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (38)$$

Se observa que la suma de R y T es igual a 1, cuando reemplazamos con amplitud en lugar energía se tiene las siguientes expresiones:

$$r = \frac{A_r}{A_i} \quad (39)$$

$$t = \frac{A_t}{A_i} \quad (40)$$

Donde r es coeficiente de reflexiones en amplitud y t es coeficiente de transmisión en amplitud

Las ecuaciones 37 y 39 como 38 y 40 están relacionadas entre de la siguiente manera (Gracia y Vega, 2001).

$$R = r^2 \quad y \quad T = t^2 \quad (41)$$

**Cálculo de permitividad efectiva:** En la mayoría de los estudios con GPR es de mucha importancia el conocer la permitividad dieléctrica de los medios, para hacer una correcta interpretación de los registros de la amplitud, desde luego caracterizar a los componentes del medio y el contenido de agua en los medios subterráneos.

**Coficiente de reflexión:** De acuerdo de la ecuación (37) que significa un balance entre la energía reflejada y la transmitida en contacto entre medios distintos, en GPR los registros de las amplitudes se hace en un nano segundo, eso hace que los ángulos de incidencia y reflejada son

aproximadamente nulo, ya que la energía reflejada y transmitida depende del ángulo con que incide y refleja. En los estudios de prospección con GPR la energía de la onda es proporcional al cuadrado de la amplitud, además el balance energético siempre depende de la permitividad dieléctrica entre medios en contacto (Gracia y Vega, 2001).

Como la energía que la onda EM es proporcional al cuadrado de la amplitud, consideramos las amplitudes que se obtiene en la prospección, que depende de los coeficientes de reflexión y transmisión entre los medios dieléctricos en medios en contacto.(Gracia y Vega, 2001).

La energía registrada en los radargrama de GPR se debe a los diferentes componentes que hay en el medio en estudio, que es el resultado de la atenuación, ganancias, perdidas, la efectividad de las antenas que se estudia con el factor de calidad mencionada anteriormente y por el coeficiente de reflexión en términos de amplitud, esto es:

$$A_m^2 = RA_0^2 \quad (42)$$

Donde  $A_m$  y  $A_0$  son amplitudes registradas en el medio, y la amplitud en la superficie respectivamente, y  $R$  es el coeficiente de reflexión.

Usamos la ecuación 40 considerando la permitividad el aire 1.00059, se obtiene la siguiente expresión.

$$A_m^2 = \frac{\sqrt{\varepsilon} - 1.00059}{\sqrt{\varepsilon} + 1.00059} A_0^2 \quad (43)$$

De donde:

$$\varepsilon = 1.00059 \left( \frac{A_0^2 + A_m^2}{A_0^2 - A_m^2} \right)^2 \quad (44)$$

La ecuación 44, nos permitirá calcular los valores de permitividad dieléctrica en el subsuelo de bofedal muestreada (ver anexo 5).

A continuación, se muestra la tabla 2 correspondiente a los valores teóricos de permitividad dieléctrica de subsuelo

**Tabla 2**

*Valores Teóricos de Permitividad del Subsuelo*

<b>Materiales</b>	<b><math>\epsilon</math></b>
Aire	1.00059
Arcilla seca	3
Arcilla húmeda	8-15
Arcilla limosa	15-30
Barro húmedo	5-40
Limo seco	3-10
Limo saturado	10-40
Grava	<8
Grava arenosa saturada	15-20
Suelo arcilloso	2-3
Suelo arenoso seco	2-3
Agua	70-81
Roca	4-7
Arena seca	2-6
Arena húmeda	10-30
Arenisca seca	2-5
pedra arenisca	5-10
Nieve	6-12
Suelo arcilloso seco	4-10

*Fuente.* (Gracia y Vega, 2001), valores de permitividad dieléctrica teórica, con ello se trabaja para clasificar con los valores experimentales.

### **2.2.7. Ubicación del área de estudio**

La ubicación del área de estudio en la microcuenca Apacheta se registra en una zona muestreada de un bofedal perteneciente al distrito Paras, Provincia Cangallo del departamento Ayacucho de

Perú, tal como se muestra en la figura 5 y cuyos puntos muestreados para la prospección geofísica con el GPR, Gepard se detallan en la tabla 3.

**Tabla 3**

*Coordenadas de los puntos extremos UTM*

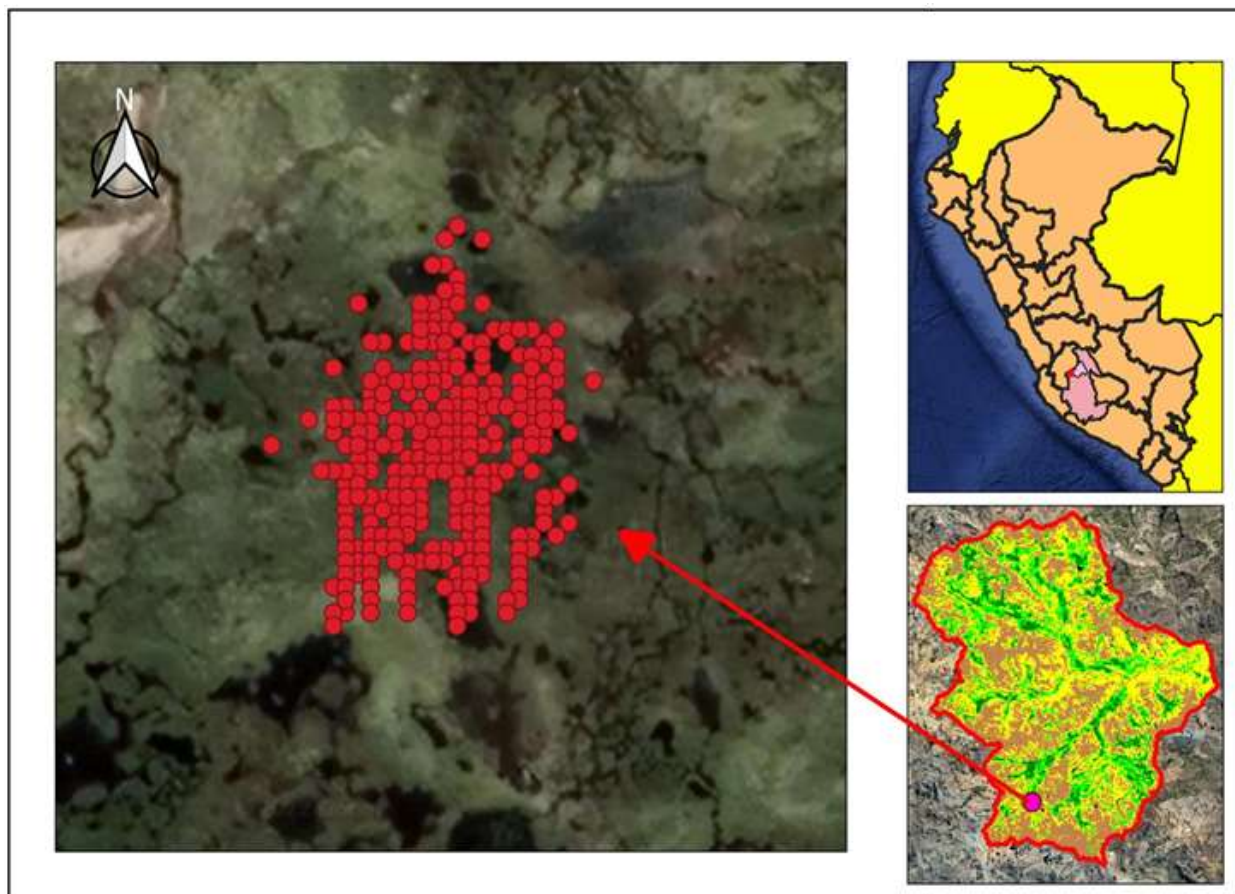
Latitud	Longitud
531776.784	8517586.164
531782.342	8517570.745
531782.222	8517570.625
531792.980	8517570.745
531805.052	8517591.722
531793.039	8517605.050

*Fuente:* Elaboración propia

**Figura 5**

*Ubicación geográfica del área de estudio*





*Fuente:* Elaboración propia, Área de estudio perteneciente a la micro cuenca Apacheta, región Ayacucho

## **2.2.8. Caracterización del subsuelo de bofedal**

### ***2.2.8.1. Bofedal muestreado en la microcuenca Apacheta***

El bofedal es un ecosistema de material orgánico, que se encuentra en mayor parte en los territorios andinos, la topografía en donde se encuentran es en los suelos planos, depresiones, o ligeramente inclinados, su bondad de estos ecosistemas de bofedales está en el almacén natural de aguas subterráneas, los subsuelos son saturados por las corrientes de aguas superficiales y subterráneas.

Los suelos son un depósito de material orgánico acumulado por muchos años, pueden ser tan profundos (turba), la vegetación es densa que corresponden a herbazales desde 0.1 a 0.5 metros,

Algunos bofedales son temporales, en las estaciones de lluvia se acumula en las almohadillas del subsuelo (MINAN, 2018).

En el territorio nacional la superficie que ocupan los bofedales es de 548174.40 hectáreas que representa a 0.42% del territorio nacional.

### **Figura 6**

#### *Ecosistema de bofedal*



*Fuente:* Elaboración propia, fotografía de un bofedal.

#### **2.2.8.2. Tipos de suelo de bofedal**

Son los diferentes tipos de suelo que se encuentra en el interior del subsuelo de un bofedal, puesto que la geología del subsuelo varía según la profundidad o según la capa del subsuelo.

**Turba.** Es un elemento estrato orgánico rico en carbono, de color pardo oscuro, está compuesto por una masa esponjosa de acumulación de material orgánico de gran magnitud de volumen que

son la acumulación de los restos de plantas por muchos años, inclusive siglos, por esta acumulación la profundidad puede ser considerable. Es de mucha importancia por la aplicación como abono orgánico, fuente de energía en la gestión de aguas subterráneas.

**Limo.** Es un estrato de material orgánico de color muy oscuro, la formación de limos se debe a la sedimentación de materiales orgánicos muy finos, se parece a la arcilla, la diferencia está en la adhesión de las moléculas, el limo se rompe con mayor facilidad por la presencia de material orgánico, mientras la arcilla se considera la adhesión. En los bofedales se encuentran en menor cantidad ya que la sedimentación es poco que en los ríos, los limos pueden presentar como limos saturados, limos secos.

**Suelo arcilloso.** El suelo arcilloso es un material que está compuesto de material inorgánico y orgánico, es muy presenta en la mayoría de los tipos de suelos, tiene la propiedad de tener un alto grado de adhesión y cohesión, en las épocas secas presentan atracción, en las épocas donde presenta humedad se dilata. En los bofedales en el subsuelo presenta arcillas mezclado con areniscas a su vez pueden presentar suelo arcilloso seco y/o húmedo.

**Grava y arena.** Es unos de los materiales comunes de los tipos de suelos, es una mezcla de rocas pequeñas, es el resultado de procesos de fragmentación de las rocas, la retención de agua es menor que las arcillas, sirve como filtro de agua, tienen la facilidad de la circulación de agua y del aire.

### **III. Metodología**

#### **3.1. Formulación de hipótesis**

##### **3.1.1 Hipótesis general**

Los diversos grados dispersión dieléctrica para la caracterización del subsuelo de bofedal, mediante datos georadar, en la microcuenca Apacheta – Ayacucho se estiman de manera significativa.

##### **3.1.2 Hipótesis específicas**

3.1.2.1. Los diversos grados de dispersión dieléctrica del subsuelo de bofedal, a partir de datos del radargrama medidos con el georadar Gepard, en la microcuenca Apacheta, se estiman de manera significativa.

3.1.2.2. La composición del subsuelo de bofedal según el rango de valores de la constante dieléctrica, en la microcuenca Apacheta, se estiman de manera significativa.

#### **3.2. Variables**

##### **3.2.1 Identificación de las variables e indicadores**

Variables

Variable Independiente: Caracterización del subsuelo de befedad

Indicadores:

- Valores teóricos de permitividad
- Textura del subsuelo

Variable Dependiente: Grados de dispersión dieléctrica del subsuelo de bofedal.

Indicadores:

- Grado de dispersión
- Constante dieléctrica
- Tipos de suelo

### 3.3. Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Tipo de variable	Escala de Medición	Instrumento
<b>Independiente: Caracterización del subsuelo de befedad</b>	Son parámetros constitutivos y son complejos, por lo que los datos de georadar registrados pueden mostrar comportamiento dispersivo significativo.	• Onda de georadar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intensidad</li> <li>• Profundidad</li> </ul>	Cuantitativo	Intervalo	Gepard
		• Parámetros electromagnéticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frecuencia</li> <li>• Longitud de onda</li> <li>• Amplitud</li> </ul>	Cuantitativo	Rango	Gepard
		• Dispersión de las ondas electromagnéticas en el subsuelo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reflexión</li> <li>• Refracción</li> <li>• Transmisión</li> <li>• Interferencia</li> </ul>	Cuantitativo	Intervalo	Gepard
<b>Dependiente: Grados de dispersión dieléctrica del subsuelo de bofedal.</b>	El subsuelo es un material dieléctrico con pérdidas, relacionadas con la permitividad que es una medida del grado en que la carga eléctrica distribuida puede polarizarse mediante la aplicación de un campo eléctrico, donde el espectro dieléctrico del subsuelo captura los complejos mecanismos de polarización.	• Propiedades dieléctricas del suelo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permitividad</li> </ul>	Cuantitativo	Rango	Ecuaciones
		• Grados de dispersión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Constante dieléctrica del medio</li> <li>• Polarización</li> </ul>	Cuantitativo	Rango	Ecuaciones

### **3.4. Tipo y nivel de investigación**

#### 4.1.1 Tipo de investigación

Aplicada

La Investigación es aplicada porque resuelve un problema enfocado en la búsqueda y fortalecimiento del conocimiento para su aplicación, logrando desarrollarse nuevas metodologías científicas, mediante el uso de nuevas tecnologías como el georadar de penetración terrestre para la prospección geofísica del subsuelo de bofedal en la microcuenca Apacheta.

#### 4.1.2 Nivel de investigación

Explicativa

En esta investigación se plantean relaciones de causalidad, donde la estadística es insuficiente para completar sus objetivos, de manera se tendrá que completar otros criterios de causalidad, aplicando métodos de interpolación a los valores extraídos en campo con el georadar de penetración terrestre para llegar a concluir el estudio, con resultados que van más allá de la descripción y que están dirigidos a responder a las causas de los eventos físicos o comportamiento del subsuelo de bofedal muestreado, centrándose en explicar por qué ocurre dichos fenómenos y en qué condiciones se dan.

### **3.5. Métodos**

El método a seguir, consiste en un conjunto de pasos a realizar para la toma de datos en un área de bofedal muestreada en la microcuenca Apacheta, mediante el uso del georadar de penetración terrestre (GPR), Gepard.

