

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA**

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

**ESCUELA PROFESIONAL DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS**



**TESIS:**

**“Variación de la composición del subsuelo de dos bofedales a diferentes profundidades mediante datos radargrama, en la microcuenca Apacheta - Ayacucho”**

Para optar el título profesional de:

**LICENCIADO EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS.  
ESPECIALIDAD DE FÍSICA**

PRESENTADO POR:

**Bach. Mauro HUALLPA NAVARRO**

ASESOR:

**Mg. Julio Francisco JIMÉNEZ ARANA**

COASESOR:

**Mg. Wilmer Enrique MONCADA SOSA**

**AYACUCHO - PERÚ**

**2025**

## **Dedicatoria**

A mi amada familia, gracias por ser mi refugio seguro, por brindarme amor incondicional y por ser mi mayor fuente de inspiración. Sus valores y enseñanzas han forjado mi carácter y han alimentado mis sueños.

Agradezco cada sacrificio que han hecho para asegurar mi felicidad y éxito, y siempre llevaré sus enseñanzas conmigo a medida que persigo mis metas.

A mis respetados profesores, gracias por su dedicación y paciencia al nutrir mi mente y expandir mis horizontes. Ustedes han despertado mi curiosidad, me han desafiado a superar mis límites y han creído en mi potencial incluso cuando dudaba de mí mismo. Su dedicación y entusiasmo por la enseñanza han impactado profundamente en mi vida, y aprecio enormemente cada aprendizaje que he recibido de ustedes.

## **Agradecimiento**

A la Escuela Profesional de Ciencias Físico Matemáticas, gracias por nutrir mi pasión por el conocimiento y por abrir las puertas a un mundo fascinante de los números e investigación.

A los profesores expertos, quienes han sido guías excepcionales en mi viaje de aprendizaje, desafiándome a desarrollar mis habilidades analíticas y lógicas. Cada clase y cada proyecto me han ayudado a fortalecer mi comprensión de los fundamentos científicos y matemáticos, y han sido la base sólida sobre la cual he construido mi futuro.

A la UNSCH, gracias por haber iluminado mi sendero hacia la excelencia, con educación de calidad, brindándome el apoyo necesario en mi desarrollo como estudiante y como individuo.

Me siento afortunado de haber formado parte de esta institución que valora el espíritu de investigación, el pensamiento crítico y la búsqueda constante del conocimiento. Además, su enfoque en el crecimiento integral me ha permitido desarrollar habilidades sociales y liderazgo que serán invaluable en mi vida futura.

## Resumen

Los ecosistemas de humedales (bofedales) de la microcuenca Apacheta cumplen una importante función de recarga hídrica durante la época de lluvias para el abastecimiento de las zonas bajas, tributarios y el río Apacheta, por lo que es necesario conocer como es el comportamiento del subsuelo en este proceso de recarga y descarga hídrica. El objetivo es analizar la variación de la composición del subsuelo de dos bofedales a diferentes profundidades mediante datos radargrama obtenidos del perfil vertical de dos transectos (T1 y T2) prospectados con el Georadar de Penetración Terrestre (GPR), en la microcuenca Apacheta de la región Ayacucho. El método empleado involucra el uso de técnicas de prospección geofísica con el uso del GPR, del cual se obtienen datos radargrama en valores de amplitud de onda reflejada del subsuelo para la estimación de la permitividad dieléctrica, el cual es un indicador de las texturas que conforman la composición del subsuelo a diferentes profundidades. Con los métodos de interpolación IDW y Kriging se obtienen imágenes del perfil vertical del subsuelo, en donde se puede identificar el porcentaje de contenido de la composición del subsuelo a diferentes profundidades agrupados en clases. Los resultados obtenidos establecen que la composición de texturas de subsuelo entre ambos perfiles verticales de los bofedales prospectados con el GPR varían de manera significativa con un acuerdo pobre según el índice Kappa de Cohen (0.113) y el índice Kappa de Fleiss (0.0732), lo cual significa que ambos bofedales mantienen características de subsuelo diferentes, propias de cada bofedal ubicado a diferentes latitudes, longitudes y altitudes. En este sentido el T2 contiene mayor composición porcentual de texturas clase A (> 80 % a la profundidad entre 1 m a 6 m) y B (> 16 % a la profundidad entre 7 m a 16 m) con respecto al T1. Sin embargo, el T1 posee mayor cantidad de agua y humedad saturada en el subsuelo que el T2. La mejora de la comprensión de los procesos hidrogeológicos que ocurren en el subsuelo de los humedales es clave para diseñar estrategias efectivas de preservación y conservación de bofedales, asegurando su estabilidad y función ecológica.

**Palabras clave:** Bofedales, radargrama, permitividad dieléctrica, composición del subsuelo, Apacheta, GPR.

## Abstract

The wetland ecosystems (bofedales) of the Apacheta micro-basin play an important role in water recharge during the rainy season to supply the lower areas, tributaries and the Apacheta River, so it is necessary to know how the subsoil behaves in this process of water recharge and discharge. The objective is to analyze the variation of the subsoil composition of two wetlands at different depths using radargram data obtained from the vertical profile of two transects (T1 and T2) prospected with the Ground Penetrating Geo-radar (GPR), in the Apacheta micro-watershed of the Ayacucho region. The method used involves the use of geophysical prospecting techniques with the use of GPR, from which radargram data are obtained in reflected wave amplitude values of the subsoil for the estimation of dielectric permittivity, which is an indicator of the textures that make up the composition of the subsoil at different depths. With the IDW and Kriging interpolation methods, images of the vertical profile of the subsurface are obtained, where the percentage content of the subsurface composition at different depths grouped in classes can be identified. The results obtained establish that the composition of subsoil textures between both vertical profiles of the wetlands prospected with the GPR vary significantly with poor agreement according to Cohen's Kappa index (0.113) and Fleiss' Kappa index (0.0732), which means that both wetlands maintain different subsoil characteristics, specific to each wetland located at different latitudes, longitudes and altitudes. In this sense, T2 contains a higher percentage composition of class A textures (> 80 % at a depth between 1 m and 6 m) and B (> 16 % at a depth between 7 m and 16 m) with respect to T1. However, T1 has a higher amount of water and saturated moisture in the subsoil than T2. Improved understanding of the hydrogeological processes occurring in the subsoil of wetlands is key to designing effective strategies for the preservation and conservation of wetlands, ensuring their stability and ecological function.

**Key words:** wetlands, radargram, dielectric permittivity, subsurface composition, Apacheta, GPR.

# Índice

Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Resumen	iv
Abstract	v
Índice	vi
Lista de tablas	x
Lista de figuras	xi
Capítulo I	15
1. Introducción	15
1.1. Formulación del problema	19
1.1.1. Problema General	19
1.1.2. Problemas específicos	19
1.2. Formulación de objetivos	19
1.2.1. Objetivo General	19
1.2.2. Objetivos específicos	19
1.3. Justificación, importancia y limitación	20
1.3.1. Justificación de la investigación	20
1.3.2. Importancia de la investigación	20
1.3.3. Limitaciones de la investigación	21
Capítulo II.	23
2. Marco Teórico	23
2.1. Antecedentes	23

2.2. Bases teóricas	25
2.2.1. Fundamentos de Ondas Electromagnéticas	25
2.2.2. Dispersiones comunes en GPR	28
2.2.3. Reflexiones de GPR en el subsuelo	29
2.3. Bases conceptuales	33
2.3.1. Radar de Penetración Terrestre (GPR)	33
2.3.2. Principios físicos de funcionamiento del GPR	34
2.3.3. Aplicaciones del GPR	39
2.3.4. Interpretación de los datos del GPR	40
2.3.5. Características Comunes de los Datos Generados por un GPR	42
2.3.6. Interpolación Kriging	43
2.3.7. Interpolación de la distancia inversa ponderada, IDW	45
2.3.8. Índice Kappa	46
Capítulo III	48
3. Metodología	48
3.1. Hipótesis y Variables	48
3.1.1. Hipótesis General	48
3.1.2. Hipótesis Específicas	48
3.2. Variables	48
3.2.1. Operacionalización de variables	49
3.5. Tipo y Nivel de Investigación	50
3.5.1. Tipo de Investigación	50
3.5.2. Nivel de investigación	50
3.6. Diseño de investigación	50

3.7. Métodos de investigación	50
3.9. Población	54
3.10. Muestra	55
3.10.1. Área de estudio	55
3.11. Técnicas	56
3.12. Instrumentos	57
3.13. Validez y confiabilidad de instrumentos	58
3.14. Técnicas de procesamiento de datos	58
3.15. Aspectos éticos	59
Capítulo IV	60
4. Resultados y Discusión	60
4.1. Composición del perfil vertical del subsuelo de dos bofedales de la microcuenca Apacheta a diferentes profundidades a partir de la permitividad dieléctrica estimada de los datos radargrama.	60
4.2. Variación de la distribución espacial de la composición del subsuelo de dos bofedales a la misma profundidad en la microcuenca Apacheta, mediante la aplicación de algoritmos de interpolación.	77
5. Conclusiones	98
6. Recomendaciones	100
7. Referencias bibliográficas	101
Abreviaturas	109
Anexos	110
Anexo 1. Matriz de consistencia	110
Anexo 2. Código en Python para la interpolación de datos radargrama	113

Anexo 3. Muestra de datos de amplitud de onda de radar reflejada, permitividad dieléctrica y clases de textura del subsuelo de bofedal a lo largo de dos transectos T1 y T2 de 20 m de longitud y 20 m de profundidad, prospectados con el GPR-Gepard, en la microcuenca Apacheta, el 12 de octubre de 2022.

125

## Lista de Tablas

Tabla 2.1	Permitividad dieléctrica relativa para distintos tipos de materiales	33
Tabla 2.2	Interpretación del índice Kappa según sus rangos de valores.	46
Tabla 3.1	Ubicación geográfica de los puntos muestreados, correspondientes a los dos transectos prospectados con el GPR – Gepard en los bofedales de la microcuenca Apacheta.	54
Tabla 4.1	Clasificación de composición de subsuelo de bofedal a partir de la Permitividad Dieléctrica ( $\epsilon$ ). Frecuencia de valores de permitividad dieléctrica agrupadas en seis	59
Tabla 4.2	clases correspondiente a la composición del subsuelo de los perfiles verticales de los transectos 1 y 2 prospectados con el GPR – Gepard en el bofedal de la microcuenca Apacheta.	60

## Lista de Figuras

Figura 2.1	Variedad de Georadares GPR-Ground Penetrating Radar.	36
Figura 2.2	Técnica del Radargrama emitiendo ondas y recopilando datos del subsuelo.	37
Figura 2.3	Ecosistemas de humedales altoandinos o Bofedales, son zonas de recarga hídrica que contienen vegetación característica y gran material orgánico en las capas superficiales, además de turberas.	38
Figura 2.4	Radargrama del perfil vertical prospectado con el GPR – Gepard en un bofedal de la microcuenca Apacheta localizado en el punto latitud = -13.39122; longitud = -74.69844.	40
Figura 2.5	Ejemplo de Interpolación Kriging (ordinario) de los datos radargrama correspondientes a un perfil vertical del subsuelo de un bofedal.	43
Figura 2.6	Ejemplo de Interpolación de Kriging (ordinario) para el perfil vertical del subsuelo de un bofedal localizado en la microcuenca Apacheta.	44
Figura 3.1	Esquema metodológico de la clasificación de composición de subsuelo de bofedal	50
Figura 3.2	Prospección geofísica con el GPR – Gepard del perfil vertical del subsuelo de bofedal a lo largo de un transecto de 20 m de longitud, hasta 20 m de profundidad.	51
Figura 3.3	Radargrama de los transectos muestreados con el GPR – Gepard (a) T1 y (b) T2.	52
Figura 3.4	Mapa de ubicación geográfica de los puntos muestreados correspondientes a los transectos prospectados con el GPR – Gepard en los bofedales de la microcuenca Apacheta.	55
Figura 4.1	Histograma de frecuencia que compara las 6 clases de composición del subsuelo de bofedal a lo largo de dos transectos de longitud 20 m hasta una profundidad de 20 m.	61
Figura 4.2	Distribución porcentual de la composición clase “A” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 1 prospectado con el GPR en el bofedal 1 de la microcuenca Apacheta.	62
Figura 4.3	Distribución porcentual de la composición clase “B” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 1 prospectado con el GPR en el bofedal 1 de la microcuenca Apacheta	63
Figura 4.4	Distribución porcentual de la composición clase “C” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 1 prospectado con el GPR en el bofedal 1 de la microcuenca Apacheta.	64

Figura 4.5	Distribución porcentual de la composición clase “D” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 1 prospectado con el GPR en el bofedal 1 de la microcuenca Apacheta.	65
Figura 4.6	Distribución porcentual de la composición clase “E” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 1 prospectado con el GPR en el bofedal 1 de la microcuenca Apacheta.	66
Figura 4.7	Distribución porcentual de la composición clase “F” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 1 prospectado con el GPR en el bofedal 1 de la microcuenca Apacheta.	67
Figura 4.8	Distribución porcentual de la composición de clases A, B, C, D, E y F a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 1 prospectado con el GPR.	68
Figura 4.9	Distribución porcentual de la composición clase “A” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 2 prospectado con el GPR en el bofedal 2 de la microcuenca Apacheta.	69
Figura 4.10	Distribución porcentual de la composición clase “B” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 2 prospectado con el GPR en el bofedal 2 de la microcuenca Apacheta.	70
Figura 4.11	Distribución porcentual de la composición clase “C” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 2 prospectado con el GPR en el bofedal 2 de la microcuenca Apacheta.	71
Figura 4.12	Distribución porcentual de la composición clase “D” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 2 prospectado con el GPR en el bofedal 2 de la microcuenca Apacheta.	72
Figura 4.13	Distribución porcentual de la composición clase “E” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 2 prospectado con el GPR en el bofedal 2 de la microcuenca Apacheta.	73
Figura 4.14	Distribución porcentual de la composición clase “F” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 2 prospectado con el GPR en el bofedal 2 de la microcuenca Apacheta.	74
Figura 4.15	Distribución porcentual de la composición de clases A, B, C, D, E y F a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 2 prospectado con el GPR.	75
Figura 4.16	Distribución espacial de la composición de texturas del subsuelo del bofedal muestreado mediante interpolación IDW de los datos de permitividad dieléctrica del perfil vertical del transecto 1.	77
Figura 4.17	Contenido porcentual de la composición de subsuelo de bofedal de las clases A, B, C, D, E y F distribuidos mediante interpolación IDW en un perfil vertical de subsuelo a lo largo del transecto 1 prospectado con el GPR.	78

Figura 4.18	(a) Selección de un área muestral dentro el perfil vertical de subsuelo de bofedal a lo largo del transecto 1, prospectado con el GPR, (b) Área muestral seleccionada del perfil vertical de subsuelo de bofedal.	79
Figura 4.19	Contenido porcentual de la composición de subsuelo de bofedal de las clases A, B, C, D, E y F distribuidos mediante interpolación IDW de los datos de permitividad dieléctrica, correspondiente a la selección muestral del área contenida en un perfil vertical de subsuelo a lo largo del transecto 1 prospectado con el GPR.	80
Figura 4.20	Distribución espacial de la composición de texturas del subsuelo del bofedal muestreado mediante interpolación IDW de los datos de permitividad dieléctrica del perfil vertical del subsuelo a lo largo del transecto 2	81
Figura 4.21	Contenido porcentual de la composición de subsuelo de bofedal de las clases A, B, C, D, E y F distribuidos mediante interpolación IDW de los datos de permitividad dieléctrica en un perfil vertical de subsuelo a lo largo del transecto 2 prospectado con el GPR.	82
Figura 4.22	(a) Selección de un área muestral dentro el perfil vertical de subsuelo de bofedal a lo largo del transecto 2, prospectado con el GPR, (b) Área muestral seleccionada del perfil vertical de subsuelo de bofedal.	83
Figura 4.23	Contenido porcentual de la composición de subsuelo de bofedal de las clases A, B, C, D, E y F distribuidos mediante interpolación IDW de los datos de permitividad dieléctrica, correspondiente a la selección muestral del área contenida en un perfil vertical de subsuelo a lo largo del transecto 2 prospectado con el GPR.	84
Figura 4.24	Variación de la composición porcentual de la clase A, a partir de la diferencia de porcentajes entre el transecto 2 y el transecto 1.	85
Figura 4.25	Variación de la composición porcentual de la clase B, a partir de la diferencia de porcentajes entre el transecto 2 y el transecto 1.	86
Figura 4.26	Variación de la composición porcentual de la clase C, a partir de la diferencia de porcentajes entre el transecto 2 y el transecto 1.	87
Figura 4.27	Variación de la composición porcentual de la clase D, a partir de la diferencia de porcentajes entre el transecto 2 y el transecto 1.	88
Figura 4.28	Variación de la composición porcentual de la clase E, a partir de la diferencia de porcentajes entre el transecto 2 y el transecto 1.	89
Figura 4.29	Variación de la composición porcentual de la clase F, a partir de la diferencia de porcentajes entre el transecto 2 y el transecto 1.	90
Figura 4.30	Interpolación Kriging Universal para los transectos 1 y 2 de los bofedales 1 y 2 en función a su profundidad, <b>longitud</b> y permitividad dieléctrica, considerando solo 1000 datos muestrales.	92

Figura 4.31	Interpolación de Kriging Universal para los transectos 1 y 2 de los bofedales 1 y 2 en función a su profundidad, <b>latitud</b> y permitividad dieléctrica, considerando solo 1000 datos muestrales.	93
Figura 4.32	Concentración de la composición de texturas de subsuelo de bofedal a través de la permitividad dieléctrica contenido en el perfil vertical a lo largo de los transecto (a) 1 y (b) 2 en función de su longitud y profundidad	94

# Capítulo I

## 1. Introducción

La región de Ayacucho, ubicada en los Andes del Perú, se caracteriza por un relieve accidentado debido a la intersección de dos cordilleras. Situada en el corazón de los Andes peruanos, está rodeada por montañas y profundos valles, ofreciendo una geografía que combina altas cumbres, llanuras onduladas y ríos serpenteantes. El clima predominante es templado y seco, con temperaturas que varían entre 10 a 22 °C, y un promedio anual de precipitaciones cercano a los 600 mm (Paz & Guillén, 2010).

El cambio climático ha generado un impacto considerable en los Andes de América Latina, afectando de manera significativa a los glaciares, la disponibilidad de agua, los ciclos agrícolas y la biodiversidad. En las últimas cinco décadas, los glaciares andinos han visto reducida su superficie en aproximadamente un 30 % debido al incremento de las temperaturas. Asimismo, se prevé una disminución en la disponibilidad de agua en los próximos años, lo que podría acarrear serias repercusiones para la agricultura y las comunidades locales. La biodiversidad también enfrenta desafíos, con especies que migran hacia altitudes mayores en busca de temperaturas más bajas y condiciones más favorables para su supervivencia (Galindo & Moreno, 2011).

La región Ayacucho no es ajena a este contexto global, así lo confirmaron Moncada & Willems, (2020), quienes demostraron que la temperatura de la superficie del suelo (TSS) muestra una tendencia ascendente, incrementándose en 4,9 °C, lo que representa el 27,5% de la TSS. Este aumento es aún más marcado en las áreas nevadas, donde alcanza 5,8 °C, equivalente al 35,3% de la TSS en la microcuenca. En estas zonas, la TSS explica el 83,6% del comportamiento de la cubierta de nieve, medido a través del índice de nieve de diferencias normalizadas (NDSI), con una reducción progresiva de la superficie nevada debido al aumento de la TSS.

La cuenca del río Cachi, considerada la más relevante en la región de Ayacucho, enfrenta actualmente múltiples desafíos relacionados con los recursos hídricos y los servicios ecosistémicos que ofrece.

Estos servicios poseen un valor económico significativo, influyendo en decisiones clave para el bienestar social. De acuerdo con encuestas, el 90.6% de los productores agrícolas en la cuenca están dispuestos a invertir en la conservación de los servicios hídricos con fines agropecuarios. Asimismo, el 92% de los habitantes de las zonas altoandinas están abiertos a recibir incentivos económicos como contraprestación por la protección de humedales y pastizales ubicados en las cabeceras de la cuenca (Ccasani Sierra et al., 2023).

La cuenca Cachi enfrenta diversas amenazas derivadas del uso intensivo de los recursos hídricos en actividades agropecuarias, tales como el riego excesivo, el sobrepastoreo, la deforestación de árboles nativos y la quema de pastizales y pajonales. Estas prácticas resultan en problemas como la erosión del suelo, un aumento de la escorrentía superficial y una disminución de la infiltración, lo que contribuye al deterioro de las funciones ecosistémicas. En este contexto, la microcuenca Apacheta se posiciona como el principal proveedor de agua para la presa Cuchoquesera, que tiene una capacidad de almacenamiento cercana a 80 millones de metros cúbicos (MMC) y satisface necesidades de agua potable, generación de energía eléctrica y actividades agrícolas e industriales (Ccasani Sierra et al., 2023).

La microcuenca Apacheta, situada en la cabecera de la cuenca del río Cachi en la región de Ayacucho, enfrenta actualmente diversas dificultades relacionadas con la gestión del recurso hídrico. Su sostenibilidad se ve comprometida principalmente por la disminución del caudal de salida en comparación con el caudal ecológico. Entre los años 2000 y 2018, se ha registrado una reducción progresiva en el caudal de salida, lo que ha impactado directamente en la capacidad de almacenamiento de agua de la presa Cuchoquesera. Este fenómeno ha generado efectos negativos en la satisfacción de la demanda de agua para consumo humano y agrícola, frecuentemente excediendo la disponibilidad hídrica. Además, esta situación perjudica el equilibrio ecológico de la microcuenca. A largo plazo, el cambio climático podría agravar esta problemática, anticipándose un potencial déficit hídrico (Moncada et al., 2020).

De igual manera, la reducción en la duración de la cobertura de nieve en los principales glaciares de la microcuenca Apacheta confirma el agotamiento progresivo de sus

reservas hídricas. En los últimos años, esta permanencia de nieve ha disminuido, probablemente como resultado del cambio climático. Este fenómeno tiene repercusiones significativas tanto para la disponibilidad de agua como para el equilibrio y funcionamiento de los ecosistemas en la cuenca (Moncada et al., 2020).

De mantenerse la tendencia positiva en el incremento anual del caudal de salida, se proyecta una reducción del 46.1% y del 56.1% con respecto a su caudal ecológico en un plazo de 5 y 10 años, respectivamente. Estos hallazgos pueden servir como base para orientar procesos de toma de decisiones que permitan mitigar los riesgos asociados a la escasez de agua tanto a nivel regional como nacional (Moncada et al., 2020).

De acuerdo con Moncada et al., (2022), el derretimiento de los glaciares y nevados en la microcuenca Apacheta ha favorecido el aumento de la cobertura vegetal (CV) en los bofedales, mostrando un patrón estacional con máximos valores de CV durante los meses de marzo, abril y mayo, coincidiendo con el periodo lluvioso. Además, los valores mínimos de CV registrados han sido superiores en comparación con años anteriores. Considerando estos escenarios y los efectos de los patrones climáticos, se prevé que el crecimiento de la CV podría alcanzar un límite, condicionado principalmente por la disponibilidad de recursos hídricos en la microcuenca. Por ello, se recomienda realizar evaluaciones de la humedad del suelo de los bofedales, así como de los factores climáticos que afectan su comportamiento, tanto en superficies como en subsuperficies, debido a su relevancia para la recarga hídrica y el suministro de agua a la presa Cuchoquesera.

Por esta razón se propone prospectar el subsuelo de dos bofedales en la microcuenca Apacheta con el uso del GPR, Gepard, que es una técnica no invasiva ni destructiva muy útil para analizar la variación del subsuelo hasta una profundidad de 40 m. Esta técnica geofísica es muy utilizada para estudiar la estructura geológica y las características del subsuelo utilizando ondas electromagnéticas en el rango de frecuencias del radar. Los datos de radargrama obtenidos de las prospecciones se utilizan para identificar las características geológicas del subsuelo, como la profundidad y la orientación de las capas de suelo y roca, la presencia de fracturas y fallas. Los datos se derivan de las ondas reflejadas por las

diferentes capas del subsuelo. Estos datos se procesan y visualizan en forma de imágenes, que se utilizan para interpretar la estructura y las propiedades del subsuelo (Conyers, 2004).

Mediante los datos radargrama, se pretende detectar las discontinuidades o anomalías de subsuelo poco profundo (< 40 m) en dos zonas de bofedal. La recopilación de datos radargrama corresponde a los perfiles verticales a lo largo de un transecto en uno o dos bofedales muestreados. Según Neal (2004), la técnica GPR ayuda a investigar ambientes hidrogeológicos subterráneos incluida la caracterización de los depósitos de agua subterránea. El análisis de la variación del subsuelo mediante datos radargrama puede ser muy útil en diversas aplicaciones en los subsuelos de bofedales en la microcuenca Apacheta, así como en la búsqueda de contenido de agua del subsuelo (Zajicová & Chuman, 2019), pero también presenta algunos desafíos y limitaciones que se tendrán en cuenta en este estudio para garantizar la calidad y precisión de los resultados por diversos enfoques (Neal, 2004).

Los datos radargrama se procesan de tal manera que su interpretación permita caracterizar la textura que compone el subsuelo con el uso de la permitividad dieléctrica (PD), así lo demuestran Moncada et al., (2024) al interpretar la PD estimada a partir de los datos del GPR Gepard, que identifica la humedad del subsuelo del bofedal, los cuales se validan mediante la realización de mediciones in situ con el medidor de humedad de suelo (MHS) FieldScout TDR-350, para el reconocimiento de bolsas de agua junto con la estimación de su contenido de agua a lo largo de los transectos muestreados T1( $R^2 = 0.8$ ), T2( $R^2 = 0.95$ ), T3( $R^2 = 0.84$ ), y T4( $R^2 = 0.84$ ).

En ese sentido, se puede utilizar la misma metodología para poder estimar la composición estratigráfica del subsuelo en cada bofedal muestreado con el GPR a partir del cálculo de la permitividad dieléctrica estimada de los datos radargrama a la misma profundidad, mediante la aplicación de un algoritmo de interpolación que permita obtener una mejor distribución de dicha composición del subsuelo, para su comparación.

## **1.1. Formulación del problema**

### **1.1.1. Problema General**

¿En qué medida varía la composición del subsuelo de dos bofedales a diferentes profundidades mediante datos radargrama, en la microcuenca Apacheta - Ayacucho?

### **1.1.2. Problemas específicos**

PE1: ¿Cuál es la composición del perfil vertical del subsuelo de dos bofedales de la microcuenca Apacheta a diferentes profundidades a partir de la permitividad dieléctrica estimada de los datos radargrama?

PE2: ¿Cuál es la variación de la distribución espacial de la composición del subsuelo de dos bofedales a la misma profundidad en la microcuenca Apacheta, mediante la aplicación de algoritmos de interpolación?

## **1.2. Formulación de objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Analizar la variación de la composición del subsuelo de dos bofedales a diferentes profundidades mediante datos radargrama, en la microcuenca Apacheta - Ayacucho.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

OE1: Determinar la composición del perfil vertical del subsuelo de dos bofedales de la microcuenca Apacheta a diferentes profundidades a partir de la permitividad dieléctrica estimada de los datos radargrama.

OE2: Estimar la variación de la distribución espacial de la composición del subsuelo de dos bofedales a la misma profundidad en la microcuenca Apacheta, mediante la aplicación de algoritmos de interpolación.

### **1.3. Justificación, importancia y limitación**

#### **1.3.1. Justificación de la investigación**

El análisis de la variación del subsuelo mediante datos radargrama tiene múltiples propósitos y causas, entre los cuales están la exploración y caracterización del subsuelo. El análisis de la variación del subsuelo mediante datos radargrama es una técnica útil para explorar y caracterizar el subsuelo, lo que permite conocer su estructura y composición geológica, su profundidad y la presencia de recursos naturales.

La técnica del radargrama se emplea para detectar y localizar recursos naturales como petróleo, gas, minerales y agua subterránea. Asimismo, esta herramienta se utiliza en la planificación y el diseño de proyectos de ingeniería, incluidos carreteras, puentes, edificios y estructuras de retención. El análisis de las variaciones en el subsuelo a través de los datos obtenidos por radargrama proporciona información valiosa para entender mejor las características del terreno y diseñar estructuras más estables y seguras.

El empleo de radargramas en la detección de aguas subterráneas se ha convertido en una herramienta cada vez más empleada en la exploración de recursos hídricos. La creciente escasez de agua en diversas regiones del mundo ha incrementado la demanda de métodos más eficientes y precisos para la exploración de aguas subterráneas. Los radargramas ofrecen información clave sobre la estructura geológica y la ubicación de las capas acuíferas, facilitando la identificación de sitios potenciales para la perforación de pozos. Además, los datos obtenidos mediante radargramas mejoran la precisión y eficacia de los métodos de exploración existentes, contribuyendo positivamente a la gestión sostenible de los recursos hídricos y al aseguramiento del suministro de agua.

#### **1.3.2. Importancia de la investigación**

Los datos radargrama proporcionan información precisa de las características estratigráficas del subsuelo, como la profundidad y la estructura geológica, que no se pueden obtener con otras técnicas de exploración del subsuelo. El análisis de la variación del subsuelo mediante datos radargrama es una técnica útil para identificar y caracterizar

recursos naturales como petróleo, gas y agua subterránea. Esta información es esencial para la industria energética y de recursos hídricos.

El análisis de las variaciones en el subsuelo a través de datos obtenidos mediante radargramas permite identificar contaminantes presentes en el suelo y el agua subterránea, contribuyendo así a la protección ambiental y la salvaguarda de la salud pública. Esta técnica también resulta fundamental en la exploración de aguas subterráneas, ya que ofrece información precisa sobre la estructura geológica y la ubicación de las capas acuíferas. Además, la interpretación de estos datos facilita la detección de posibles obstáculos o barreras en el subsuelo que podrían interferir con los procesos de extracción de agua subterránea.

En síntesis, los radargramas representan una herramienta crucial en la exploración de aguas subterráneas gracias a su capacidad para ofrecer información precisa y detallada sobre la estructura geológica y la ubicación de las capas acuíferas. Su aplicación puede resultar más rentable y eficaz en comparación con otros métodos de exploración, lo que los convierte en un recurso especialmente útil para la gestión sostenible del agua.

### **1.3.3. Limitaciones de la investigación**

Los datos obtenidos mediante radargramas son sensibles a diversas condiciones ambientales, como la humedad, la temperatura y la salinidad del suelo, las cuales pueden influir en la calidad de la información y la precisión de las mediciones. Esta técnica resulta particularmente eficaz en profundidades relativamente superficiales. Sin embargo, la capacidad de exploración puede estar condicionada por factores como las propiedades del suelo, la frecuencia de la señal empleada y otros elementos asociados.

Los objetos metálicos en el subsuelo pueden generar interferencias en los datos radargrama, lo que puede dificultar la interpretación de los mismos. La interpretación de los datos radargrama puede ser compleja y requiere experiencia y habilidades especializadas. Además, la interpretación puede ser subjetiva y depende en gran medida de la práctica y habilidad del analista.

La aplicación de la técnica de radargramas puede implicar costos significativos, especialmente en proyectos de gran envergadura. Estos costos abarcan el empleo de herramientas como el GPR, Gepard, así como el equipo necesario para la adquisición y procesamiento de datos. Además, incluyen la capacitación de personal especializado y el análisis e interpretación de la información recopilada.

En síntesis, los radargramas constituyen una herramienta fundamental en la exploración de recursos naturales y en diversos ámbitos. Sin embargo, presentan ciertas limitaciones que deben tenerse en cuenta al interpretar los datos y diseñar estrategias de exploración. Su aplicación exige conocimientos sólidos en matemáticas y física para desarrollar o elaborar indicadores mediante el empleo de fórmulas.

## Capítulo II.

### 2. Marco Teórico

#### 2.1. Antecedentes

Existen numerosos trabajos que proporcionan una revisión exhaustiva sobre la aplicación del radar de penetración terrestre (en inglés, Ground-penetrating radar, GPR) en estudios del suelo. Según Zajícová y Chuman (2019) el GPR se emplea para estimar el contenido de agua en el suelo, analizar la estratigrafía de suelo y turba, así como identificar raíces de árboles. Además, los autores abordan técnicas más avanzadas de modelado numérico y destacan los beneficios potenciales del GPR en investigaciones relacionadas con el estudio del suelo. El GPR es una metodología geofísica que utiliza ondas electromagnéticas pulsadas para investigar el subsuelo y determinar sus propiedades.

Según Annan (2004) y Neal (2004), la propagación de ondas generadas por el GPR en un medio está influenciada principalmente por factores como la permitividad dieléctrica, la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética. En medios de baja pérdida, como suelos y maderas secas, la velocidad y la atenuación de las ondas GPR son determinadas principalmente por la permitividad dieléctrica y la conductividad eléctrica, mientras que la permeabilidad magnética suele ser despreciable (Davis, 2003).

Existen otros autores que discuten sobre los principios fundamentales del GPR y los avances recientes en su uso para investigar la estructura y propiedades de sedimentos y composición del subsuelo. El potencial del GPR en su poder de penetración en el subsuelo ayuda en la caracterización de depósitos geológicos como lo menciona (Conyers & Goodman, 1997).

De acuerdo con Belina et al., (2012), las estrategias actuales para la inversión de formas de onda en georadar cruzado se fundamentan en la presunción de que los parámetros constitutivos electromagnéticos son independientes de la frecuencia. No obstante, en la práctica, estos parámetros son conocidos por depender de la frecuencia y presentar

características complejas, lo que puede dar lugar a un comportamiento significativamente dispersivo en los datos de GPR recopilados.

Recientemente, Klotzsche et al. (2019) utilizó la forma de inversión de onda completa para caracterizar el dominio saturado de varios acuíferos diferentes basándose en mapas de permitividad altamente resueltos a escala de decímetro. Hasta ahora no era posible invertir todo el rango de profundidad del sistema suelo-acuífero variablemente saturado, incluyendo la parte saturada y no saturada del subsuelo debido al alto contraste medio entre la zona saturada y no saturada y las diferencias en los rellenos de los pozos.

Klotzsche et al. (2019), propone una forma de inversión de onda completa de GPR en cruz que invierte simultáneamente tanto para la parte saturada como para la no saturada del subsuelo. Se demostró que la nueva inversión de forma de onda completa de GPR para sistemas suelo-acuífero de saturación variable para diferentes rellenos de pozos se puede utilizar para obtener imágenes de todo el rango de profundidad desde la zona crítica y se puede aplicar a un amplio campo de aplicaciones.

En un GPR, una antena emite ondas electromagnéticas que se introducen en el subsuelo y se reflejan en las discontinuidades de las propiedades del terreno. Estas ondas son detectadas por otra antena y se procesan para obtener información sobre la estructura y las propiedades del subsuelo. Los radargramas, por otro lado, muestran la señal registrada por el GPR en función de la profundidad y el tiempo y son utilizadas para identificar las capas y estructuras del subsuelo y para estimar las propiedades de los materiales bajo tierra (Conyers, 2013).

El radargrama es un tipo de representación gráfica utilizada en geofísica para mostrar las reflexiones de ondas de radio emitidas por un radar en la subsuperficie terrestre. En el radargrama, el eje de las ordenadas corresponde la profundidad y el eje de las abscisas representa la distancia recorrida por la señal del radar (M. L. Jol et al., 2014).

En palabras simples, un radargrama es una imagen bidimensional que muestra la intensidad de la onda de radar recibida en dos dimensiones espaciales (distancia y profundidad). En términos de estudios sobre el radargrama en subsuelos, se han realizado

investigaciones en diferentes campos y con diferentes objetivos. Algunos ejemplos incluyen: Estudios geológicos, estudios hidrológicos, Estudios arqueológicos y Estudios geotécnicos. En el estudio Hoback et al. (2016), describe la tomografía de resistividad eléctrica (en inglés, Electrical Resistivity Tomography, ERT) para mapear la heterogeneidad de la raíz, el tronco y la humedad del suelo en una plantación de árboles de nuez en Nebraska, Estados Unidos.

El estudio reveló que la ERT es una técnica eficaz para identificar la variabilidad espacial en la densidad de raíces y la humedad del suelo, lo que puede contribuir a optimizar la gestión de cultivos y a prevenir la propagación de enfermedades en los árboles. En términos generales, los hallazgos destacan el potencial de la ERT para profundizar en la comprensión de la interacción entre las plantas y el entorno subterráneo.

Kovacs et al., (1995), analizó los sondeos de radar realizados en una plataforma de hielo McMurdo, Antártida, y comparó las determinaciones de constantes dieléctricas resultantes con la ecuación de Robin, mediciones de laboratorio en hielo y nieve y otras expresiones dadas en la literatura para determinar la permitividad dieléctrica relativa vs la gravedad específica de la nieve seca y el hielo. Los hallazgos encontrados indican que la forma de la ecuación de Robin es válida.

En esta investigación se realiza un análisis teórico y práctico de la variación del subsuelo de dos bofedales a diferentes profundidades para la microfrecuencia Apacheta, a partir del análisis de los datos radargrama en valores de onda reflejada que son convertidos a valores de PD para la interpretación de las texturas que componen el subsuelo de un bofedal. A pesar de ser una técnica geofísica útil, también son discutidas sus brechas y limitaciones como: profundidad de investigación limitada, dependencia de la composición y propiedades del suelo, interferencia de objetos cercanos e interpretación de la señal.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Fundamentos de Ondas Electromagnéticas**

Las ondas electromagnéticas (OEM) se compone de los vectores de campo eléctrico ( $\vec{E}$ ) y campo magnético ( $\vec{B}$ ), ambos perpendiculares y ortogonales entre sí en dirección de su

propagación. La información del  $\vec{E}$  también está contenida en  $\vec{D}$ , donde  $\vec{E}$  es la intensidad del campo eléctrico y  $\vec{D}$  el desplazamiento eléctrico o densidad de flujo eléctrico. Las OEM están vinculados con las ecuaciones de Maxwell, que se forman al incrementar la velocidad de las cargas en movimiento de un lado a otro, generando  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  oscilantes, estas ondas viajan a la velocidad de la luz ( $c$ ) y suelen transportar energía electromagnética.

Las ecuaciones de James Clerk Maxwell relacionan los  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$ , llamadas ecuaciones constitutivas, a través del vector  $\vec{D}$  y la inducción magnética  $\vec{H}$ , donde la suma de dos soluciones a estas ecuaciones también genera una solución. Las ecuaciones formuladas por J.C. Maxwell constituyen un conjunto de cuatro ecuaciones diferenciales parciales que explican y describen las interacciones fundamentales del electromagnetismo.

1. Ley de Gauss: Establece una relación entre la distribución de la carga eléctrica y el campo eléctrico generado por dicha carga. Conociendo la forma del objeto y la manera en que se distribuye la carga, es posible emplear esta ley para derivar una expresión del campo eléctrico. Su aplicación es especialmente útil en situaciones donde existe algún grado de simetría, ya que esto simplifica considerablemente el cálculo de la ecuación.

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.1)$$

2. Ley de Gauss para el magnetismo: establece que los monopolos magnéticos no existen. En esencia, se utiliza como una afirmación fundamental para derivar expresiones en este campo. En el magnetismo, la presencia de un polo sur implica necesariamente la existencia de un polo norte asociado, ya que, hasta la fecha, no se ha descubierto ningún monopolo magnético aislado.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.2)$$

3. Ley de Faraday: postula que cualquier variación en el entorno magnético de una bobina de alambre genera la inducción de un voltaje en dicha bobina. Cambios en la intensidad del campo magnético, el movimiento del imán, el desplazamiento de la bobina o su rotación, son factores que pueden inducir un voltaje en la bobina.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{M} \quad (\text{Ley de Faraday}) \quad (2.3)$$

4. Ley de Ampere: establece que el campo magnético generado por una corriente eléctrica es directamente proporcional a la magnitud de dicha corriente, siendo la constante de proporcionalidad la permeabilidad del espacio libre. Mientras que las cargas estacionarias producen campos eléctricos proporcionales a su magnitud, las cargas en movimiento generan campos magnéticos, cuya intensidad está relacionada con la corriente eléctrica, es decir, la combinación de la carga y su movimiento.

$$\nabla \times \vec{H} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (\text{Ley de Ampere - Maxwell}) \quad (2.4)$$

Donde:  $\vec{E}$ , es el vector de intensidad de campo eléctrico;  $\vec{B}$ , es el vector de densidad de flujo magnético;  $\vec{D}$ , vector desplazamiento eléctrico;  $\vec{H}$ , es la intensidad de campo magnético,  $\rho$  es la densidad de carga eléctrica;  $\vec{J}$ , es el vector de densidad de corriente eléctrica;  $\vec{M}$  es el vector de densidad magnética.

Las ecuaciones de Maxwell, combinadas con las ecuaciones de continuidad, son fundamentales para entender las interacciones de las OEM y su propagación a través de diferentes medios, de las cuales se derivan las siguientes formulaciones:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.6)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.7)$$

Donde  $\epsilon$ ,  $\mu$ , y  $\sigma$  describen las propiedades físicas de un medio específico por donde se desplaza la OEM. La conductividad eléctrica,  $\sigma$ , se refiere a la capacidad esencial que tiene un material de conducir corriente eléctrica. La permitividad dieléctrica,  $\epsilon$ , se refiere a la capacidad de polarización que tiene un medio en presencia de  $\vec{E}$ , y la permeabilidad magnética,  $\mu$ , mide la capacidad de un medio en atraer  $\vec{B}$ .

La OEM al propagarse depende de su medio físico, en el vacío  $c = 3 \times 10^8$  m/s y en un medio cualquiera, la magnitud de su velocidad es:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.6)$$

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

Las propiedades del material que controlan el proceder de la energía electromagnética en un medio son la  $\epsilon_r$ , la  $\sigma$  y la  $\mu$ . Las permitividades dieléctricas reales e imaginarias se mencionan en regiones donde no hay materia ni campos electromagnéticos se mide en unidades de capacitancia eléctrica (faradios) por metro. En cuanto al GPR, las pérdidas de energía más importantes basadas en la conducción se producen debido al transporte de carga iónica en el agua y a los procesos electroquímicos (Neal, 2004).

### 2.2.2. Dispersiones comunes en GPR

Sea una superficie lisa entre el aire y un medio con  $\epsilon_r \geq 1$  (también llamada permitividad dieléctrica relativa), entonces la resistencia de dispersión de la superficie depende de su rugosidad y de  $\epsilon_r$  del material a partir del cual se produce la dispersión. Cuando incide una OEM en un medio no toda la energía incidente se refleja, algunos son transmitidos al medio. Si la OEM transmitida no encuentra ninguna variación posterior en las propiedades dieléctricas del medio, continuará avanzando, gradualmente será absorbido por las pérdidas. Si el medio contiene discontinuidades dieléctricas incrustadas, la onda se dispersa. Para nuestro caso lo que nos interesa es el componente reflejado desde la interfaz, ya que al medir se espera determinar las propiedades del material de la superficie. La densidad de potencia reflejada en relación con la densidad de potencia incidente se describe mediante el coeficiente de reflexión de potencia, representado como (Hinostroza, 2022)

$$R = |\rho'|^2 \quad (2.7)$$

donde  $\rho'$  se denomina coeficiente de reflexión de Fresnel de la interfaz aire-superficie. Si se relaciona el campo eléctrico reflejado con respecto al incidente, se tiene:

$$\rho' = \frac{|\vec{E}_r|}{|\vec{E}_i|} \quad (2.8)$$

Donde la magnitud del campo eléctrico ( $|\vec{E}| = E$ ) monocromático en el tiempo-espacio  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$  se define como:

$$E(r, t) = \text{Re}[E(r)e^{j\omega t}] \quad (2.9)$$

De manera general, una onda plana monocromática con una amplitud compleja constante  $\mathbf{E}_0$ , tiene la forma  $\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_0 e^{-j\mathbf{k}\mathbf{r}}$ , que se propaga en dirección del vector de onda  $\mathbf{k}$ .

### 2.2.3. Reflexiones de GPR en el subsuelo

Las pérdidas por conducción también pueden depender de la frecuencia. Para materiales terrestres típicos, por debajo de una frecuencia de transición entre los 10 a 300 MHz, las pérdidas de energía debido a  $\sigma$  superan ampliamente la energía almacenada por procesos de polarización y la propagación será dispersiva. Esto limita las aplicaciones de baja frecuencia del GPR. Por encima de la frecuencia de transición, las pérdidas de energía debido a la conducción son aproximadamente independientes de la frecuencia. La mayoría de los sistemas GPR están diseñados para funcionar en un intervalo de frecuencia, que va desde los 50 MHz a 1.0 GHz (Neal, 2004).

Además de las pérdidas de energía debido a los parámetros físico  $\epsilon, \sigma, \mu$  y a la dispersión, también ocurren por distancias geométricas. La magnitud de la velocidad ( $v$ ) de una OEM está en función de su frecuencia ( $f$ ), la velocidad de la luz en el espacio libre ( $C_0$ ), la  $\epsilon_r$ , la  $\mu_r$  y  $\sigma$  de un medio específico. Matemáticamente, se define como:

$$v = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r \left( \frac{1 + \sqrt{1 + (\sigma / \omega \epsilon)^2}}{2} \right)}} \quad (2.10)$$

donde  $c_0$  es la velocidad de la OEM en el vacío, y  $\sigma/\omega\epsilon$  es un factor de pérdida, donde  $\omega = 2\pi f$  es la frecuencia angular ( $\text{rad s}^{-1}$ ). Para materiales de baja pérdida, se supone que  $\sigma / \omega \epsilon \approx 0$  (Neal, 2004). La ecuación (2.10) se puede escribir de manera simplificada como:

$$v = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.11)$$

La influencia de  $\mu_r$  se supone despreciable y se le asigna un valor correspondiente al material no magnético ( $\mu_r = 1$ ). Cuando las OEM se propaga a través de un medio, su amplitud ( $A$ ) decae exponencialmente desde su valor inicial ( $A_0$ ) a medida que recorre una distancia  $z$ ,  $A = A_0 e^{-\alpha z}$ , donde  $\alpha$  es la constante de atenuación. Para materiales de baja

pérdida, esta constante es independiente de la frecuencia, entonces  $\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\mu / \varepsilon}$  (Reynolds, 1997).

Por lo general, en rocas, sedimentos y suelos, una menor  $\varepsilon$  resulta en una mayor  $\nu$  y una menor  $\sigma$  resulta en una menor  $\alpha$ . Sin embargo, estas relaciones se descomponen si las suposiciones mencionadas anteriormente se violan, por ejemplo, al introducir sustancias de alta conductividad, como agua salada y ciertos tipos de arcillas, o cantidades significativas de material magnético, como magnetita o hematita (Neal, 2004).

Si una OEM emitida muestra discontinuidad significativa en el subsuelo con respecto a  $\varepsilon_r$ ,  $\mu_r$  o  $\sigma$ , parte de la energía se refleja de manera proporcional a la magnitud del cambio (Reynolds, 1997; Van Dam, 2001). La cantidad de energía reflejada, en relación a la amplitud de la OEM, se da por el coeficiente de reflexión ( $R$ ). Suponiendo que los contrastes de  $\sigma$  y  $\mu_r$  son despreciables, entonces:

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r_2}} - \sqrt{\varepsilon_{r_1}}}{\sqrt{\varepsilon_{r_2}} + \sqrt{\varepsilon_{r_1}}} = \frac{\nu_2 - \nu_1}{\nu_2 + \nu_1} \quad (2.12)$$

donde  $\varepsilon_{r_1}$  y  $\varepsilon_{r_2}$  son la permitividad dieléctrica relativa de las capas adyacentes 1 y 2. El valor de  $R$  varía de +1 a -1. La Tabla I muestra algunos ejemplos de permitividad dieléctrica relativa ( $\varepsilon_r$ ).

Por otro lado, veamos el coeficiente de reflexión ( $R$ ) en términos de la amplitud de onda reflejada por el medio ( $A_m$ ), según Redman et al. (2002), la magnitud del coeficiente de reflexión en una ubicación determinada es la relación entre la amplitud  $A_0$  de la OEM reflejada en esa ubicación y la amplitud  $A_m$  de una OEM medida en la misma elevación sobre un objetivo de medio de propiedades diferentes al vacío.

$$A_m^2 R = A_0^2 \quad (2.13)$$

Donde  $A_m$  son las amplitudes de la OEM reflejada medidas para la reflexión de cualquier medio y  $A_0$  es la amplitud de la OEM reflejada en la superficie del material estudiado. Luego considerando que la permitividad dieléctrica en el aire es igual a 1.00059

y reemplazando la ecuación 2.12 en 2.13 la permitividad dieléctrica del subsuelo  $\varepsilon_{r_2}$  puede determinarse de la siguiente manera:

$$A_0^2 = A_m^2 \frac{\sqrt{\varepsilon_{r_2}} - 1}{\sqrt{\varepsilon_{r_2}} + 1} \quad (2.14)$$

$$\sqrt{\varepsilon_{r_2}} = \left(\frac{A_0}{A_m}\right)^2 (\sqrt{\varepsilon_{r_2}} + 1) + 1$$

$$\sqrt{\varepsilon_{r_2}} = \left(\frac{A_0}{A_m}\right)^2 (\sqrt{\varepsilon_{r_2}}) + \left(\frac{A_0}{A_m}\right)^2 + 1$$

$$\sqrt{\varepsilon_{r_2}} - \left(\frac{A_0}{A_m}\right)^2 (\sqrt{\varepsilon_{r_2}}) = \left(\frac{A_0}{A_m}\right)^2 + 1$$

$$\sqrt{\varepsilon_{r_2}} \left(1 - \left(\frac{A_0}{A_m}\right)^2\right) = \left(\frac{A_0}{A_m}\right)^2 + 1$$

$$\sqrt{\varepsilon_{r_2}} = \frac{\left(\frac{A_0}{A_m}\right)^2 + 1}{1 - \left(\frac{A_0}{A_m}\right)^2} \quad (2.15)$$

Despejando lo simplificado la ecuación anterior (ecuación 2.15) tenemos

$$\sqrt{\varepsilon_{r_2}} = \left(\frac{A_0^2 + A_m^2}{A_0^2 - A_m^2}\right) \quad (2.16)$$

Ordenando y extrayendo la raíz cuadrada de la ecuación 2.16 tenemos:

$$\varepsilon_{r_2} = \left(\frac{A_0^2 + A_m^2}{A_0^2 - A_m^2}\right)^2 = \left(\frac{1 + \frac{A_m^2}{A_0^2}}{1 - \frac{A_m^2}{A_0^2}}\right)^2 \quad (2.17)$$

De esa forma la ecuación 2.17 relaciona la permitividad relativa de una capa de subsuelo ( $\varepsilon_{r_2}$ ) a una determinada profundidad con las amplitudes de dos señales, una detectada ( $A_m$ ) y otra correspondiente a un reflector perfecto ( $A_0$ ), generalmente una amplitud de onda reflejada máxima.

La ecuación se utiliza para calcular la permitividad dieléctrica relativa del suelo a partir de la medición de las amplitudes de las señales. En términos más específicos, la  $\varepsilon_{r_2}$  es

una propiedad que indica cuánto se opone el suelo al campo eléctrico, en comparación con el vacío. De esta forma la ecuación 2.17 permite calcular los valores de la  $\epsilon_{r_2}$  en el subsuelo de un bofedal a diferentes profundidades.

La amplitud detectada ( $A_m$ ) es siempre menor que la amplitud correspondiente a un reflector perfecto ( $A_0$ ) debido a la atenuación y dispersión de la señal electromagnética mientras se propaga a través del suelo e interactúa con los objetos y las capas del subsuelo (Liu, 2017).

A partir de la ecuación 2.17 y tomando como referencia el valor de la permitividad dieléctrica del aire  $\epsilon_{\text{aire}} = 1.00059$ , además de los valores de la amplitud de onda reflejada  $A_0 = 71.6$  de los radargramas obtenidos en las prospecciones de los transectos T1 y T2 de los perfiles verticales de los bofedales muestreados en la microcuenca Apacheta, se obtiene una fórmula que calcula la permitividad dieléctrica del medio ( $\epsilon_m$ ) prospectado a diferentes profundidades (Moncada, et al. 2024):

$$\epsilon_m = 1.00059 * \frac{((71.6)^2 + A_m^2)^2}{((71.6)^2 - A_m^2)^2} \quad (2.18)$$

Donde  $A_m$  es la amplitud de onda de radar reflejada o detectada a diversa profundidades dentro del perfil vertical del radargrama del subsuelo prospectado.

De acuerdo con el valor de  $\epsilon_m$  que se logre calcular con la ecuación 2.18 se podrá distinguir las diferentes texturas o materiales que componen la estratigrafía del subsuelo del perfil vertical prospectado con el GPR, Gepard. Dichos valores de  $\epsilon_m$  estimados de los datos radargrama se comparan con los datos de  $\epsilon_r$  que se detallan en la tabla 2.1, donde se ha recogido un número significativo de rangos de valores estandarizados de la permitividad dieléctrica relativa de algunos materiales o texturas de suelo extraídos de NEAL (2004) y adaptados de los datos disponibles en Conyers & Goodman (1997).

Tabla 2.1.

Permitividad dieléctrica relativa para distintos tipos de materiales.

<b>Textura</b>	<b>Permitividad dieléctrica relativa (<math>\epsilon_r</math>)</b>
Aire	1
Arcilla seca	3

Arcilla húmeda	8 - 15
Arcilla limosa	15 - 30
Asfalto	3 - 5
Barro húmedo	5 - 40
Limo seco	3 - 10
Limo saturado	10 - 40
Grava	< 8
Grava arenosa saturada	15 - 20
Granito	5 - 15
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	3 - 5
Piedra arenisca	5-10
Nieve	6-12
Suelo arcilloso seco	4-10
Hielo	3 - 4
Carbón	4 - 5
Suelo boscoso	12
Suelo de cultivo	15
Concreto	6
Permanfrost	4 - 5

---

*Fuente:* Datos extraídos de (NEAL, 2004); (modificado de Conyers & Goodman, 1997).

## **2.3. Bases conceptuales**

### **2.3.1. Radar de Penetración Terrestre (GPR)**

El radar de penetración terrestre (GPR, por sus siglas en inglés) es una herramienta en el campo de la geofísica diseñada para analizar la estructura y características del subsuelo. Funciona mediante el envío y recepción de ondas electromagnéticas. Su origen radica en los conceptos básicos del radar, una tecnología perfeccionada durante la Segunda Guerra Mundial para identificar aviones y embarcaciones hostiles. Posteriormente, se adaptó para la detección de objetos utilizando ondas de radio de alta frecuencia.

El primer uso documentado del GPR en la exploración del subsuelo fue en la década de 1950 por geofísicos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas

en inglés) que buscaban agua subterránea. En la actualidad, el GPR es una herramienta común en la exploración geofísica y se utiliza para una amplia variedad de aplicaciones, desde la detección de tuberías subterráneas hasta la evaluación de la estructura de los puentes y la identificación de sitios arqueológicos (L. B. Conyers & Goodman, 1997).

El radargrama consiste en una representación visual en dos dimensiones que muestra los datos obtenidos por el GPR en un análisis del subsuelo. El uso de radargramas para interpretar la información del GPR comenzó en la década de 1970. El desarrollo de software específico para este propósito ha permitido importantes avances en la capacidad de los geofísicos para comprender la estructura del subsuelo. Con el progreso de la tecnología del GPR, también han evolucionado las técnicas para interpretar estos radargramas. Hoy en día, los especialistas en geología emplean diversas herramientas de procesamiento y visualización de datos, como la migración de señales, el filtrado y la correlación de datos, para extraer información más detallada del GPR (Jol & Bristow, 2003).

### **2.3.2. Principios físicos de funcionamiento del GPR**

El GPR, es una técnica geofísica que emplea OEM para representar la estructura del subsuelo. Su funcionamiento se basa en transmitir una señal electromagnética de alta frecuencia hacia el subsuelo, donde interactúa con las distintas capas y materiales. Estas interacciones generan reflexiones que son captadas por un receptor ubicado en la superficie. A partir de estas señales reflejadas, se crea una representación gráfica del subsuelo conocida como radargrama.

Cuando la señal electromagnética encuentra un límite entre materiales con distintas propiedades eléctricas, como entre una capa de suelo y una roca, una parte de la señal se refleja hacia la superficie. El receptor del radar de penetración terrestre (GPR) capta esta señal reflejada, que luego se emplea para generar el radargrama. La velocidad con la que la señal se propaga en el subsuelo depende de las características eléctricas de los materiales que atraviesa, lo que permite al GPR identificar cambios en la composición y estructura del subsuelo. La amplitud y el tiempo de retorno de la señal reflejada brindan información sobre

la profundidad y posición de las interfaces entre diferentes capas y materiales (Daniels, 2004).

Las mediciones realizadas mediante GPR han encontrado aplicaciones en un amplio rango de campos geofísicos, tales como la exploración geológica, la arqueología, la ingeniería civil y los estudios hidrológicos (Bano et al., 2016; M. Sato et al., 2017; Yang et al., 2020). El GPR opera enviando pulsos de ondas electromagnéticas hacia el subsuelo, los cuales se reflejan al encontrar capas con propiedades dieléctricas distintas. La información sobre el tiempo de retorno y la intensidad de las señales reflejadas permite generar una representación visual de las estructuras internas del terreno (Jol, 2009).

La exactitud y el nivel de detalle de las mediciones realizadas con GPR están determinados por múltiples variables, incluyendo la frecuencia utilizada, longitud de onda, diseño de la antena y características del material del subsuelo (Hayashi et al., 2018; Luo et al., 2016). En ese sentido, el procesamiento de las señales GPR puede incluir técnicas avanzadas de filtrado y análisis, como la migración de la imagen y la inversión de datos Jol, 2009; Siemon & Slater, 2016).

La aplicación del GPR en investigaciones hidrológicas se ha enfocado principalmente en evaluar la humedad presente en el suelo, analizar la distribución de la porosidad y localizar capas de material impermeable (Chen et al., 2020; Pan et al., 2019; Wagner et al., 2015). Las mediciones con GPR también han sido utilizadas para identificar el nivel freático y la estructura de los acuíferos (Alumbaugh et al., 2016; Loke, 2013).

Figura 2.1.

Variedad de Georadares GPR-Ground Penetrating Radar.



Fuente: ABC Geotechnical Consulting

La técnica del radargrama se ha empleado extensamente en la identificación de agua subterránea. Este método genera una representación bidimensional basada en las reflexiones de ondas electromagnéticas de alta frecuencia que atraviesan el suelo. Las señales emitidas interactúan con las diversas capas del terreno y producen reflexiones, las cuales varían al encontrarse con interfaces entre capas que presentan diferentes niveles de conductividad eléctrica, como ocurre en el caso del agua subterránea (Sato et al., 2013).

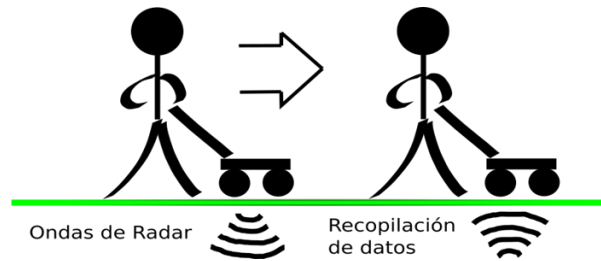
El análisis de los radargramas se basa en la detección de reflectores, los cuales pueden originarse debido a la presencia de agua subterránea, entre otros elementos. Las características de los reflectores, como su profundidad, forma y amplitud, ofrecen datos valiosos acerca de la cantidad y calidad del agua subterránea (S. Groom et al., 2008).

La calidad de la resolución espacial y la capacidad de penetración del radar dependen de factores como el diseño de la antena, la frecuencia y la longitud de onda empleadas durante la recolección de datos. Por lo general, las antenas que operan con frecuencias altas ofrecen una mejor resolución espacial, aunque tienen menor alcance de penetración. En contraste, las antenas de frecuencias bajas logran mayor penetración en el subsuelo, pero con una resolución espacial reducida (Moghadas et al., 2018).

La Figura 2.2 ilustra un ejemplo práctico de la aplicación de la técnica del radargrama. Asimismo, la interpretación de estas imágenes puede optimizarse mediante el empleo de técnicas avanzadas de procesamiento de señales, como la migración de fase y la corrección de atenuación, las cuales ayudan a minimizar interferencias y a mejorar la calidad y resolución de la imagen obtenida (Alcántara et al., 2014).

Figura 2.2.

Técnica del Radargrama emitiendo ondas y recopilando datos del subsuelo.



El uso de la tecnología de radar para la prospección de agua subterránea se basa en la teoría electromagnética y la propagación de OEM a través de medios heterogéneos (tipos de materiales o sustancias en un medio). El radar utiliza OEM de alta frecuencia para detectar objetos y estructuras subterráneas. Römer y Mester (2008) realizaron un estudio de radar en el campo para la detección de aguas subterráneas en un acuífero sedimentario. Se utilizó un sistema de GPR con una frecuencia de operación de 200 MHz para investigar las propiedades del subsuelo y detectar la ubicación de la interfaz entre el agua subterránea y la capa de suelo (Römer & Mester, 2008).

Las propiedades dieléctricas del medio también son esenciales para la propagación de las OEM y para la detección de objetos y estructuras subterráneas. Las propiedades dieléctricas están relacionadas con la capacidad del medio para acopiar energía eléctrica y se expresan como la constante dieléctrica relativa ( $\epsilon_r$ ) y la pérdida dieléctrica ( $\tan\delta$ ).

Los materiales con alta  $\epsilon_r$  y baja  $\tan\delta$  son buenos conductores de ondas electromagnéticas, mientras que los materiales con baja  $\epsilon_r$  y alta  $\tan\delta$  son malos conductores. Groom y Holbrook (2013) realizaron un estudio de radar para la prospección de agua subterránea en un acuífero de arena. Utilizaron 500 MHz para detectar la ubicación y las propiedades de la interfaz entre el agua subterránea y la capa de suelo. Se encontró que las propiedades dieléctricas del agua subterránea y la arena eran significativamente diferentes (Groom & Holbrook, 2013).

La atenuación de la señal es un fenómeno importante que limita la profundidad de detección del GPR y afecta la resolución espacial de las imágenes. La atenuación de la OEM está en función de la frecuencia de operación del radar, la distancia de propagación, las propiedades dieléctricas del medio y la geometría del objeto o la estructura subterránea (LIN et al., 2018).

En estudios de bofedales (Figura 2.3) de aguas subterráneas, según Soto et al. (2013), el GPR es capaz de penetrar el subsuelo y registrar las reflexiones de las OEM generadas por equipos en las interfaces entre las diferentes capas de suelo y las aguas subterráneas. Estas reflexiones se muestran en el radargrama para identificar la profundidad y la distribución del agua subterránea en el subsuelo de bofedal.

Figura 2.3.

Ecosistemas de humedales altoandinos o Bofedales, son zonas de recarga hídrica que contienen vegetación característica y gran material orgánico en las capas superficiales, además de turberas.



Por su parte López et al. (2015) señalan que la calidad de las imágenes generadas mediante el radar de penetración terrestre (GPR) está determinada por factores como la frecuencia de la señal emitida por el dispositivo, la velocidad con la que las ondas electromagnéticas se propagan a través del medio y las propiedades de conductividad eléctrica tanto del suelo como del agua subterránea. Otros autores como Sun et al. (2017) han utilizado la técnica de inversión de datos para mejorar la interpretación de los radargramas y obtener una mayor precisión en la localización y caracterización de las aguas subterráneas en Bofedales. La inversión de datos es una técnica matemática que utiliza un modelo físico del subsuelo y los datos obtenidos con GPR para estimar las propiedades hidrogeológicas del área.

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

El GPR se usa en diferentes campos de investigación para aplicaciones de exploración geofísica, ingeniería civil, arqueología, detección de objetos enterrados, entre otras.

- En geología: El GPR se utiliza para el estudio de la estructura del subsuelo y la identificación de fallas geológicas y depósitos de roca. Por ejemplo, el GPR se ha utilizado para identificar la estructura de una falla en la región de Malargüe, Argentina (Alcoba et al., 2019).
- En exploración geofísica: El GPR se utiliza para la investigación de la estructura y composición del subsuelo en busca de recursos naturales, como agua subterránea y depósitos de minerales. Por ejemplo, el GPR se ha utilizado para la detección de agua subterránea en zonas áridas en España (Lopez-Martinez et al., 2021).
- En medio ambiente: El GPR se emplea para analizar la contaminación del suelo y localizar fugas de sustancias químicas en entornos industriales. Un ejemplo de su aplicación es la detección de fugas de petróleo en una planta industrial ubicada en Canadá (Khan et al., 2019).
- En arqueología: El GPR se utiliza para la detección y mapeo de estructuras enterradas en sitios arqueológicos. Por ejemplo, el GPR se ha utilizado para identificar muros, tumbas y restos de edificios en la antigua ciudad de Herculano, Italia (Gambetta et al., 2020).

- En ingeniería civil: El GPR se utiliza para la evaluación de carreteras, puentes y estructuras de concreto, de manera no destructiva. Por ejemplo, el GPR se ha utilizado para la detección de fisuras y la evaluación del grosor del concreto en un puente en Japón (Kusakabe et al., 2019).

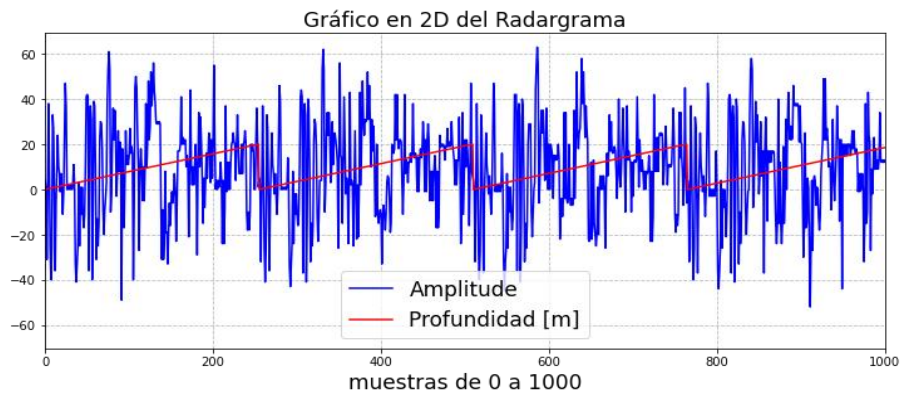
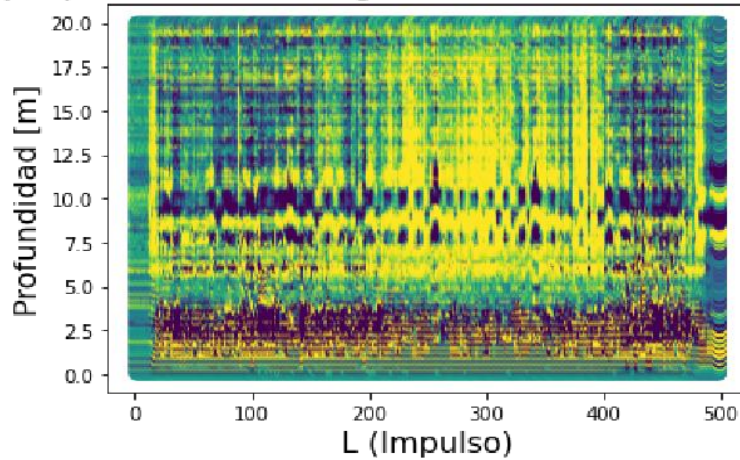
#### **2.3.4. Interpretación de los datos del GPR**

Un radargrama es una representación gráfica creada a partir de la información recopilada mediante un GPR, como se ilustra en la Figura 2.4. Esta información se presenta en forma de ondas de energía reflejadas por las distintas capas y objetos presentes en el subsuelo. Analizar estos datos requiere identificar patrones y características en las ondas reflejadas, lo que permite detectar la presencia de diversos materiales o estructuras en el terreno.

Figura 2.4.

Radargrama del perfil vertical prospectado con el GPR – Gepard en un bofedal de la microcuenca Apacheta localizado en el punto latitud = -13.39122; longitud = -74.69844.

### Ejemplo de datos Radargrama en Bofedales de Apacheta



Entre las características que se analizan en los radargramas se encuentran las variaciones en la reflectividad, los cambios en la velocidad de propagación de la OEM, los patrones de atenuación de la energía y la presencia de áreas con sombras o interferencias. Estos patrones son útiles para identificar elementos del subsuelo, como capas de terreno, agua subterránea, formaciones rocosas, raíces de árboles, tuberías, cimientos y otros objetos enterrados.

Si se realiza un estudio GPR en un área de terreno para determinar la profundidad de una capa del bofedal al usar un equipo de GPR, se envía impulsos de OEM (ondas electromagnéticas) al subsuelo a través de una antena. Algunas ondas se reflejarán en la capa del bofedal y volverán a la antena del radar. Estas ondas reflejadas se registran en una imagen llamada radargrama (Figura 4), que son amplitudes de ondas reflejadas en función del tiempo que tardaron en regresar a la antena del radar. La profundidad de la capa de roca se puede determinar midiendo el tiempo que tardan las ondas en rebotar en la capa y regresar a la

antena. En el radargrama, la capa del bofedal aparecerá como una línea horizontal que se encuentra en un cierto tiempo.

### **2.3.5. Características Comunes de los Datos Generados por un GPR**

Estas características son importantes para comprender y analizar los datos generados por un sistema GPR, ya que pueden proporcionar información sobre la resolución espacial, la profundidad de detección y la ubicación geográfica de los objetos o cambios en el subsuelo.

- **L (Impulse):** Es la duración del impulso electromagnético que se emite desde la antena. Esta característica influye en la resolución vertical del GPR, ya que el impulso más corto permite detectar objetos a menor profundidad, pero con menor calidad de imagen.
- **L-Unit:** Esta característica se refiere a la unidad de medida que describe la duración del impulso. Las unidades comunes incluyen nanosegundos (*ns*) y picosegundos (*ps*).
- **W (Line):** Es el ancho de la línea de adquisición de datos del GPR. Esta característica se refiere a la distancia entre cada una de las líneas de medición que se realizan durante la adquisición de datos del subsuelo.
- **W-Unit:** Esta característica se refiere a la unidad de medida que describe el ancho de la línea de adquisición. Las unidades comunes incluyen metros (*m*) y centímetros (*cm*).
- **Depth(m):** Es la profundidad a la que el sistema GPR puede detectar objetos o cambios en la composición del subsuelo. Esta característica está influenciada por varios factores, como la frecuencia de operación, el tipo de antena y la conductividad eléctrica del suelo.
- **Amplitude:** Es una amplitud de la OEM recibida por el GPR después de que se refleja en las diferentes capas y materiales bajo la superficie. Esta característica se utiliza para representar la intensidad de las reflexiones y, por lo tanto, la composición y estructura del subsuelo.
- **Latitude:** Indica la ubicación norte-sur de la medición de datos.
- **Longitude:** Indica la ubicación este-oeste de la medición de datos.