- Paso 1. Recolección de datos como de las amplitudes para cada profundidad desde 0 a 20 metros de profundidad, en cada punto (envío de las ondas EM, los puntos geográficos están decimales, que se registra en la Tablet).
- Paso 2. Los datos de amplitud se exportan a Excel, los datos de Amplitud se convierten en relación a la constante dieléctrica, se convierte las coordenadas decimales a UTM.
- Paso 3. Se resume en una tabla de Excel los valores de permitividad en cada profundidad con sus respectivos coordenadas UTM.
- Paso 4. Se exporta la data completa de los valores de permitividad a Qgis para su posterior análisis con la interpolación IDW
- Paso 5. Se hace el procedimiento las interpolaciones para cada una de las profundidades
- Paso 6. Con la librería de Qgis se hace las etiquetas con franja de colores para la clasificación de los valores de permitividad.
- Paso 7. Se obtiene un mapa de permitividad dieléctrica en cada punto y profundidad, desde luego se hace la caracterización de la composición del subsuelo de bofedal.
- Paso 8. La obtención de los grados de dispersión de aplica la estadística descriptiva que es desviación estándar en cada profundidad de los valores de permitividad, desde luego se hace la gráfica de la dispersión y con su respectiva profundidad que pertenece.
- Paso 9. Se hace la tabla de grados de dispersión dieléctrica y la gráfica de las dispersiones dieléctricas en función a la profundidad establecida y registrada en GPR

### **3.6. Diseño de investigación**

#### 4.2.1 Método de la investigación

Cualitativo - Cuantitativo



#### 4.2.2 Diseño de la investigación

Cuasi experimental

### **3.7. Población y muestra**

#### 4.3.1 Universo

El universo está compuesto por todos los bofedales de la microcuenca Apacheta de la Región Ayacucho.

#### 4.3.2 Población

La población está compuesta por la decodificación de los datos de la constante dieléctrica de los componentes de subsuelo de bofedal, tomados con el Georadar de Penetración Terrestre “Gepard”, en la microcuenca Apacheta.

#### 4.3.3 Muestra

La muestra está conformada por la selección aleatoria de un subconjunto de observaciones de los datos de constante dieléctrica de los componentes del subsuelo de bofedal en la microcuenca Apacheta de la Región Ayacucho, durante el año 2019, medidos con el Georadar de Penetración Terrestre “Gepard”.

### **3.8. Técnicas e instrumentos**

#### 4.4.1 Técnicas

- Decodificación de la información de las variables de estudio, a partir de los datos de conductividad eléctrica de los diferentes componentes de subsuelo de bofedal medidos con el detector geoelectrico “Gepard”.

- Análisis documental y de observación
- Análisis de datos con el uso de software libre, EXCEL, QGIS, ArcMap.

#### 4.4.2 Instrumentos

- Equipos de laboratorio de LABTELER: Gepard.
- Software libre: EXCEL, QGIS, ARCMAP.
- Guía de análisis documental y de observación

#### 4.4.3 Fuentes

- Datos de permitividad dieléctrica de la composición del subsuelo de bofedal.
- Libros y textos especializados
- Revistas científicas
- Catálogos virtuales
- Mapa de bofedales de la microcuenca Apacheta.

### **3.9. Validez y confiabilidad de instrumentos**

La contrastación de hipótesis será mediante el análisis de los estadígrafos adecuados, se verificará la relevancia y significancia de los resultados a partir de los datos de georadar mediante la interpolación de los datos de permitividad de la composición en Qgis, ArcMap, aplicación de desviación estándar para calcular los grados de dispersión, por lo que se espera confirmar que efectivamente el resultado encontrado es significativo.

### **3.10. Técnicas de procesamiento de datos**

Se utilizará el radar de penetración terrestre Gepard, el cual está debidamente georreferenciada, cuyos datos registrados de la amplitud en cada una de las

profundidades de transformará en datos de permitividad dieléctrica para su posterior análisis los Softwares: ArcMap QGIS. Excel.

### **3.11. Aspectos éticos**

El presente trabajo de investigación es original, los datos de dispersión dieléctrica en relación a la constante dieléctrica se obtienen mediante el algoritmo de inversión de los datos de amplitud que son datos de GPR Gepard del laboratorio de Teledetección y energías renovables de Universidad Nacional de san Cristóbal de Huamanga.

## IV. Resultados y discusión

### 4.1. Determinación de los diversos grados de dispersión dieléctrica del subsuelo de bofedal, a partir de datos radargrama medidos con el georadar Gepard, en la microcuenca Apacheta.

La determinación de los diversos grados de dispersión dieléctrica (G) se hallaron aplicando la desviación estándar a los valores de la permitividad dieléctrica estimados a diferentes profundidades (P), de esta manera se observa el comportamiento de la dispersión dieléctrica en relación a la constante dieléctrica, tal como se detalla en la tabla 4, donde se presenta los valores de los diversos grados de dispersión dieléctrica del subsuelo de bofedal de microcuenca Apacheta.

**Tabla 4**

*Valores de Grados de Dispersión dieléctrica y Profundidad, donde P es profundidad y G grados de dispersión .*

P	G	P	G	P	G	P	G	P	G
0.00	0.00	4.02	2.75	8.05	16.48	12.07	8.87	16.10	3.95
0.08	0.00	4.10	2.42	8.13	10.07	12.15	9.74	16.17	1.02
0.16	0.58	4.18	3.14	8.21	13.56	12.23	8.45	16.25	4.70
0.24	0.33	4.26	4.35	8.28	14.49	12.31	6.29	16.33	0.80
0.32	0.06	4.34	3.90	8.36	12.61	12.39	8.39	16.41	1.69
0.39	2.09	4.42	1.34	8.44	12.67	12.47	6.55	16.49	1.84
0.47	0.19	4.50	0.58	8.52	19.29	12.55	14.19	16.57	3.66
0.55	1.59	4.58	3.97	8.60	26.51	12.62	8.63	16.65	4.43
0.63	0.52	4.66	3.33	8.68	28.93	12.70	6.44	16.73	4.52
0.71	3.70	4.73	0.52	8.76	32.37	12.78	5.30	16.81	5.51
0.79	3.39	4.81	6.60	8.84	37.30	12.86	7.43	16.89	2.85
0.87	0.58	4.89	0.69	8.92	32.52	12.94	5.89	16.96	7.83
0.95	0.50	4.97	1.08	8.99	31.25	13.02	8.44	17.04	4.66
1.03	0.61	5.05	0.52	9.07	31.62	13.10	19.86	17.12	9.20
1.10	1.25	5.13	0.33	9.15	32.48	13.18	6.11	17.20	11.05
1.18	0.92	5.21	1.20	9.23	29.62	13.26	1.22	17.28	3.79
1.26	7.77	5.29	0.43	9.31	31.62	13.33	5.98	17.36	9.33
1.34	0.87	5.37	0.54	9.39	26.35	13.41	0.77	17.44	3.98
1.42	7.29	5.44	0.20	9.47	19.61	13.49	6.09	17.52	7.62
1.50	0.42	5.52	0.77	9.55	19.54	13.57	7.21	17.60	1.30

1.58	9.83	5.60	0.15	9.63	21.57	13.65	5.13	17.67	2.98
1.66	0.39	5.68	0.29	9.70	36.63	13.73	10.25	17.75	1.80
1.74	10.86	5.76	0.93	9.78	29.34	13.81	8.37	17.83	5.21
1.81	0.37	5.84	0.47	9.86	31.74	13.89	8.06	17.91	1.28
1.89	10.12	5.92	0.32	9.94	20.96	13.97	7.35	17.99	1.72
1.97	1.06	6.00	1.43	10.02	24.93	14.04	3.27	18.07	0.66
2.05	1.91	6.08	5.82	10.10	34.47	14.12	7.62	18.15	2.59
2.13	3.62	6.15	4.90	10.18	29.31	14.20	6.73	18.23	1.08
2.21	1.15	6.23	2.55	10.26	34.27	14.28	8.22	18.31	2.95
2.29	3.01	6.31	0.97	10.34	32.90	14.36	1.11	18.38	1.76
2.37	5.35	6.39	3.27	10.42	21.28	14.44	6.44	18.46	1.59
2.45	8.31	6.47	11.23	10.49	21.08	14.52	1.55	18.54	3.19
2.52	1.35	6.55	5.40	10.57	15.56	14.60	2.59	18.62	0.75
2.60	3.33	6.63	7.31	10.65	13.35	14.68	1.16	18.70	1.42
2.68	7.98	6.71	6.01	10.73	19.09	14.75	1.52	18.78	0.59
2.76	5.59	6.79	6.67	10.81	16.04	14.83	1.01	18.86	0.98
2.84	5.02	6.86	7.74	10.89	16.15	14.91	0.99	18.94	4.22
2.92	2.83	6.94	8.76	10.97	17.43	14.99	4.88	19.02	0.67
3.00	10.95	7.02	6.37	11.05	19.73	15.07	12.37	19.09	5.11
3.08	7.91	7.10	2.95	11.13	17.33	15.15	3.00	19.17	6.10
3.16	2.54	7.18	7.02	11.20	25.80	15.23	18.26	19.25	2.33
3.23	3.99	7.26	11.95	11.28	24.02	15.31	10.07	19.33	5.50
3.31	2.52	7.34	11.29	11.36	13.73	15.39	4.45	19.41	4.98
3.39	5.66	7.42	17.52	11.44	26.31	15.46	1.87	19.49	3.84
3.47	3.40	7.50	10.72	11.52	16.06	15.54	0.95	19.57	5.25
3.55	1.75	7.57	19.45	11.60	14.84	15.62	1.87	19.65	0.73
3.63	1.68	7.65	21.48	11.68	19.82	15.70	10.49	19.73	4.46
3.71	9.44	7.73	21.38	11.76	19.17	15.78	2.53	19.80	0.82
3.79	1.31	7.81	29.86	11.84	19.83	15.86	10.10	19.88	3.89
3.87	7.44	7.89	27.88	11.91	19.80	15.94	3.32	19.96	9.08
3.95	1.50	7.97	16.37	11.99	8.61	16.02	4.51	20.04	3.41

*Fuente:* Elaboración propia, valores de los diversos grados de dispersión dieléctrica del subsuelo de bofedal de microcuenca Apacheta.

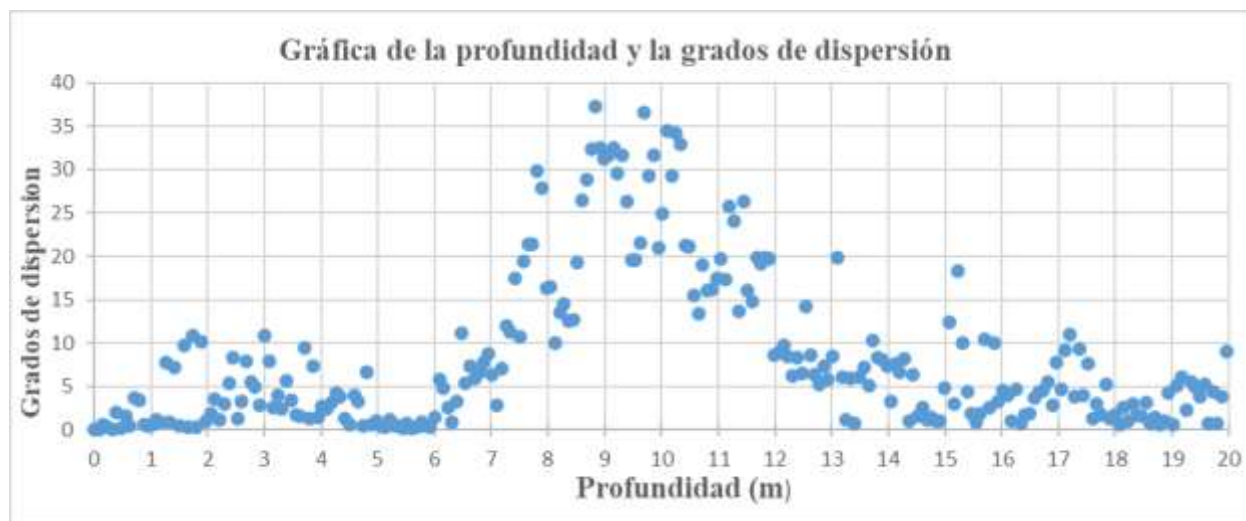
En la figura 7 se observó la variabilidad de los valores de los diversos grados de dispersión dieléctrica (G) del subsuelo de bofedal de microcuenca Apacheta, y su comportamiento a diferentes profundidades (P). Se verificó que en los primeros 6 m de profundidad los grados de dispersión son bajas moderadas manteniéndose entre los 0 a 10,5. A partir de los 6 m de

profundidad los grados de dispersión aumentan considerablemente hasta alcanzar el valor máximo de 35,8 para después disminuir notablemente hasta una profundidad de 14m.

Este incremento de los grados de dispersión entre las profundidades de 6 m a 14 m indicó que el subsuelo de bofedal es altamente dispersivo con texturas gravosas y saturadas de humedad que permiten el interflujo subsuperficial en un bofedal. Finalmente, en las zonas más profundas mayores a 14 m los grados de dispersión se mantuvo en un rango de 0 a 10, lo cual indica un suelo más uniforme o más compacto.

### Figura 7

*Gráfica de Grados de Dispersión y Profundidad.*



*Fuente:* Elaboración propia, representa los diferentes grados de dispersión dieléctrica con su respectiva profundidad.

#### **4.2. Caracterización de la composición del subsuelo de bofedal según rango de valores de la constante dieléctrica estimada a partir de la amplitud de onda georadar reflejada, en la microcuenca Apacheta.**

Para obtener los resultados de la caracterización de la composición del subsuelo se trabajó con la interpolación (IDW) en el software ARGIS, el cual es un software que nos permitió hacer la interpolación de los datos de permitividad dieléctrica en 357 puntos, en cada uno de ellos hasta 20 metros de profundidad.

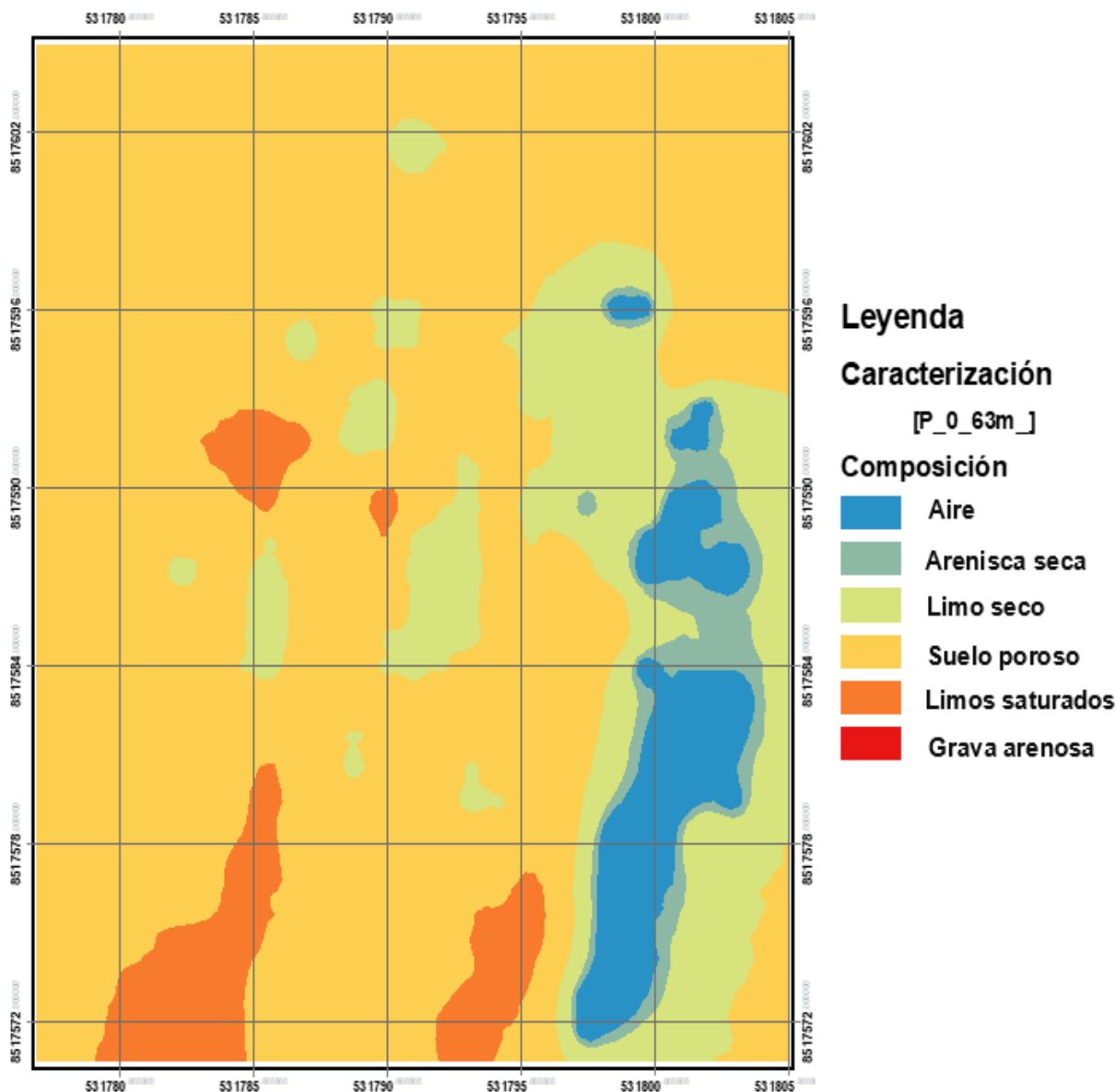
Los resultados de la interpolación para ciertas profundidades con sus respectivas etiquetas de franja de colores, se compararon con los valores teóricos de la permitividad dieléctrica.