### 2.3.6. Interpolación Kriging

Su nombre proviene de Danie G. Krige, un geólogo sudafricano que desarrolló este método en la década de 1950. La idea principal detrás del Kriging es modelar la variabilidad espacial de los datos utilizando una combinación ponderada de valores observados en puntos cercanos. La técnica de interpolación Kriging se emplea en estadísticas espaciales y geoespaciales para estimar valores desconocidos en ubicaciones no muestreadas dentro de un conjunto de datos distribuidos espacialmente. Este método genera una superficie estimada basada en puntos dispersos con valores previamente conocidos. A diferencia de otros enfoques de interpolación, Kriging requiere un análisis detallado e interactivo del comportamiento espacial del fenómeno antes de determinar el método más adecuado para crear la superficie final (Oliver, 1990).

El método Kriging se basa en determinar una combinación lineal óptima de los valores medidos para predecir un valor desconocido en un punto específico. Esta técnica considera tanto la autocorrelación espacial, es decir, la relación entre los valores según su distancia, como la variabilidad local presente en los datos. En términos matemáticos, la fórmula general de Kriging se genera de una sumatoria de datos ponderados:

$$Z(s_i) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot Z(s_i) \quad (2.19)$$

Donde:  $Z(s_i)$ , es el valor medido en la ubicación (i);  $\lambda_i$  son los pesos para valor medido en (i);  $s_i$  es la ubicación de la predicción;  $N$  es el número de valores medidos.

Los pesos  $\lambda_i$  en Kriging se determinan considerando no solo la distancia entre los puntos muestreados y el lugar donde se realiza la predicción, sino también la distribución espacial global de los puntos medidos. Este enfoque es ampliamente empleado en disciplinas como la geología y la ciencia del suelo, ya que reconoce la existencia de una influencia espacialmente correlacionada, tanto en términos direccionales como de distancia, en los datos analizados (Royle, et. al. 1981).

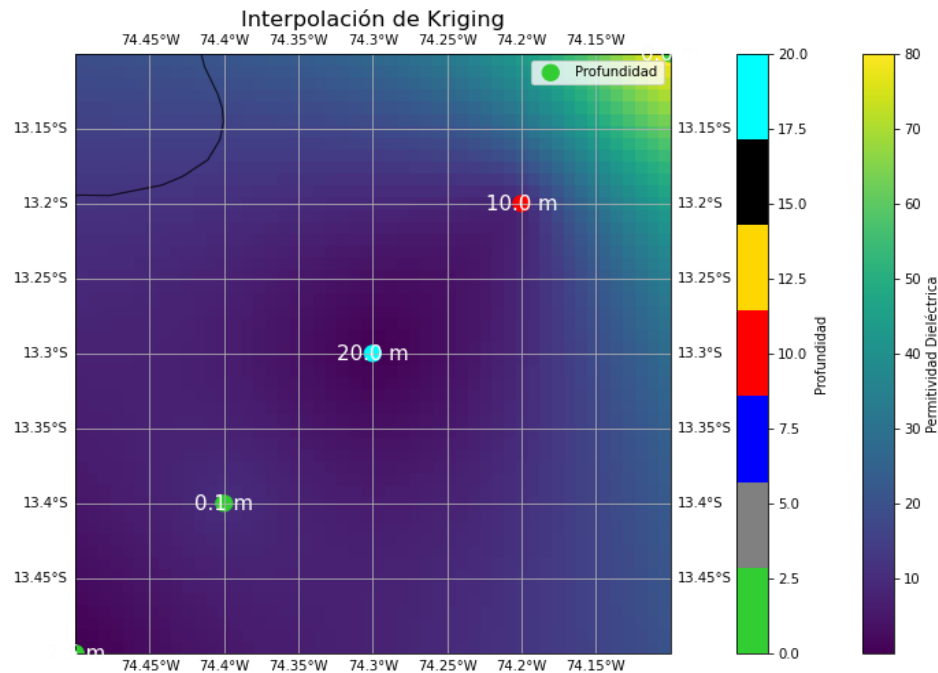
Por otro lado, Kriging Ordinario (OK) es una técnica esencial en estadísticas espaciales que se utiliza para interpolar valores desconocidos en puntos no muestreados

dentro de un conjunto de datos espacialmente distribuidos. El objetivo principal del OK es estimar valores en ubicaciones no observadas de manera imparcial y con la mínima varianza posible. Esto se logra asignando pesos a los valores observados en función de su distancia y crear una combinación ponderada que considere la autocorrelación espacial.

A diferencia de otros enfoques, el método de Kriging Ordinario (OK) considera tanto la variabilidad global como la local de los datos, lo que permite obtener estimaciones más precisas y representativas. Aunque este método asume que los datos son estacionarios, es decir, que sus propiedades estadísticas permanecen constantes en el espacio, su capacidad para identificar y reproducir patrones espaciales lo convierte en una herramienta esencial en áreas como la geología, la climatología y la ingeniería civil.

Figura 2.5.

Ejemplo de Interpolación Kriging (ordinario) de los datos radargrama correspondientes a un perfil vertical del subsuelo de un bofedal.

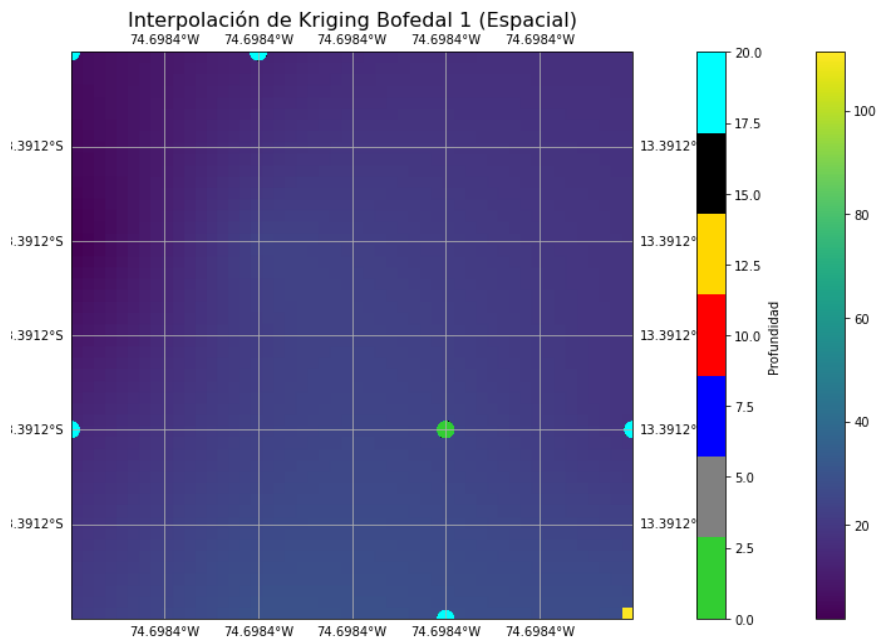


En un estudio realizado por (Henríquez et al., 2013), en Atirro, Costa Rica, se analizaron 138 muestras de suelo en 1011 ha para variables de fertilidad. Usando Kriging ordinario, se crearon mapas interpolados. La validación con "validación de campo" y

"validación cruzada" mostró coeficientes de correlación de 0,09 a 0,87 y 0,52 a 0,84 respectivamente. Ca y pH tuvieron mejor predicción. Aunque los mapas fueron útiles, se enfatiza la necesidad de verificaciones.

Figura 2.6.

Ejemplo de Interpolación de Kriging (ordinario) para el perfil vertical del subsuelo de un bofedal localizado en la microcuenca Apacheta.



### 2.3.7. Interpolación de la distancia inversa ponderada, IDW

La información obtenida a partir de los radargramas refleja la amplitud de las ondas de radar que son devueltas desde distintas profundidades en el subsuelo de un bofedal analizado. Para representar adecuadamente el comportamiento y la composición del perfil vertical del subsuelo en estas áreas, se requiere emplear un método de interpolación, como el de distancia inversa ponderada (Inverse Distance Weighting, IDW). Este enfoque permite calcular los valores de las celdas o cuadrículas mediante una combinación lineal ponderada de los puntos asociados a los datos de permitividad dieléctrica (Watson & Philip, 1985).

La función de ponderación se basa en la distancia inversa, lo que implica que los datos del radargrama del perfil vertical del bofedal que se interpola deben depender tanto de la ubicación como de la profundidad. Esta ponderación se asigna a los puntos muestreados a

diferentes profundidades utilizando un coeficiente que regula la disminución de la influencia de la ponderación a medida que aumenta la distancia hacia el punto nuevo. Un coeficiente de ponderación mayor reduce el impacto de los puntos más alejados del punto desconocido durante el proceso de interpolación. A medida que el coeficiente incrementa, los valores estimados para los puntos desconocidos tienden a acercarse a los valores de los puntos muestreados más próximos (Watson & Philip, 1985).

En la fórmula (2.20),  $\tilde{z}_j$  es el valor estimado para  $j$  (los puntos  $(i; j)$  son el par de coordenadas  $(x; y)$  donde hay una profundidad  $z_i$ ),  $n$  es el número de puntos usados en la interpolación,  $z_i$  es el valor en el punto  $i$ -ésimo,  $\beta$  es un exponente de ponderación que controla la manera como el peso disminuye con la distancia y  $k_{ij}$  corresponde al peso asociado a cada dato  $i$  en el cálculo de  $j$ , varían entre 0 y 1 para cada dato por lo cual la suma total de todos los  $k_{ij} = 1$ , es decir  $\sum_{i=1}^n k_{ij} = 1$ , se calcula de acuerdo con (Watson & Philip, 1985):

$$\tilde{z}_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{ij}^\beta}} = \frac{\sum_{i=1}^n k_{ij} z_i}{\sum_{i=1}^n k_{ij}} \quad (2.20)$$

En esta investigación se analizó la distribución espacial del perfil vertical de un bofedal prospectado en la microcuenca Apacheta, utilizando el GPR, Gepard, con un alcance de hasta 20 metros de profundidad. La información obtenida proviene de radargramas generados a partir de dos transectos T1 y T2 de 20 metros de longitud. Estos datos fueron procesados mediante el método de interpolación IDW, para clasificar y caracterizar la composición del subsuelo de cada bofedal (Watson & Philip, 1985).

### 2.3.8. Índice Kappa

Con el propósito de comparar las categorías de composición del subsuelo entre dos bofedales (tabla 4.1), se analizan las clases estimadas basadas en los rangos de valores de la permitividad dieléctrica, determinados mediante la ecuación 2.19. Estos valores se contrastan con los datos observados de permitividad dieléctrica presentados en la tabla 2.1. La correlación se establece considerando las similitudes reflejadas en la diagonal principal de la

matriz de convolución, junto con las diferencias identificadas por encima o por debajo de dicha diagonal, las cuales son fundamentales para calcular el índice Kappa (Sánchez, 2016).

$$K = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e} \quad (2.21)$$

Donde,  $P_0 = \sum_{i=1}^m p_{ii}$  es la proporción de acuerdos medidos en la clasificación de la composición del subsuelo en los transectos T1 y T2, y  $P_e = \sum_{i=1}^m p_{i*} p_{*i}$  es la proporción de acuerdos esperados por el azar.

Por lo tanto, para  $\alpha = 0.05$ , se concluye que si el p-valor  $< \alpha$ , el acuerdo entre evaluadores no se debe al azar. Por el contrario, si el p-valor  $> \alpha$ , el acuerdo entre ambos evaluadores se debe a probabilidades aleatorias. Por consiguiente, la interpretación del índice Kappa se basa en los intervalos establecidos en la tabla 2.2.

Tabla 2.2.

Interpretación del índice Kappa según sus rangos de valores.

<b>Valor del índice Kappa</b>	<b>Grado de acuerdo</b>
0.00 – 0.20	Pobre
0.20 – 0.40	Debil
0.40 – 0.60	Moderado
0.60 – 0.80	Bueno
0.80 – 1.00	Muy bueno

## **Capítulo III**

### **3. Material y Métodos**

#### **3.1. Hipótesis y Variables**

##### **3.1.1. Hipótesis General**

La variación de la composición del subsuelo de dos bofedales a diferentes profundidades mediante datos radargrama, en la microcuenca Apacheta - Ayacucho, es significativa.

##### **3.1.2. Hipótesis Específicas**

HE1: La composición del perfil vertical del subsuelo de dos bofedales de la microcuenca Apacheta a diferentes profundidades se determina de manera significativa a partir de la permitividad dieléctrica estimada de los datos radargrama.

HE2: La distribución espacial de la composición del subsuelo de dos bofedales varían de manera significativa a la misma profundidad en la microcuenca Apacheta, mediante la aplicación de algoritmos de interpolación.

#### **3.2. Variables**

Las variables son cuantitativas

X1: Datos radargrama

X2: Composición del subsuelo de dos bofedales

### 3.2.1. Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Tipo de variable	Escala de Medición	Instrumento
<b>X1: Datos radar- grama.</b>	Los radargramas son valores de amplitudes de onda de radar reflejada, que representa la composición del perfil vertical del subsuelo sobre las líneas prospectadas con GPR a diferentes profundidades.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Profundidad de penetración de las ondas electromagnéticas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Permitividad dieléctrica</li> <li>● Longitud de onda</li> <li>● Frecuencia</li> </ul>	Cuantitativo	Intervalo	Georadar de penetración terrestre, Gepard
<b>X2: Composición del subsuelo de dos bofedales.</b>	El subsuelo del bofedal contiene humedad saturada y presenta una diversa vegetación hidromórfica que generalmente se acumula en capas con el transcurso del tiempo	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Textura del subsuelo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Clasificación de la textura del suelo según escala de reflectancia</li> </ul>	Cuantitativo	Rango	Ecuaciones

### **3.5. Tipo y Nivel de Investigación**

#### **3.5.1. Tipo de Investigación**

Según su finalidad es: Aplicada

La investigación tiene como objetivo abordar cuestiones prácticas mediante el uso de principios científicos. En particular, busca comprender la composición del subsuelo de los bofedales, un aspecto esencial para la adecuada gestión, protección y conservación de los ecosistemas de humedales altoandinos, como los bofedales.

#### **3.5.2. Nivel de investigación**

Por su profundidad es: Descriptivo – Correlacional

Es descriptivo porque se enfoca en caracterizar la composición del subsuelo a diferentes profundidades y en distintas ubicaciones.

Es correlacional porque se enfoca en comparar los valores de las permitividades dieléctricas de la composición de dos perfiles verticales de subsuelo de bofedal.

### **3.6. Diseño de investigación**

No experimental y transversal.

Es no experimental, dado que no se manipulan variables de manera controlada, sino que se observan y analizan las condiciones existentes del subsuelo.

Es transversal, dado que los datos recolectados se dan en un solo momento en el tiempo, proporcionando una “instantánea” de la composición del subsuelo en los bofedales

### **3.7. Métodos de investigación**

Por el manejo de recolección de datos es: Cualitativo - Cuantitativo

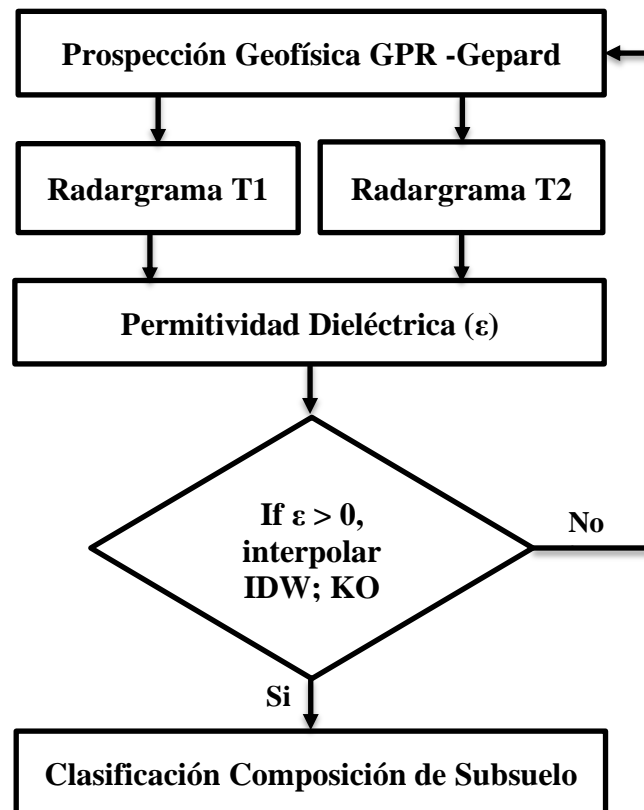
El método de investigación incluye varias etapas:

1. Recolección de Datos: Utilización del radar de penetración terrestre (GPR - Gepard) para obtener datos radargrama del subsuelo a diferentes profundidades.
2. Análisis de Datos: Estimación de la permitividad dieléctrica ( $\epsilon$ ) a partir de los datos radargrama para determinar la composición del perfil vertical del subsuelo (OE1).
3. Interpolación Espacial: Aplicación de algoritmos de interpolación para estimar la distribución espacial de la composición del subsuelo a la misma profundidad (OE2).

Este método facilita un análisis exhaustivo y exacto de la estructura y composición del subsuelo en los bofedales estudiados con el GPR, Gepard. La figura 3.1 presenta la metodología aplicada para procesar los datos obtenidos mediante radargramas en dos transectos T1 y T2 ubicados en la microcuenca Apacheta.

Figura 3.1.

Esquema metodológico de la clasificación de composición de subsuelo de bofedal



El procedimiento a seguir para la toma de datos a lo largo de dos transectos T1 y T2 en dos bofedales con el GPR – Gepard, consiste en realizar los siguientes pasos:

Paso 1: La prospección geofísica con el GPR sobre los dos Transectos T1 y T2 se realizó el 12 de octubre del 2022. Sobre la superficie de los bofedales muestreados se traza un transecto de 20 m de longitud en cada uno y sobre esa línea se realiza una prospección del perfil vertical del subsuelo con el GPR, Gepard (figura 3.2), hasta una profundidad de 20 m para ambos bofedales. Durante el recorrido las antenas del GPR se deben mantener a 5 cm separadas del suelo, se debe procurar caminar de manera lenta y constante. La Tablet que contienen el software debe permanecer cerca de la unidad de control del GPR con la finalidad de mantener clara la señal de contacto (Bluetooth) entre ambos dispositivos. A medida que se realiza la prospección la señal del radargrama aparece en la pantalla de la Tablet, culminada la prospección se genera una imagen del radargrama al igual que un archivo (.txt) conteniendo datos de valores de amplitud de onda de radar reflejada en cada capa del subsuelo de bofedal a diferentes profundidades.

Figura 3.2.

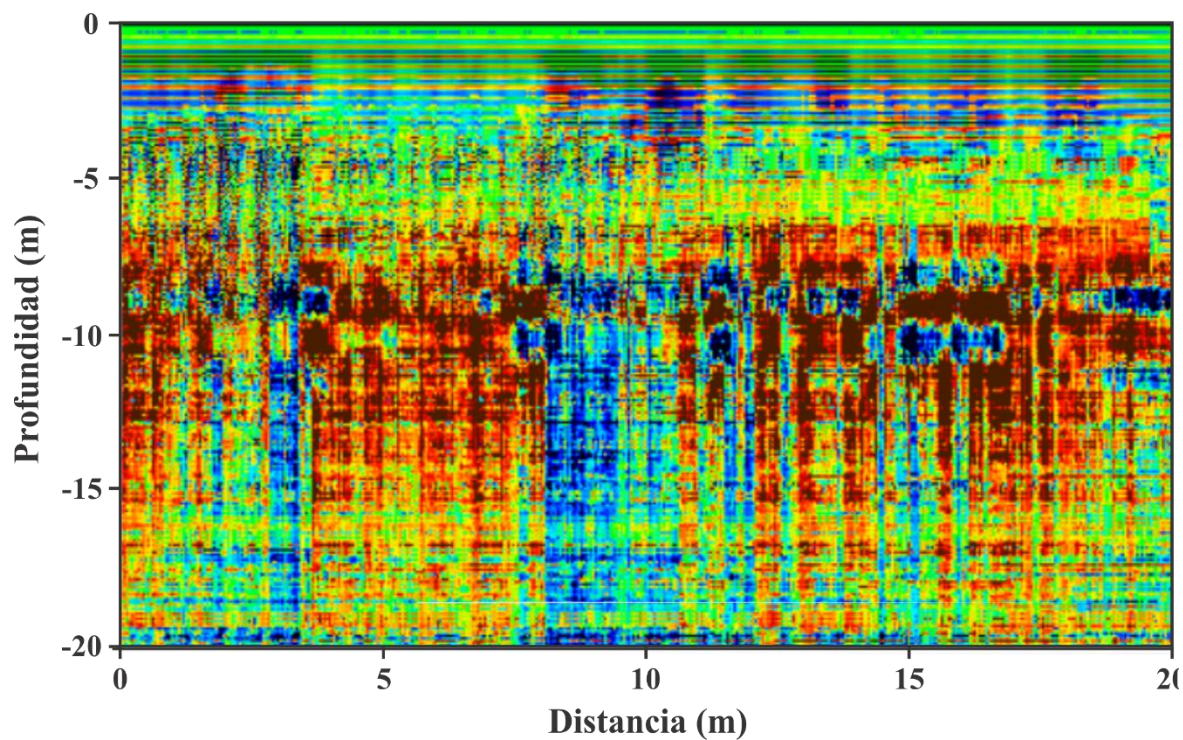
Prospección geofísica con el GPR – Gepard del perfil vertical del subsuelo de bofedal a lo largo de un transecto de 20 m de longitud, hasta 20 m de profundidad.



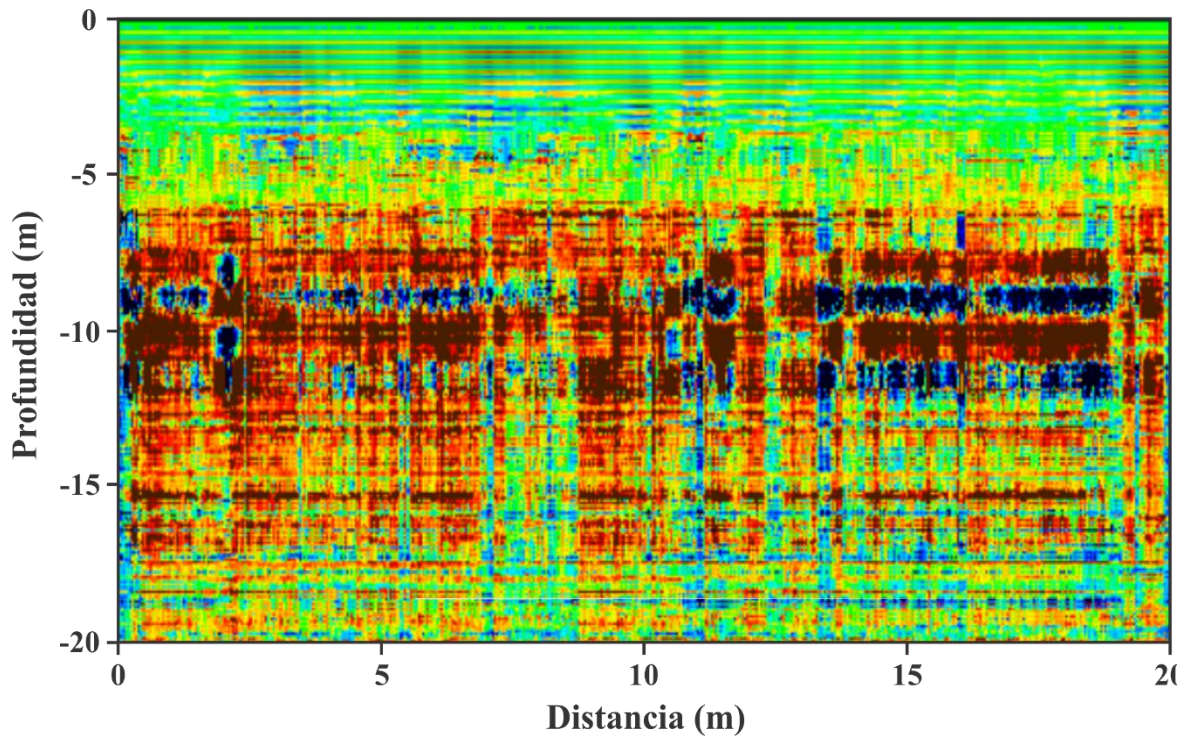
Paso 2: De cada prospección realizada con el GPR – Gepard sobre los dos transectos T1 y T2 muestreados se obtiene una imagen radargrama del perfil vertical del subsuelo. El radargrama del T1 se muestra en la Figura 3.3(a) y el radargrama del T2 se ilustra en la figura 3.3(b). En ambos radargramas se puede apreciar la distribución espacial del contenido estratigráfico a partir de los datos de amplitud de onda de radar reflejada en cada capa del subsuelo de bofedal prospectados con el GPR, la base de datos generados en ambas prospecciones se procesa aplicando la fórmula de la permitividad dieléctrica (ecuación 2.17) para estimar la textura de la composición del subsuelo de los dos bofedales, agrupándolas en clases.

Figura 3.3.

Radargrama de los transectos muestreados con el GPR – Gepard (a) T1 y (b) T2.



(a) Radargrama del transecto T1



Paso 3: Los datos de permitividad dieléctrica obtenidos en los perfiles del subsuelo de los dos bofedales, a distintas profundidades, se comparan entre sí en las mismas capas de profundidad empleando pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas. Este análisis busca determinar si existen diferencias significativas entre las texturas del subsuelo de los bofedales ubicados en la microcuenca Apacheta.

Paso 4: Utilizando los datos de permitividad dieléctrica, se aplica un método de interpolación como Kriging o IDW para generar mapas que representen la distribución espacial de la composición del subsuelo en los perfiles verticales de ambos bofedales.

### 3.9. Población

Está conformada por toda el área correspondiente al suelo superficial y subsuperficial de los ecosistemas de bofedales ubicados en la microcuenca Apacheta de la región Ayacucho.

### 3.10. Muestra

Está conformada por la colección aleatoria de los perfiles verticales de los transectos prospectados con el GPR – Gepard del subsuelo de dos bofedales de la microcuenca Apacheta a distintas profundidades, altitudes y ubicación, de acuerdo con el acceso que se tenga para llegar a dichas zonas muestreadas.

#### 3.10.1. Área de estudio

La figura 3.1 presenta un mapa que muestra la ubicación geográfica de los dos transectos (T1 y T2) examinados en los bofedales de la microcuenca Apacheta el 12 de octubre del 2022. En estos transectos, separados por una distancia de 2200 metros, se llevaron a cabo estudios geofísicos utilizando el GPR, Gepard. Cada uno de los transectos tiene una longitud de 20 metros y los análisis alcanzaron hasta 20 metros de profundidad, correspondiendo al perfil vertical del subsuelo de los bofedales evaluados.

En la tabla 3.1 se ilustra la ubicación geográfica de los puntos muestreados (rojo) en el mapa de la figura 3.1 correspondientes a los transectos T1 y T2 muestreados y prospectados con el GPR – Gepard, los cuales se encuentran distanciados 2200 m uno del otro, en los bofedales de la microcuenca Apacheta de la región Ayacucho. Ambos bofedales se escogieron por su cercanía uno del otro y por su estado natural, sin intervención del hombre.

Tabla 3.1.

Ubicación geográfica de los puntos muestreados el 12 de octubre de 2022, correspondientes a los dos transectos prospectados con el GPR – Gepard en los bofedales de la microcuenca Apacheta.

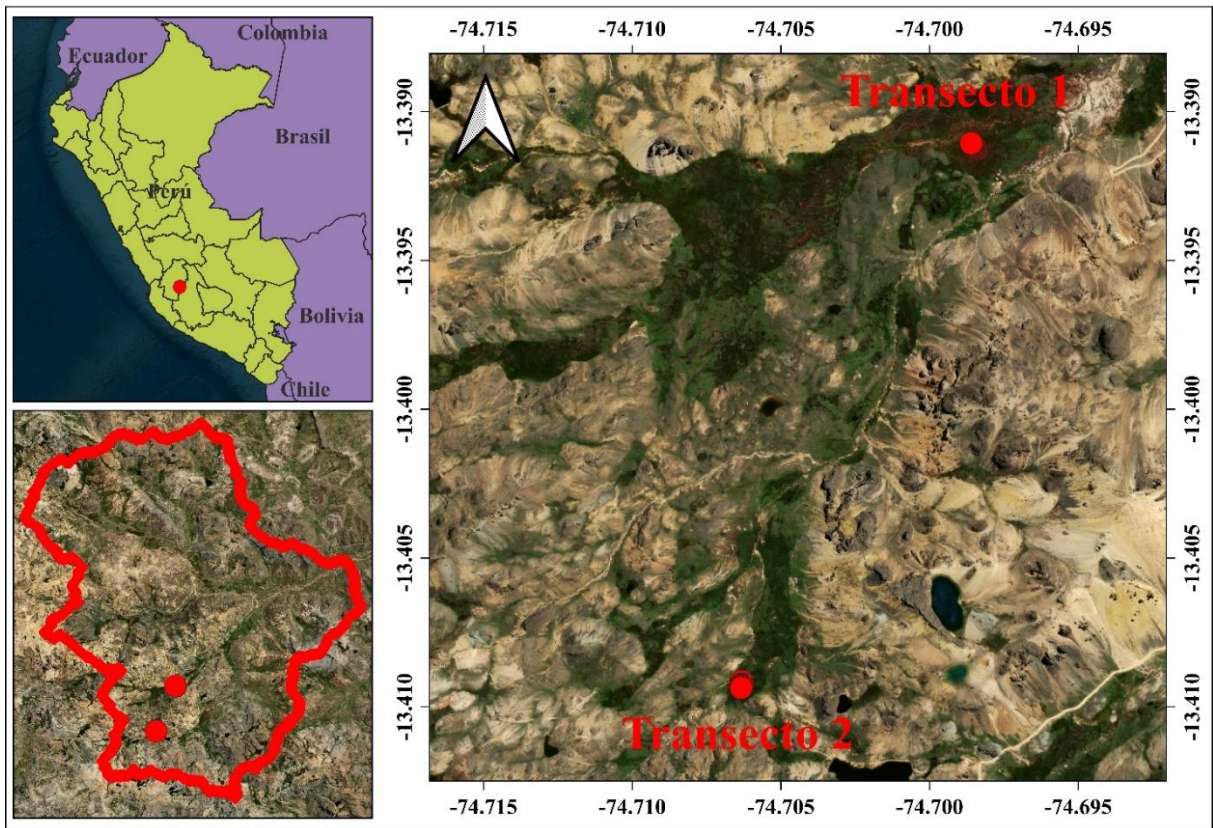
<b>Puntos</b>	<b>Latitud (°)</b>	<b>Longitud (°)</b>	<b>Altitud (m)</b>
1	-13.39122	-74.69844	4507
2	-13.40917	-74.70636	4646

Como se aprecia en el mapa de la figura 3.4, el acceso a los bofedales es muy accidentado, característico de los ecosistemas de bofedales de alta montaña, por lo que para

llegar al primer punto de muestreo se tiene que caminar por un lapso de una hora y para llegar al siguiente punto se debe caminar una distancia de 2200 m, de mayor pendiente que el primero en un tiempo aproximado de una hora adicional, además de cargar el equipo de GPR que es muy pesado.

Figura 3.4.

Mapa de ubicación geográfica de los puntos muestreados correspondientes a los transectos prospectados con el GPR – Gepard en los bofedales de la microcuenca Apacheta.



### 3.11. Técnicas

- Interpretación de la información obtenida de los radargramas de los perfiles verticales realizados a lo largo de cada transecto, utilizando los datos de amplitud de las ondas reflejadas que corresponden a los distintos componentes del subsuelo del bofedal, registrados con el GPR, Gepard.

- Revisión de documentos sobre la composición del subsuelo de los bofedales, complementada con observaciones directas realizadas a través de mediciones in situ utilizando el GPR, Gepard.
- Implementación de técnicas de interpolación espacial para elaborar mapas que representen la distribución de la composición del subsuelo en los bofedales, utilizando métodos como la distancia inversa ponderada (IDW) o Kriging, los cuales se evalúan mediante un código desarrollado en Python.

### **3.12. Instrumentos**

El análisis de la composición del subsuelo en los bofedales requiere la implementación de diversas técnicas de prospección geofísica, así como el uso de equipos avanzados, como el GPR, Gepard, que forma parte del equipamiento disponible en el laboratorio de Teledetección y Energías Renovables LABTELER-UNSCH.

Este instrumento de medición contiene los siguientes componentes:

- Antenas de radar: Las antenas son el componente principal del GPR. La antena emite la señal electromagnética y recibe la señal reflejada del subsuelo. Hay diferentes tipos de antenas disponibles, como las de banda ancha y las de frecuencia central.
- Generador de señal: Es el dispositivo que produce la señal electromagnética que se envía a través de la antena hacia el subsuelo. Se puede utilizar una fuente de energía eléctrica o baterías para alimentar el generador.
- Registrador de datos: El registrador de datos se utiliza para registrar y almacenar los datos recopilados por la antena del GPR. Los datos se pueden procesar y analizar posteriormente para producir una imagen del subsuelo.
- Software de procesamiento de datos: Utiliza los datos recopilados por la antena y crear imágenes del subsuelo. También permite la visualización y el análisis de los resultados.
- Carro de radar: El carro de radar se utiliza para transportar el GPR y la antena a través del terreno. El carro puede ser motorizado o manual y está diseñado para permitir la fácil maniobrabilidad de la antena.

- GPS: Se utiliza para georeferenciar los datos recopilados por el GPR y ubicar las mediciones en un mapa.

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

La validación de hipótesis se llevará a cabo mediante el análisis de los estadígrafos apropiados, utilizando pruebas estadísticas paramétricas o no paramétricas, según corresponda. Estas pruebas permitirán evaluar la relevancia y significancia de los resultados obtenidos a partir de los datos de radargramas registrados con el GPR, con el objetivo de confirmar que los resultados sean efectivamente significativos.

Los resultados obtenidos dependerán de la precisión con la que el GPR mida en el subsuelo de ambos bofedales. Es decir, si el GPR es válido, entonces realmente está capturando y evaluando el radargrama de los perfiles verticales del subsuelo a lo largo de cada transecto en los bofedales muestreados.

La confiabilidad del GPR - Gepard dependerá de la consistencia de los resultados alcanzados a partir de los datos radargrama. El GPR - Gepard es confiable si al realizar mediciones repetidamente en las mismas condiciones sobre los bofedales muestreados, produce resultados similares en ambos bofedales.

### **3.14. Técnicas de procesamiento de datos**

Existen varias técnicas para procesar los datos de un radargrama. Algunas de las técnicas más comunes son:

- Filtros: Son herramientas empleadas para reducir el ruido y optimizar la calidad de la señal registrada en los radargramas. Estos pueden aplicarse tanto antes como después del proceso de recolección de datos.
- Procesamiento de imágenes: Se utiliza para optimizar la resolución y el contraste de las imágenes del radargrama. Se pueden aplicar técnicas como la mejora de la nitidez, la corrección de la perspectiva y la eliminación de artefactos.

Análisis de amplitud y tiempo de llegada: El análisis de amplitud y tiempo de llegada se utiliza para identificar y caracterizar las reflexiones en el radargrama. Se pueden

utilizar técnicas como la extracción de picos, la agrupación de reflexiones y la medición de la amplitud y el tiempo de llegada de las reflexiones.

- Inversión de datos: La inversión de datos se utiliza para reconstruir una imagen tridimensional del subsuelo a partir de los datos del radargrama. Se pueden utilizar técnicas como la inversión de Laplace, la inversión de Fourier y la inversión de datos tomográficos.
- Modelado de propagación de ondas: Se utiliza para simular la propagación de las OEM en el subsuelo y para comprender cómo se producen las reflexiones en el radargrama. Se pueden utilizar técnicas de interpolación.

### **3.15. Aspectos éticos**

Para la presente investigación, la recolección de datos se llevará a cabo utilizando el GPR, Gepard, una herramienta que ofrece una técnica no destructiva ni invasiva, garantizando la ausencia de conflictos de interés u otros inconvenientes.

El análisis y la interpretación de los datos obtenidos se realizarán mediante algoritmos de interpolación, complementados con técnicas estadísticas descriptivas e inferenciales. Este proceso contará con la orientación y apoyo de un especialista del equipo multidisciplinario de investigación, quien asumirá el rol de asesor y/o coasesor de esta tesis.

## Capítulo IV

### 4. Resultados y Discusión

#### 4.1. Composición del perfil vertical del subsuelo de dos bofedales de la microcuenca Apacheta a diferentes profundidades a partir de la permitividad dieléctrica estimada de los datos radargrama.

Los valores de las amplitudes de onda de radar de cada radargrama de los transectos T1 y T2, correspondientes a los dos perfiles verticales prospectados en los bofedales muestreados, se convierten a valores de permitividad dieléctrica con la ecuación 2.18. Luego, se establece una clasificación de la composición del subsuelo en seis clases, detalladas en la tabla 4.1, las cuales se han escogido de acuerdo con el rango de permitividad dieléctrica de los diferentes materiales dados en la tabla 2.1. En el anexo 3 se ilustran los datos radargrama de los transectos T1 y T2 clasificados en 6 clases (A, B, C D, E y F) de acuerdo con los valores de permitividad dieléctrica.

Esto resulta muy útil al momento de identificar en colores la composición del subsuelo lo cual conlleva a realizar una descripción idónea de las diferentes texturas que se encuentran a diferentes profundidades en cada perfil vertical del subsuelo prospectado con el GPR y que no se puede observar de manera directa en los radargrama brindados por el software Gepard.

Tabla 4.1.

Clasificación de composición de subsuelo de bofedal a partir de la Permitividad Dieléctrica ( $\epsilon$ ).

Clases	Composición del subsuelo	Rango de $\epsilon$	Color
A	Aire / Suelo con alta porosidad	[1 – 2)	Rojo
B	Arena seca / Barro seco / Arenisca seca / Suelo Arcilloso con arena seca	[2 – 6)	Anaranjado
C	Limo seco / Roca / Sal de roca seca / Suelo arcilloso seco / suelo arenoso y seco / Piedra arenisca / Grava	[6 – 10)	Amarillo
D	Nieve / Arcilla húmeda / Arena húmeda / suelo arcilloso húmedo / suelo arenoso húmedo / Grava	[10 – 40)	Verde

	arenosa saturada / Arcilla limosa / Barro húmedo / Limo con humedad saturada		
E	Suelo orgánico poroso con humedad saturada	[40 – 70)	Celeste
F	Agua	[70 – 82)	Azul

En la tabla 4.2 se muestran las frecuencias de ocurrencia de las seis clases y el porcentaje de cobertura espacial para cada clase en cada radargrama correspondientes a los valores de PD estimados de los valores de amplitud de onda de radar reflejada en el subsuelo a lo largo de los transectos T1 y T 2 de los bofedales muestreados en la microcuenca Apacheta. La comparación de cada clase entre ambos perfiles verticales de cada transecto se da a través del índice Kappa de Fleiss, en donde se observa, que la comparación de las seis clases entre los dos perfiles verticales de ambos transectos muestreados mantienen un grado de acuerdo pobre, lo cual significa que la composición estratigráfica de cada bofedal suele variar significativamente dependiendo de su ubicación, altitud y pendiente.

Tabla 4.2.

Frecuencia de valores de permitividad dieléctrica agrupadas en seis clases correspondiente a la composición del subsuelo de los perfiles verticales de los transectos T1 y T2 prospectados con el GPR – Gepard en el bofedal de la microcuenca Apacheta.

Clases	T1	T2	%T1	%T2	Kappa Fleiss	Z	p-valor
<b>A</b>	55198	94203	38.4	65.5	0.058	21.912	0.0
<b>B</b>	21388	22013	14.9	15.3	0.138	52.311	0.0
<b>C</b>	5076	4442	3.5	3.1	0.114	43.394	0.0
<b>D</b>	8972	6579	6.2	4.6	0.109	41.384	0.0
<b>E</b>	34214	4196	23.8	2.9	-0.016	-6.166	0.0
<b>F</b>	18972	12387	13.2	8.6	0.101	38.401	0.0

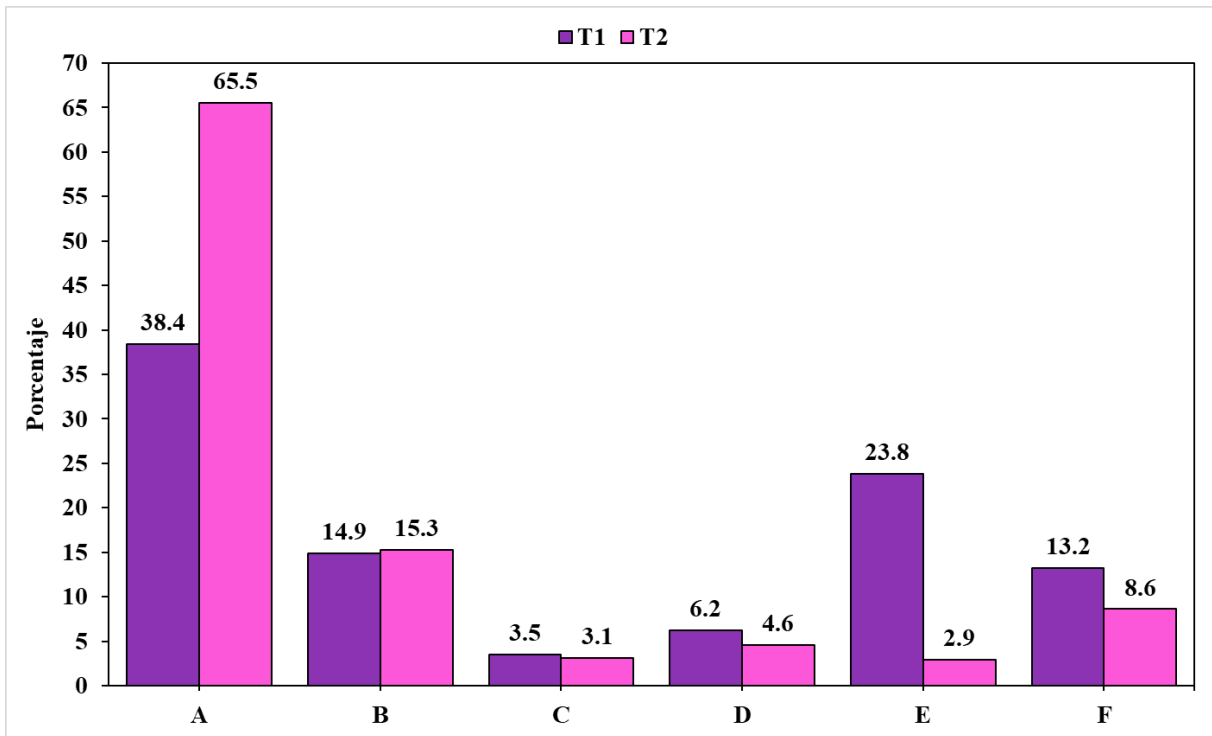
En la figura 4.1 se compara el porcentaje de frecuencia de ocurrencia de cada clase entre los transectos T1 y T2 prospectados con el GPR – Gepard en dos bofedales de la microcuenca Apacheta. Se observa que la clase A y B en T2 (65.5 % y 15.3 %) es mayor que en T1 (38.4 % y 14.9 %), esto significa una mayor concentración de suelo con alta porosidad, arena seca, arenisca, suelo arcilloso seco.

Las clases C, D, E y F en T1 (3.5 %, 6.2 %, 23.8 % y 13.2 %) es mayor que en T2 (3.1 %, 4.6 %, 2.9 % y 8.6 %), esto significa una mayor concentración de limo seco o húmedo, arcilla seca o húmeda, arcilla limosa, piedra arenisca, grava seca o húmeda, arena seca o húmeda, barro seco o húmedo, suelo orgánico poroso con humedad saturada, contenido de agua.

También se observa que la clase A en el perfil vertical de ambos transectos T1 y T2 es mucho mayor que todas las demás clases para ambos transectos y que la clase C es menor que las demás dentro de un rango de profundidad de 20 m.

Figura 4.1.

Histograma de frecuencia que compara las 6 clases de composición del subsuelo de bofedal a lo largo de dos transectos de longitud 20 m hasta una profundidad de 20 m.



El proceso de comparación de la composición del subsuelo a partir de las clases generadas en seis grupos de PD estimados de los datos GPR obtenidos de las mediciones in situ a lo largo de dos transectos. Para esto, se utiliza el índice Kappa de Cohen y de Fleiss, evaluando ambas muestras con un 95 % de confianza. La hipótesis nula (H0) sugiere que las

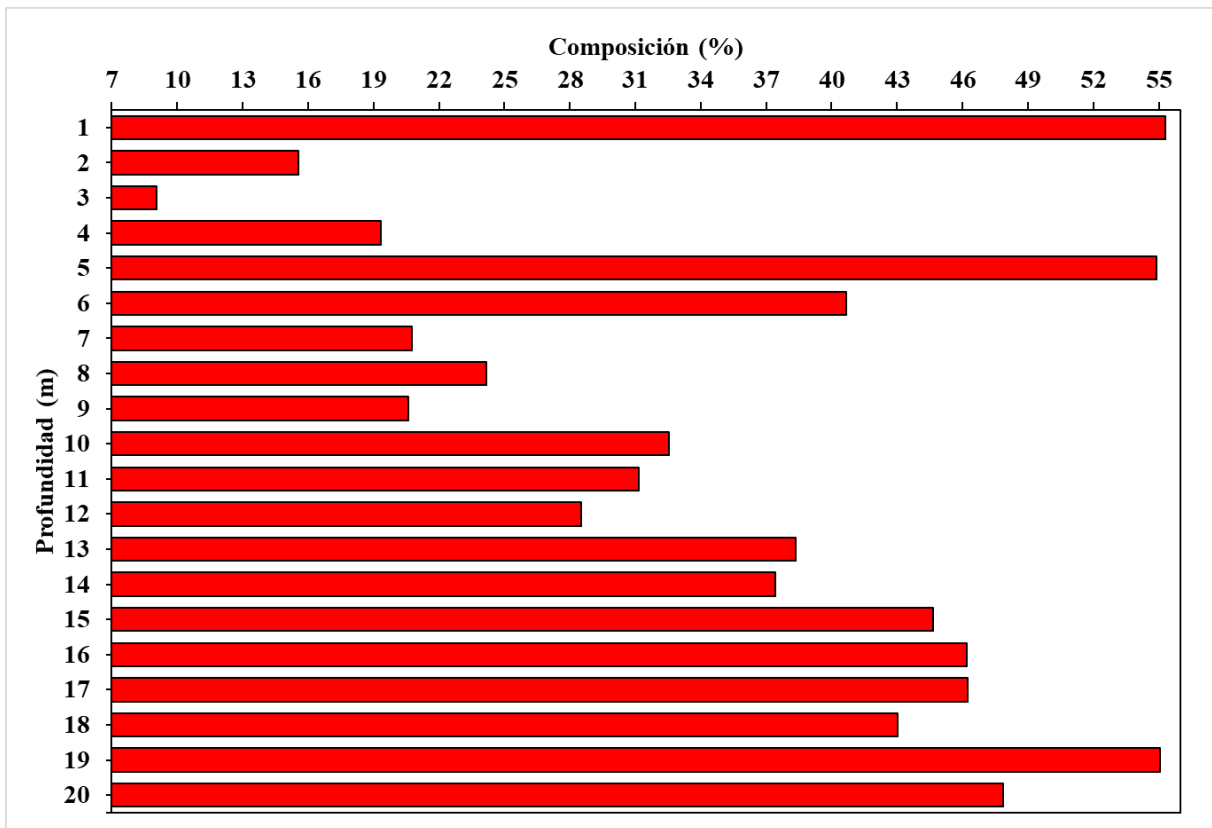
observaciones realizadas a las seis clases en ambos transectos, coinciden debido a eventos aleatorios. En contraste, la hipótesis alternativa (H1) propone que estas observaciones coinciden debido a eventos no aleatorios, indicando que las mediciones reflejan la realidad mostrada por la PD estimada de la amplitud de onda reflejada, recibida por el GPR.

El estadístico de contraste estimado muestra un índice Kappa de Cohen  $\kappa=0.113$  y un índice Kappa de Fleiss  $\kappa= 0.0732$ ; [IC 95%: 0,0703-0,076] con un p-valor = 0.0, menor al nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ . Esta evidencia, sugiere que la concordancia entre las fuentes de información refleja la realidad en un 37,6 %, indicando una pobre concordancia entre las composiciones de texturas de subsuelo entre ambos transectos. Por lo tanto, se evidencia que la composición de texturas entre ambos perfiles verticales de subsuelo de los dos bofedales a partir de datos GPR varían de manera significativa con un acuerdo pobre según el índice Kappa de Cohen (0.113) y el índice Kappa de Fleiss (0.0732), tal como se puede interpretar del contenido de la tabla 2.2.

En la figura 4.2 se ilustra la distribución porcentual de la composición clase A, en el perfil vertical del transecto T1, a diferentes profundidades, donde se observa que la mayor cantidad porcentual (> 50 %) de la clase A se encuentra a 1 m, 5 m y 19 m de profundidad. Por otro lado, la menor cantidad porcentual (< 10 %) de la clase A se encuentra a 3 m de profundidad.

Figura 4.2.

Distribución porcentual de la composición clase “A” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 1 prospectado con el GPR en el bofedal 1 de la microcuenca Apacheta.

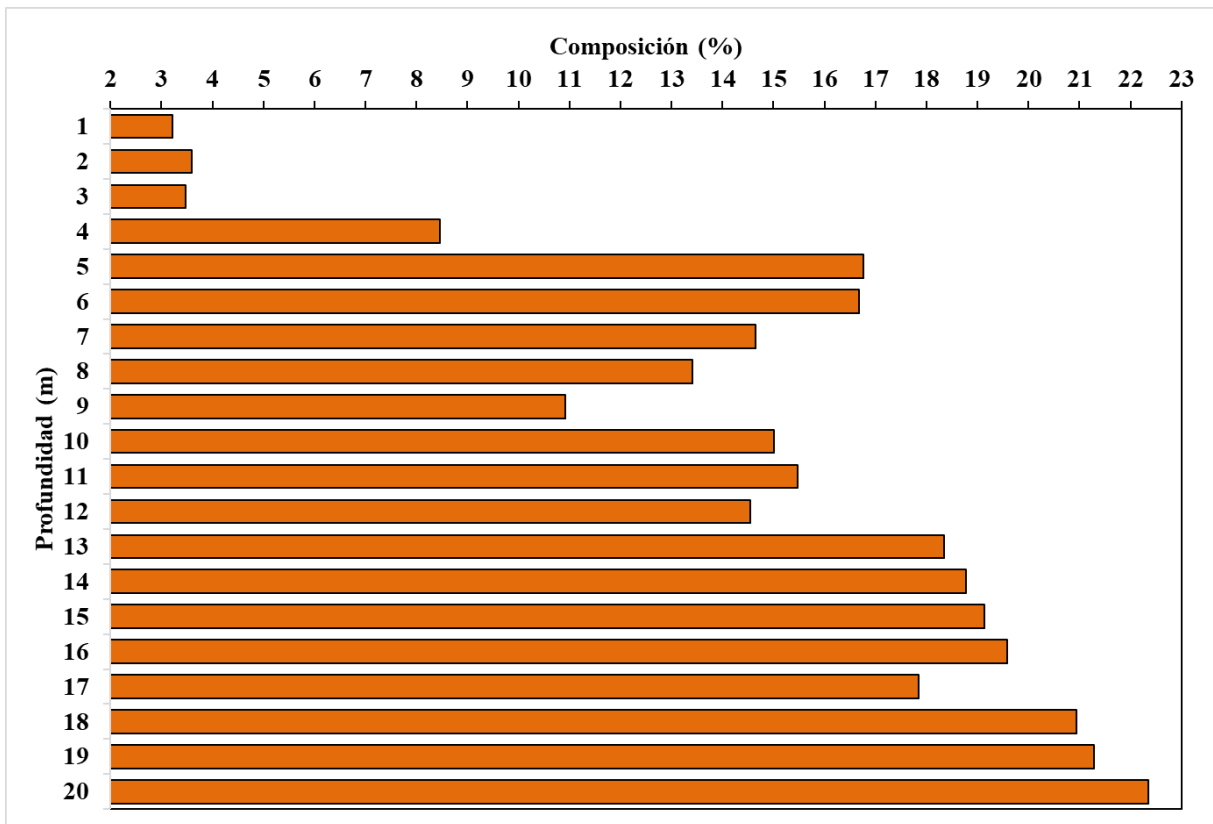


En ese sentido, se estima que a profundidades > 13 m el porcentaje de texturas de suelo orgánico con contenido de aire en zonas cercanas a la superficie y suelo con alta porosidad, en el subsuelo es mucho mayor comparada con la capa de subsuelo en los 3 m de profundidad. Además, se observa que en este T1, a 1 m de profundidad cerca de la superficie, la distribución de suelo orgánico poroso se concentra en mayor cantidad (55 %).

En la figura 4.3 se ilustra la distribución porcentual de la composición clase B, en el perfil vertical del T1, a diferentes profundidades, donde se observa que la mayor cantidad porcentual (> 20 %) de la clase B se encuentra a 18 m, 19 m y 20 m de profundidad, pero en menor proporción que la clase A. Por otro lado, la menor cantidad porcentual (< 4 %) de la clase B se encuentra a 1 m, 2 m y 3 m de profundidad, y en menor proporción que la clase A.

Figura 4.3.

Distribución porcentual de la composición clase “B” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 1 prospectado con el GPR en el bofedal 1 de la microcuenca Apacheta.

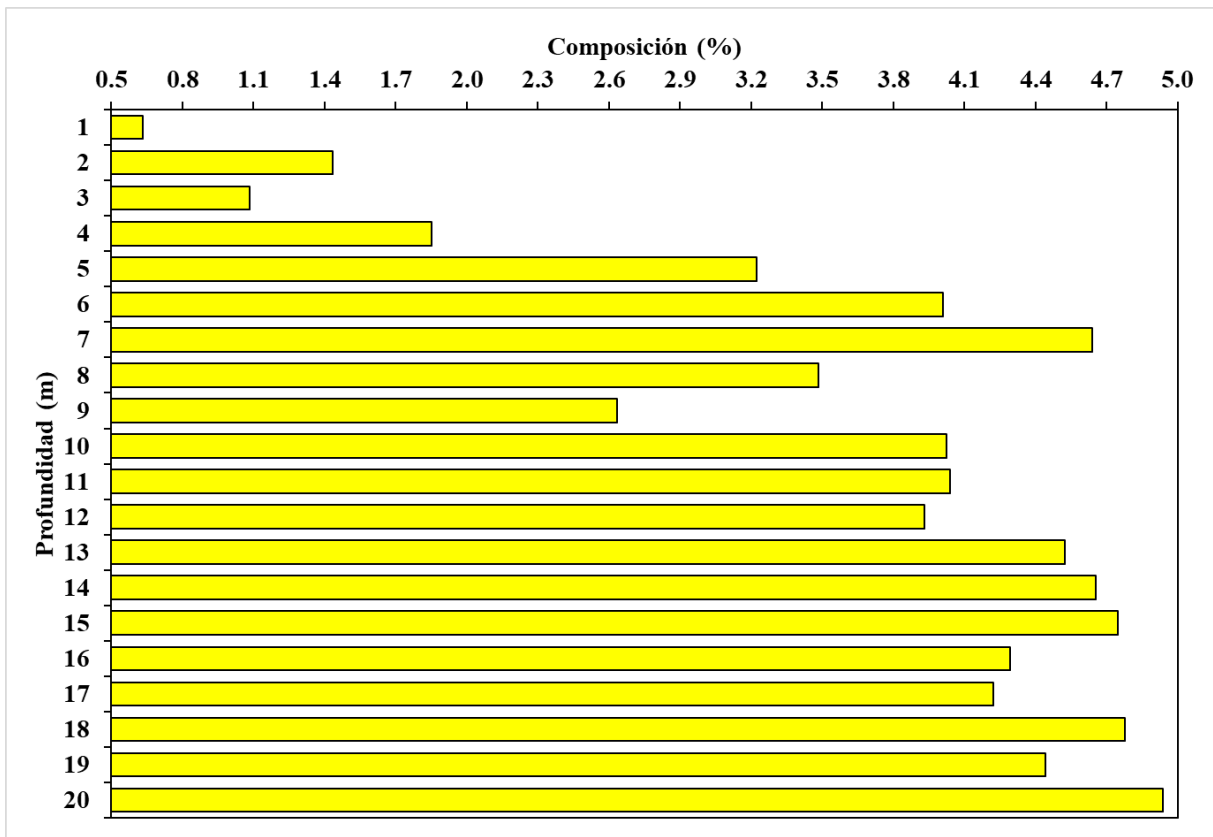


En ese sentido, se estima que a profundidades > 13 m el porcentaje de texturas como arena seca, barro seco, arenisca seca y suelo arcilloso con arena seca, en el subsuelo es mucho mayor comparada con la capa de subsuelo entre 1 m a 3 m de profundidad. Además, se observa que en este transecto T1, a 20 m de profundidad, la distribución de estas texturas de suelo se concentra en mayor cantidad (22.4 %).

En la figura 4.4 se ilustra la distribución porcentual de la composición clase C, en el perfil vertical de T1, a diferentes profundidades, donde se observa que la mayor cantidad porcentual (> 4.5 %) de la clase C se encuentra a 7 m, 13 m, 14 m, 15 m, 18 m y 20 m de profundidad, pero en menor proporción que la clase A y la clase B. Por otro lado, la menor cantidad porcentual (< 2 %) de la clase C se encuentra a 1 m, 2 m, 3 m y 4 m de profundidad, y en menor proporción que la clase A y la clase B.

Figura 4.4.

Distribución porcentual de la composición clase “C” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 1 prospectado con el GPR en el bofedal 1 de la microcuenca Apacheta.

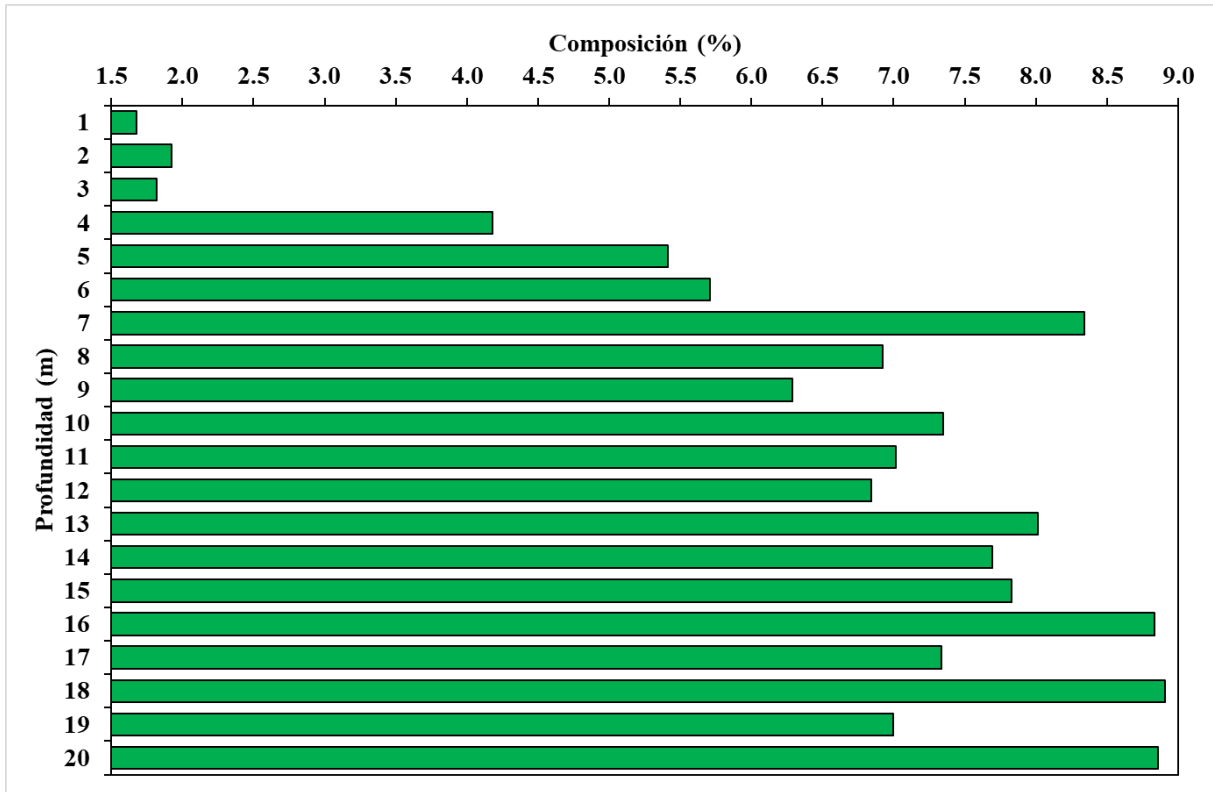


En ese sentido, se estima que a profundidades > 13 m el porcentaje de texturas como limo seco, roca, sal de roca seca, suelo arcilloso seco, suelo arenoso y seco, piedra arenisca y grava, en el subsuelo es mucho mayor comparada con la capa de subsuelo entre 1 m y 4 m que son zonas cercanas a la superficie donde se concentra la menor cantidad de estas texturas. Además, se observa que en este transecto T1, a 20 m de profundidad, la distribución de estas texturas de suelo se concentra en mayor cantidad (4.9 %).

En la figura 4.5 se ilustra la distribución porcentual de la composición clase D, en el perfil vertical de T1, a diferentes profundidades, donde se observa que la mayor cantidad porcentual (> 7.5 %) de la clase D se encuentra a 7 m, 13 m, 14 m, 15 m, 16 m, 18 m y 20 m de profundidad, pero en menor proporción que la clase A y la clase B. Por otro lado, la menor cantidad porcentual de la composición (< 2 %) de la clase D se encuentra a 1 m, 2 m y 3 m de profundidad, y en menor proporción que la clase A y la clase B.

Figura 4.5.

Distribución porcentual de la composición clase “D” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 1 prospectado con el GPR en el bofedal 1 de la microcuenca Apacheta.

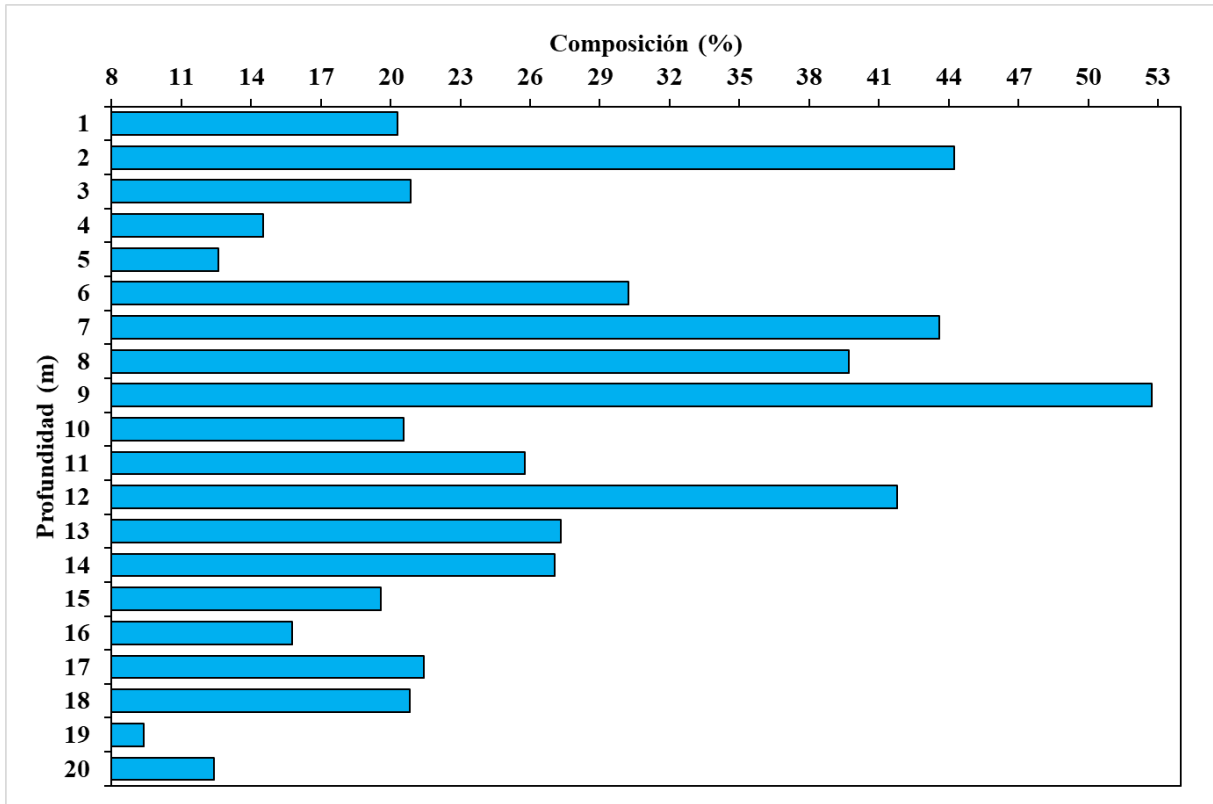


En ese sentido, se estima que a profundidades  $> 7$  m el porcentaje de texturas como arcilla húmeda, arena húmeda, suelo arcilloso húmedo, suelo arenoso húmedo, grava arenosa saturada, arcilla limosa, barro húmedo y limo con humedad saturada, en el subsuelo es mucho mayor comparada con la capa de subsuelo entre 1 m y 3 m que son zonas cercanas a la superficie donde se concentra la menor cantidad de estas texturas.

En la figura 4.6 se ilustra la distribución porcentual de la composición clase E, en el perfil vertical de T1, a diferentes profundidades, donde se observa que la mayor cantidad porcentual de la composición clase E ( $> 35$  %) se encuentra a 1 m, 7 m, 8 m, 9 m y 12 m de profundidad, pero en menor proporción que la clase A y en mayor proporción que las clases B y C. Por otro lado, la menor cantidad porcentual de la composición de la clase E ( $< 15$  %) se encuentra a 4 m, 5 m, 19 m y 20 m de profundidad, y en menor proporción que la clase A y en mayor proporción que las clases B y C.

Figura 4.6.

Distribución porcentual de la composición clase “E” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 1 prospectado con el GPR en el bofedal 1 de la microcuenca Apacheta.

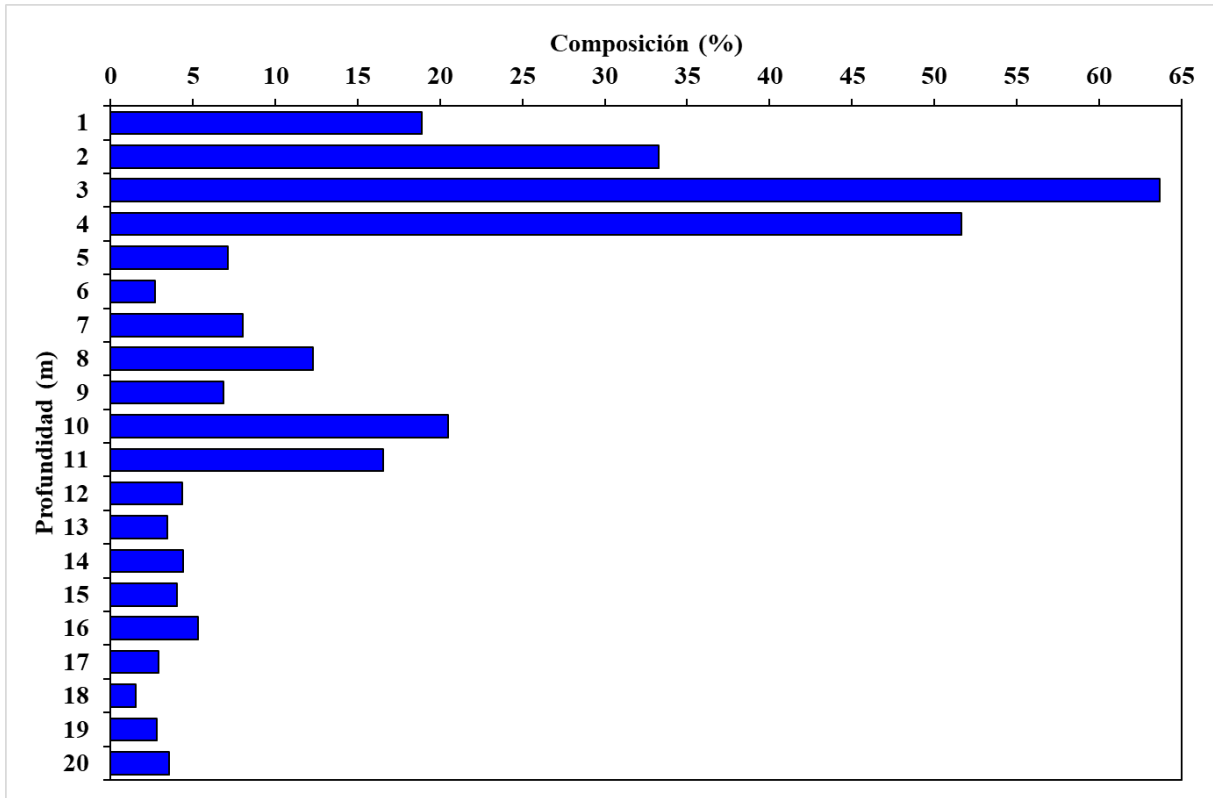


En ese sentido, se estima que a profundidades  $> 6$  m y  $< 9$  m el porcentaje de texturas como suelo orgánico poroso con humedad saturada, en el subsuelo es mucho mayor comparada con la capa de subsuelo a 2 m de profundidad cercana a la superficie donde se agrupa la mayor cantidad de estas texturas. Asimismo, se observa una menor concentración a profundidades  $> 15$  m y una mayor concentración a la profundidad de 9 m (52.7 %).