A continuación, se presenta la caracterización de la composición que se tiene el terreno en estudios, que es un bofedal que no tiene humedad en la superficie terrestre puesto que no hubo precipitación en aquella temporada.

En la figura 8 muestra la capa del subsuelo que corresponde a una profundidad de 0.63m, se describió según el rango de valores de la constante dieléctrica, de la siguiente manera: la región celeste corresponde a un contenido altamente poroso, que son producto de la porosidad del material orgánico, más aún por la presencia de escasez de la humedad, la región turquesa correspondió a subsuelo de arenisca seca, verde lima correspondieron al subsuelo de limo seco, finalmente la región rojo corresponde a un subsuelo de grava arenosa.

#### **Figura 8**

*Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 0.63 m.*



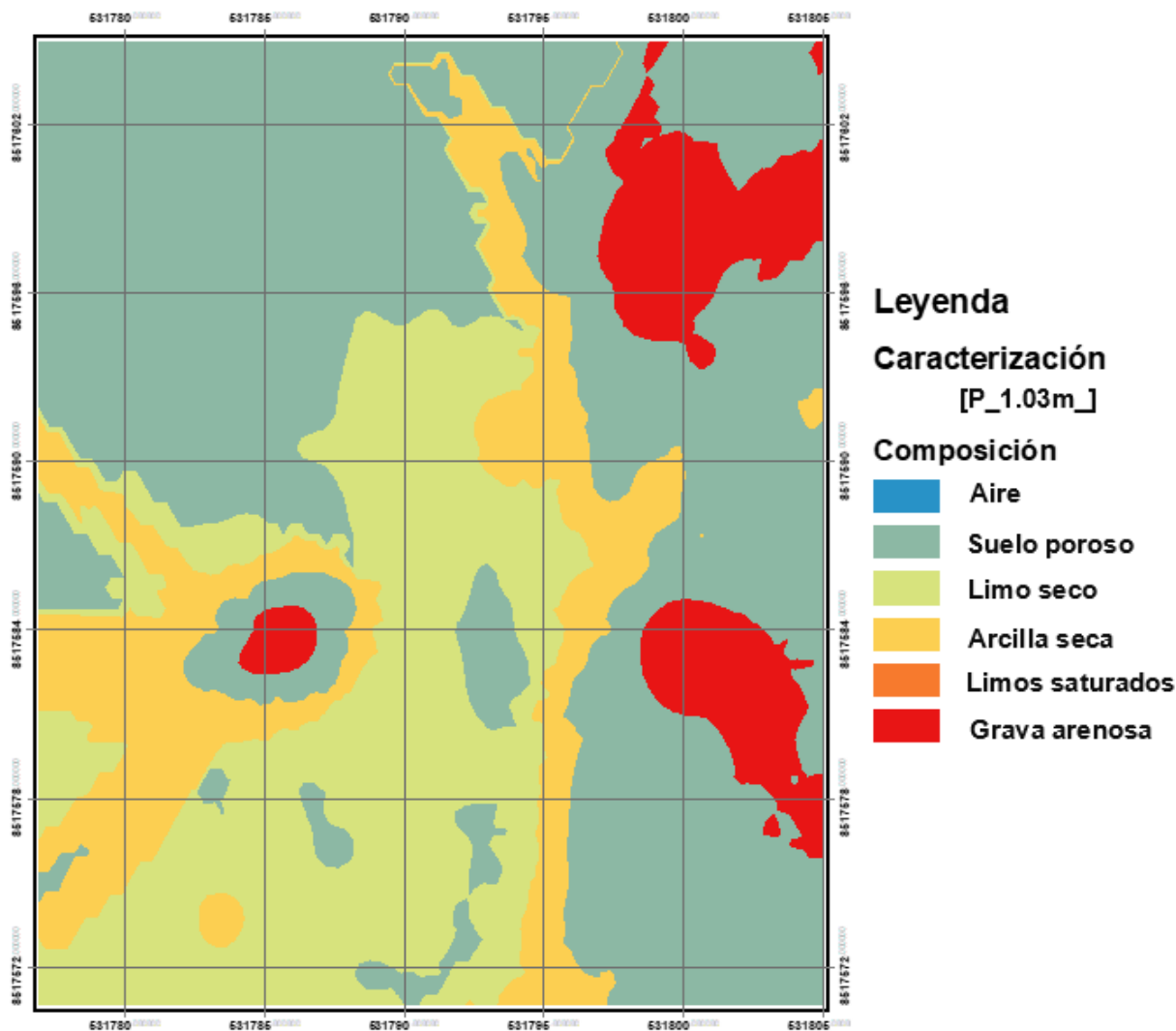
*Fuente:* Elaboración propia

En la figura 9 muestra la capa del subsuelo que corresponde a una profundidad de 1.03 m, se describió según el rango de valores de la constante dieléctrica, de la siguiente manera: la región celeste y verde menta correspondieron a un contenido de aire, que fue producto de la porosidad del material orgánico, más aún por la presencia de escasez de la humedad, la región verde lima al subsuelo de limo seco, la región amarillo anaranjado al subsuelo de arcilla seca, finalmente la región rojo a un subsuelo de grava arenosa.



**Figura 9**

*Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 1.03 m.*



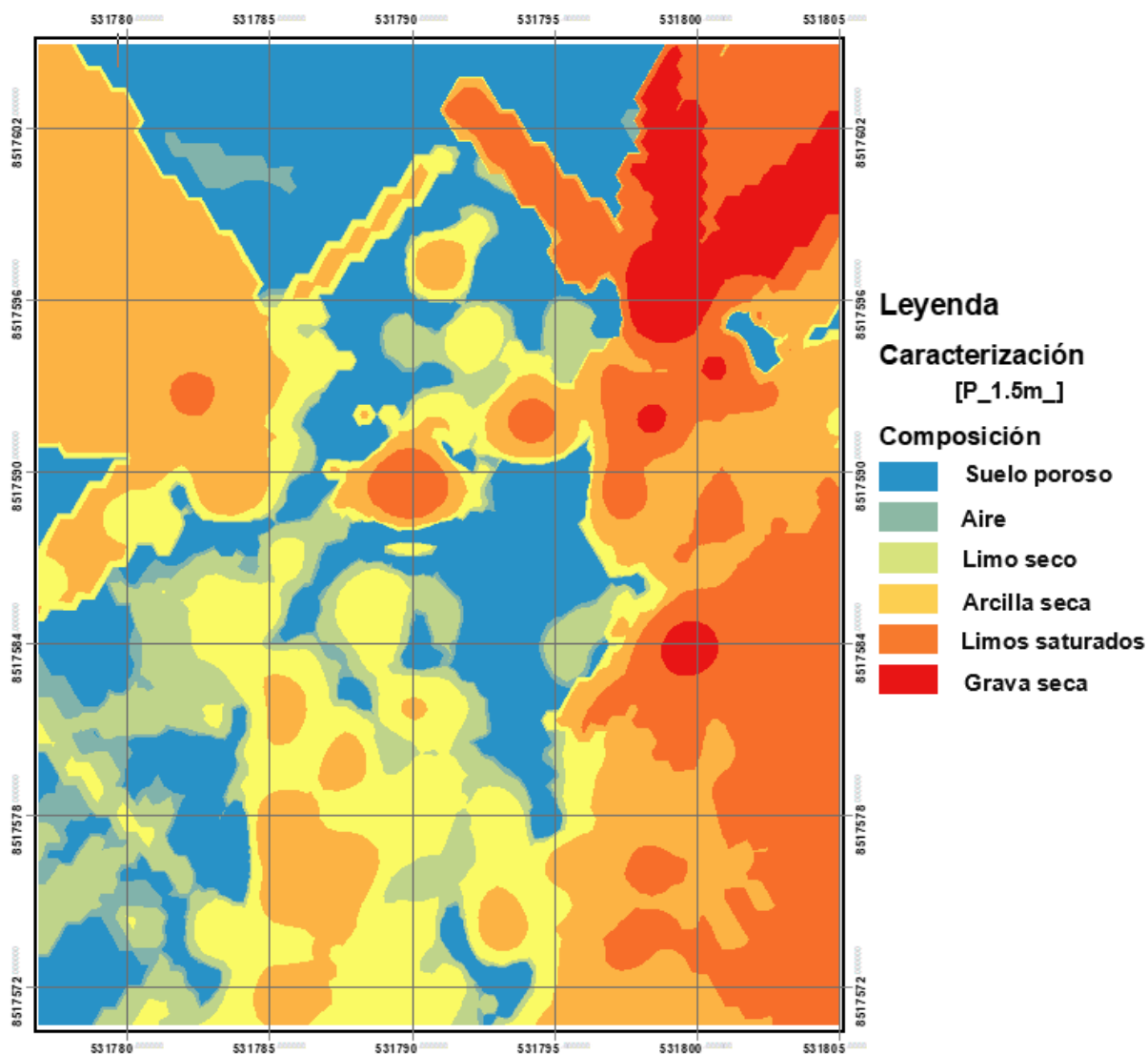
*Fuente:* Elaboración propia

En la figura 10 muestra la capa del subsuelo a una profundidad de 1.5 m, se describió según el rango de valores de la constante dieléctrica, de la siguiente manera: la región celeste y verde menta, correspondieron a un contenido de aire, que son producto de la porosidad del material orgánico, la región verde lima y amarillo, al subsuelo de limo seco, la región amarillo anaranjado,

al subsuelo de arcilla seca, los limos saturados, al color anaranjado, finalmente la región rojo a un subsuelo de grava seca.

### Figura 10

*Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 1.5 m.*



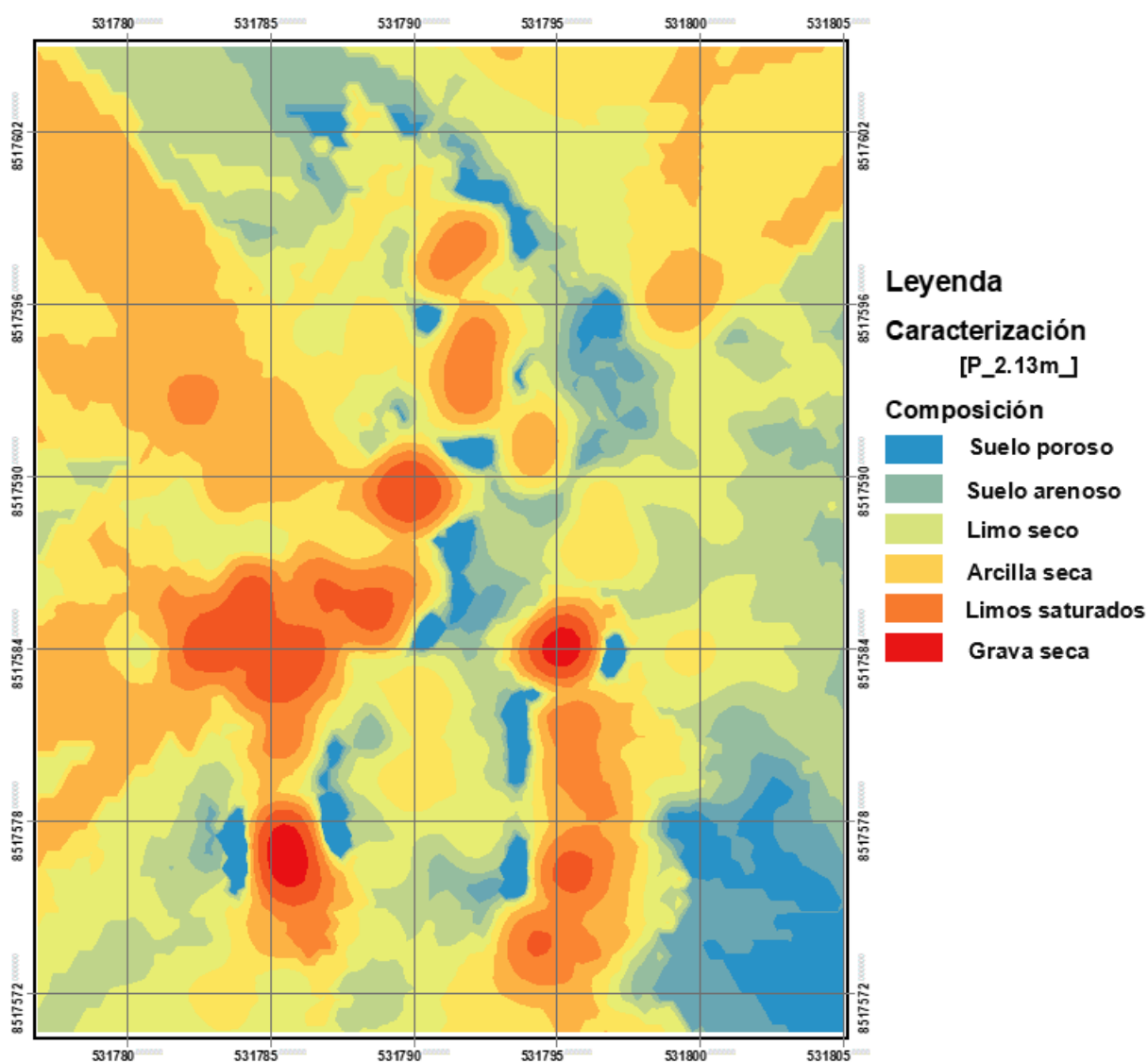
*Fuente:* Elaboración propia

En la figura 11 muestra la capa del subsuelo a una profundidad de 1.5 m, se describió según el rango de valores de la constante dieléctrica, de la siguiente manera: la región celeste y verde

menta, correspondieron a un contenido de aire, que son producto de la porosidad del material orgánico, la región verde lima y amarillo, a subsuelo de limo seco, la región amarillo anaranjado, al subsuelo de arcilla seca, los limos saturados, al color anaranjado, finalmente la región rojo a un subsuelo de grava seca.

### Figura 11

*Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 2.13m.*

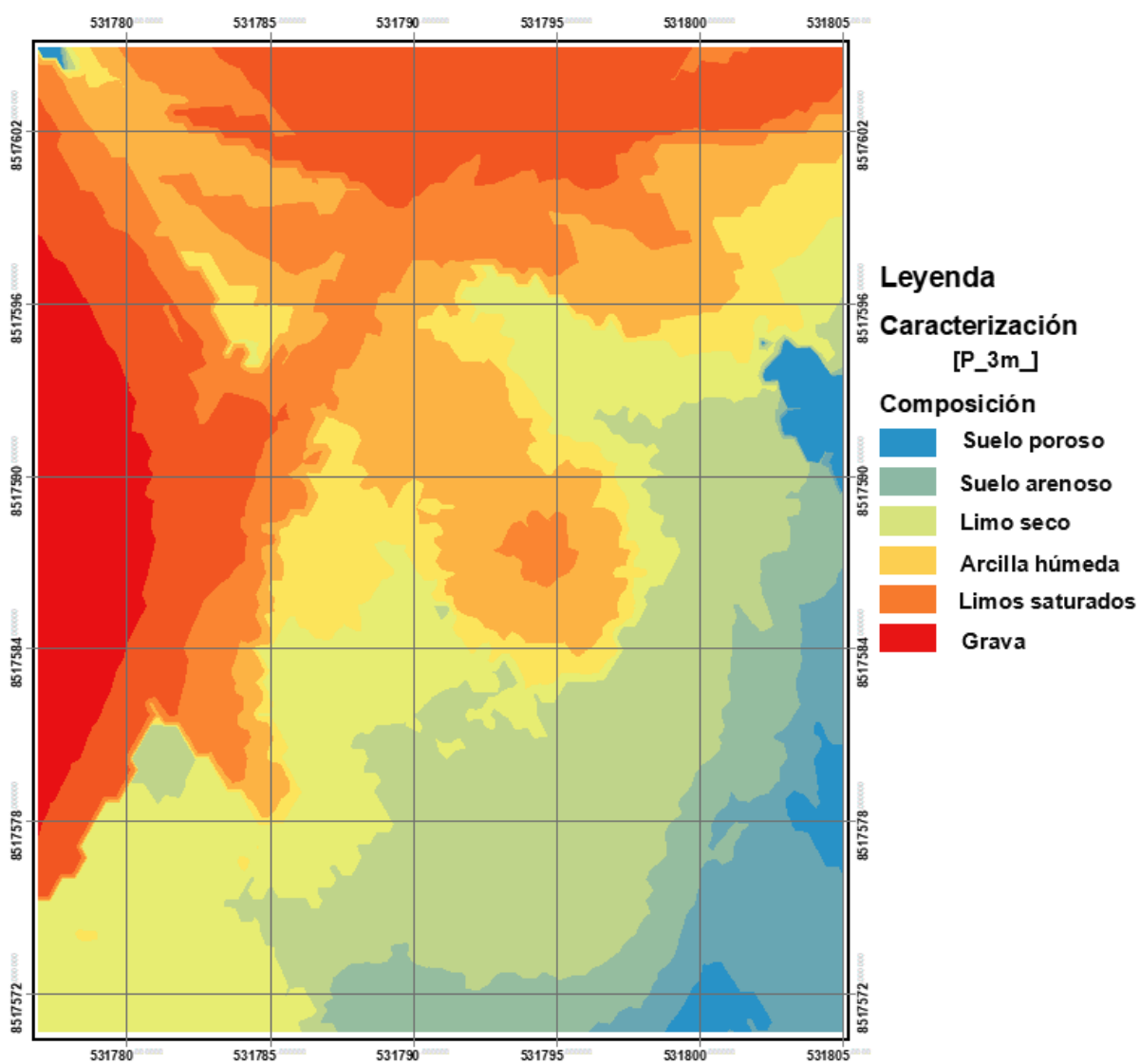


*Fuente:* Elaboración propia

En la figura 12 se observó que las zonas amarillas corresponden a subsuelo con arcilla húmeda, así mismo se puede también observar subsuelos limosos saturados, con grava seca, arenosas y suelo poroso.

**Figura 12**

*Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 3 m*

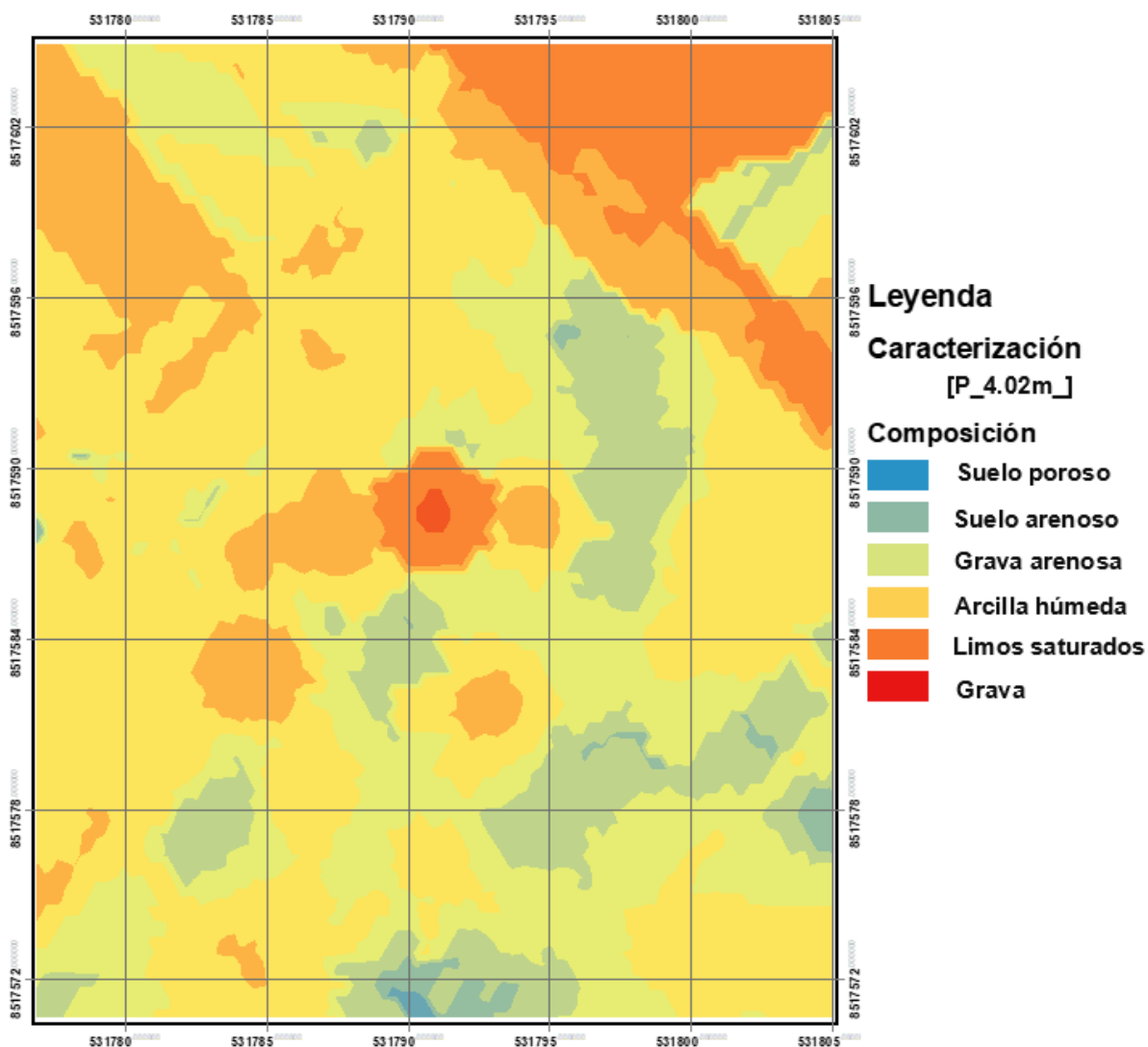


*Fuente:* Elaboración propia

En la figura 13 se observó que las zonas amarillas corresponde a subsuelo con arcilla húmeda con gravas arenosas-humeda, así mismo se puede también se observó subsuelos limosos saturados con grava arenosas y suelo poroso.

### Figura 13

*Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 4.02m.*

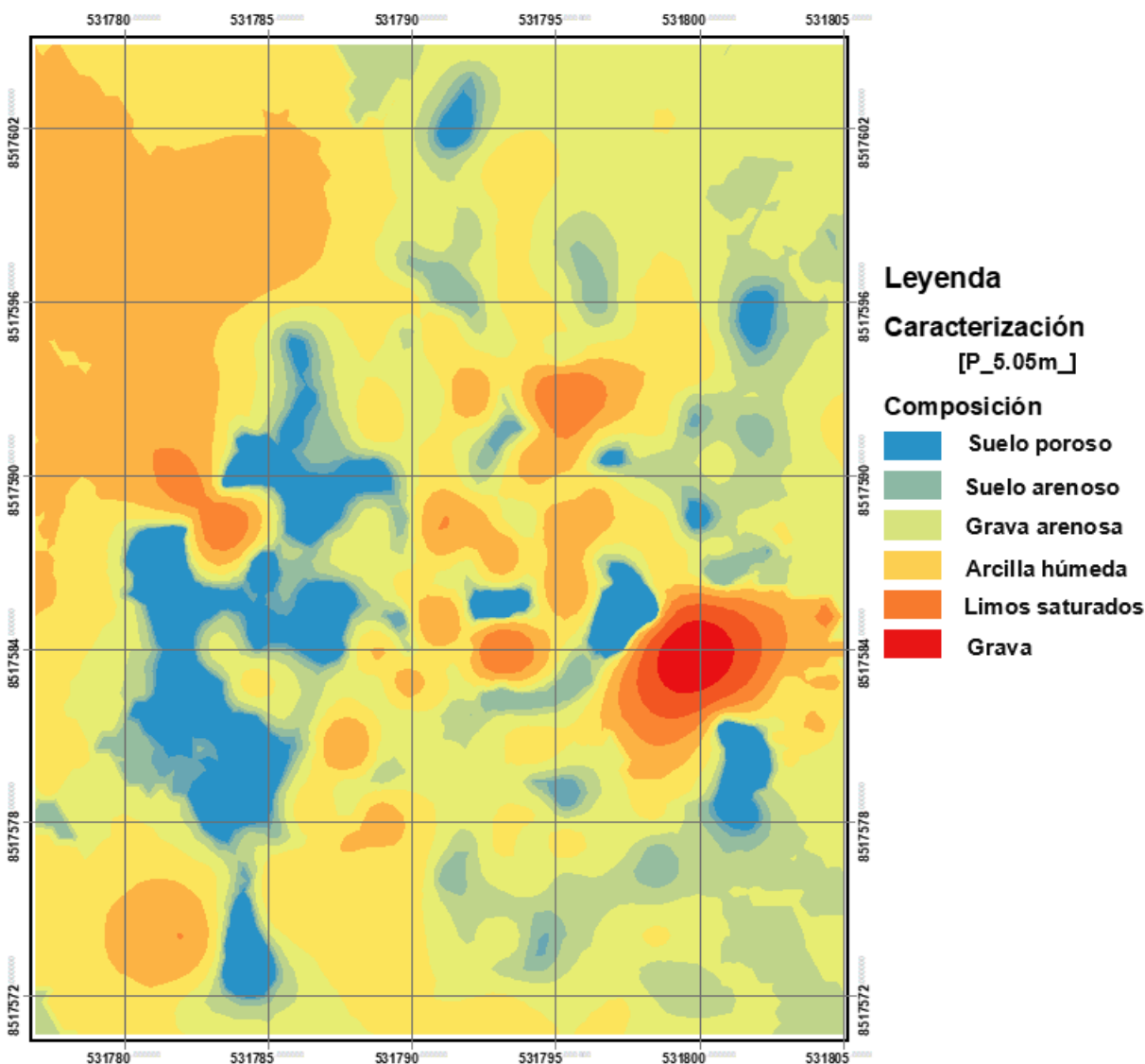


*Fuente:* Elaboración propia

En la figura 14 se observó que las zonas amarillas corresponden al subsuelo con arcilla húmeda con gravas arenosas y limos saturados, así mismo se observó subsuelos limosos saturados, con grava, arenosas y suelo poroso, que son producto de la expulsión de los gases del material orgánico.

### Figura 14

*Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 5.05 m.*

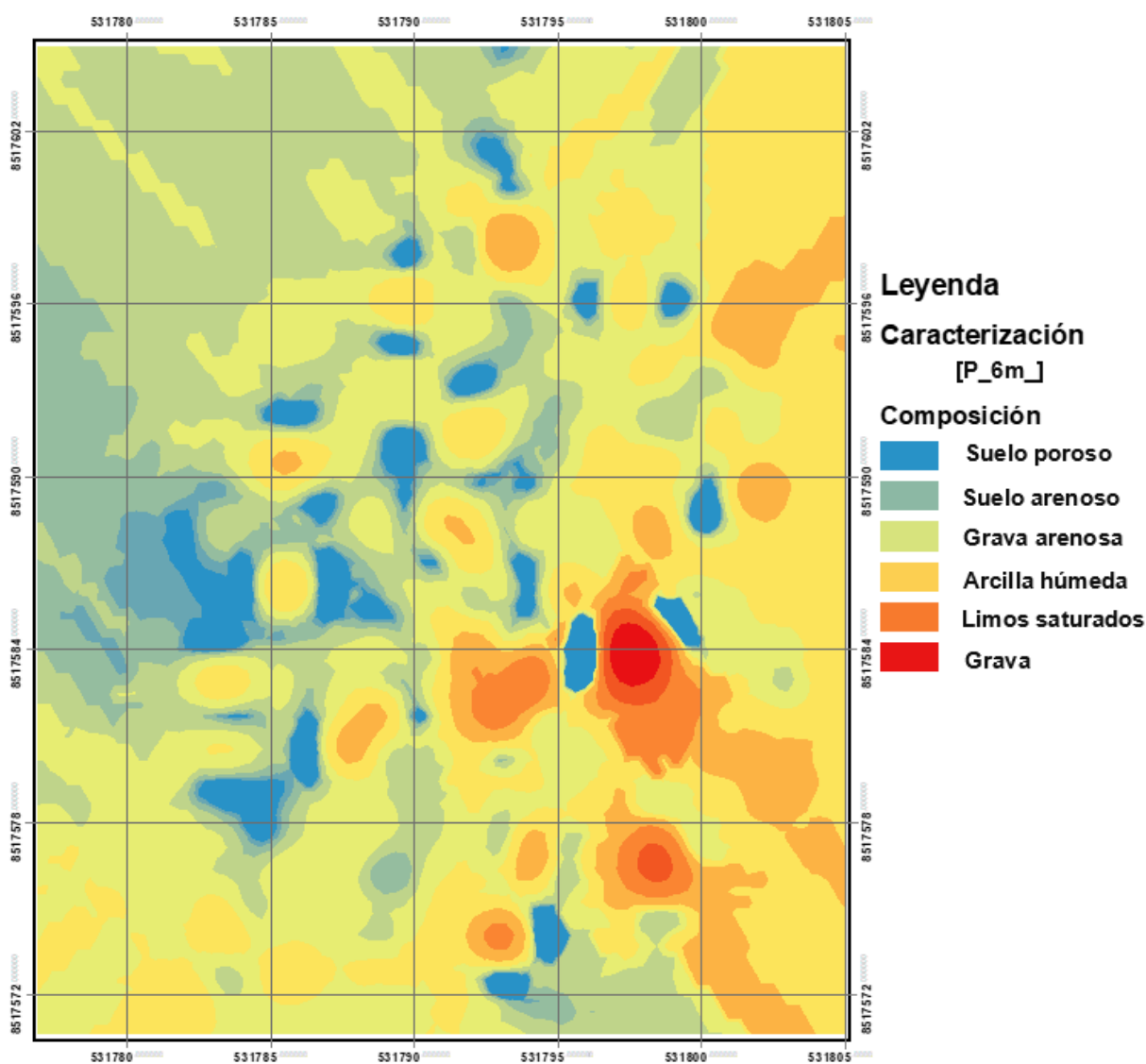


*Fuente:* Elaboración propia.