En la figura 4.7 se ilustra la distribución porcentual de la composición clase F, en el perfil vertical de T1, a diferentes profundidades, donde se observa que la mayor cantidad porcentual de la composición de subsuelo clase F ( $> 30$  %) se encuentra a 2 m, 3 m y 4 m de profundidad, pero en menor proporción que las clases A y E, y en mayor proporción que las clases B y C. Por otro lado, la menor cantidad porcentual de la composición de la clase F ( $< 5$  %) se encuentra a 6 m, 12 m, 13 m, 14 m, 15 m, 17 m, 18 m, 19 m y 20 m de profundidad, y en menor proporción que la clase A y E, y en mayor proporción que las clases B y C.

Figura 4.7.

Distribución porcentual de la composición clase “F” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 1 prospectado con el GPR en el bofedal 1 de la microcuenca Apacheta.

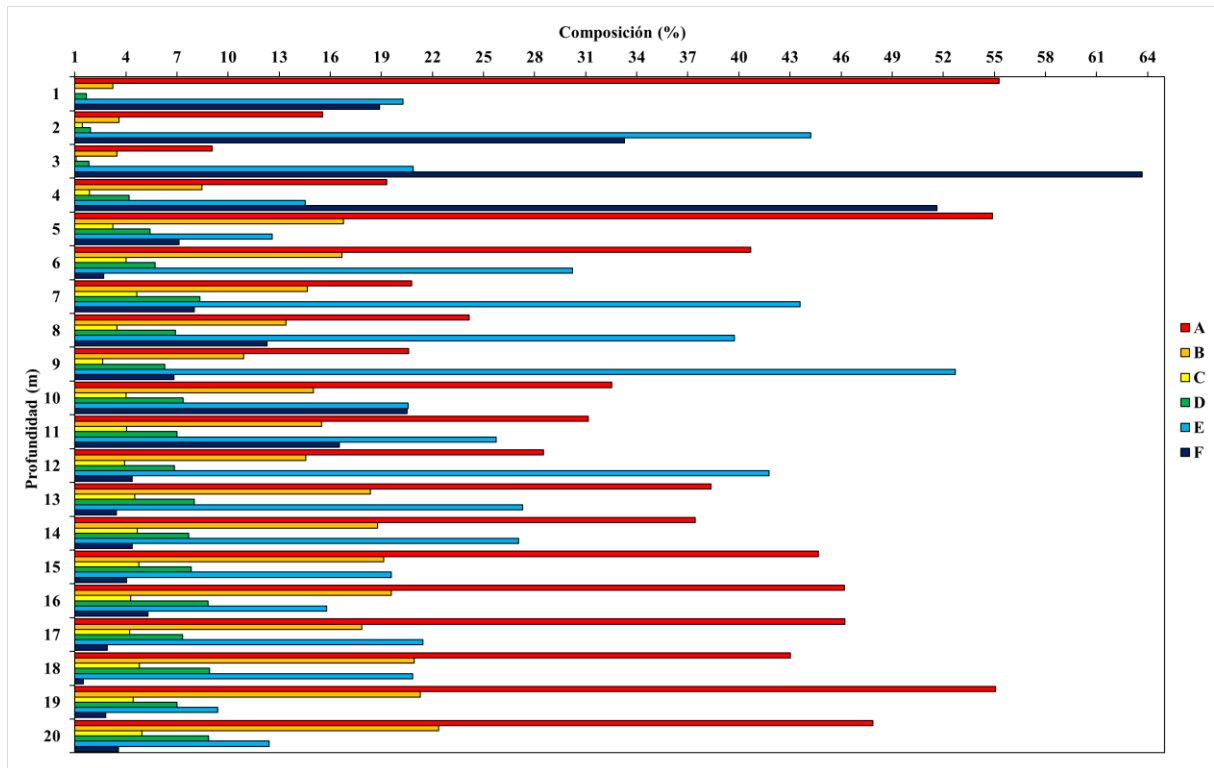


En ese sentido, se estima que a profundidades > 12 m el porcentaje de agua y humedad saturada en el subsuelo es mucho menor comparada con la capa de subsuelo entre los 1 m y 4 m que son zonas cercanas a la superficie donde se agrupa la mayor cantidad de agua y humedad. Asimismo, se observa a la profundidad de 3 m la concentración de agua y humedad saturada es mucho mayor (63.7 %).

En la figura 4.8 se ilustra la distribución de la composición de las clases A, B, C, D, E y F del perfil vertical de T1 del subsuelo de bofedal prospectado con el GPR. Se observa que las clases A y E se distribuyen en mayor concentración porcentual, la clase A presenta una composición de 44.2 % a 2 m, 54.9 % a 5 m y 55.1 % a 19 m, la clase E presenta una composición de 55.3 % a 1 m, 52.7 % a 9 m de profundidad.

Figura 4.8.

Distribución porcentual de la composición de clases A, B, C, D, E y F a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 1 prospectado con el GPR.

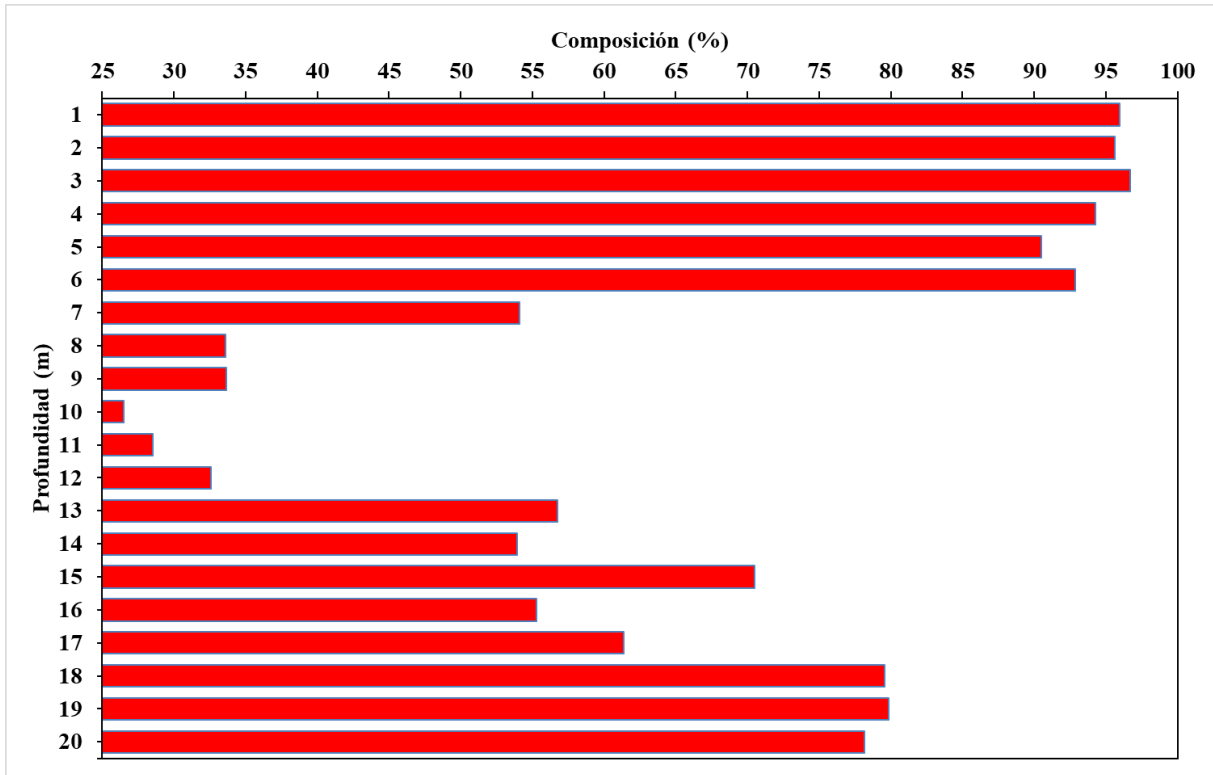


Por su parte, la clase C se da en menor proporción con respecto a las demás clases. Asimismo, la clase F se da en menor proporción con respecto a las demás clases a partir de la profundidad de 12 m hasta los 20 m, lo cual significa que el subsuelo se mantiene muy húmedo cerca de la superficie y a medida que se profundiza la humedad va disminuyendo. Esto sugiere que el bofedal 1 no almacena agua o humedad saturada en mayor proporción a mayores profundidades.

En la figura 4.9 se ilustra la distribución porcentual de la composición clase A, en el perfil vertical de T2, a diferentes profundidades, donde se observa que la mayor cantidad porcentual (> 80 %) de la clase A se encuentra entre 1 m a 6 m de profundidad. Por otro lado, la menor cantidad porcentual (< 35 %) de la clase A se encuentra entre 8 m a 12 m de profundidad.

Figura 4.9.

Distribución porcentual de la composición clase “A” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 2 prospectado con el GPR en el bofedal 2 de la microcuenca Apacheta.

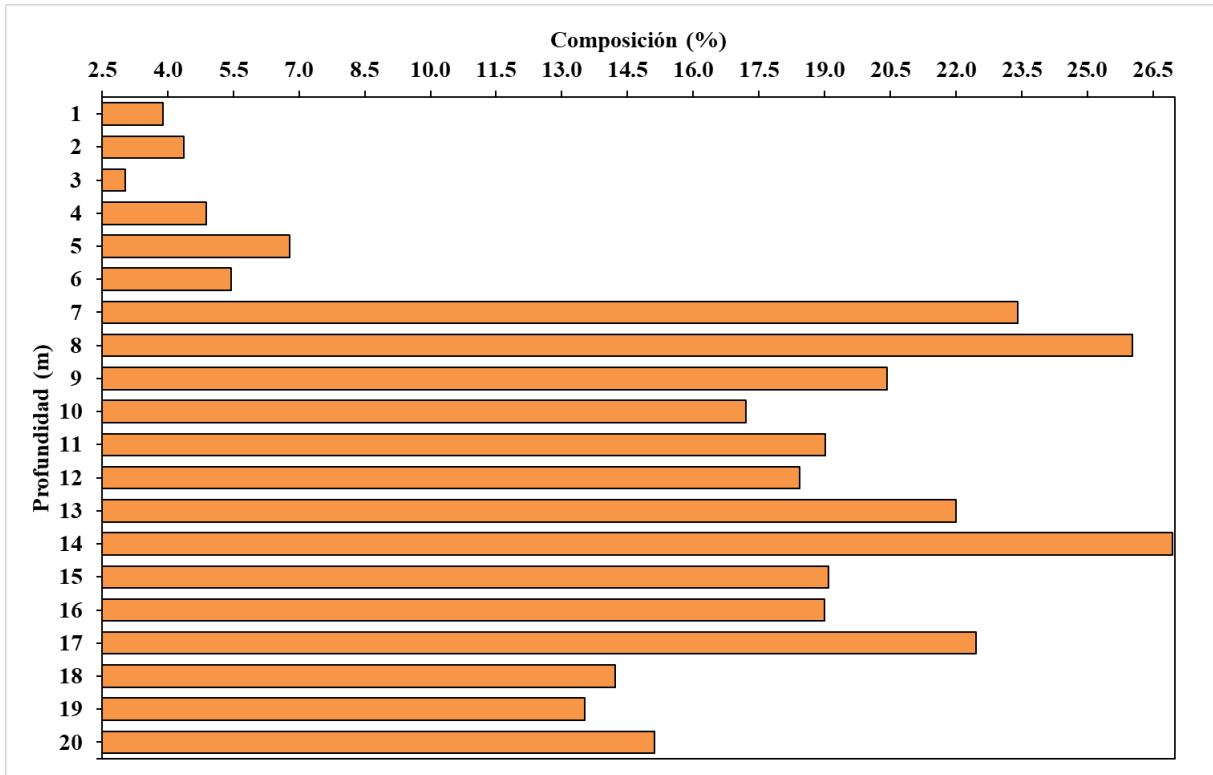


En ese sentido, se estima que a profundidades  $> 1$  m y  $< 6$  m el porcentaje de texturas se suelo orgánico con contenido de aire en zonas cercanas a la superficie y suelo con alta porosidad en el subsuelo es mucho mayor comparada con la capa de subsuelo entre los 8 m a 12 m de profundidad. Además, se observa que en este transecto T2, a 1 m, 2m y 3 m de profundidad cerca de la superficie, la distribución de suelo orgánico poroso se concentra una mayor cantidad con un 96 %, 95.6 % y 96.7 %, respectivamente. Por su parte la menor concentración se encuentra a la profundidad de 10 m.

En la figura 4.10 se ilustra la distribución porcentual de la composición clase B, en el perfil vertical de T2, a diferentes profundidades, donde se observa que la mayor cantidad porcentual ( $> 16$  %) de la clase B se encuentra entre 7 m a 16 m de profundidad, pero en menor proporción que la clase A. Por otro lado, la menor cantidad porcentual ( $< 7$  %) de la clase B se encuentra entre 1 m a 6 m de profundidad, y en menor proporción que la clase A.

Figura 4.10.

Distribución porcentual de la composición clase “B” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 2 prospectado con el GPR en el bofedal 2 de la microcuenca Apacheta.

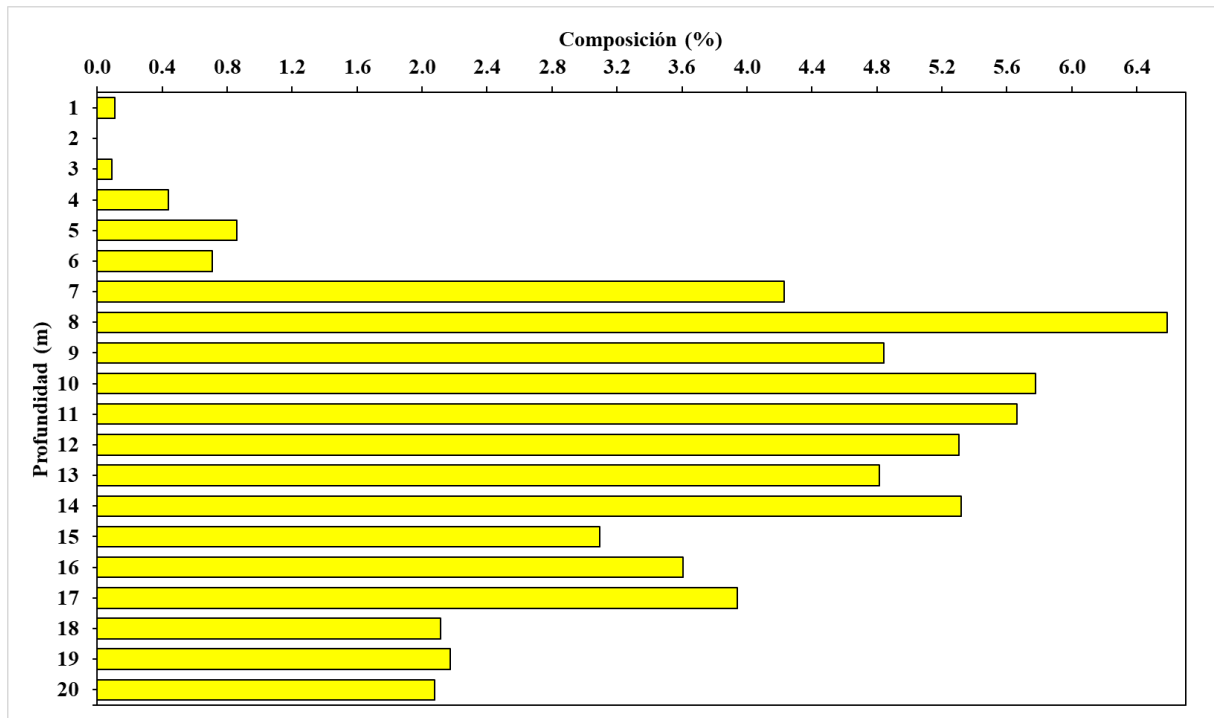


En ese sentido, se estima que a profundidades > 7 m el porcentaje de texturas como arena seca, barro seco, arenisca seca y suelo arcilloso con arena seca, en el subsuelo es mucho mayor comparada con la capa de subsuelo entre 1 m a 6 m de profundidad. Además, se observa que en este transecto T2, a 8 m y 14 m de profundidad, la distribución de estas texturas de suelo se concentra en mayor cantidad con 26 % y 27 %, respectivamente.

En la figura 4.11 se ilustra la distribución porcentual de la composición clase C, en el perfil vertical del T2, a diferentes profundidades, donde se observa que la mayor cantidad porcentual (> 4 %) de la clase C se encuentra entre 7 m a 14 m de profundidad, pero en menor proporción que las clases A y B. Por otro lado, la menor cantidad porcentual (< 1 %) de la clase C se encuentra entre 1 m a 6 m de profundidad, y en menor proporción que las clases A y B.

Figura 4.11.

Distribución porcentual de la composición clase “C” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 2 prospectado con el GPR en el bofedal 2 de la microcuenca Apacheta.

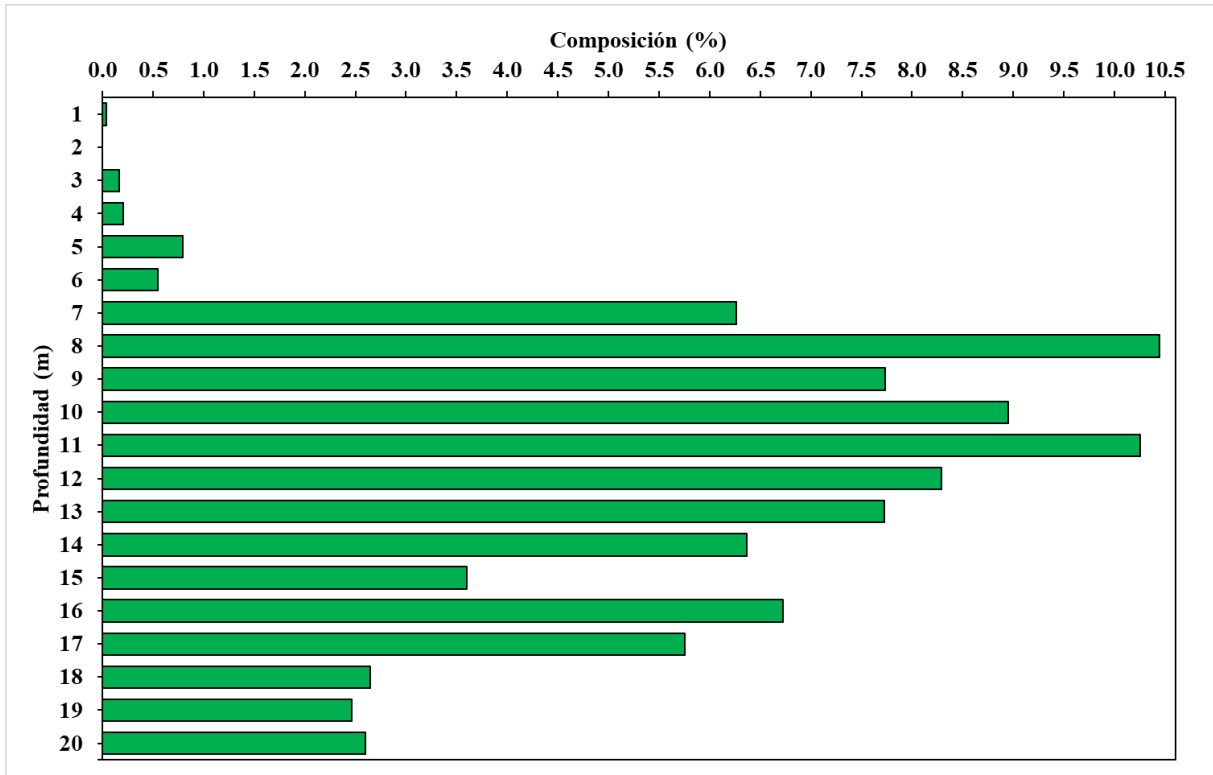


En ese sentido, se estima que a profundidades > 7 m el porcentaje de texturas como limo seco, roca, sal de roca seca, suelo arcilloso seco, suelo arenoso y seco, piedra arenisca y grava, en el subsuelo es mucho mayor comparada con la capa de subsuelo entre 1 m y 6 m que son zonas cercanas a la superficie donde se agrupa la menor cantidad de estas texturas. Además, se observa que en este transecto T2, a 8 m de profundidad, la distribución de estas texturas de suelo se concentra en mayor cantidad (6.6 %).

En la figura 4.12 se ilustra la distribución porcentual de la composición clase D, en el perfil vertical de T2, a diferentes profundidades, donde se observa que la mayor cantidad porcentual (> 7 %) de la clase D se encuentra entre 8 m a 13 m de profundidad, pero en menor proporción que las clases A y B. Por otro lado, la menor cantidad porcentual de la composición (< 1 %) de la clase D se encuentra entre 1 m a 6 m de profundidad, y en menor proporción que las clases A y B.

Figura 4.12.

Distribución porcentual de la composición clase “D” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 2 prospectado con el GPR en el bofedal 2 de la microcuenca Apacheta.

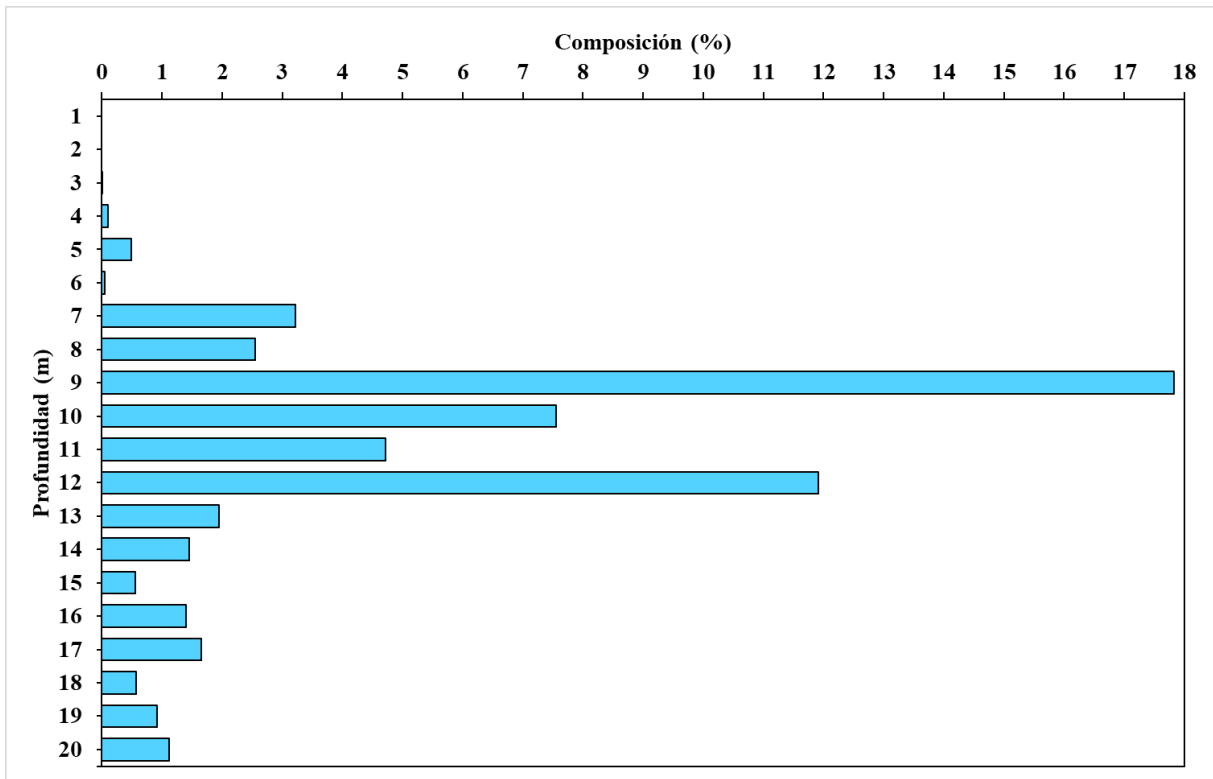


En ese sentido, se estima que a profundidades > 7 m el porcentaje de texturas como arcilla húmeda, arena húmeda, suelo arcilloso húmedo, suelo arenoso húmedo, grava arenosa saturada, arcilla limosa, barro húmedo y limo con humedad saturada, en el subsuelo es mucho mayor comparada con la capa de subsuelo entre 1 m y 6 m que son zonas cercanas a la superficie donde se agrupa la menor cantidad de estas texturas. Además, se puede observar ausencia de esta textura a la profundidad de 2 m.

En la figura 4.13 se ilustra la distribución porcentual de la composición clase E, en el perfil vertical de T2, a diferentes profundidades, donde se observa que la mayor cantidad porcentual de la composición clase E (> 4 %) se encuentra entre 9 m a 12 m de profundidad, pero en menor proporción que la clase A. Por otro lado, la menor cantidad porcentual de la composición de la clase E (< 2 %) se encuentra entre 13 m a 20 m de profundidad, y en menor proporción que la clase A, B y C.

Figura 4.13.

Distribución porcentual de la composición clase “E” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 2 prospectado con el GPR en el bofedal 2 de la microcuenca Apacheta.

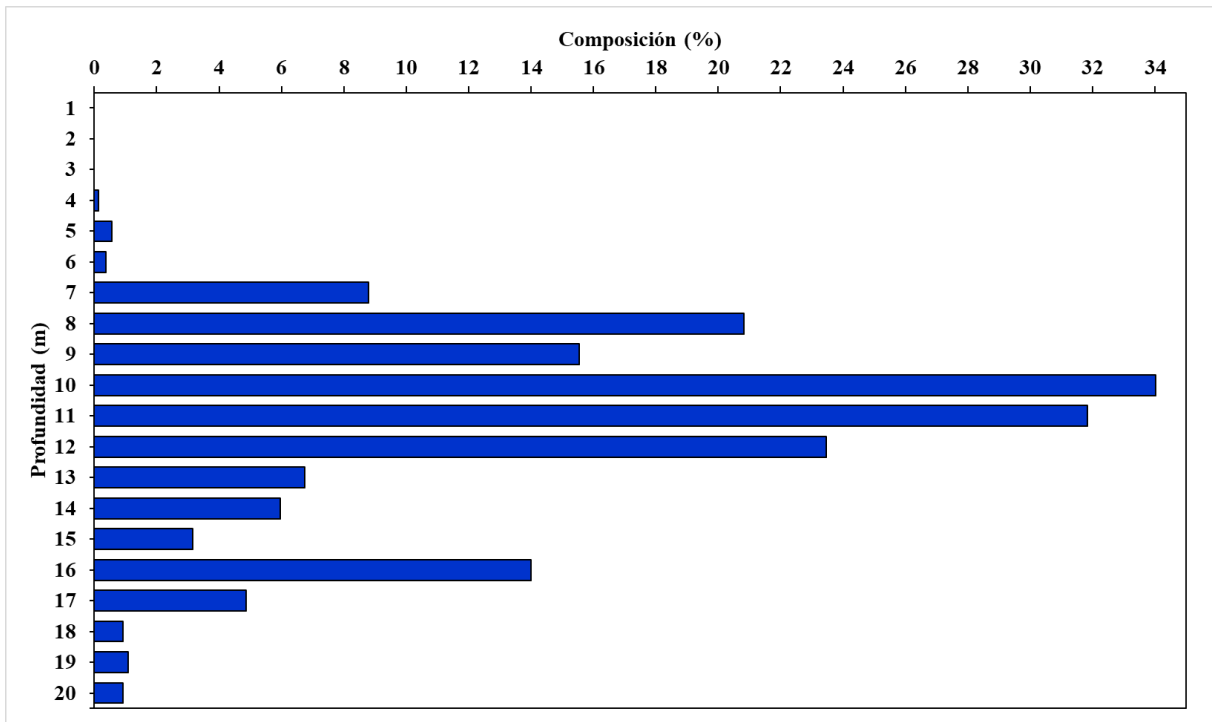


En ese sentido, se estima que a profundidades  $> 7$  m y  $< 20$  m el porcentaje de texturas como suelo orgánico poroso con humedad saturada en el subsuelo es mucho mayor comparada con la capa de subsuelo entre 1 m a 6 m de profundidad cercana a la superficie, donde se observa la ausencia de las mismas texturas a profundidades de 1 m, 2 m y 3 m. Asimismo, se observa una menor concentración a profundidades  $> 13$  m y una mayor concentración de esta textura a la profundidad de 9 m (17.8 %).

En la figura 4.14 se ilustra la distribución porcentual de la composición clase F, en el perfil vertical de T2, a diferentes profundidades, donde se observa que la mayor cantidad porcentual de la composición de subsuelo clase F ( $> 14$  %) se encuentra entre 8 m a 12 m de profundidad. Por otro lado, la menor cantidad porcentual de la composición de la clase F,  $< 1$  % se encuentra entre 1 m a 6 m,  $< 2$  % se encuentra entre 18 m a 20 m de profundidad.

Figura 4.14.

Distribución porcentual de la composición clase “F” a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 2 prospectado con el GPR en el bofedal 2 de la microcuenca Apacheta.

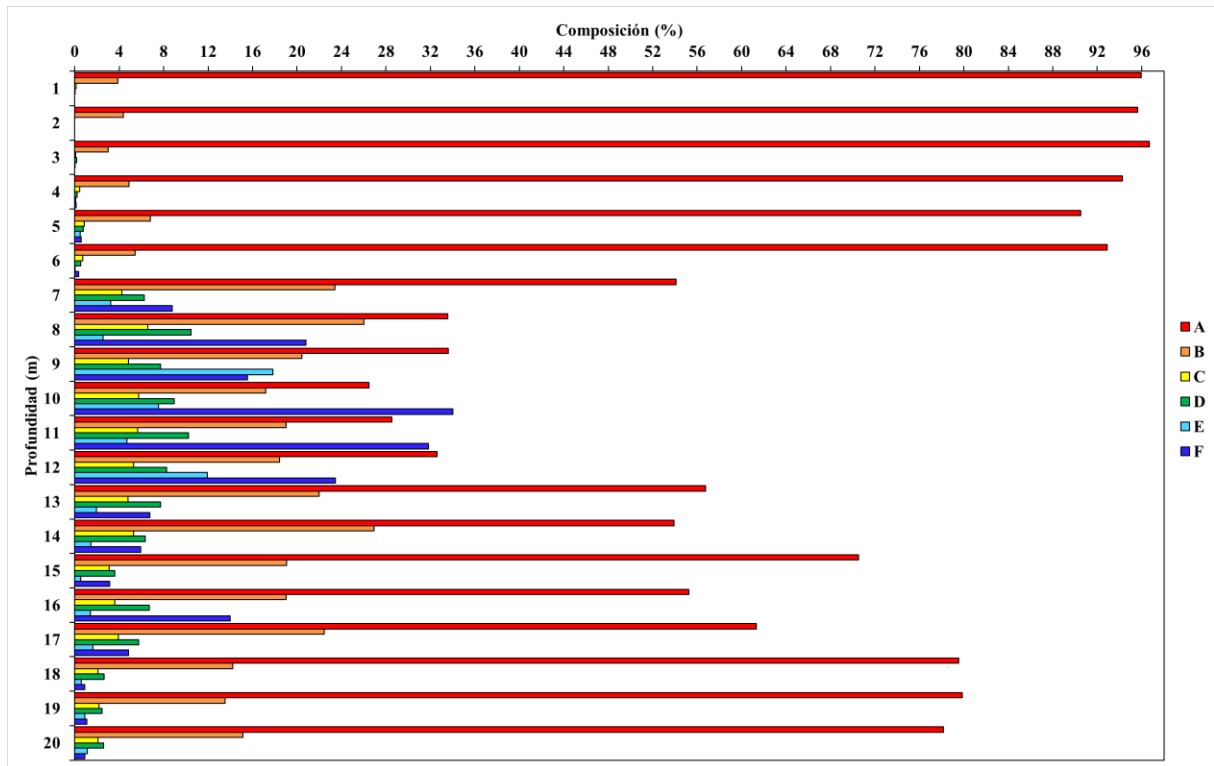


En ese sentido, se estima que a profundidades > 7 m el porcentaje de agua y humedad saturada en el subsuelo es mucho menor comparada con la capa de subsuelo entre 1 m a 6 m que son zonas cercanas a la superficie donde se observa ausencia de la misma en las profundidades de 1 m, 2 m y 3 m, lo cual indica la profundización de la napa freática en esta zona de bofedal. Asimismo, se observa a la profundidad de 10 m la concentración de agua y humedad saturada es mucho mayor (34 %).

En la figura 4.15 se ilustra la distribución de la composición de las clases A, B, C, D, E y F del perfil vertical de T2 del subsuelo de bofedal prospectado con el GPR. Se observa que las clases A y B se distribuyen en mayor concentración porcentual, la clase A presenta una composición de 95.96 % a 1 m, 95.62 % a 2 m, 95.71 % a 3 m, 94.24 % a 4 m, 90.49 % a 5 m y 92.88 % a 6 m, la clase E presenta una composición de 26 % a 8 m y 26.95 % a 14 m de profundidad.

Figura 4.15.

Distribución porcentual de la composición de clases A, B, C, D, E y F a diferentes profundidades, en el perfil vertical del transecto 2 prospectado con el GPR.



Por su parte, la clase E se expresa en menor proporción con respecto a las demás clases. Asimismo, la clase F se da en menor proporción con respecto a las demás clases a partir de la profundidad de 1 m hasta los 6 m, es decir en capas cercanas a la superficie del subsuelo, lo cual significa que esta zona de bofedal se mantiene muy seco y a medida que se profundiza la humedad va aumentando hasta los 12 m para luego disminuir hasta los 20 m. Esto sugiere que el bofedal 2 no almacena agua o humedad saturada en mayor proporción en las capas superficiales, argumentando la profundización de la napa freática.

#### 4.2. Variación de la distribución espacial de la composición del subsuelo de dos bofedales a la misma profundidad en la microcuenca Apacheta, mediante la aplicación de algoritmos de interpolación.

##### 4.2.1. Distribución espacial de la composición del subsuelo de dos bofedales a la misma profundidad con Interpolación IDW

En la figura 4.16 se ilustra la distribución espacial de la composición del subsuelo de bofedal correspondiente al perfil vertical de T1, prospectado con el GPR - Gepard, mediante interpolación IDW de los datos de PD detallados en el anexo 3, procesados a través de la ejecución del código Python del anexo A2.1. Para un mejor análisis de la información cualitativa de las clases A, B, C, D, E y F de composición de subsuelo de bofedal es preciso asignarle un valor de correspondencia a cada clase con la finalidad de realizar la interpolación numérica, así: A = 1, B = 2, C = 3, D = 4, E = 5 y F = 6.

Se observa que la mayor concentración de agua y humedad saturada en el subsuelo, clasificada en las clases E y F (celeste + azul), se encuentra localizada entre los 1.5 m a 4.5 m de profundidad. Asimismo, entre los 4.5 m a 6 m de profundidad se observa una mayor concentración de contenido de subsuelo de clase A y B (rojo + anaranjado).