En la figura 15 se observó que las zonas amarillas corresponden al subsuelo con arcilla húmeda con gravas con suelo arenoso y limos saturados, así mismo se observó subsuelos con grava, arenosas y suelo poroso, que son producto de la expulsión de los gases del material orgánico.

**Figura 15**

*Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 6 m.*

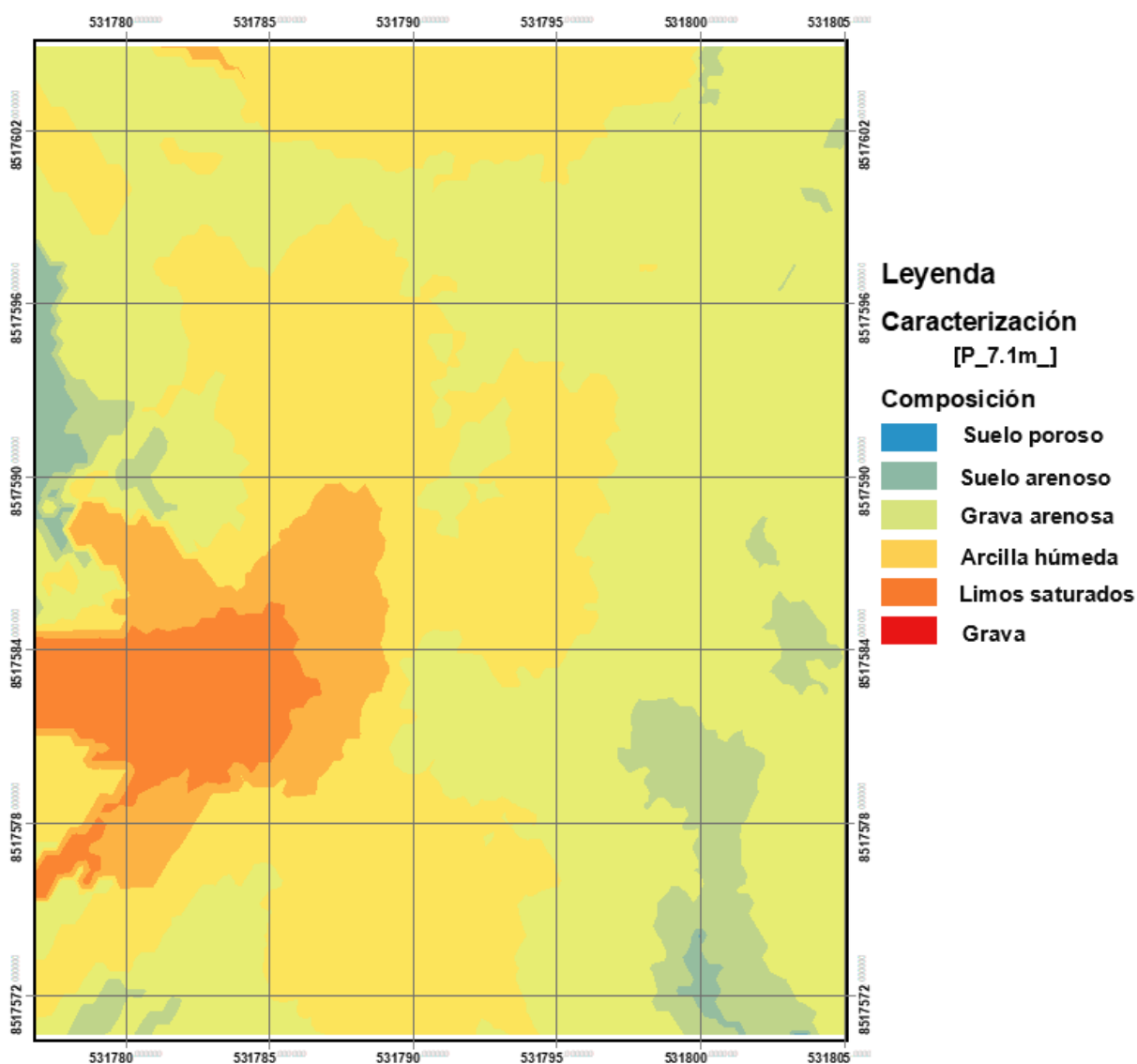


*Fuente:* Elaboración propia.

En la figura 16 se observó que las zonas amarillas corresponde a subsuelo con arcilla húmeda con gravas ,con un suelo arenoso y limos saturados, así mismo se observó subsuelos con grava arenosa y suelo poroso, que son producto de la expulsión de los gases del material orgánico.

**Figura 16**

*Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 7.10m.*



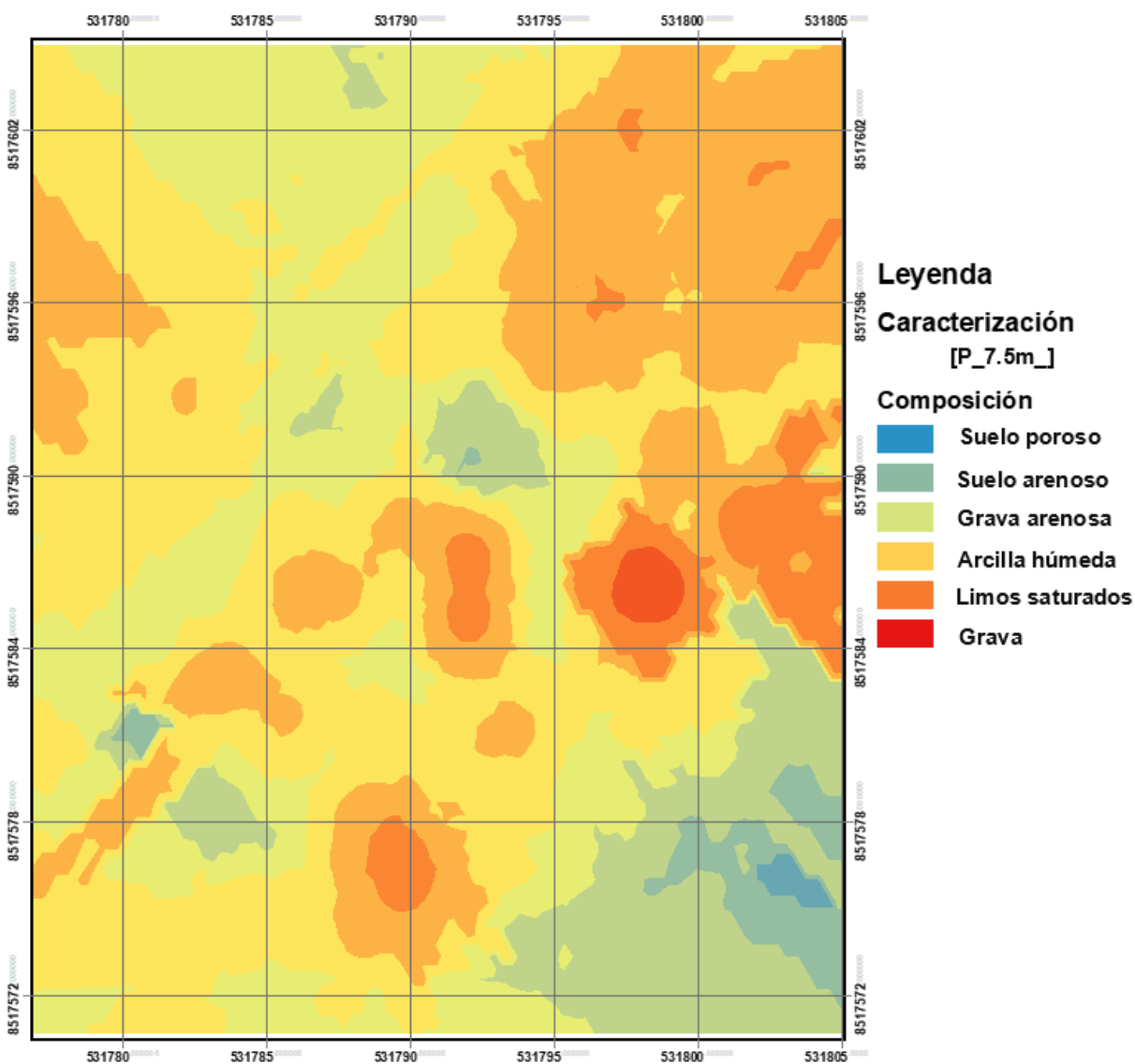
*Fuente:* Elaboración propia.



En la figura 17 se observó que las zonas amarillas corresponde a subsuelo con arcilla húmeda con limos saturados, con un suelo arenoso, así mismo se observó subsuelos con grava, arenosas y suelo poroso, que son producto de la expulsión de los gases del material orgánico.

### Figura 17

*Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 7.50 m.*

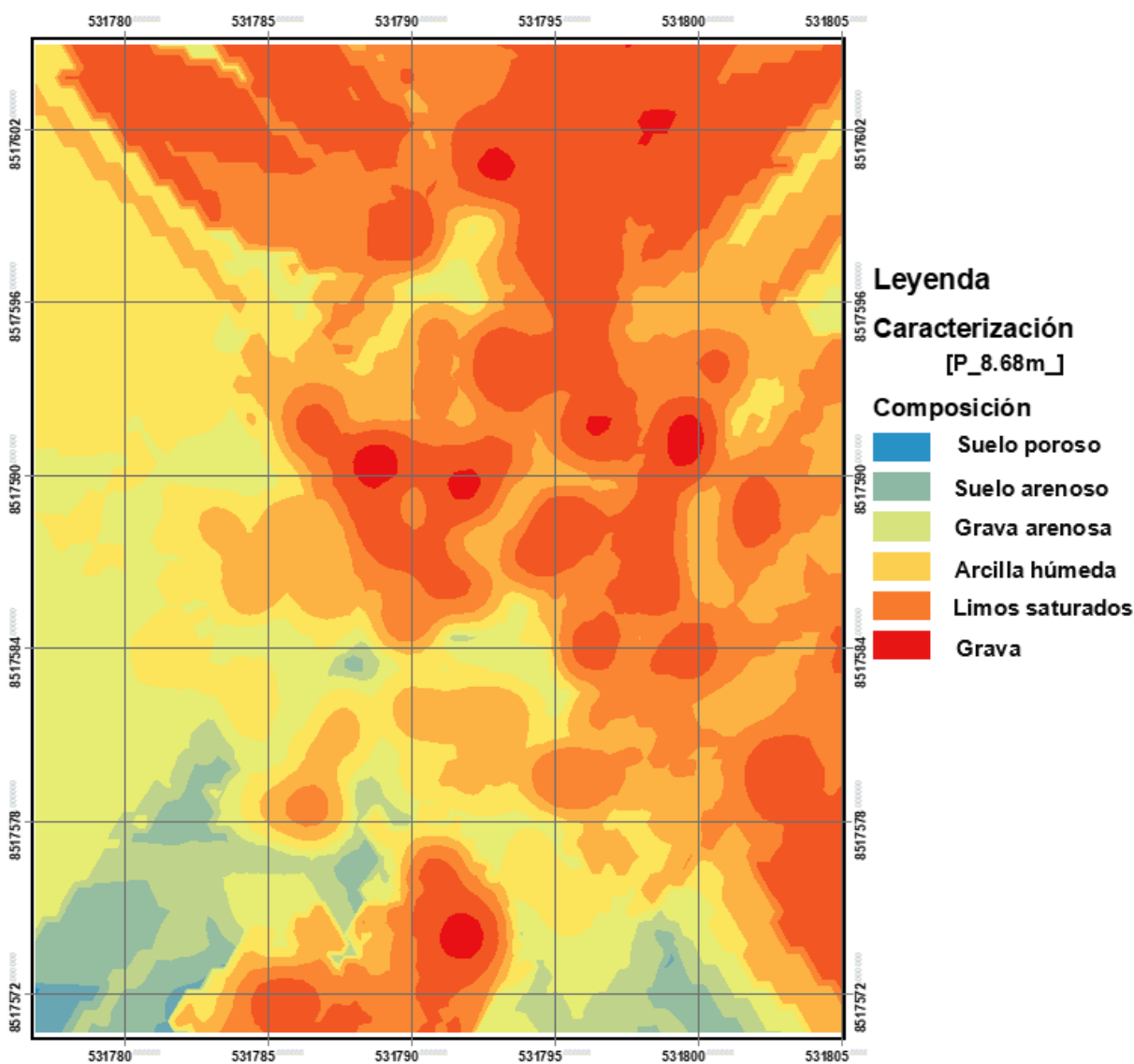


*Fuente:* Elaboración propia.

En la figura 18 se observó que las zonas amarillas corresponden al subsuelo con arcilla húmeda con limos saturados, con un suelo arenoso, grava arenosa y suelo poroso que son producto de la expulsión de los gases del material orgánico.