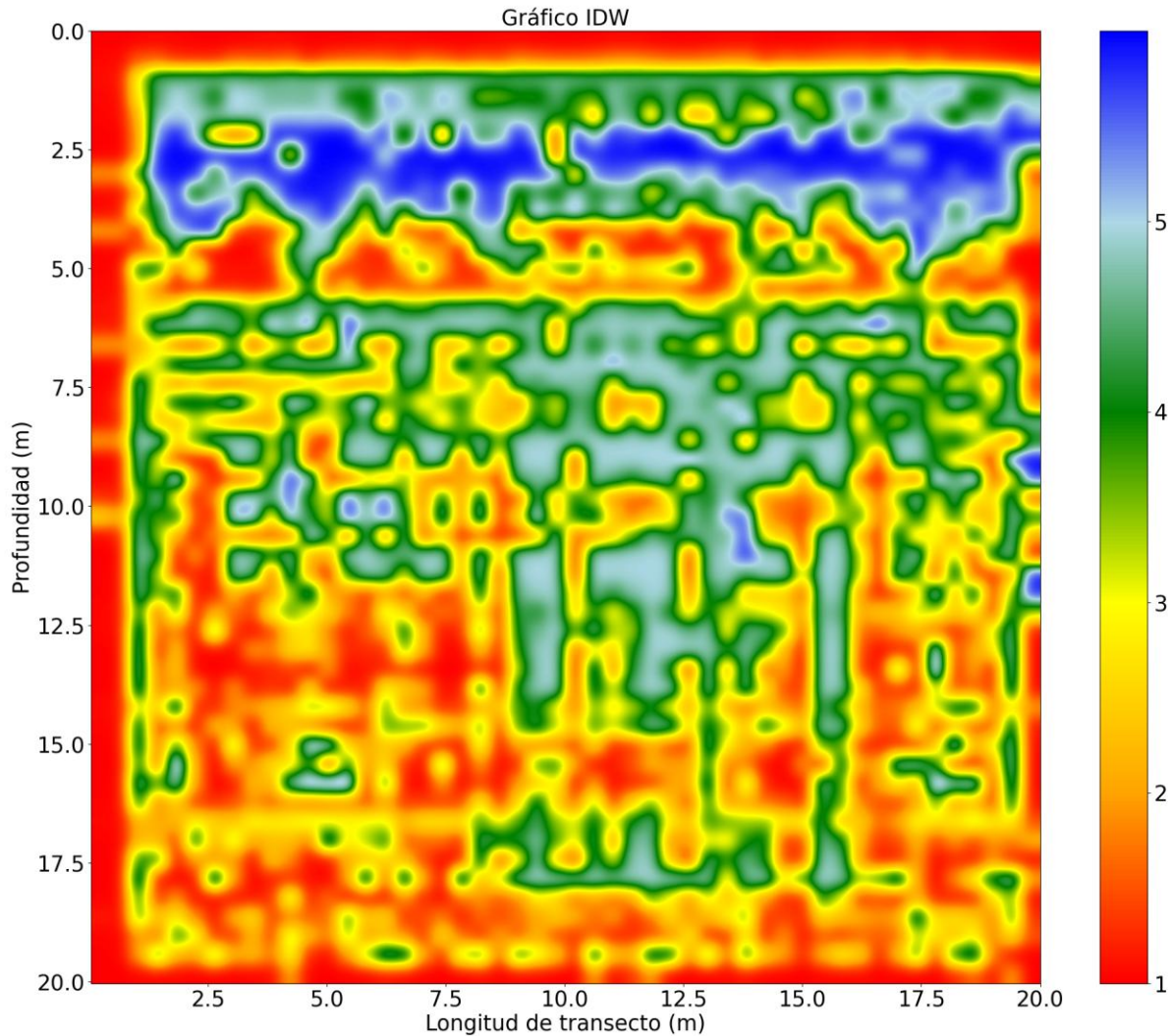
La franja vertical rojo + anaranjado localizada en el borde del extremo izquierdo no es precisamente la composición de subsuelo de clase A + B, posiblemente esa franja vertical se forma debido al inicio de la prospección con el GPR cuando no se realiza adecuadamente el desplazamiento del GPR, generando una cierta cantidad de datos que no se ajustan a la composición real del subsuelo de bofedal, por lo que se sugiere que estos datos no se consideren durante el análisis de las interpolaciones posteriores.

A profundidades > 6 m y < 15 m, la distribución de las clases D y E se encuentra rodeadas por la composición de suelo seco y duro correspondiente a las clases C, B y A. También, de manera aislada se observan bolsones con contenido de agua representados en color azul y humedad saturada representado por el color celeste envueltos por composición de la clase D.

A profundidades > 15 m se observa una mayor composición de suelo seco y duro perteneciente a la clase C (amarillo + anaranjado) que se encuentra acompañado de suelo de clase A.

Figura 4.16.

Distribución espacial de la composición de texturas del subsuelo del bofedal muestreado mediante interpolación IDW de los datos de permitividad dieléctrica del perfil vertical del transecto 1.

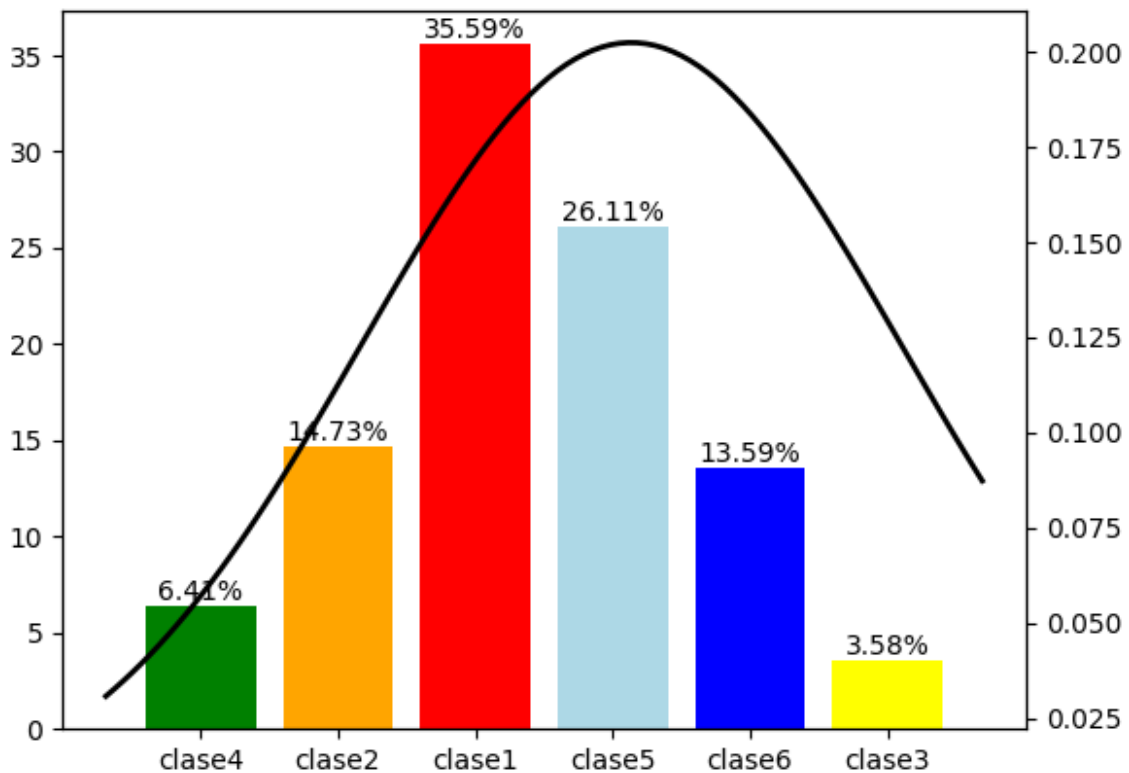


En la figura 4.17 se ilustra el contenido porcentual de la composición de subsuelo correspondiente a las clases A (clase 1 = 35.59 %), B (clase 2 = 14.73 %), C (clase 3 = 3.58 %), D (clase 4 = 6.41 %), E (clase 5 = 26.11 %) y F (clase 6 = 13.59 %) distribuidos mediante interpolación IDW de los datos de permitividad dieléctrica en un perfil vertical a lo largo de T1 prospectado con el GPR. Se observa que la clase A contiene el mayor contenido porcentual de la composición estratigráfica de subsuelo de bofedal con texturas de suelo orgánico con contenido de aire en zonas cercanas a la superficie y suelo con alta porosidad.

En menor proporción se encuentran la clase C con bajo contenido de texturas de limo seco, roca, sal de roca seca, suelo arcilloso seco, suelo arenoso y seco, piedra arenisca y grava, y la clase D con bajo contenido de arcilla húmeda, arena húmeda, suelo arcilloso húmedo, suelo arenoso húmedo, grava arenosa saturada, arcilla limosa, barro húmedo y limo con humedad saturada.

Figura 4.17.

Contenido porcentual de la composición de subsuelo de bofedal de las clases A, B, C, D, E y F distribuidos mediante interpolación IDW en un perfil vertical de subsuelo a lo largo del transecto 1 prospectado con el GPR.

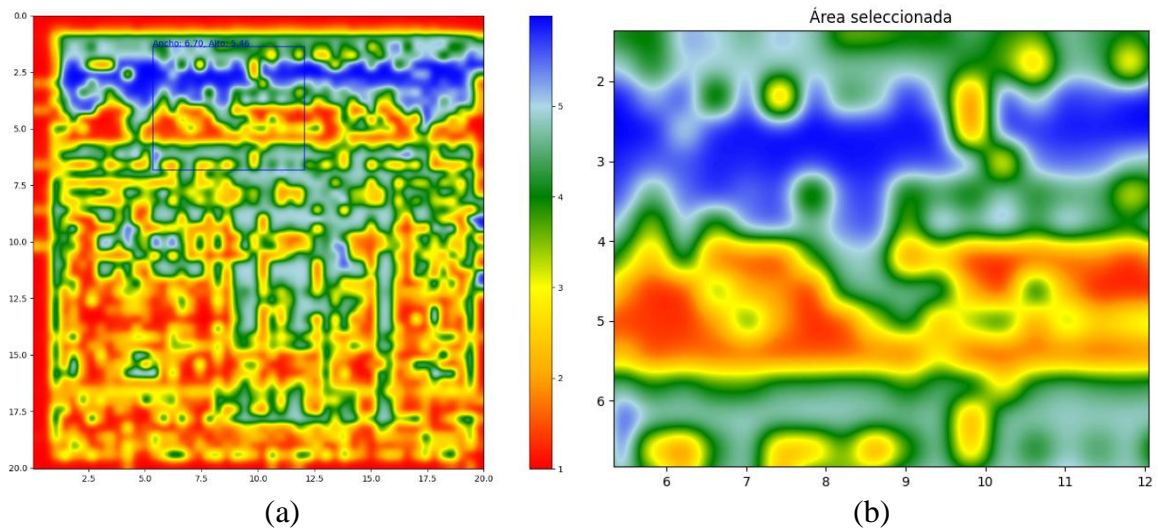


En la figura 4.18 se ha seleccionado una pequeña área muestral del perfil vertical del subsuelo de bofedal prospectado a lo largo de T1, mediante interpolación IDW. Se observa, que el área seleccionada (de 5 a 12 m de largo y 1 a 7 m de profundidad), contiene la clase F (azul) con la apariencia de bolsones con alto contenido de agua y humedad saturada, se encuentra envuelta por las clases E y D, asimismo, se observa que las clases A y B (rojo +

anaranjado) con suelos orgánicos altamente porosos, también se encuentran envueltas por las composiciones de subsuelo de clase C y D (amarillo + verde) que son suelos secos y duros, y que a su vez también se encuentran ubicados en menor proporción dentro de los suelos porosos.

Figura 4.18.

(a) Selección de un área muestral dentro el perfil vertical de subsuelo de bofedal a lo largo del transecto 1, prospectado con el GPR, (b) Área muestral seleccionada del perfil vertical de subsuelo de bofedal.



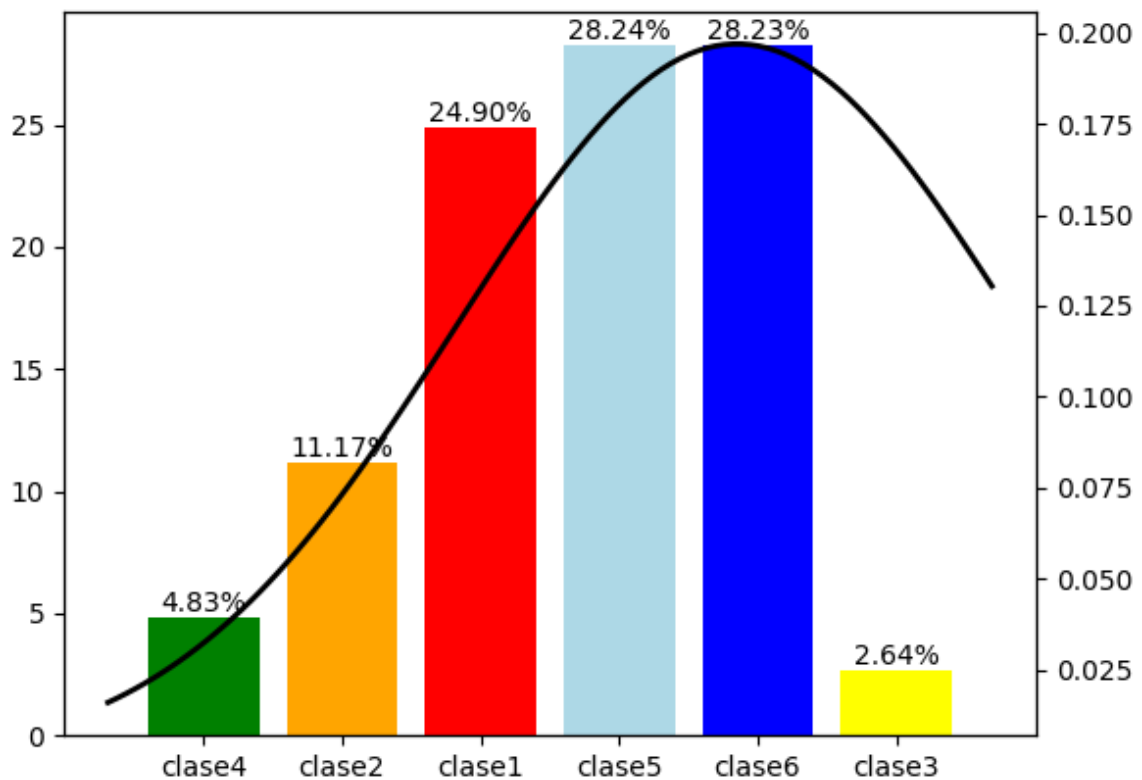
En la figura 4.19 se ilustra el porcentaje del contenido de la composición de subsuelo contenida en la sección muestreada y seleccionada en la figura 4.18, perteneciente al perfil vertical del subsuelo de bofedal prospectado con el GPR a lo largo de T1, mediante interpolación IDW de los datos de permitividad dieléctrica.

Se observa, que el área muestral seleccionada contiene la clase E (celeste) en mayor proporción (clase 5 = 28.24 %) en comparación con las demás clases, pero en similar proporción (clase 6 = 28.23 %) se encuentra la clase F (azul) con la apariencia de bolsones con grandes contenidos de agua y humedad saturada. Se observa que en tercer lugar se encuentra la clase A (clase 1 = 24.9 %) también contiene el mayor contenido porcentual de

la composición estratigráfica de subsuelo de bofedal con texturas de suelo orgánico con contenido de aire en zonas cercanas a la superficie y suelo con alta porosidad.

Figura 4.19.

Contenido porcentual de la composición de subsuelo de bofedal de las clases A, B, C, D, E y F distribuidos mediante interpolación IDW de los datos de permitividad dieléctrica, correspondiente a la selección muestral del área contenida en un perfil vertical de subsuelo a lo largo de T1 prospectado con el GPR.

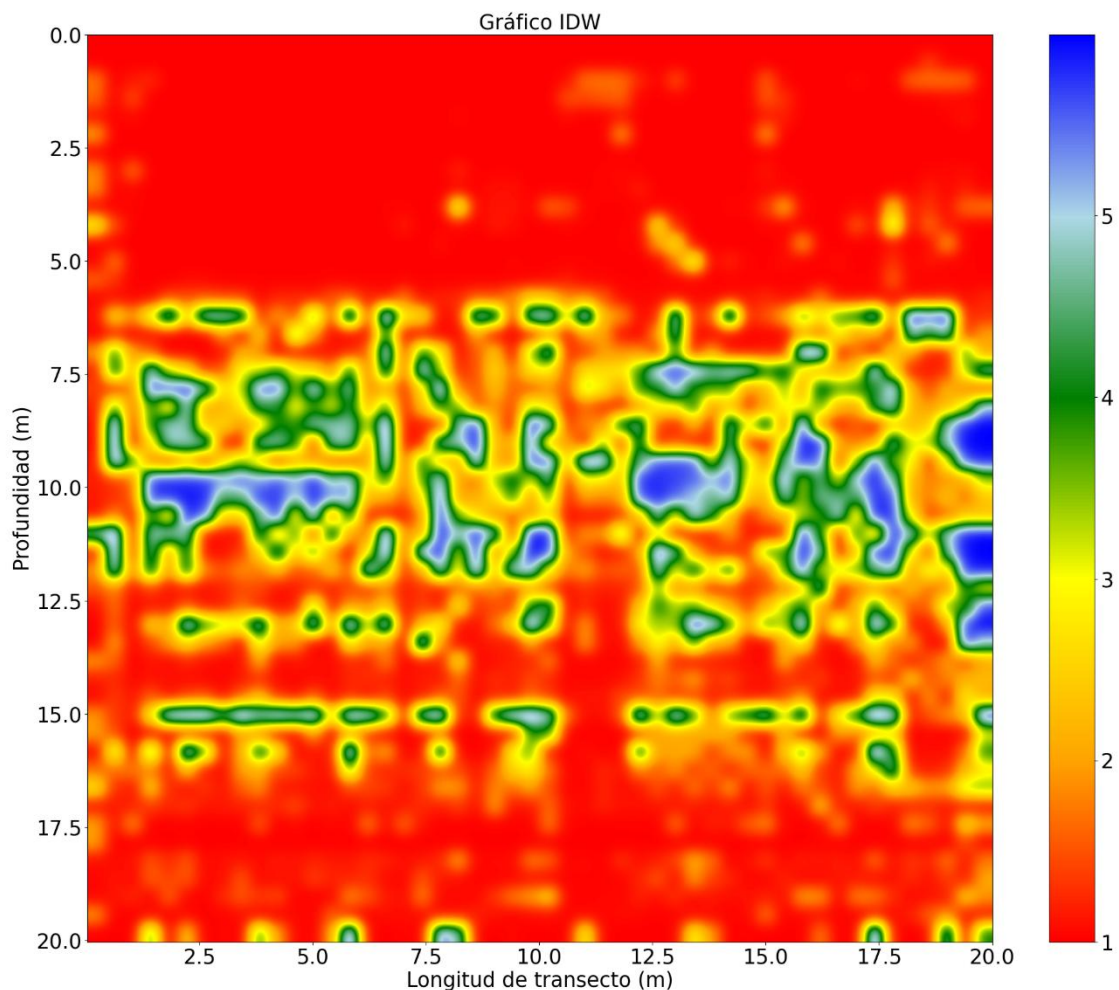


En menor proporción se encuentran la clase C (clase 3 = 2.64 %) con bajo contenido de texturas de limo seco, roca, sal de roca seca, suelo arcilloso seco, suelo arenoso y seco, piedra arenisca y grava, y la clase D (clase 4 = 4.83 %) con bajo contenido de arcilla húmeda, arena húmeda, suelo arcilloso húmedo, suelo arenoso húmedo, grava arenosa saturada, arcilla limosa, barro húmedo y limo con humedad saturada.

En la figura 4.20 se ilustra la distribución espacial de la composición del subsuelo de bofedal correspondiente al perfil vertical de T2, prospectado con el GPR - Gepard, mediante interpolación IDW de los datos de PD detallados en el anexo 3, procesados a través de la ejecución del código Python del anexo A2.1.

Figura 4.20.

Distribución espacial de la composición de texturas del subsuelo del bofedal muestreado mediante interpolación IDW de los datos de permitividad dieléctrica del perfil vertical del subsuelo a lo largo del transecto 2.



Se observa que la mayor concentración de agua y humedad saturada en el subsuelo, clasificada en las clases E y F (celeste + azul), se encuentra localizada entre los 9 m a 13 m

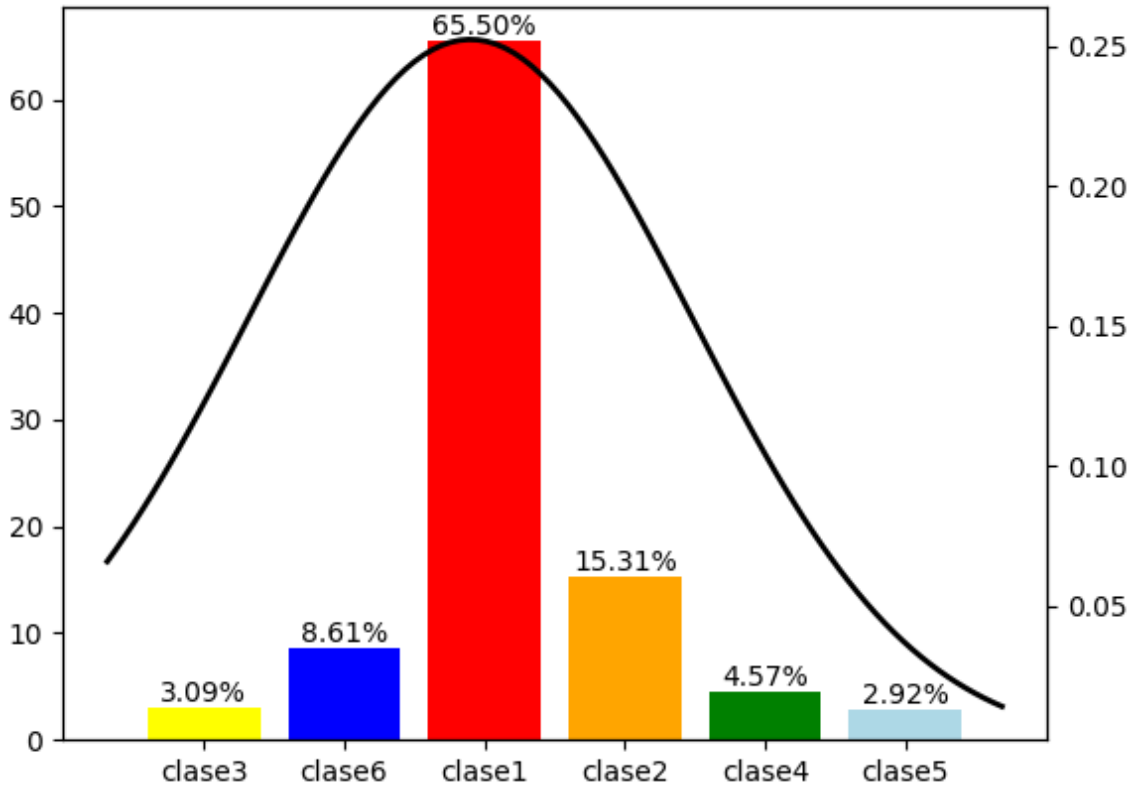
de profundidad, se observa la localización de bolsones de agua envueltos en texturas de clase C y D. Asimismo, es importante observar un gran contenido de texturas de clase A desde la superficie 0 m hasta los 6 m de profundidad con una mayor concentración de contenido de subsuelo orgánico y poroso.

A profundidades  $> 13$  m y  $< 16$  m, la distribución de las clases D y E se encuentra rodeadas por la composición de suelo orgánico altamente poroso correspondiente a las clases A y B. También, de manera aislada se observan porciones de texturas con contenido de humedad saturada de clase E envuelto por las texturas de la clase D que a su vez está envuelta por las texturas de las clases B y A. A profundidades  $> 16$  m se observa una mayor composición de suelo orgánico altamente poroso perteneciente a la clase A y B (rojo + anaranjado).

En la figura 4.21 se ilustra el contenido porcentual de la composición estratigráfica de subsuelo correspondiente a las clases A (clase 1 = 65.5 %), B (clase 2 = 15.31 %), C (clase 3 = 3.09 %), D (clase 4 = 4.57 %), E (clase 5 = 2.92 %) y F (clase 6 = 8.61 %) distribuidos mediante interpolación IDW de los datos de permitividad dieléctrica en un perfil vertical a lo largo de T2 prospectado con el GPR. Se observa que la clase A contiene el mayor contenido porcentual de la composición estratigráfica de subsuelo de bofedal con texturas de suelo orgánico altamente poroso con contenido de aire en zonas cercanas a la superficie y suelo profundo con alta porosidad. En menor proporción se encuentran la clase C con bajo contenido de suelos porosos y humedad saturada, y la clase E con bajo contenido de texturas de limo seco, roca, sal de roca seca, suelo arcilloso seco, suelo arenoso y seco, piedra arenisca y grava.

Figura 4.21.

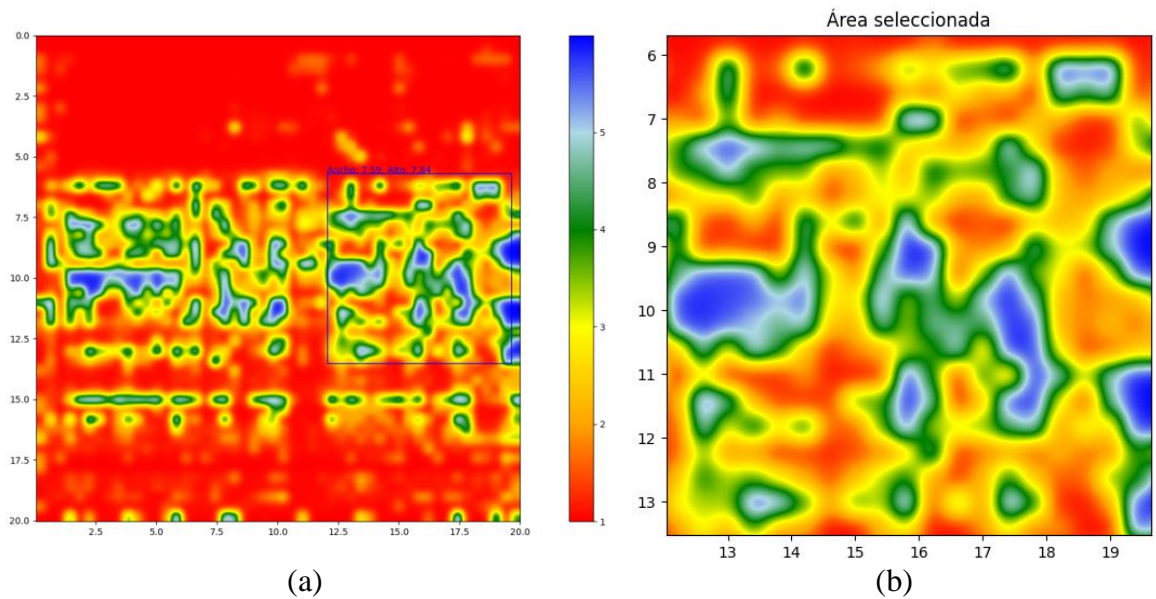
Contenido porcentual de la composición de subsuelo de bofedal de las clases A, B, C, D, E y F distribuidos mediante interpolación IDW de los datos de permitividad dieléctrica en un perfil vertical de subsuelo a lo largo del transecto 2 prospectado con el GPR.



En la figura 4.22 se ha seleccionado una pequeña área muestral del perfil vertical del subsuelo de bofedal prospectado a lo largo de T2, mediante interpolación IDW de los datos de permitividad dieléctrica correspondiente a las diferentes texturas que yacen en el subsuelo de bofedal prospectado con el GPR. Se observa, que el área seleccionada (de 12 a 20 m de largo y 5 a 14 m de profundidad), contiene la clase F (azul) con la apariencia de bolsones con alto contenido de agua envuelta por suelo con humedad saturada de clase E (celeste), que a su vez se encuentran envuelta por las clases C y D. Asimismo, se observa que las clases A y B (rojo + anaranjado) con suelos orgánicos altamente porosos, también se encuentran envueltas por las composiciones de subsuelo de clase C y D (amarillo + verde) que son suelos secos y duros, y que a su vez se encuentran ubicados en mayor proporción con respecto a los suelos porosos de esta sección muestreada.

Figura 4.22.

(a) Selección de un área muestral dentro el perfil vertical de subsuelo de bofedal a lo largo del transecto 2, prospectado con el GPR, (b) Área muestral seleccionada del perfil vertical de subsuelo de bofedal.



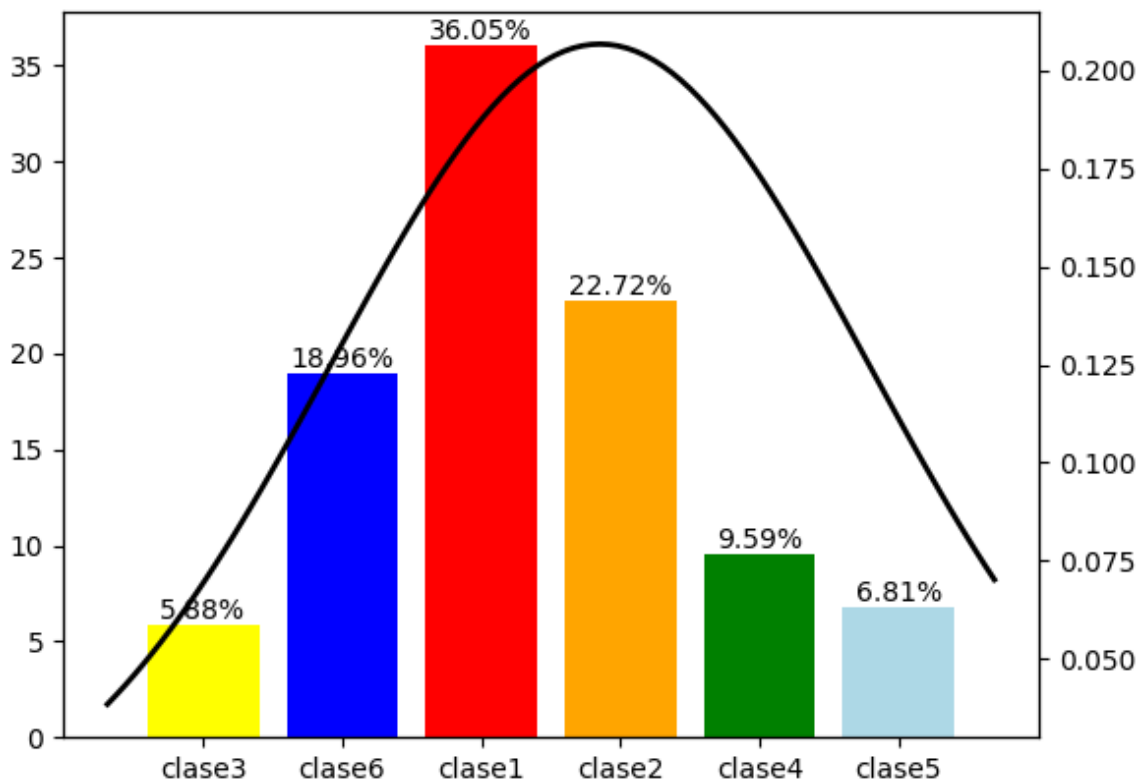
En la figura 4.23 se ilustra el porcentaje del contenido de la composición de subsuelo contenida en la sección muestreada y seleccionada en la figura 4.22, perteneciente al perfil vertical del subsuelo de bofedal prospectado con el GPR a lo largo de T2, mediante interpolación IDW de los datos de permitividad dieléctrica.

Se observa, que el área muestral seleccionada contiene la clase A (rojo) en mayor proporción (clase 1 = 36.05 %) en comparación con las demás clases, en segundo lugar, se encuentra la clase B (clase 2 = 22.72 %), seguido de la clase F (clase 6 = 18.96 %) con la apariencia de bolsones con mayor contenido de agua y humedad saturada. Se observa que en cuarto lugar se encuentra la clase D (clase 4 = 9.59 %) con contenido de texturas como arcilla húmeda, arena húmeda, suelo arcilloso húmedo, suelo arenoso húmedo, grava arenosa saturada, arcilla limosa, barro húmedo y limo con humedad saturada.

Figura 4.23.

Contenido porcentual de la composición de subsuelo de bofedal de las clases A, B, C, D, E y F distribuidos mediante interpolación IDW de los datos de permitividad dieléctrica,

correspondiente a la selección muestral del área contenida en un perfil vertical de subsuelo a lo largo de T2 prospectado con el GPR.



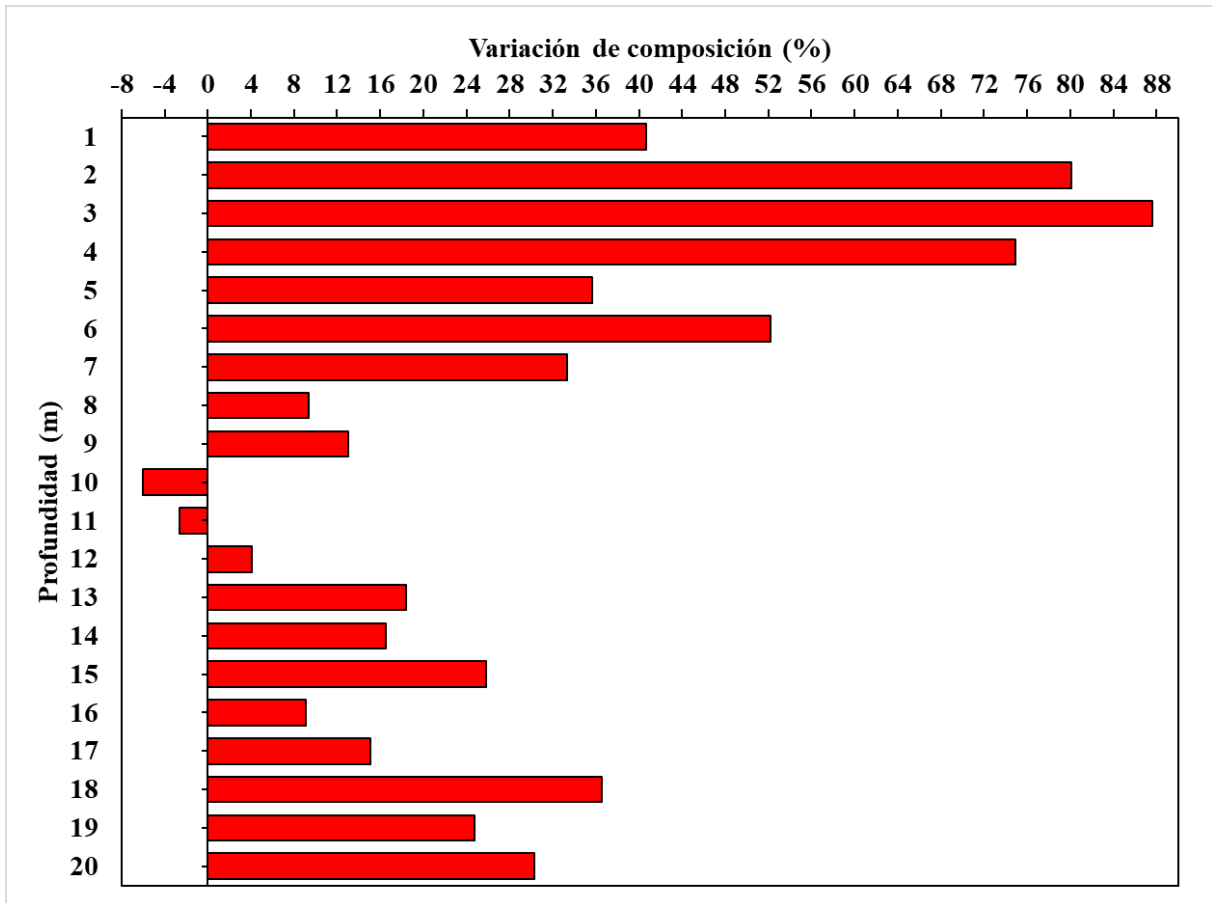
En menor proporción se encuentran la clase C (clase 3 = 5.88 %) con bajo contenido de texturas de limo seco, roca, sal de roca seca, suelo arcilloso seco, suelo arenoso y seco, piedra arenisca y grava, y la clase E (clase 5 = 6.81 %) con bajo contenido de humedad saturada en el subsuelo del bofedal 2.