### Figura 18

*Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 8.68 m.*

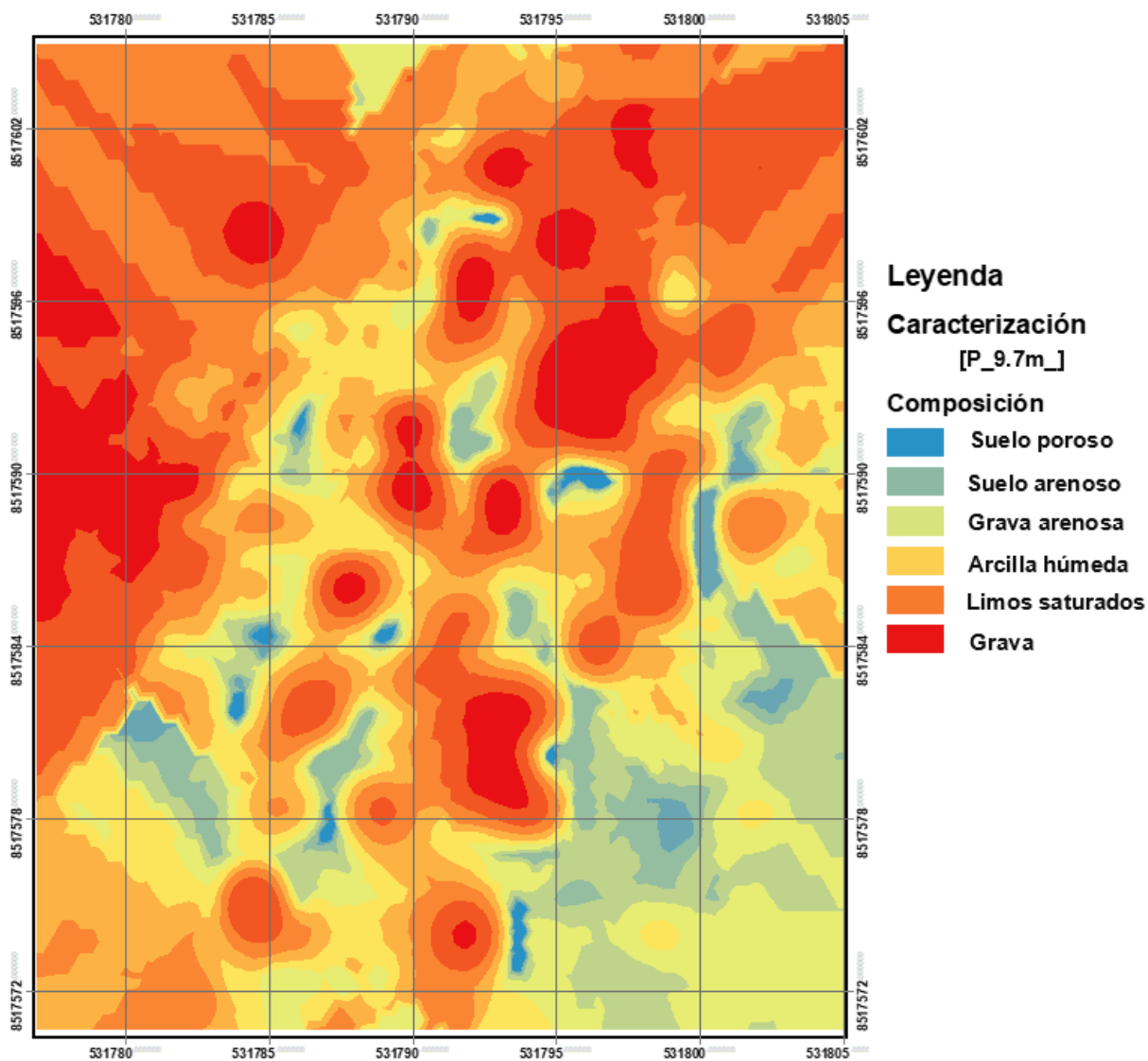


*Fuente:* Elaboración propia.

En la figura 19, se observó que las zonas rojas corresponden a subsuelo con abundante gravas, con limos saturados, suelo arenoso, subsuelos arcillosas, arenosas y suelo poroso que son producto de la expulsión de los gases del material orgánico.

### Figura 19

*Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 9.7 m.*

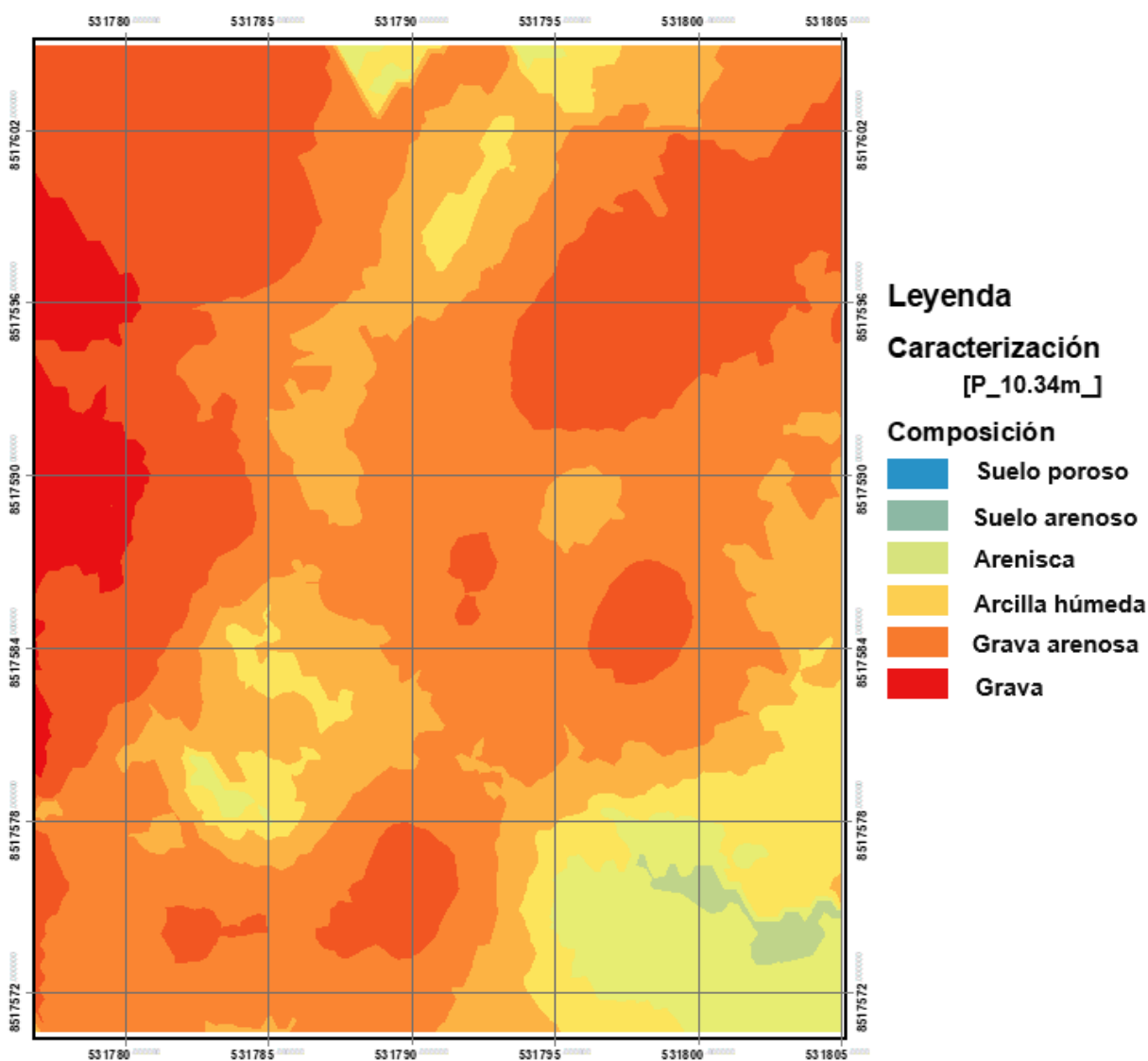


*Fuente:* Elaboración propia.

En la figura 20, se observó que las zonas rojas y las zonas de color anaranjado corresponde a subsuelo con abundante gravas, gravas arenosas, areniscas, subsuelo aresonoso, suelos arcillosas, arenosas y suelo poroso.

### Figura 20

*Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 10.34 m.*

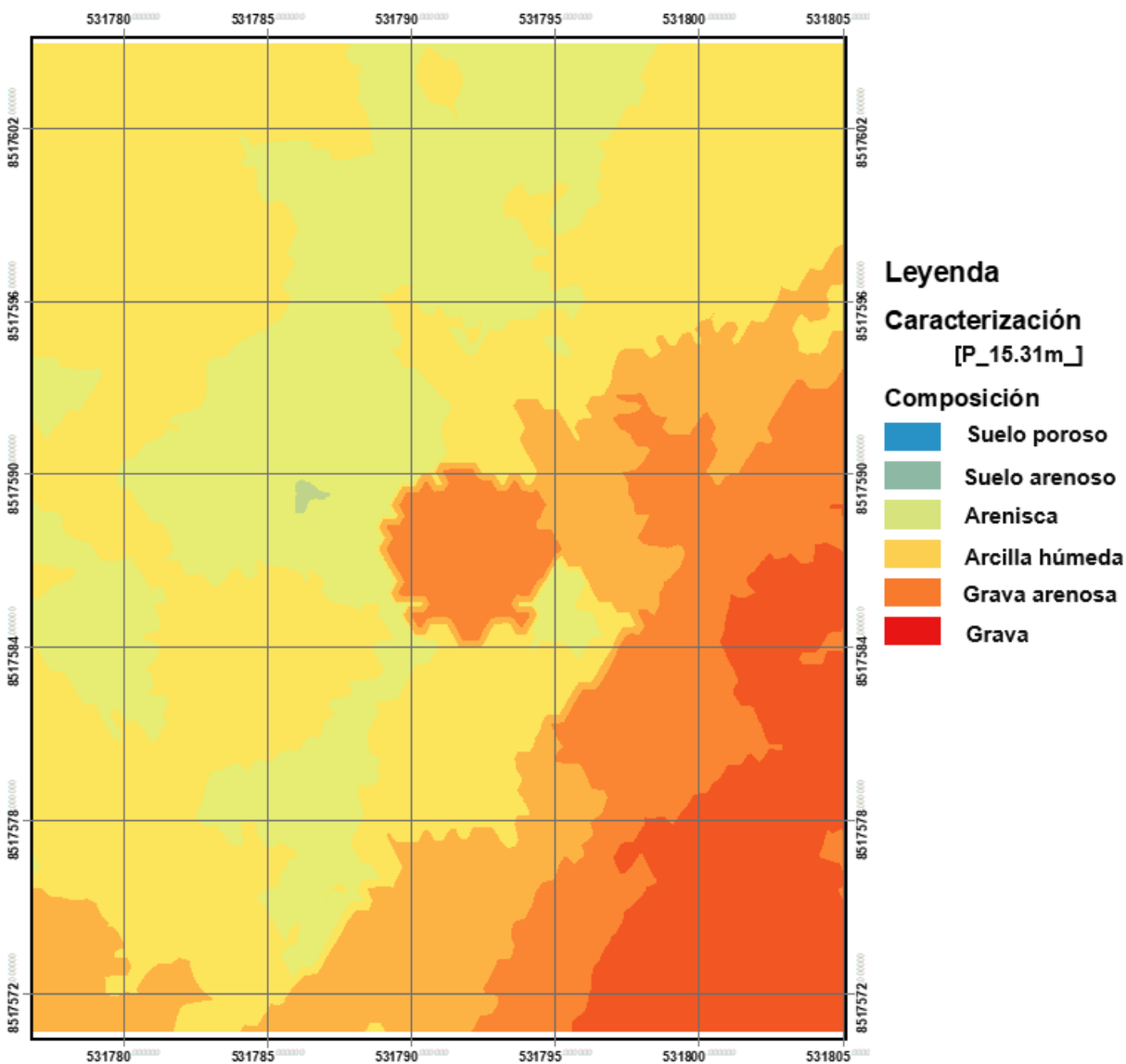


*Fuente:* Elaboración propia.

En la figura 21, se observó que las zonas amarillas corresponden al subsuelo con arcilla húmeda con areniscas, suelo arenoso, grava arenosa y suelo poroso que son producto de la expulsión de los gases del material orgánico.

### Figura 21

*Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 15.31m.*

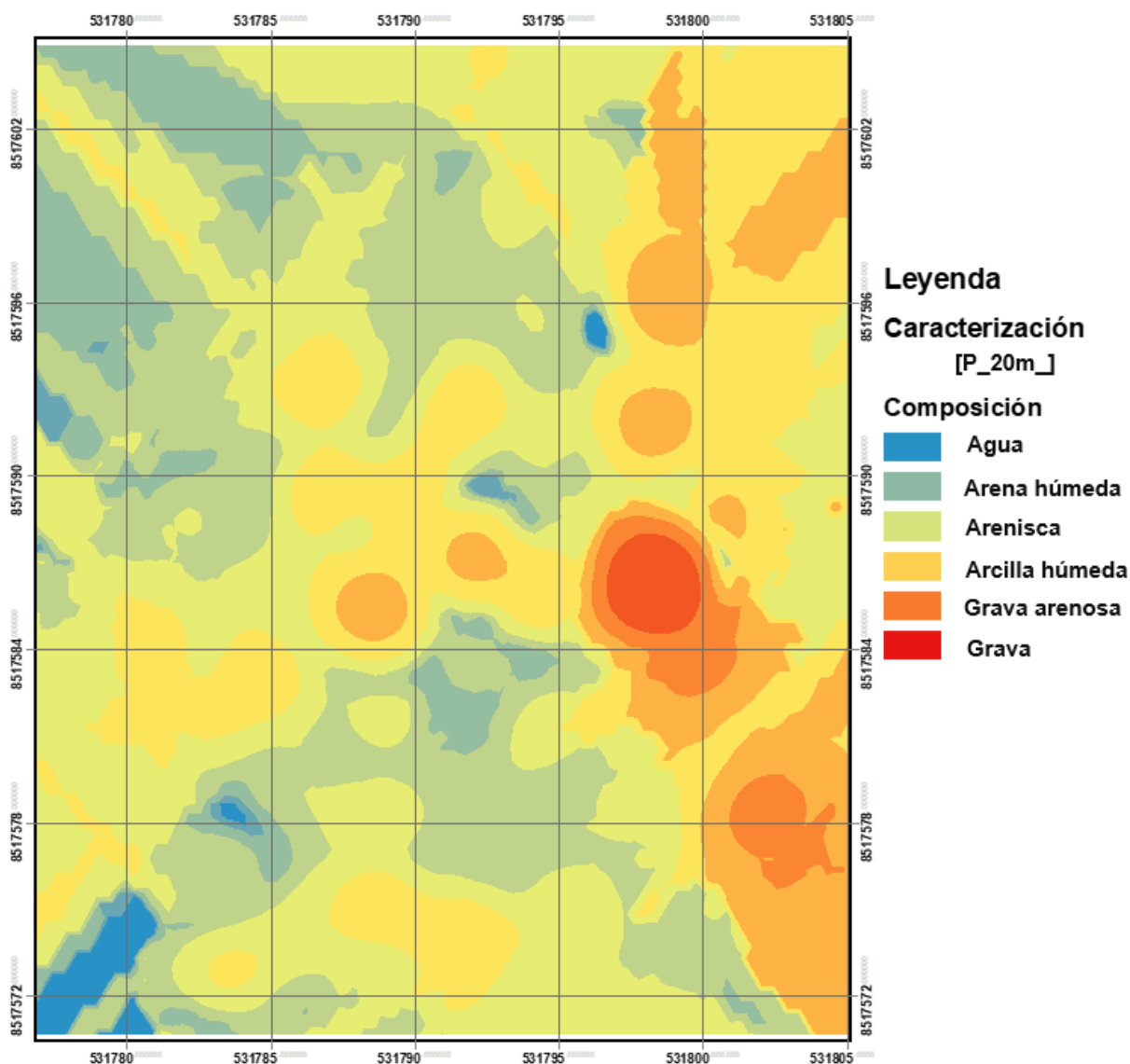


*Fuente:* Elaboración propia

En la figura 22, se observó que las zonas amarillas corresponden al subsuelo con arcilla húmeda con areniscas, subsuelo arenoso, subsuelos con grava, arena húmeda, con una cantidad mínima de bolsas de agua dulce.