En la figura 4.24 se ilustra la variación de la composición porcentual de la clase A entre T2 con respecto a T1, donde se observa que T2 posee un mayor porcentaje de composición de la clase A entre 1 m a 9 m de profundidad, llegando a alcanzar el mayor porcentaje a la profundidad de 3 m, además de un alto contenido de texturas de suelo de clase A entre los 12 m a 20 m de profundidad.

Solo a la profundidad de 10 m y 11 m el T1 presenta mayor contenido de clase A. Esto significa que el T1 posee una mayor concentración de clase A que el T2.

Figura 4.24.

Variación de la composición porcentual de la clase A, a partir de la diferencia de porcentajes entre el transecto 2 y el transecto 1.

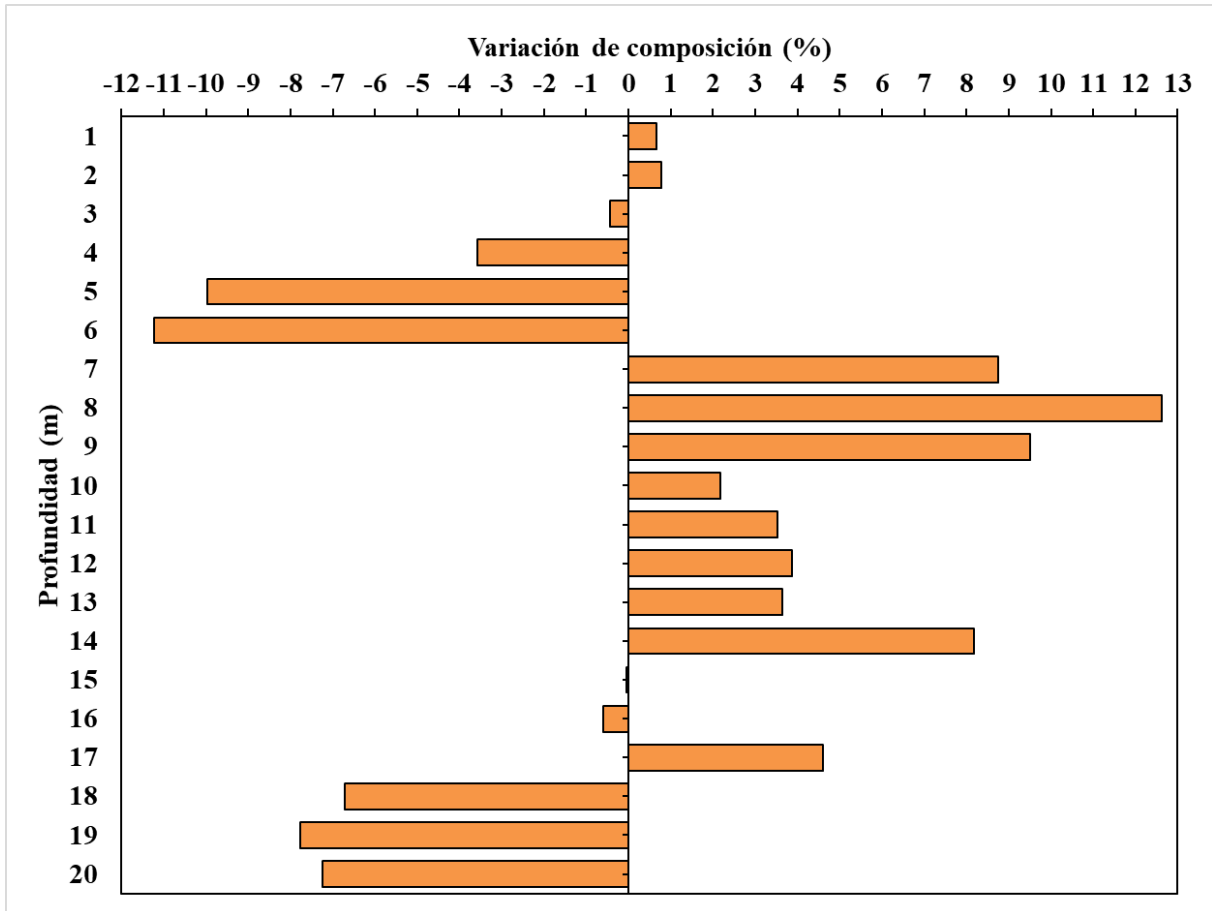


En la figura 4.25 se ilustra la variación de la composición porcentual de la clase B entre T2 con respecto a T1, donde se observa que T2 posee un mayor porcentaje de composición de la clase B entre 1 m a 2 m de profundidad y de 7 m a 14 m de profundidad, llegando a alcanzar el mayor porcentaje a la profundidad de 8 m.

A la profundidad de 3 m a 6 m y de 18 m a 20 m, el T1 presenta mayor contenido de texturas de suelo de clase B, siendo el mayor porcentaje a la profundidad de 6 m. Esto significa que T2 posee mayor concentración de clases B que T1.

Figura 4.25.

Variación de la composición porcentual de la clase B, a partir de la diferencia de porcentajes entre el transecto 2 y el transecto 1.

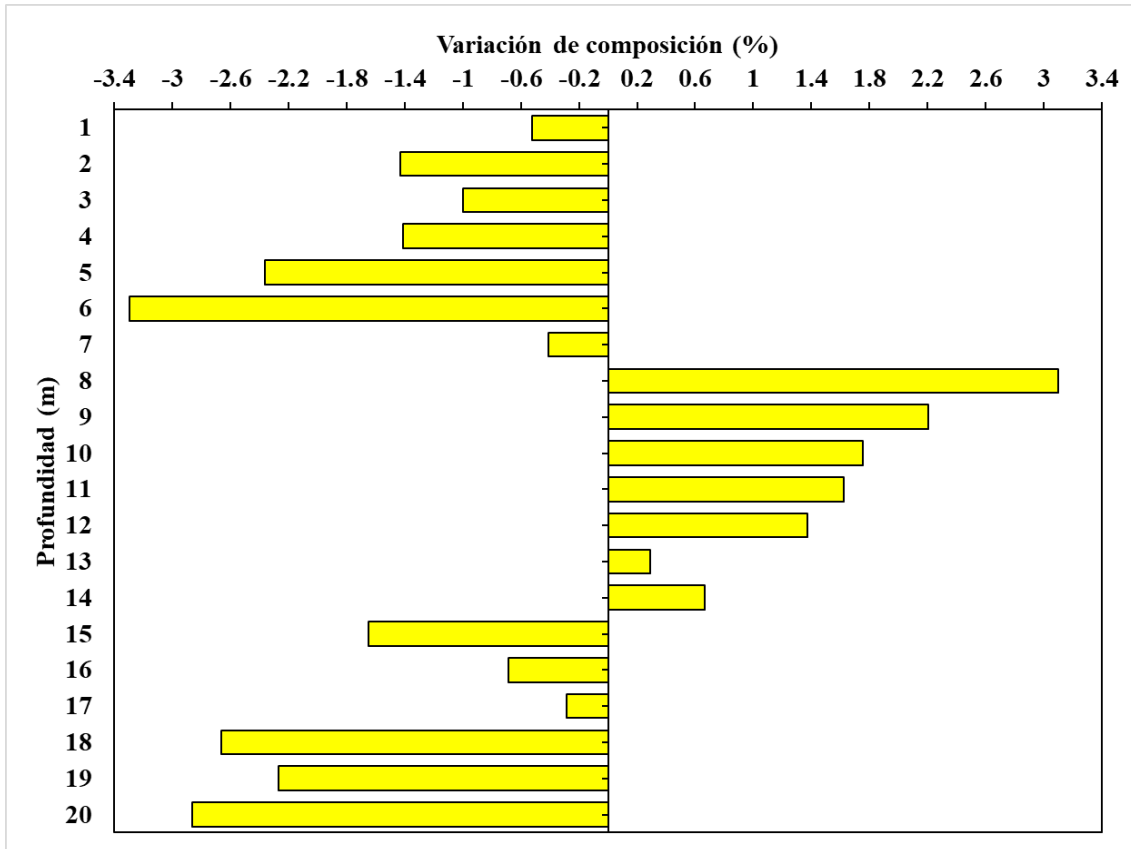


En la figura 4.26 se ilustra la variación de la composición porcentual de la clase C entre T2 con respecto a T1, donde se observa que T2 posee un mayor porcentaje de composición de la clase C entre los 8 m a 14 m de profundidad, llegando a alcanzar un alto porcentaje a la profundidad de 8 m.

A la profundidad entre 3 m a 6 m y de 18 m a 20 m, T1 presenta mayor contenido de clase C con un alto contenido de suelos duros y seco a las profundidades de 6 m y 20 m. Esto significa que T1 posee mayor concentración porcentual de texturas de clase C que T2.

Figura 4.26.

Variación de la composición porcentual de la clase C, a partir de la diferencia de porcentajes entre el transecto 2 y el transecto 1.

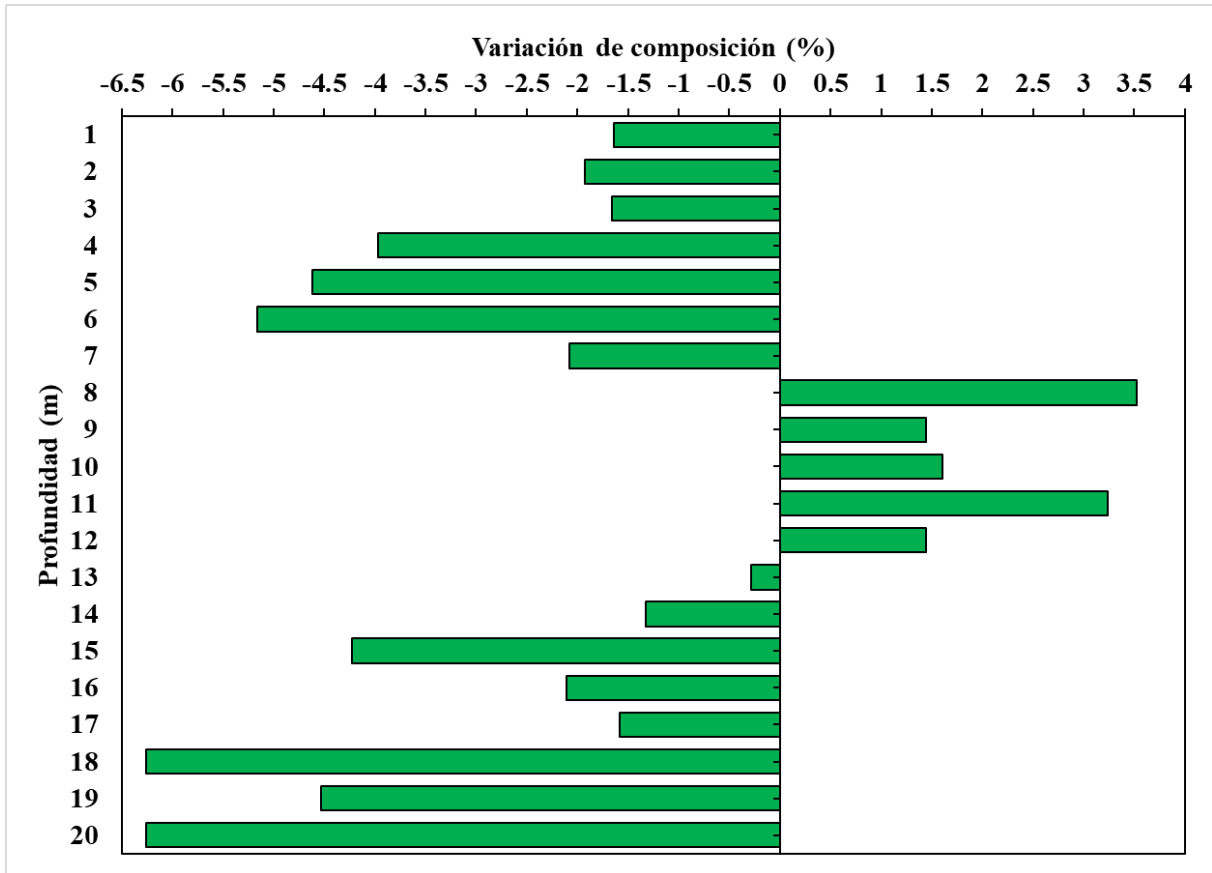


En la figura 4.27 se ilustra la variación de la composición porcentual de la clase D entre T2 con respecto a T1, donde se observa que T2 posee un mayor porcentaje de composición de la clase D entre los 8 m a 12 m de profundidad, llegando a alcanzar un alto porcentaje a la profundidad de 8 m.

A la profundidad entre 1 m a 7 m y de 13 m a 20 m, el T1 presenta mayor contenido porcentual de clase D con un alto contenido de texturas de suelos seco a las profundidades de 6 m, 18 m y 20 m. Esto significa que T1 posee una mayor concentración de texturas de clase D que T2.

Figura 4.27.

Variación de la composición porcentual de la clase D, a partir de la diferencia de porcentajes entre el transecto 2 y el transecto 1.

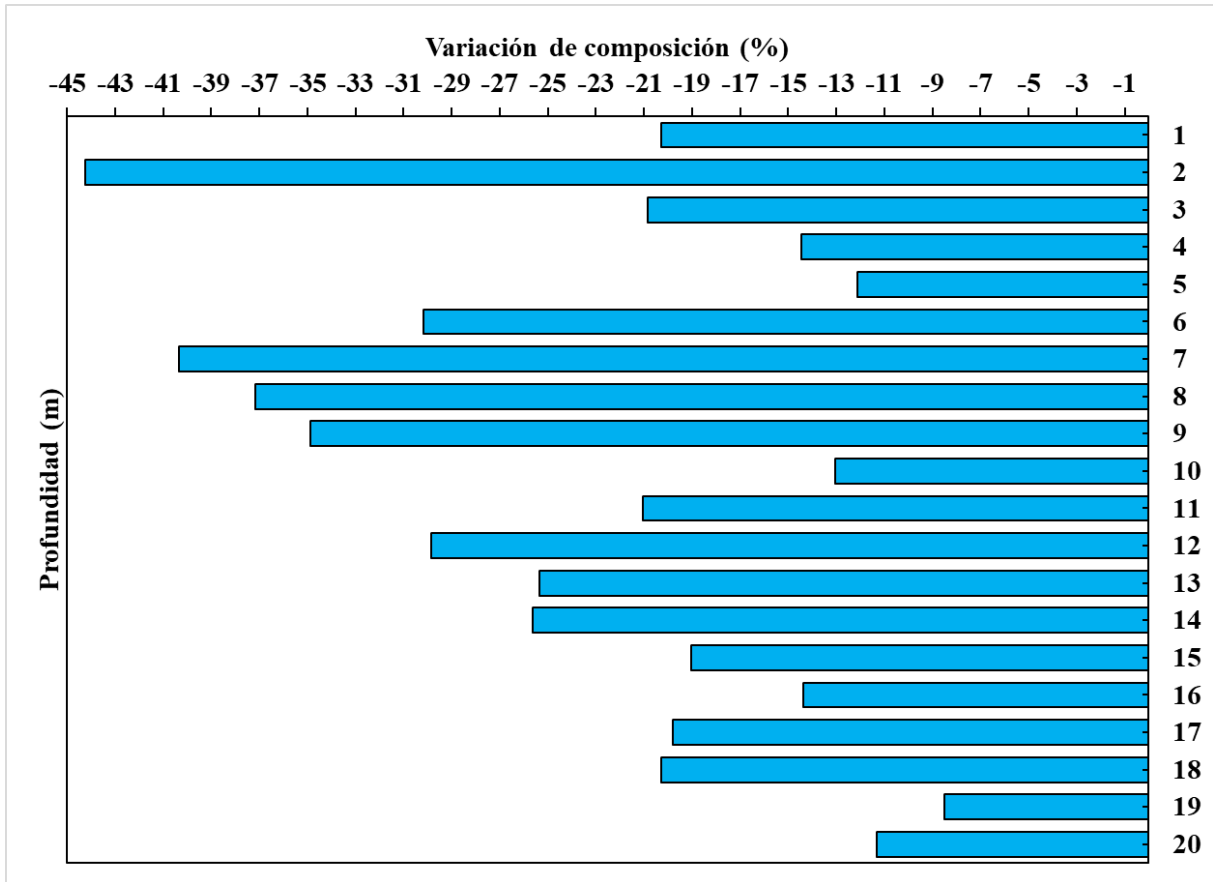


En la figura 4.28 se ilustra la variación de la composición porcentual de la clase E entre T2 con respecto T1, donde se observa que T1 posee un mayor porcentaje de composición de la clase E desde la superficie a 0 m hasta los 20 m de profundidad, llegando a alcanzar un alto porcentaje a la profundidad de 2 m.

A la profundidad entre 6 m a 9 m y de 11 m a 18 m, el T1 presenta mayor contenido porcentual de clase E con un alto contenido de texturas de suelos con humedad saturada a las profundidades de 7 m y 12 m. Esto significa que T1 posee una mayor concentración de texturas de suelo de clase E que T2.

Figura 4.28.

Variación de la composición porcentual de la clase E, a partir de la diferencia de porcentajes entre el transecto 2 y el transecto 1.

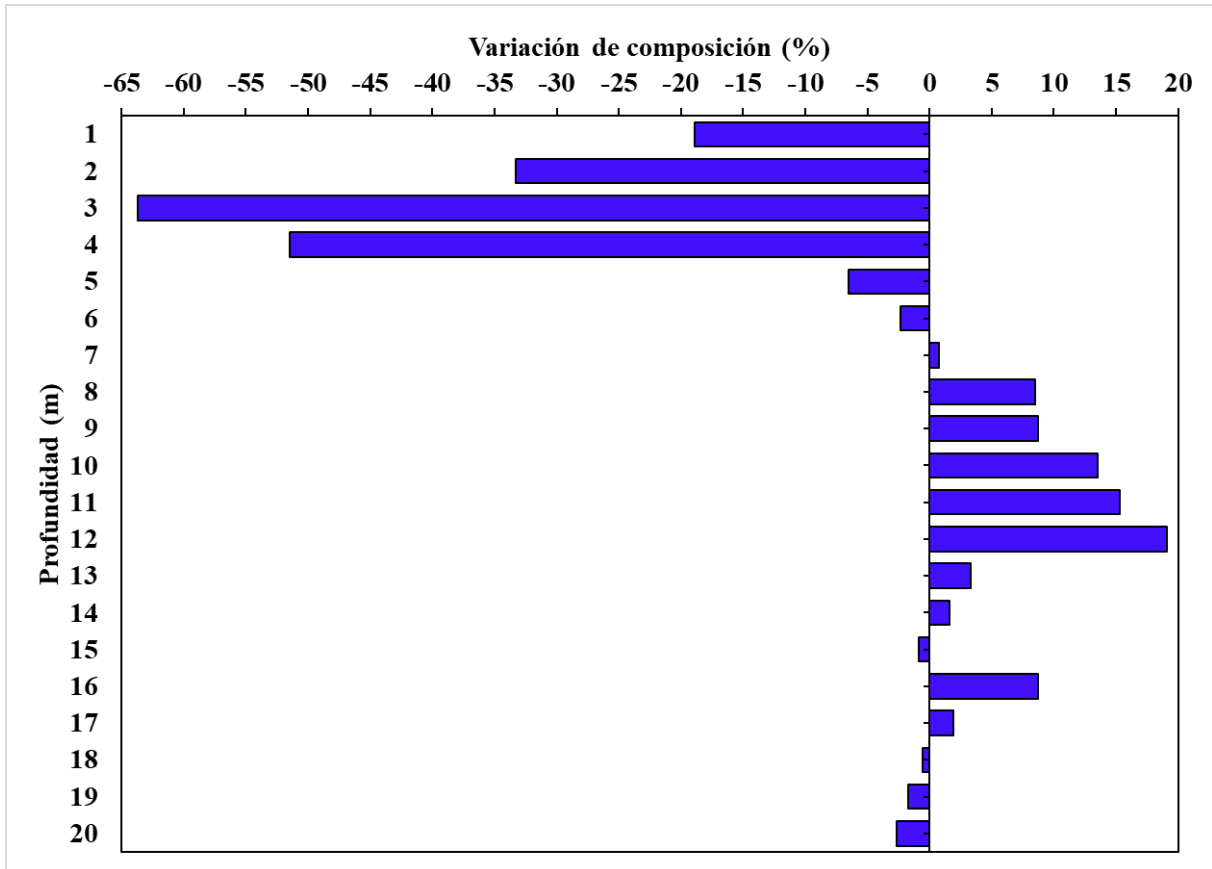


En la figura 4.29 se ilustra la variación de la composición porcentual de la clase F entre T2 con respecto a T1, donde se observa que T2 posee un mayor porcentaje de composición de la clase F entre los 7 m a 14 m de profundidad, llegando a alcanzar un alto porcentaje a la profundidad de 12 m.

A la profundidad entre 1 m a 6 m y de 18 m a 20 m, el T1 presenta mayor contenido porcentual de clase F con un gran contenido de texturas de bolsones de agua a las profundidades de 3 m y 20 m. Esto significa que T1 posee una mayor concentración de texturas de clase F que T2, muy a pesar de que T2 tenga una mayor distribución porcentual en casi todo el perfil vertical del subsuelo de bofedal.

Figura 4.29.

Variación de la composición porcentual de la clase F, a partir de la diferencia de porcentajes entre el transecto 2 y el transecto 1.



#### 4.2.2. Distribución espacial de la composición del subsuelo de dos bofedales a la misma profundidad con Interpolación Kriging

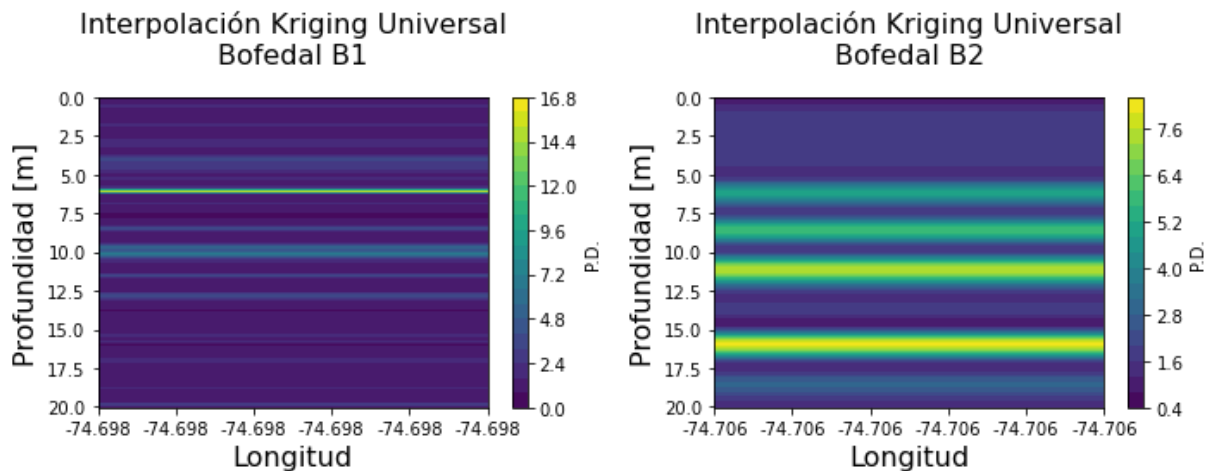
En la figura 4.16 se ilustra la distribución espacial de la composición del subsuelo de bofedal correspondiente al perfil vertical del transecto T1 y T2, prospectado con el GPR - Gepard, mediante interpolación Kriging Universal de los datos de PD de la composición estratigráfica del subsuelo de bofedal detallados en el anexo 3, procesados a través de la ejecución del código Python del anexo A2.2.

Para un mejor análisis de los valores de PD correspondiente a la composición estratigráfica del subsuelo de bofedal es preciso considerar solo 1000 datos como muestra de los datos obtenidos de la prospección con el GPR. Se observa que la interpolación Kriging

Universal no genera una mejor distribución espacial de los valores de PD de la composición estratigráfica del subsuelo de bofedal a lo largo de los transectos T1 y T2 caracterizado por los valores de **longitud** y profundidad, lo cual no permite describir las diferentes concentraciones de las texturas. Sin embargo, en esta escena lo mayores valores de permitividad dieléctrica se concentran a las profundidades de 11 m y 16 m.

Figura 4.30.

Interpolación Kriging Universal para los transectos 1 y 2 de los bofedales 1 y 2 en función a su profundidad, **longitud** y permitividad dieléctrica, considerando solo 1000 datos muestrales.



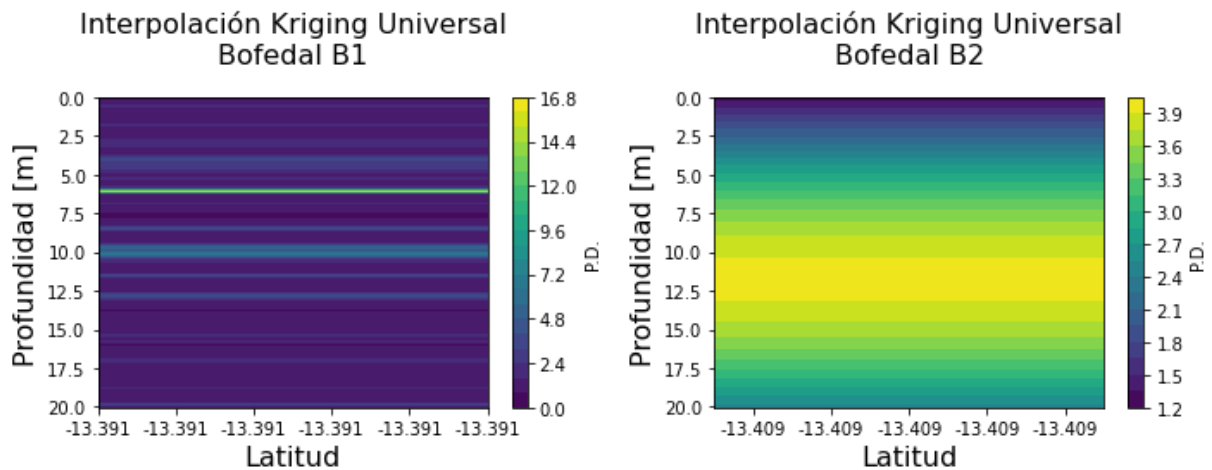
Para un mejor análisis de los valores de PD correspondiente a la composición estratigráfica del subsuelo de bofedal es preciso considerar solo 1000 datos como muestra de los datos obtenidos de la prospección con el GPR.

Se observa que la interpolación Kriging no genera una mejor distribución espacial de los valores de PD de la composición estratigráfica del subsuelo de bofedal a lo largo de T1 y T2 caracterizado por los valores de **latitud** y profundidad, lo cual no permite describir las diferentes concentraciones de las texturas.

Sin embargo, en esta escena lo mayores valores de permitividad dieléctrica se concentran más a la profundidad de 10 m y 13 m.

Figura 4.31.

Interpolación de Kriging Universal para los transectos 1 y 2 de los bofedales 1 y 2 en función a su profundidad, **latitud** y permitividad dieléctrica, considerando solo 1000 datos muestrales.



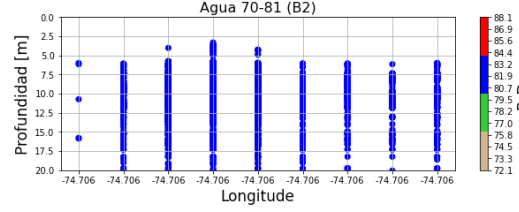
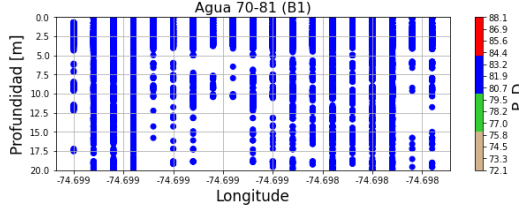
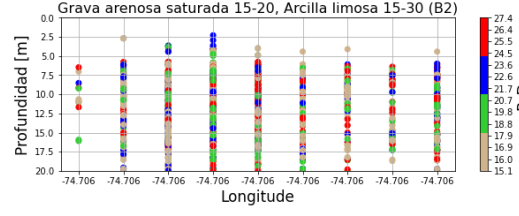
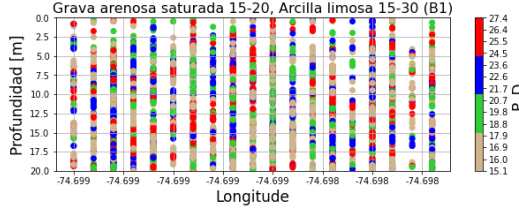
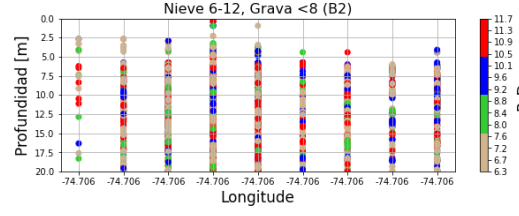
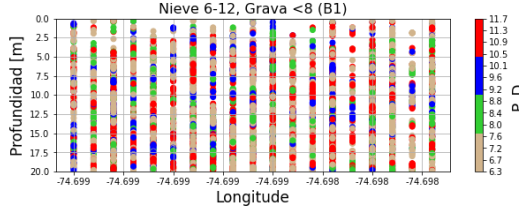
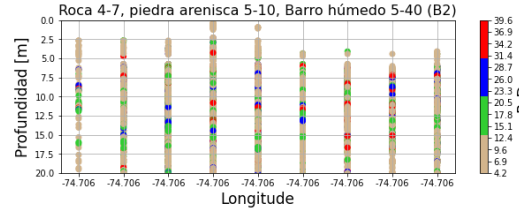
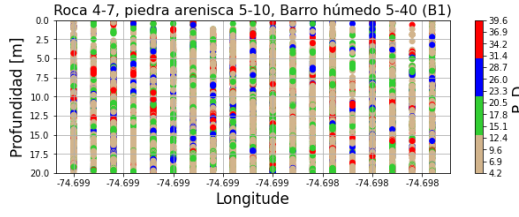
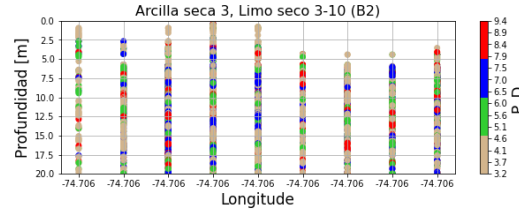
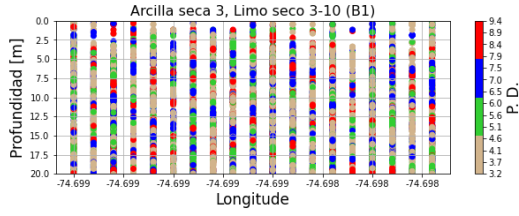
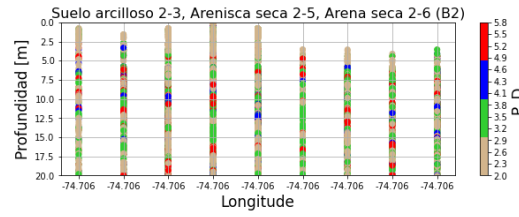
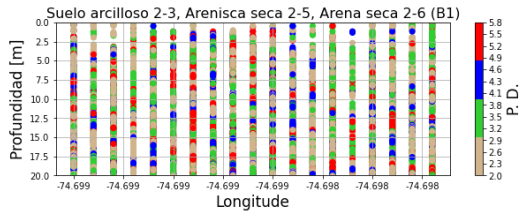
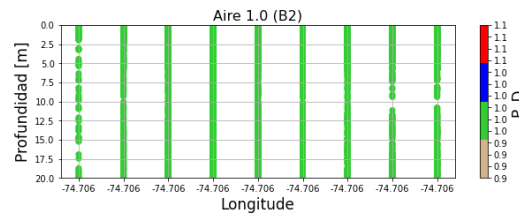
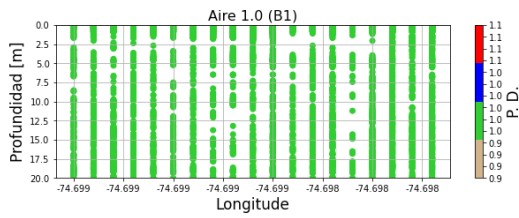
En la figura 4.32 se ilustra la concentración de la composición de texturas de subsuelo estimada de los valores de PD a partir de la interpolación Kriging Universal. Se observa el contenido de aire en el suelo es mayor en T1, al igual que la presencia de suelo arcilloso, arenisca, arena seca, arcilla seca, limo seco, grava, grava arenosa saturada, humedad saturada en el suelo y bolsones con contenido de agua.

Si se compara estos resultados obtenidos de la interpolación Kriging se observa que la interpolación IDW mantiene una postura más certera al momento de realizar una mejor distribución de las texturas de subsuelo clasificadas en 6 clases, algo que Kriging no permite realizar de manera certera el procesamiento de una gran cantidad de datos.

En ese sentido, los resultados analizados a partir de la interpolación IDW muestran mayor credibilidad al momento de diferenciar una clase con respecto a la otra y al momento de identificar la ubicación de zonas con alta humedad saturada y de bolsones con contenido de agua a diferentes profundidades.

Figura 4.32.

Concentración de la composición de texturas de subsuelo de bofedal a través de la permitividad dieléctrica contenido en el perfil vertical a lo largo de los transecto (a) T1 y (b) T2 en función de su longitud y profundidad.



(a)

(b)

## 5. Conclusiones

Se logró determinar 6 clases de composición de texturas en el subsuelo del bofedal a partir de la permitividad dieléctrica estimada de los datos radargrama de GPR – Gepard correspondientes al perfil vertical del subsuelo a diferentes profundidades a lo largo de dos transectos T1 y T2 muestreados en dos bofedales de la microcuenca Apacheta, llegando establecer que la composición de texturas de subsuelo entre ambos bofedales varía de manera significativa con un acuerdo pobre según el índice Kappa de Cohen (0.113) y el índice Kappa de Fleiss (0.0732).

Esto sugiere que ambos bofedales mantienen características de subsuelo diferentes, propias de cada bofedal ubicado a diferentes latitudes, longitudes y altitudes, en este sentido T2 contiene mayor composición porcentual de texturas clase A (> 80 % a la profundidad entre 1 m a 6 m) y B (> 16 % a la profundidad entre 7 m a 16 m) que T1.

En el caso contrario, T1 contiene mayor contenido de texturas de clase C (> 4.5 % a las profundidades de 7 m, 13 m, 14 m, 15 m, 18 m y 20 m), D (> 7.5 % a las profundidades de 7 m, 13 m, 14 m, 15 m, 16 m, 18 m y 20 m), E (> 35 % a la profundidad de 1 m, 7 m, 8 m, 9 m y 12 m) y F (> 30 % a la profundidad entre 2 m a 4 m) que T2.