### Figura 22

*Capa de subsuelo de bofedal a una profundidad de 20m.*



*Fuente:* Elaboración propia

En la obtención de los valores de los grados dispersión dieléctrica en la tabla 3, para cada uno de las profundidades registradas, desde 0 metros hasta 20 metros, de la protección geofísica, se desarrolló con normalidad y los resultados son muy satisfactorios, teniendo en cuenta las bases teóricas que lo respalda, desde luego en la caracterización de la composición del subsuelo, por capas, los resultados presentados en cada una de las figura presenta una valiosa contribución a entender los sub estrados del subsuelo, de los componentes pertinentes que presenta, según el modelo físico que permitió la obtención de los valores esperados de constante dieléctrica del subsuelo, desde luego se usaron los paquetes de Argis para su modelamiento, según la interpolación de los valores de constante dieléctrica.

La investigación se realizó con artículos recientes, trabajos geofísicos sobre las caracterización del subsuelo las publicaciones son escasos, en cambio los temas sobre la dispersión dieléctrica en medios no homogéneos son considerables, los métodos que se realizaron son muy prácticos, desde la prospección geofísica hasta la obtención de los grados de dispersión dieléctrica de la investigación, ya que el medio en que se hizo el mapeo no fue homogéneo en mayor parte, resume en una dispersión producto de la absorción de la energía electromagnética, por los diferentes parámetros constitutivos del medio prospectadas, de esta manera comparando con los resultados obtenidos de los artículos de Belina et al. (2012) y Tim Bergmann (1998), se llegó que los materiales geofísicas tiene un comportamiento dispersivo.

## Conclusiones

1. Se ha logrado estimar los diversos grados de dispersión dieléctrica del subsuelo de bofedal, de la microcuenca Apacheta a diferentes profundidades (tabla 4), donde se ha verificado que del 100% de los datos analizados el 70.18% tienen un sesgo de comportamiento dispersivo, siendo los de mayor grado de dispersión correspondientes a las profundidades entre los 6 m hasta los 14 m, lo cual indica que en este rango de profundidades el subsuelo de bofedal contiene una gran cantidad de gravas arenosas con humedad saturada, mientras en las zonas más profundas el suelo posee texturas más uniformes y compacto como material arcilloso y limoso en mayor cantidad.
2. Se logró caracterizar la composición del subsuelo de bofedal según el rango de valores estimados con la constante dieléctrica a partir de los valores de onda reflejada medida con el georadar de penetración terrestre, generándose mapas de interpolación con el método IDW, a diferentes capas de profundidad (figuras 8 a 22). En los mapas se verifica la composición del subsuelo de bofedal según el rango de valores de la constante dieléctrica correspondiente al subsuelo del bofedal muestreado en la microcuenca Apacheta.

En las capas cercanas a la superficie el subsuelo suele ser muy poroso, esto debido al gran contenido de materia orgánica posiblemente por la vegetación de bofedal que subyace en ella conforme se degrada con el tiempo y que se almacena formando parte de la composición del subsuelo con otras texturas como es el suelo limoso y zonas altamente porosas.

A mayor profundidad la composición del subsuelo se ha constituido en la mayor parte por arcilla seca y húmeda en otras partes, con limos saturados, gravas, areniscas, arena húmeda, con algo de materia orgánica porosa. Entre el rango de los 6m a 14 m de profundidad se observa mucha



grava arenosa con humedad saturada en mayor proporción en comparación con suelo orgánico poroso en menor cuantía.

En la capa del subsuelo a la profundidad de 10,34 m se observa un subsuelo con mayor contenido de grava arenosa y con alto contenido de humedad saturada, esta composición hace posible el traslado del interflujo subsuperficial a manera de escorrentías superficiales que permiten el transporte del agua hacia las zonas más bajas de los bofedales consolidándose como zonas de recarga hídrica cuya función es descargarse durante las zonas de estíos. En las capas más profundas, la textura del subsuelo de bofedal es más uniforme, se destacan suelos con arcilla húmeda, arenisca y suelos más compactos, posiblemente suelo rocoso.

## **Recomendaciones**

Para tener los resultados óptimos en la caracterización del subsuelo de bofedales mejor es trabajar en épocas donde se ausenta las precipitaciones, lo cual nos facilita tener imágenes de interpolación de mayor detalle del subsuelo. Cabe decir que esta investigación deja muchas preguntas por resolver, ya que las aplicaciones de georadar de penetración terrestre son infinitas y los algoritmos de cómo se puede tratar los datos son innumerable, puesto que el trabajo de investigación se hizo con datos de prospección del 11 de noviembre del 2020, ya que en aquella fecha la precipitación se ausentó, por ello tenemos resultados donde no se puede encontrar bolsas de aguas en la superficie terrestre, aun así la humedad se mantiene en las profundidades.

Debo mencionar que esta investigación con GPR es un método muy valioso para futuras investigaciones, puesto no es invasiva, teniendo en cuenta la deforestación, desabastecimiento, disminución de agua, nos urge investigar ya que en lo general la microcuenca Apacheta es el principal proveedor de agua a la represa Cuchoquesera quien a la vez es el abastecedor principal de Ayacucho, por tanto se deben tomar ya las medidas necesarias en el tiempo corto posible para solucionar este problema que nos afectara a todos.

## Referencias bibliográficas

- Belina, F., Irving, J., Ernst, J., & Holliger, K. (2012). Evaluation of the reconstruction limits of a frequency-independent crosshole georadar waveform inversion scheme in the presence of dispersion. *Journal of Applied Geophysics*, 78, 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.03.003>
- Bergmann, T. (1998). Finite-difference modeling of electromagnetic wave propagation in dispersive and attenuating media. *Geophysics*, 63(3), 856-867. <https://doi.org/10.1190/1.1444396>
- Blancas, J., Cortes, F., Gomez, M., & Alatríste, D. (1996). Adquisición y Procesamiento de Datos de GPR en un Campo de Pruebas. *Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración. VII Simposium de Geofísica y Exposición*.
- Bradford, J. H. (2007). Frequency-dependent attenuation analysis of ground-penetrating radar data. *GEOPHYSICS*, 72(3), J7-J16. <https://doi.org/10.1190/1.2710183>
- Carlsten, S., Johansson, S., & Wörman, A. (1995). Radar techniques for indicating internal erosion in embankment dams. *Journal of Applied Geophysics*, 33(1), 143-156. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(95\)90037-3](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)90037-3)
- Cook, J. C. (1975). Radar transparencies of mine and tunnel rocks. *Geophysics*, 40(5), 865-885. <https://doi.org/10.1190/1.1440573>
- Daniels, D. J. (Ed.). (2004). *Ground Penetrating Radar*. Institution of Engineering and Technology. <https://digital-library.theiet.org/content/books/ra/pbra015e>
- De Coster, A., Tran, A. P., & Lambot, S. (2016). Fundamental Analyses on Layered Media Reconstruction Using GPR and Full-Wave Inversion in Near-Field Conditions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(9), 5143-5158. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2556862>
- Dios Otín, F., Artigas García, D., & Recolons Martos, J. (2004). *Campos electromagnéticos*. Universitat Politecnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politecnica. <https://books.google.com/books?id=ehGiCgAAQBAJ>
- Ernst, J. R., Green, A. G., Maurer, H., & Holliger, K. (2007). Application of a new 2D time-domain full-waveform inversion scheme to crosshole radar data. *GEOPHYSICS*, 72(5), J53-J64. <https://doi.org/10.1190/1.2761848>
- Fonseca-Benítez, F. A. (2006). The GRP (Ground Penetrating Radar) in different studies of the subsoil. *Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 3(2). [https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria\\_sogamoso/article/view/834](https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/article/view/834)
- Fullagar, P. K., Livelybrooks, D. W., Zhang, P., Calvert, A. J., & Wu, Y. (2000). Radio tomography and borehole radar delineation of the McConnell nickel sulfide deposit, Sudbury, Ontario, Canada. *GEOPHYSICS*, 65(6), 1920-1930. <https://doi.org/10.1190/1.1444876>
- Fuller, B. D., & Ward, S. H. (1970). Linear System Description of the Electrical Parameters of Rocks. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 8(1), 7-18. <https://doi.org/10.1109/TGE.1970.271447>
- Gary R. Olhoeft & Ernest T. Selig. (2002). *Ground-penetrating radar evaluation of railway track substructure conditions*. 4758. <https://doi.org/10.1117/12.462264>
- Gracia, P., & Vega, M. (2001). *Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico*.

- Hollender, F., & Tillard, S. (1998). Modeling ground-penetrating radar wave propagation and reflection with the Jonscher parameterization. *Geophysics*, 63(6), 1933-1942. <https://doi.org/10.1190/1.1444486>
- Jol, H. (2009). *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications* (p. 524).
- Keller, G. V. (2012). 2. Rock and Mineral Properties. En *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Volume 1, Theory* (pp. 12-51). <https://doi.org/10.1190/1.9781560802631.ch2>
- Klotzsche, A., Kruk, J. van der, Linde, N., Doetsch, J., & Vereecken, H. (2013). 3-D characterization of high-permeability zones in a gravel aquifer using 2-D crosshole GPR full-waveform inversion and waveguide detection. *Geophysical Journal International*, 195(2), 932-944. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt275>
- Ministerio del Ambiente. (2015). Estrategia Nacional de Humedales. Lima, Perú. Recuperado de <http://www.minam.gob.pe/consultaspublicas/wpcontent/uploads/sites/52/2014/02/RM-N%C2%B0-051-2014-MINAM.pdf>
- Noon, D. A. (1996). *Stepped-frequency radar design and signal processing enhances ground penetrating radar performance*.
- Otín, F. D. (1998). *Campos electromagnéticos*. Edicions de la UPC, S.L. <https://books.google.com/books?id=sJFGuB1Ai2IC>
- Tarantola, A. (1984). Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation. *Geophysics*, 49(8), 1259-1266. <https://doi.org/10.1190/1.1441754>
- Tronicke, J., Dietrich, P., Wahlig, U., & Appel, E. (2002). Integrating surface georadar and crosshole radar tomography: A validation experiment in braided stream deposits. *GEOPHYSICS*, 67(5), 1516-1523. <https://doi.org/10.1190/1.1512747>
- Turner, G. (1994). Subsurface radar propagation deconvolution. *GEOPHYSICS*, 59(2), 215-223. <https://doi.org/10.1190/1.1443583>
- Valle, S., Zanzi, L., & Rocca, F. (1999). Radar tomography for NDT: comparison of techniques. *Journal of Applied Geophysics*, 41(2), 259-269. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(98\)00046-9](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(98)00046-9)
- Watanabe, T., Nihei, K. T., Nakagawa, S., & Myer, L. R. (2004). Viscoacoustic wave form inversion of transmission data for velocity and attenuation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(6), 3059-3067. <https://doi.org/10.1121/1.1710878>
- Xu, J., Logsdon, S., Ma, X., Horton, R., Han, W., & Zhao, Y. (2014). Measurement of Soil Water Content with Dielectric Dispersion Frequency. *Soil Science Society of America Journal*, 78, 1500. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.10.0429>

## ANEXOS

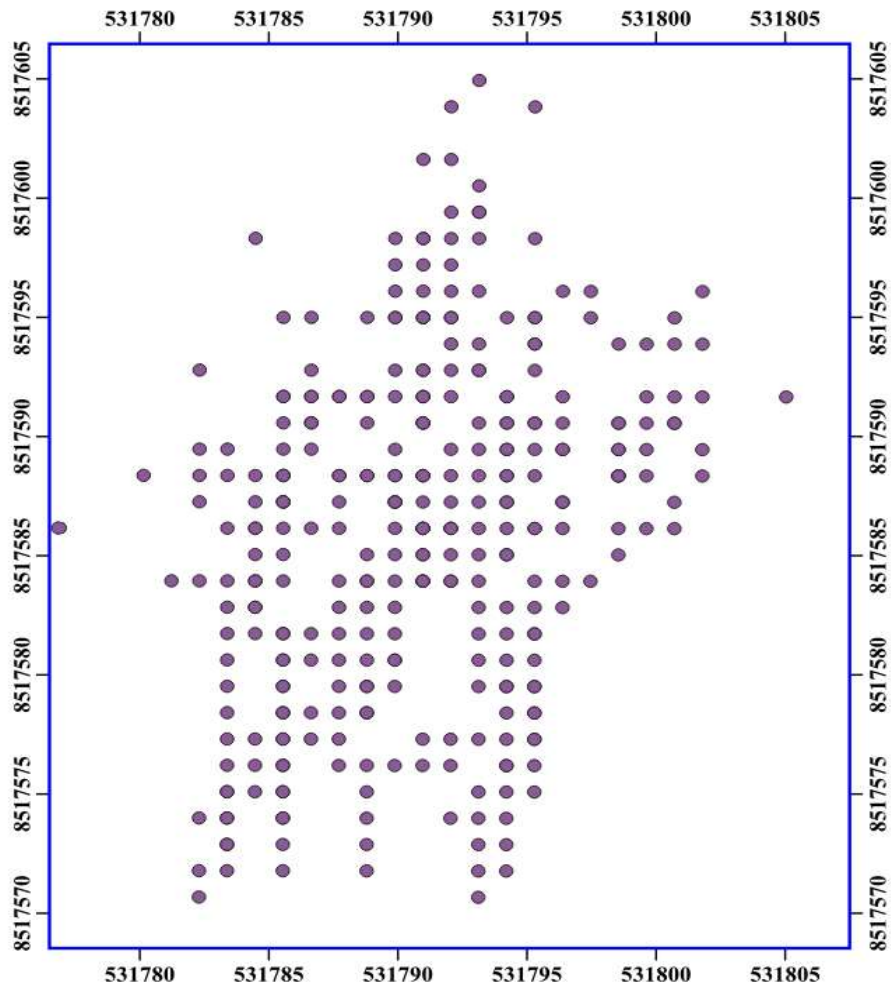
### Anexo 1: Matriz de Consistencia

Problema Principal	Objetivo General	Hipótesis General	Variables	Indicadores	Métodos	Técnicas e Instrumentos
<p>¿En qué medida los límites de reconstrucción de un esquema de inversión de onda de georadar cruzado permite estimar los diversos grados de dispersión dieléctrica del subsuelo de bofedal, de la microcuenca Apacheta, región Ayacucho, 2021?</p> <p><b>Problemas Específicos</b></p> <p>1. ¿Cuáles son los límites de reconstrucción de un esquema de inversión de onda de georadar cruzado, en función a su frecuencia, longitud de onda y amplitud, de acuerdo a los diversos grados de dispersión</p>	<p>Evaluar los límites de reconstrucción de un esquema de inversión de onda de georadar cruzado en diversos grados de dispersión dieléctrica del subsuelo de bofedal, de la microcuenca Apacheta, Región Ayacucho, 2021.</p> <p><b>Objetivos Específicos</b></p> <p>1. Determinar los límites de reconstrucción de un esquema de inversión de onda de georadar cruzado, en función a su frecuencia, longitud de onda y amplitud, de acuerdo con los diversos grados de dispersión dieléctrica del subsuelo de bofedal, en la</p>	<p>Los límites de reconstrucción de un esquema de inversión de onda de georadar cruzado se evalúan de manera significativa a partir de los diversos grados de dispersión dieléctrica del subsuelo de bofedal, de la microcuenca Apacheta, Región Ayacucho, 2021.</p> <p><b>Hipótesis Específicas</b></p> <p>1. Los límites de reconstrucción de un esquema de inversión de onda de georadar cruzado, se determinan de manera significativa en función a su frecuencia, longitud de onda y amplitud, de acuerdo con los diversos grados de</p>	<p><b>Variable Independiente:</b></p> <p>Límites de reconstrucción de un esquema de inversión de onda de georadar cruzado.</p> <p><b>Variable Dependiente:</b></p> <p>Grados de dispersión dieléctrica del subsuelo de bofedal.</p>	<p><b>Indicadores</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Intensidad</li> <li>• Profundidad</li> <li>• Frecuencia</li> <li>• Longitud de onda</li> <li>• Amplitud de onda</li> <li>• Reflexión</li> <li>• Refracción</li> <li>• Transmisión</li> <li>• Interferencia</li> </ul> <p><b>Indicadores</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Permitividad</li> <li>• Resistividad</li> <li>• Conductividad</li> <li>• Constante dieléctrica del medio</li> <li>• Polarización</li> </ul>	<p><b>Tipo de Investigación:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicada</li> </ul> <p><b>Nivel de Investigación:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Explicativa</li> </ul> <p><b>Diseño de Investigación:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuasi experimental</li> </ul> <p><b>Método de la Investigación:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cualitativo y cuantitativo</li> </ul> <p><b>Población:</b></p> <p>La decodificación de los datos de la constante dieléctrica de los componentes de subsuelo de bofedal, tomados con “Gepard”.</p> <p><b>Muestra:</b></p>	<p><b>Técnicas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Decodificación de datos de Gepard”.</li> <li>• Análisis documental y de observación</li> <li>• Uso de software especializado</li> </ul> <p><b>Instrumentos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipos de laboratorio de LABTELER</li> <li>• Software libre: Rstudio, Python, QGIS</li> <li>• Guía de análisis documental y de observación</li> <li>• Libros y textos especializados</li> </ul>

<p>dieléctrica del subsuelo de bofedal, en la microcuenca Apacheta?</p> <p>2. ¿Cuáles son los diversos grados de dispersión en relación a la constante dieléctrica de la composición del subsuelo de bofedal, de la microcuenca Apacheta?</p>	<p>microcuenca Apacheta.</p> <p>2. Estimar los diversos grados de dispersión en relación a la constante dieléctrica de la composición del subsuelo de bofedal, en la microcuenca Apacheta</p>	<p>dispersión dieléctrica del subsuelo de bofedal, en la microcuenca Apacheta.</p> <p>2. La estimación de los diversos grados de dispersión en relación a la constante dieléctrica de la composición del subsuelo de bofedal, en la microcuenca Apacheta, es significativa.</p>			<p>La selección aleatoria de un subconjunto de observaciones de los datos de constante dieléctrica de los componentes del subsuelo de bofedal en la microcuenca Apacheta medidos con el Georadar “Gepard”.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revistas científicas</li> <li>• Catálogos virtuales</li> <li>• Muestra seleccionada</li> <li>• Página web</li> <li>• Mapa de bofedales de la microcuenca Apacheta</li> </ul>
---	---	---	--	--	--	---

**Anexo 2: Los 357 Puntos muestreados (UTM) para la prospección del subsuelo de bofedal en la microcuenca Apacheta.**

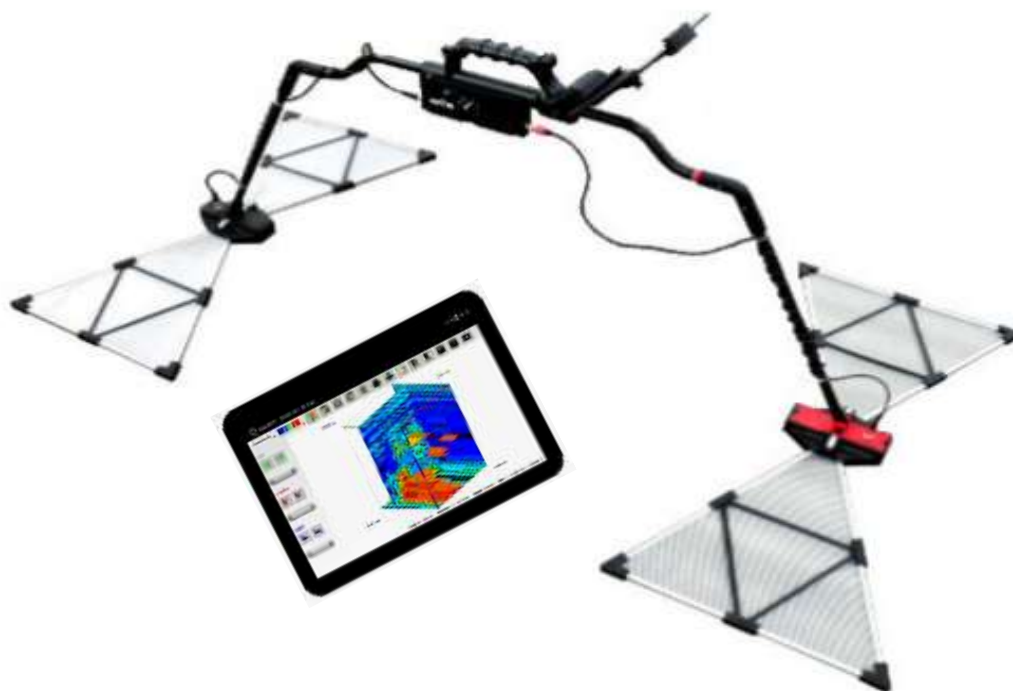
En el anexo 2 se muestran los diferentes puntos del subsuelo de bofedal en la microcuenca Apacheta, donde se hizo la prospección con Gepard que están georreferenciadas en las coordenadas UTM.



*Fuente:* Elaboración propia, puntos donde se tomaron los datos con georadar de penetración terrestre, Gepard.

### **Anexo 3: Gepard (OKM) con Antenas Triangulares**

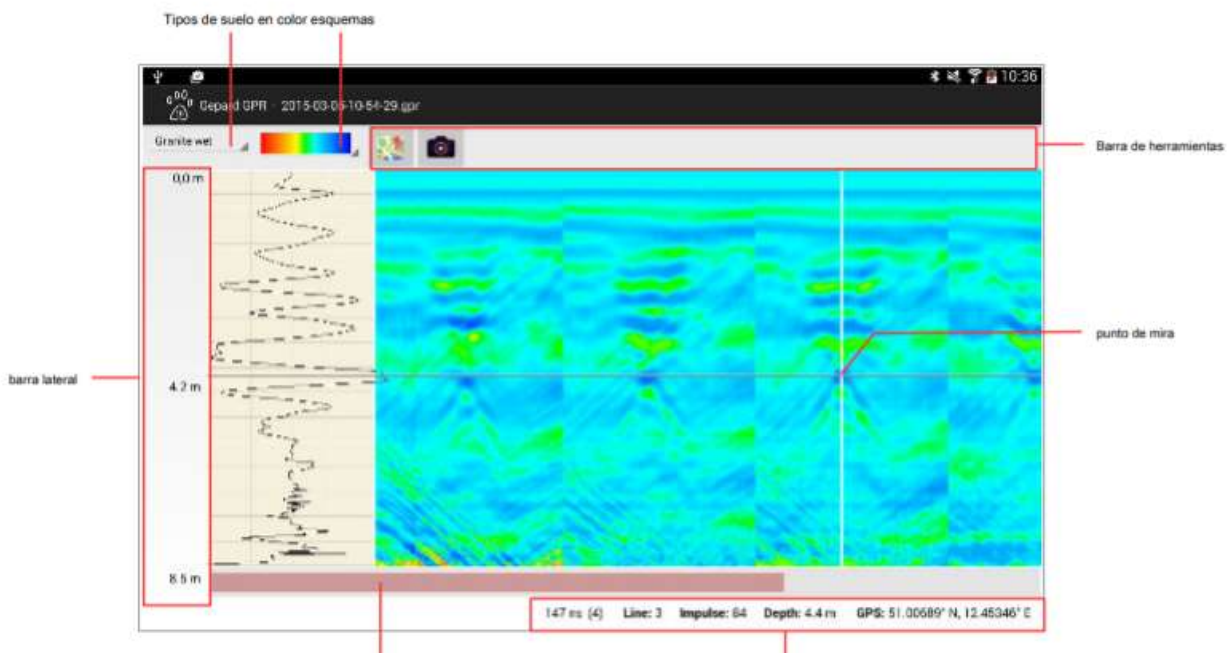
El equipo de Gepard (OKM), que está conformado por las dos antenas triangulares, unidad de control, una tableta y los ejes de transistor y receptor, un georradar de penetración terrestre (GPR), es un potente instrumento para las prospecciones en que se desea trabajar o investigar, las antenas triangulares envían una señal en el área de prospección y recibe una señal de la onda eléctrica reflejada, para detectar las diferentes anomalías que se presenta en las diferentes condiciones del subsuelo, como las características del sustrato del subsuelo, huecos, y otros objetos.



### **Anexo 4: Radargrama de Amplitud y Profundidad de Gepard**

Un radargrama, es la representación gráfica en perfil del subsuelo prospectado con el georradar de penetración terrestre (GPR), estas imágenes de franja de colores son producto de las reflexiones que son obtenidas en cada una de las profundidades y en el tiempo. Los puntos prospectados se recogen en un archivo de datos conteniendo los valores de la onda de campo eléctrico reflejada en el subsuelo.





**Anexo 5: Estimación de la permitividad dieléctrica del subsuelo de bofedal a diferentes profundidades a partir de los valores de onda reflejada medida con el georadar de penetración terrestre.**

[https://drive.google.com/drive/folders/1qIwDkaqNqSuMCXjsCfy7tTTzX6pZKCmW?usp=share\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1qIwDkaqNqSuMCXjsCfy7tTTzX6pZKCmW?usp=share_link)



## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

### ACTA N° 011-2023-FIMGC

En la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **RESOLUCIÓN DECANAL N° 074-2023-FIMGC-D**, siendo los siete días del mes de febrero del 2023, a horas 12:00 pm.; se reunieron los jurados del acto de sustentación, en el Auditorium virtual google meet del Campus Universitario de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Siendo el Jurado de la sustentación de tesis compuesto por el presidente el **Dr. Ing. Efraín Elías PORRAS FLORES**, Jurado el **Mg. Jorge Luis LOZANO RODRIGUEZ**, Jurado el **Mg. Julio Francisco JIMENEZ ARANA**, Jurado - Asesor el **Mg. Wilmer Enrique MONCADA SOSA** y secretario del proceso el **Mg. Ing. Christian LEZAMA CUELLAR**, con el objetivo de recepcionar la sustentación de la tesis denominada **“ESTIMACIÓN DE LOS DIVERSOS GRADOS DISPERSIÓN DIELECTRICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO DE BOFEDAL, MEDIANTE DATOS GEORADAR, EN LA MICROCUENCA APACHETA - AYACUCHO”**, presentado por el/la Sr./Srta., **NATANAEL MALLQUI DÍAZ**, Bachiller en **Ciencias Físico Matemáticas**.

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

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



Firmado digitalmente por  
Efraín Elías Porras Flores  
Fecha: 2023.02.15  
09:54:43 -05'00'

**Dr. Ing. Efraín Elías PORRAS FLORES**  
Presidente

**Mg. Jorge Luis LOZANO RODRIGUEZ**  
Jurado

**Mg. Wilmer Enrique MONCADA SOSA**  
Jurado Asesor

**Mg. Julio Francisco JIMENEZ ARANA**  
Jurado

**Mg. Ing. Christian LEZAMA CUELLAR**  
Secretario del Proceso



## CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### CONSTANCIA N° 014-2023-FIMGC

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

**Apellidos y Nombres** : MALLQUI DÍAZ, NATANAEL  
**Escuela Profesional** : CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS  
**Título de la Tesis** : Estimación de los diversos grados dispersión dieléctrica para la caracterización del subsuelo de bofedal, mediante datos georadar, en la microcuenca Apacheta - Ayacucho.  
**Evaluación de la Originalidad** : 10 % Índice de Similitud  
**Identificador de la entrega** : 2004865506

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

En señal de conformidad y verificación se firma la presente constancia

Ayacucho, 02 de febrero del 2023



UNIVERSIDAD NACIONAL DE  
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA  
Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil

Firmado digitalmente  
por LEZAMA CUELLAR  
CHRISTIAN

**Mg. Ing. Christian LEZAMA CUELLAR**

Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado

Estimación de los diversos  
grados dispersión dieléctrica  
para la caracterización del  
subsuelo de bofedal, mediante  
datos georadar, en la  
microcuenca Apacheta -  
Ayacucho.

*por Natanael Mallqui Díaz*

---

**Fecha de entrega:** 02-feb-2023 11:55a.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2004865506

**Nombre del archivo:** NATANAEL\_MALLQUI\_D\_AZ\_FISMA.pdf (1.75M)

**Total de palabras:** 16250

**Total de caracteres:** 89870

# Estimación de los diversos grados dispersión dieléctrica para la caracterización del subsuelo de bofedal, mediante datos georadar, en la microcuenca Apacheta - Ayacucho.

## INFORME DE ORIGINALIDAD

10%

INDICE DE SIMILITUD

8%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	4%
2	repository.javeriana.edu.co Fuente de Internet	1%
3	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
4	riunet.upv.es Fuente de Internet	1%
5	tesis.ipn.mx Fuente de Internet	1%
6	"CARTOGRAFIADO DE LA MORFOLOGÍA SUBGLACIAR DE LA MALADETA Y ANETO MEDIANTE GEORRADAR", 'Universitat Politecnica de Valencia' Fuente de Internet	1%
7	docplayer.es Fuente de Internet	<1%



---

8	<a href="http://vitoria-gasteiz.org.es">vitoria-gasteiz.org.es</a>	<1 %
Fuente de Internet		
9	<a href="http://cybertesis.uach.cl">cybertesis.uach.cl</a>	<1 %
Fuente de Internet		
10	<a href="http://www.tdx.cat">www.tdx.cat</a>	<1 %
Fuente de Internet		
11	<a href="http://www.researchgate.net">www.researchgate.net</a>	<1 %
Fuente de Internet		
12	<a href="http://www.slideshare.net">www.slideshare.net</a>	<1 %
Fuente de Internet		
13	<a href="http://documentop.com">documentop.com</a>	<1 %
Fuente de Internet		
14	<a href="http://1library.co">1library.co</a>	<1 %
Fuente de Internet		

---

Excluir citas      Activo

Excluir bibliografía      Activo

Excluir coincidencias      < 30 words

## **Declaración jurada de autenticidad**

Yo, Mallqui Díaz Natanael con DNI 71033618 y código de matrícula N° 26131255 con domicilio Urb. Mariscal Cáceres Distrito Ayacucho Provincia Huamanga Región Ayacucho Estudiante de: Pre Grado de la Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil, Escuela Profesional de ciencias físico-matemáticas,

Con proyecto de investigación titulado: Estimación de los diversos grados dispersión dieléctrica para la caracterización del subsuelo de bofedal, mediante datos georadar, en la microcuenca Apacheta - Ayacucho.

Declaro bajo juramento que:

1. El presente proyecto de investigación es de mi autoría.
2. He respetado las normas universales de redacción al hacer uso de las citas y referencias de las fuentes consultadas. Por lo que, el presente proyecto de investigación no presenta plagio alguno.
3. El proyecto que se presenta no sido presentado anteriormente con el objetivo de obtener grado académico o título profesional, mucho menos publicada, razón por el que puedo precisar que no es autoplagiado.

En caso de encontrarse o confirmarse hechos contrarios a los declarados inicialmente asumo las sanciones y consecuencias que de esas acciones deriven, sometiéndome a las normas vigentes de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Ayacucho 09 de enero del 2023



---

Mallqui Diaz, Natanael

DNI:71033618