Se logró estimar la variación de la distribución espacial de la composición estratigráfica de la textura del subsuelo de dos perfiles verticales a lo largo de dos transectos T1 y T2 muestreados en dos bofedales a la misma profundidad en la microcuenca Apacheta, mediante la aplicación de algoritmos de interpolación IDW y Kriging. En cuya aplicación, la interpolación IDW ha realizado la mejor representación de las texturas presentes en el subsuelo prospectado a través de los datos de permitividad dieléctrica, en donde se observa que la mayor concentración de contenido de agua y humedad saturada correspondiente a las clases E (26.11 %) y F (13.59 %).

Asimismo, es posible seleccionar una sección muestral de cada perfil vertical de los transectos T1 y T2, para determinar su concentración porcentual de la composición textural, así como la identificación de las clases que allí predominan. Por su parte la sección muestral seleccionada en T1 contiene la clase A en un 24.9 %, la clase B en un 11.17 %, en mayor proporción se identifica a las clases E (28.24) y F (28.23) y en menor proporción se tiene a

las clases D (4.83 %) y C (2.64 %). En igual medida, se tiene una sección muestral seleccionada en T2 que contiene en mayor proporción a las clases A (36.05 %) y B (22.72 %), seguido de la clase F en un 18.96 % y en menor proporción se tiene a las clases D (9.59 %) y C (5.88 %).

Se logró evaluar la variación porcentual del contenido de texturas según su clasificación de texturas agrupadas en clases a partir de los datos de permitividad dieléctrica existente entre ambos perfiles verticales muestreados en dos bofedales, pudiendo establecer que en el perfil vertical de T1 presenta una mayor concentración porcentual en un rango de profundidades localizadas entre los 1.5 m a 9 m y de 12 m a 20 m de profundidad, con un máximo de la clase A (35.59 %) a la profundidad de 3 m, en comparación con T2 que focaliza las clases E (2.92 %) y F (8.61 %) entre los 9 m a 13 m de profundidad, aquí también la clase A (65.5 %) alcanza la mayor concentración porcentual.

## **6. Recomendaciones**

Se recomienda aplicar en mejor medida el método de interpolación IDW para la distribución espacial de la composición de texturas de subsuelo de bofedal estimadas a partir de los valores de PD, que a su vez se estiman de los datos de amplitud de onda reflejada en cada capa del subsuelo y recibida por el GPR – Gepard, dado que su potencialidad en el reconocimiento de patrones dentro del mismo rango de valores permite clasificar de manera significativa las texturas que componen el subsuelo del bofedal muestreado.

Para asegurar una mejor versatilidad de los resultados se recomienda realizar un mayor número determinado de prospecciones a través de diferentes transectos en un número considerable de bofedales, de tal manera que la muestra de datos sea significativa para la comparación de perfiles verticales de las composiciones que yacen en el subsuelo de cada bofedal prospectado con el GPR - Gepard.

Durante el análisis de los datos de amplitud de onda de radar reflejada en cada capa del subsuelo medidas con el GPR – Gepard, se recomienda no considerar los datos de los primeros puntos prospectados, esto debido a que los primeros pasos que se dan con el GPR no se encuentran en la medida correcta debido a falla con el procedimiento de medición por parte de la persona que carga con el GPR, estos datos no se encuentran en coherencia con los demás datos de la prospección por lo que no se ajustan a la información real que yace en el subsuelo del bofedal prospectado.

Se recomienda mejorar la aplicabilidad del método de interpolación Kriging a través del manejo del código en Python para el procesamiento de los datos de permitividad dieléctrica de las zonas muestreadas y prospectadas con el GPR – Gepard, dado que la gran cantidad de datos que se debe prospectar supera las expectativas de este método y del código utilizado, de esta manera, el logro de trabajar con toda la data se permitirá superar el rendimiento del método para un número grande de datos para así poder comparar los resultados en igual medida con otros métodos de interpolación.

## 7. Referencias bibliográficas

- Alcántara, S. (2014). Ground penetrating radar for the detection of buried objects in the subsurface. *Measurement*, Elsevier, v. 47, p. 484–491.
- Alcoba, S. (2019). Ground-penetrating radar for the study of the subsurface structure of the malargüe región, mendoza province, argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, Elsevier, v. 90, p. 496–507.
- Alumbaugh, D.L.; Hoversten, M.K.; O'Brien, M.H. (2016). Toward a quantitative interpretation of gpr data for subsurface characterization. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 81, n. 2, p. WA19–WA32.
- Bano, M. (2016). Ground penetrating radar (gpr) for subsurface imaging: A review of recent developments. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 16, n. 4, p. 439.
- 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>
- Ccasani Sierra, M., Gonzales Castillo, J., Orihuela Romero, C., HilarioValenzuela, P., Ccasani Sierra, M., Gonzales Castillo, J., Orihuela Romero, C., & HilarioValenzuela, P. (2023). Valoración económica de los servicios ecosistémicos del recurso hídrico de la cuenca del río Cachi, Ayacucho, Perú. *Manglar*, 20(3), 247-256.  
<https://doi.org/10.57188/manglar.2023.028>

- Chen, Y.; Hao, J.; Gao, L. (2020). A survey of deep learning techniques for subsurface imaging using ground-penetrating radar. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics, Environmental and Engineering Geophysical Society*, v. 25, n. 2, p. 159–176.
- Conyers, L.B. (2013). *Ground-penetrating radar for archaeology*. 2. ed. [S.l.]: AltaMira Press.
- Conyers, L.B.; Goodman, D. (1997). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews, Elsevier*, v. 42, p. 173–196.
- Conyers, L.B. (2004). *Ground-Penetrating Radar for Geoarchaeology*. [S.l.]: John Wiley & Sons.
- Conyers, L.B., Goodman, D. (1997). *Ground-penetrating radar: An introduction for archaeologists*. 1st. ed. Walnut Creek, CA: AltaMira Press.
- Dam, R.L. (2001). Ground-penetrating radar. *Encyclopedia of Environmental Microbiology*, John Wiley & Sons, New York, NY, p. 1–13.
- Daniels, D.J. (2004). *Ground Penetrating Radar*. [S.l.]: Institution of Electrical Engineers.
- Davis, D.H. (2003). Ground-penetrating radar. *Reviews of geophysics, Wiley Online Library*, v. 41, n. 2.
- Galindo, L.M; Moreno, J.M. (2011). Los impactos del cambio climático en América latina y el caribe. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, v. 11, n. 2, p. 141–152.

- Gambetta, M. (2020). Ground-penetrating radar for the detection of buried archaeological structures: A case study from the ancient city of herculaneum (italy). *Remote Sensing, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, v. 12, n. 1, p. 108.
- Groom, R.W; Holbrook, W.S. (2013). Ground-penetrating radar imaging of subsurface structures and hydrologic processes in an alpine floodplain. *Journal of Hydrology, Elsevier*, v. 496, p. 173–186.
- Groom, S. (2008). Radar observations of internal layering and basal melting on the ice sheets of Antarctica and greenland. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, IEEE*, v. 46, n. 10, p. 2824–2832.
- Hayashi, K.; Sato, M.; Ishii, E. (2018). Enhanced cross-borehole gpr imaging using time-shifted difference. *Journal of Applied Geophysics, Elsevier*, v. 158, p. 45–55.
- Henríquez, C.; Méndez, J.C & Masís, R. (2013). Interpolación de variables de fertilidad de suelo mediante el Análisis kriging y su validación<sup>1</sup>. *Agronomía Costarricense*, 37(2), 71-82. Retrieved August 11, 2023, from [http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0377-94242013000200006&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242013000200006&lng=en&tlng=es).
- Hinostroza, H. (2022). Estimación de parámetros geométricos y espectrales diferenciados en imágenes de radar sentinel-1 para la clasificación de uso del suelo en la microcuenca apacheta. *UNSCH*, p. 57–63.
- Hoback, W. (2016). Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity. *Vadose Zone Journal, Soil Science Society of America*, v. 15, n. 8, p. 1–12.
- Jol, H.M. (2009). *Ground penetrating radar theory and applications*. [S.l.]: Elsevier.

- Jol, H.M; Bristow, C.S. (2003). Ground penetrating radar in sediments: Introduction. *Sedimentary Geology*, Elsevier, v. 159, n. 1-3, p. 1–5.
- Jol, M.L.; Smith, A.D.; Doe, P.J. (2014). Processing ground-penetrating radar data in polar coordinates. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, IEEE, v. 52, n. 1, p. 396–407.
- Khan, N; Lu, Z; Daniilidis, A. (2019). Ground-penetrating radar as a tool for monitoring petroleum leaks in the subsurface. *Journal of Environmental Management*, Elsevier, v. 243, p. 171–181.
- Klotzsche, A., Vereecken, H., & Van der Kruk, J. (2019). GPR full-waveform inversion of a variably saturated soil-aquifer system. *Journal of Applied Geophysics*, 170, 103823. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103823>
- Kusakabe, O; Ishizaki, T; Mochizuki, Y. (2019). Evaluation of concrete bridge decks by ground penetrating radar. *Journal of Nondestructive Evaluation*, Springer, v. 38, n. 3, p. 1–11.
- Lambot, S., & Slob, E. (2011). Ground Penetrating Radar: Imaging Within and Through the Ground. In *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics* (pp. 443-455). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-8702-7\\_98](https://doi.org/10.1007/978-90-481-8702-7_98)
- Lin, T; Yang. (2018). A review of ground-penetrating radar signal analysis techniques for pavement systems. *Journal of Applied Geophysics*, Elsevier, v. 149, p. 104–116.
- Liu, H.; Endres, A.L. (2017). Ground-penetrating radar for geological applications: An introduction. In *Ground-penetrating Radar for Geoarchaeology* (pp. 1-14). Springer, Cham.

- Loke, M.H. (2013). A tutorial on 2d electrical resistivity imaging methods. *Surveys in Geophysics*, Springer, v. 34, n. 2, p. 211–232.
- Lopez-Martinez, J; Martos-Rosillo, S; Perez-Garcia, A. (2021). Ground-penetrating radar as a tool for groundwater detection in an arid environment: The almería (se spain) alluvial aquifer. *Hydrology*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 8, n. 2, p. 54.
- Luo, Y.; Li, Y.; Hu, X. (2016). Numerical modeling of ground penetrating radar wave propagation in a two-dimensional heterogeneous lossy medium. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, Environmental and Engineering Geophysical Society, v. 21, n. 2, p. 77–84.
- López, J. (2015). Ground penetrating radar for groundwater exploration: A review. *Journal of Applied Geophysics*, Elsevier, v. 120, p. 164–182.
- Moghadas, D; Golshani, A; Arian, M. (2018). Ground penetrating radar imaging of the subsurface structures: A case study in the garmsar plain, central iran. *Geoscience Frontiers*, Elsevier, v. 9, n. 2, p. 521–529.
- Moncada, W., Willems, B., Moncada, W., & Willems, B. (2020). Tendencia anual del caudal de salida, en referencia al caudal ecológico en la Microcuenca Apacheta / Ayacucho / Perú, del 2000 al 2018. *Ecología Aplicada*, 19(2), 93-102. <https://doi.org/10.21704/rea.v19i2.1560>
- Moncada, W., & Willems, B. (2020). Spatial and temporal analysis of surface temperature in the Apacheta micro-basin using Landsat thermal data. *Revista de Teledetección*, 57, Article 57. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13855>

- Moncada, W., Willems, B., Pereda, A., Aldana, C., & Gonzales, J. (2022). Tendencia anual, anomalías y predicción del comportamiento de cobertura de vegetación con imágenes Landsat y MOD13Q1, microcuenca Apacheta, Región Ayacucho. *Revista de Teledetección*, 59, Article 59. <https://doi.org/10.4995/raet.2022.15672>
- Moncada, W., Pereda, A., Masías, M., Lagos, M., Portal-Quicaña, E., Aldana, C., Saavedra, Y., & Saavedra, E. (2024). Estimación de la humedad del suelo de un ecosistema de humedal altoandino (Bofedal) con datos de georradar y mediciones In-Situ, Ayacucho-Perú. *International Soil and Water Conservation Research*. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2024.06.003>
- Neal, A. (2004). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-science reviews*, Elsevier, v. 66, n. 3-4, p. 261–330.
- Oliver, M. A. (1990). Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems. *International Journal of Geographic Information Systems* 4: 313–332.
- Pan, K.L.; Chen, Y.G.; Chang, K.J. (2019). Fault zone imaging by ground-penetrating radar: a case study from the longitudinal valley fault, eastern taiwan. *Geophysical Journal International*, Oxford University Press, v. 217, n. 3, p. 1732–1742.
- Paz, G; Guillén, J. (2010). *Ayacucho: Historia, arte y cultura*. [S.l.]: Editorial San Marcos.
- Reynolds, J. M. (1997). *An introduction to applied and environmental geophysics*. Wiley, Chichester, UK.
- Römer, J; Mester, A. (2008). Ground-penetrating radar measurements for hydrogeological investigations. *Hydrogeology Journal*, Springer, v. 16, n. 4, p. 673–684.

- Royle, A. G., F. L. Clausen y P. Frederiksen. (1981). Practical Universal Kriging and Automatic Contouring. *Geoprocesamiento* 1: 377–394.
- Sánchez, J. M. 2016. Análisis de Calidad Cartográfica mediante el estudio de la Matriz de Confusión. *Pensamiento Matemático*, 6(2), 9-26.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5998855>
- Sato, K. (2013). Ground-penetrating radar investigations for groundwater exploration in africa. *Journal of Applied Geophysics*, Elsevier, v. 97, p. 45–54.
- Sato, M. (2017). Ground penetrating radar and resistivity survey for mapping soil and rock thickness in upland areas. *Soil Science and Plant Nutrition*, Taylor & Francis, v. 63, n. 5, p. 454–463.
- Siemon, B.; Slater, L. (2016). High-resolution GPR imaging of thin bedrock in a karst terrain. *Journal of Applied Geophysics*, Elsevier, v. 134, p. 35–42.
- Soto, R. (2013). Ground-penetrating radar study of groundwater resources in wetland environments in central Chile. *Hydrogeology Journal*, Springer, v. 21, n. 4, p. 815–824.
- Sun, X. (2017). Hydrogeological characterization of karst aquifer systems using integrated geophysical techniques in the qinling mountains of central china. *Hydrogeology Journal*, Springer, v. 25, n. 3, p. 817–832.
- Vallejo, A.A. (1980). *Civitas guamangensis: Los hombres, espacios y solares de la villa de san juan de la frontera de huamanga (1540–1547)*.

- Wagner, S. (2015). Use of ground-penetrating radar to study the anatomy and stability of an active rock glacier on the matterhorn (ch). *The Cryosphere*, Copernicus GmbH, v. 9, n. 3, p. 1097–1113.
- Watson, D. F., & Philip, G. M. (1985). A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation. *Geoprocessing*, 2, 315–327
- Yang, W.; Lin, H.; Wang, D. (2020). Detection of underground tunnel anomalies using ground-penetrating radar and electromagnetic methods. *Applied Sciences*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 8, p. 2713.
- Zajícová, K; Chuman, T. (2019). Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review. *Geoderma*, Elsevier, v. 343, p. 116–129.

## Abreviaturas

Abreviatura	Descripción
GPR	Ground-penetrating radar
ERT	Electrical Resistivity Tomography
OEM	Ondas Electromagnéticas
R	Coefficiente de reflexión
$\vec{E}$	Campo Eléctrico
$\vec{B}$	Campo Magnético
$\vec{D}$	Desplazamiento Eléctrico
$\vec{H}$	Inducción magnética
$\vec{M}$	Densidad magnética
$\vec{J}$	Densidad de corriente eléctrica
$\rho$	Densidad de carga eléctrica
$\epsilon_r$	Permitividad dieléctrica relativa
$\sigma$	Conductividad eléctrica
$\mu$	Permeabilidad magnética
$\rho'$	Coefficiente de reflexión de Fresnel
$A_m$	Amplitud de onda radar medida para la reflexión de cualquier medio
$A_0$	Amplitud de onda radar reflejada en superficie de material prospectado
TSS	Temperatura Superficial del Suelo
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas
NDSI	Índice de Nieve de Diferencias Normalizadas
NDWI	Índice de Agua de Diferencias Normalizadas
CV	Cobertura de Vegetación
PD	Permitividad Dieléctrica
MHS	Medidor de Humedad de Suelo
OK	Kriging Ordinario
IDW	Interpolación de la distancia inversa ponderada

## **Anexos**

### **Anexo 1. Matriz de consistencia**

**Título: Variación de la composición del subsuelo de dos bofedales a diferentes profundidades en la microcuenca Apacheta, mediante datos radargrama.**

**Bachiller: Mauro Huallpa Navarro**

**Asesor: Mg. Julio Francisco Jiménez Arana.**

**Coasesor: Mg. Wilmer Enrique Moncada Sosa**

Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variables	Métodos	Técnicas e Instrumentos
<p>¿En qué medida varía la composición del subsuelo de dos bofedales a diferentes profundidades mediante datos radargrama, en la microcuenca Apacheta - Ayacucho?</p> <p><b>Problemas Específicos</b>  <b>PE1:</b> ¿Cuál es la composición del perfil vertical del subsuelo de dos bofedales de la microcuenca Apacheta a diferentes profundidades a partir de la permitividad dieléctrica estimada de los datos radargrama?  <b>PE2:</b> ¿Cuál es la variación de la distribución espacial de la composición del subsuelo de dos</p>	<p>Analizar la variación de la composición del subsuelo de dos bofedales a diferentes profundidades mediante datos radargrama, en la microcuenca Apacheta - Ayacucho.</p> <p><b>Objetivos Específicos</b>  <b>OE1:</b> Determinar la composición del perfil vertical del subsuelo de dos bofedales de la microcuenca Apacheta a diferentes profundidades a partir de la permitividad dieléctrica estimada de los datos radargrama.  <b>OE2:</b> Estimar la variación de la distribución espacial de la composición del subsuelo de dos bofedales a la misma profundidad en la</p>	<p>La variación de la composición del subsuelo de dos bofedales a diferentes profundidades mediante datos radargrama, en la microcuenca Apacheta - Ayacucho, es significativa.</p> <p><b>Hipótesis Específicas</b>  <b>HE1:</b> La composición del perfil vertical del subsuelo de dos bofedales de la microcuenca Apacheta a diferentes profundidades se determina de manera significativa a partir de la permitividad dieléctrica estimada de los datos radargrama.  <b>HE2:</b> La distribución espacial de la composición del subsuelo de dos bofedales varían de manera significativa a la misma profundidad en la microcuenca Apacheta,</p>	<p><b>Variable X1:</b>  Datos radargrama.  <b>Indicadores de X1:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Permitividad dieléctrica</li> <li>• Longitud de onda</li> <li>• Frecuencia</li> </ul> <p><b>Variable X2:</b>  Composición del subsuelo de dos bofedales.  <b>Indicadores de X2:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Clasificación de la textura del suelo según escala de reflectancia</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>• Descriptivo</li> <li>• Correlacional</li> </ul> <p><b>Diseño de Investigación:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• No 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>  Conformada por toda el área correspondiente al suelo superficial y subsuperficial de los bofedales de la microcuenca Apacheta.</p> <p><b>Muestra:</b>  Conformada por la selección aleatoria del subsuelo de dos bofedales de la microcuenca Apacheta a</p>	<p><b>Técnicas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Observación</li> <li>• Estadígrafos adecuados para el procesamiento de datos</li> <li>• Uso de software especializado</li> </ul> <p><b>Instrumentos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Guía de análisis documental</li> <li>• Libros y textos especializados</li> <li>• Revistas científicas</li> <li>• Catálogos virtuales</li> <li>• -Muestra seleccionada</li> <li>• -Página web</li> </ul>

bofedales a la misma profundidad en la microcuenca Apacheta, mediante la aplicación de algoritmos de interpolación?	microcuenca Apacheta, mediante la aplicación de algoritmos de interpolación.	mediante la aplicación de algoritmos de interpolación		diferentes altitudes y ubicación.	
---	--	---	--	-----------------------------------	--

## Anexo 2. Código en Python para la interpolación de datos radargrama

### A2.1. Código Python para la interpolación IDW

```
#Importar librerias
import tkinter as tk
from tkinter import messagebox, Button, Label, ttk
from tkinter import Menu, filedialog, simpledialog, colorchooser
from tkinter import Tk, Toplevel, Canvas, Frame
from PIL import Image, ImageTk
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.backends.backend_tkagg import (FigureCanvasTkAgg,
NavigationToolbar2Tk)
from openpyxl import load_workbook
import matplotlib as mpl
from matplotlib.patches import Rectangle
from scipy.stats import linregress
import seaborn as sns
from adjustText import adjust_text
from collections import Counter
import plotly.graph_objects as go
from plotly.subplots import make_subplots
import plotly.express as px
import matplotlib.ticker as mtick
import dash
from dash import dcc, html
from dash.dependencies import Input, Output
from PIL import Image, ImageChops
import plotly.io as pio
import ast
import math
from scipy.stats import norm
from flask import Flask, render_template_string, request, jsonify
import requests
from threading import Timer
from matplotlib.animation import FuncAnimation
import os
# Crear la ventana principal
window = tk.Tk()
window.title("Aplicativo")
window.geometry("800x600")
# Función para redimensionar imágenes
def resize_image(image_path, width, height):
```

```

    image = Image.open(image_path)
    resized_image = image.resize((width, height), Image.Resampling.LANCZOS)
    return ImageTk.PhotoImage(resized_image)
fig, ax = plt.subplots(figsize=(20, 15), dpi=100) #, gridspec_kw={'width_ratios': [30, 30]})
#vent_graph=Toplevel()
most=0
# Función para mostrar la barra de menú y ocultar elementos
def show_menu():
    global entry4, entry5, label1, label2, label3, label4, label5, combo01, combo02, combo03,
most, button_limpiar
    menu_bar = Menu(window)
    window.config(menu=menu_bar)
    # Agregar un menú a la barra de menú
    file_menu = Menu(menu_bar, tearoff=0)
    menu_bar.add_cascade(label="Archivo", menu=file_menu)
    file_menu.add_command(label="Nuevo")
    file_menu.add_command(label="Abrir", command=open_file)
    file_menu.add_command(label="Guardar", command=save_image)
    # Agregar opción para ingresar número de clasificación
    file_menu.add_command(label="Clasificación", command=ingresar_intervalo)
    # Crear submenú para elegir color
    color_menu = Menu(file_menu, tearoff=0)
    file_menu.add_cascade(label="Color", menu=color_menu)
    color_menu.add_command(label="Seleccionar Color", command=elegir_color)
    color_menu.add_command(label="Ingresar Color Manualmente",
command=ingresar_color_manual)
    file_menu.add_separator()
    file_menu.add_command(label="Salir", command=window.quit)
    # Agregar un nuevo menú "Estudio" a la barra de menú
    estudio_menu = Menu(menu_bar, tearoff=0)
    menu_bar.add_cascade(label="Estudio", menu=estudio_menu)
    # Agregar submenús a "Estudio"
    tipo_menu = Menu(estudio_menu, tearoff=0)
    estudio_menu.add_cascade(label="Tipo", menu=tipo_menu)
    tipo_menu.add_command(label="Estadístico", command=opcion1)
    #tipo_menu.add_command(label="Gráfico", command=opcion2)
    grafico_menu=Menu(tipo_menu, tearoff=0)
    tipo_menu.add_cascade(label="Gráfico", menu=grafico_menu)
    grafico_menu.add_command(label="IDW", command=elegir_idw)
    grafico_menu.add_command(label="Gráfico básico", command=elegir_basico)
    grafico_menu.add_command(label="Curvas de Nivel", command=elegir_cn)
    Nivel_menu=Menu(estudio_menu, tearoff=0)
    estudio_menu.add_cascade(label="Nivel", menu=Nivel_menu)
    Nivel_menu.add_command(label="Total", command=elegir_total)
    #Nivel_menu.add_command(label="Regional", command=elegir_region)
    Regional_menu=Menu(Nivel_menu, tearoff=0)

```

```

Nivel_menu.add_cascade(label="Regional", menu=Regional_menu)
Regional_menu.add_command(label="Individual", command=niv_indiv)
Regional_menu.add_command(label="Grupal", command=niv_grup)
estudio_menu.add_command(label="Grado de Interpolación", command=elegir_grado)
Detallar_menu= Menu(menu_bar, tearoff=0)
menu_bar.add_cascade(label="Detallar Data", menu=Detallar_menu)
Detallar_menu.add_command(label="Nombrar Clasificación Manual",
command=elegir_caract1)
Detallar_menu.add_command(label="Ingresar Clasificación", command=elegir_caract2)
def ingresar_intervalo():
    global numero_clasificacion, intervalos_cl
    intervalos_cl1 = simpledialog.askstring("Intervalos de clases", "Ingrese los intervalos de
clasificación, ej.: [1, 7], [7, 15]...")
    intervalos_cl=ast.literal_eval(intervalos_cl1)
    numero_clasificacion=len(intervalos_cl)
    print(f"Número de clasificación ingresado: {numero_clasificacion}")
    return intervalos_cl
def elegir_color():
    global color_clasificacion, color_scale
    color_scale=[]
    k=0
    while k<= numero_clasificacion-1:
        color_clasificacion = colorchooser.askcolor(title="Elija los colores para la clasificación
de forma ascendente a la clase")[1]
        color_scale.append(color_clasificacion)
        k=k+1
    print(f"Color de clasificación elegido: {color_scale}")
    return color_scale
def ingresar_color_manual():
    global color_clasificacion_manual, color_scale
    color_scale=[]
    k=0
    while k<= numero_clasificacion-1:
        color_clasificacion_manual = simpledialog.askstring("Ingresar Color", "Ingrese el
nombre del color de forma ascendente a la clase:")
        color_scale.append(color_clasificacion_manual)
        k=k+1
    print(f"Color de Clasificación: {color_scale}")
    return color_scale
def opcion1():
    global grafico_selecc
    grafico_selecc = "Estadístico"
    print(f"Opción seleccionada: {grafico_selecc}")
    return grafico_selecc
#def opcion2():
    #global opcion_seleccionada

```

```

#opcion_seleccionada = "Gráfico"
#print(f'Opción seleccionada: {opcion_seleccionada}')
#return opcion_seleccionada
def elegir_total():
    global elec_tr
    elec_tr="Total"
    print(f'Opción seleccionada: {elec_tr}')
    return elec_tr
def elegir_region():
    global elec_tr
    elec_tr=simpledialog.askinteger("elegir clasificación", "Elegir la clase de interés: ")
    print(f'Opción seleccionada: {elec_tr}')
    return elec_tr
def niv_indiv():
    global nivel_eleg, elec_tr
    nivel_eleg=simpledialog.askinteger("elegir solo una clase", "Ingrese la clase en cardinal:
ej. 5")
    elec_tr="Región"
    print(f'Nivel elegido: {nivel_eleg}')
    return nivel_eleg
def niv_grup():
    global nivel_eleg, elec_tr
    nivel_eleg1=simpledialog.askstring("elegir más de 1 clase", "Ingrese los cardinales de la
clases entre comas: ej. 2, 3, 5 ")
    nivel_eleg=ast.literal_eval(nivel_eleg1)
    elec_tr="Región"
    print(f'nivel elegido: {nivel_eleg}')
    return nivel_eleg
def elegir_grado():
    global elec_gr
    elec_gr=simpledialog.askinteger("elegir grado", "Elegir grado de Interpolación del 0 al 3:
")
    print(f'Opción seleccionada: {elec_gr}')
    return elec_gr
def elegir_idw():
    global grafico_selecc
    grafico_selecc = "idw"
    print(f'Opción seleccionada: {grafico_selecc}')
    return grafico_selecc
def elegir_basico():
    global grafico_selecc
    grafico_selecc = "básico"
    print(f'Opción seleccionada: {grafico_selecc}')
    return grafico_selecc
def elegir_cn():
    global grafico_selecc

```

```

grafico_selecc = "curvas de nivel"
print(f"Opción seleccionada: {grafico_selecc}")
return grafico_selecc
def elegir_caract1():
    global elec_caract
    elec_caract=[]
    k=0
    while k<= numero_clasificacion-1:
        elec_caract1= simpledialog.askstring("Nombrar Clases", "Nombre clases
individualmente")
        elec_caract.append(elec_caract1)
        k=k+1
    print(elec_caract)
    return elec_caract
def elegir_caract2():
    global elec_caract
    file_path = filedialog.askopenfilename(filetypes=[("Excel files", "*.xlsx *.xls")])
    if file_path:
        elec_caract = pd.read_excel(file_path)
        elec_caract = list(elec_caract)
        #print(df) # Imprimir los datos en la consola
        # Aquí puedes hacer lo que necesites con los datos, por ejemplo, almacenarlos en una
variable global
        global excel_data1
        excel_data1 = elec_caract
    return elec_caract
def selec_si():
    global elec_si
    elec_si= "Seleccionar"
    return elec_si
def selec_no():
    global elec_no
    elec_no= "Sin Seleccionar"
    return elec_no
def obtener_texto():
    global texto_ing1, texto_ing2, texto_ing3
    texto_ing1 = combo03.get()
    texto_ing2 = combo02.get()
    texto_ing3 = combo01.get()
    print(f"Texto ingresado: {texto_ing1}")
    return texto_ing1, texto_ing2, texto_ing3
# Función para abrir un archivo y mostrar su contenido
def open_file():
    global df, sheet
    file_path = filedialog.askopenfilename(filetypes=[("Excel files", "*.xlsx *.xls")])
    if file_path:

```

```

df = pd.read_excel(file_path)
workbook = load_workbook(file_path)
sheet = workbook.active
#print(df) # Imprimir los datos en la consola
# Aquí puedes hacer lo que necesites con los datos, por ejemplo, almacenarlos en una
variable global
global excel_data
excel_data = df
#text_widget.delete(1.0, tk.END)
#text_widget.insert(tk.END, df.to_string())
# Hacer visible el botón de generar gráfico
#graph_button.place(relx=0.5, rely=0.1, anchor='center')
print(f"Archivo {file_path} cargado.")
# Función para guardar la imagen
def save_image():
    folder_path = filedialog.askdirectory()
    if folder_path:
        file_path = os.path.join(folder_path, "grafica.png")
        temp_fig.savefig(file_path)
        with open(os.path.join(folder_path, "informacion.txt"), 'w') as f:
            f.write("Toda la información de la ventana.") # Aquí pones la información que
quieres guardar.
def save_im_vs():
    folder_path = filedialog.askdirectory()
    if folder_path:
        file_path = os.path.join(folder_path, "grafica1.png")
        fig_porc.savefig(file_path)
        with open(os.path.join(folder_path, "informacion.txt"), 'w') as f:
            f.write("Toda la información de la ventana.") # Aquí pones la información que
quieres guardar.
def save_im_zoom():
    folder_path = filedialog.askdirectory()
    if folder_path:
        file_path = os.path.join(folder_path, "grafica2.png")
        fig_zoomed.savefig(file_path)
        with open(os.path.join(folder_path, "informacion.txt"), 'w') as f:
            f.write("Toda la información de la ventana.") # Aquí pones la información que
quieres guardar.
def distance_matrix(x0, y0, x1, y1):
    """ Make a distance matrix between pairwise observations.
    Note: from <http://stackoverflow.com/questions/1871536>
    """
    obs = np.vstack((x0, y0)).T
    interp = np.vstack((x1, y1)).T
    d0 = np.subtract.outer(obs[:,0], interp[:,0])
    d1 = np.subtract.outer(obs[:,1], interp[:,1])

```

.....(\*El código continua)

## A2.2. Código Python para la interpolación Kriging

```
from netCDF4 import Dataset # http://code.google.com/p/netcdf4-python/
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd #manipulacao de dados
from datetime import datetime, timedelta #manipulacao de datas
from netCDF4 import Dataset, date2index, num2date #manipulacao de archivos nc
import conda
import numpy as np
import cftime
import matplotlib.cm as cm
import matplotlib.path as mpath
from cartopy import config
import cartopy.crs as ccrs
import cartopy
import scipy
from numpy import zeros
from scipy import signal
from scipy import misc
import matplotlib.pylab as pylab
from numpy import empty, arange, exp, real, imag
from IPython.core.display import Image, display
import signalz
import padasip as pa #Filtros Adaptativos
import xarray as xr
import numpy.ma as ma
from scipy import ndimage
from sklearn.metrics import mean_squared_error
from sklearn.metrics import mean_absolute_error
from mpl_toolkits.basemap import Basemap
from matplotlib.ticker import FormatStrFormatter
import time
# Leer archivo xlsx
df_a =
pd.read_excel('/home/lugorio/Pasta_personal/UNSCH/UNSCH_trabajos/Tesis_Mauro/datos/T2.xlsx')
df7_b =
pd.read_excel('/home/lugorio/Pasta_personal/UNSCH/UNSCH_trabajos/Tesis_Mauro/datos/T7.xlsx')
# Extraer las columnas de Latitud y Longitud
latitudes_a = df_a['Latitude']
longitudes_a = df_a['Longitude']
```

```

latitudes_b = df7_b['Latitude']
longitudes_b = df7_b['Longitud']
# Definir los datos de los puntos
lons = [-74,69861]#T2
lats = [-13,3913]#T2

# Crear la figura con dos subplots
fig, (ax1, ax2, ax3) = plt.subplots(1, 3, figsize=(21,8), subplot_kw={'projection':
ccrs.PlateCarree()})
# Configurar el primer subplot
ax1.set_extent([-82, -68, -18, 0])
ax1.coastlines(resolution='10m')
ax1.add_feature(cartopy.feature.BORDERS, linestyle='-', alpha=0.5)
ax1.add_feature(cartopy.feature.LAND, facecolor='#f7e8b6')
ax1.add_feature(cartopy.feature.OCEAN, facecolor='#c1dcf2')
ax1.add_feature(cartopy.feature.RIVERS)
ax1.add_feature(cartopy.feature.LAKES, alpha=0.5)
ax1.add_feature(cartopy.feature.STATES, alpha=0.5)
ax1.scatter(longitudes_a[0], latitudes_a[0], s=110, color='red', marker='o',
transform=ccrs.PlateCarree())
ax1.axes.gridlines(draw_labels=True)

# Configurar el segundo subplot
ax2.set_extent([-75.2, -72.7, -15.7, -12.1])
ax2.coastlines(resolution='10m')
ax2.add_feature(cartopy.feature.BORDERS, linestyle='-', alpha=0.5)
ax2.add_feature(cartopy.feature.LAND, facecolor='#f7e8b6')
ax2.add_feature(cartopy.feature.OCEAN, facecolor='#c1dcf2')
ax2.add_feature(cartopy.feature.RIVERS)
ax2.add_feature(cartopy.feature.LAKES, alpha=0.5)
ax2.add_feature(cartopy.feature.STATES, alpha=0.5)
ax2.scatter(longitudes_a[0], latitudes_a[0], s=150, color='blue', marker='s',
transform=ccrs.PlateCarree())
ax2.axes.gridlines(draw_labels=True)

# Configurar el tercer subplot
ax3.set_extent([-74.69861, -74.6984, -13.3913, -13.391]) #T2
ax3.coastlines(resolution='10m')
ax3.add_feature(cartopy.feature.BORDERS, linestyle='-', alpha=0.5)
ax3.add_feature(cartopy.feature.LAND, facecolor='#f7e8b6')
ax3.add_feature(cartopy.feature.OCEAN, facecolor='#c1dcf2')
ax3.add_feature(cartopy.feature.RIVERS)
ax3.add_feature(cartopy.feature.LAKES, alpha=0.5)
ax3.add_feature(cartopy.feature.STATES, alpha=0.5)
ax3.axes.gridlines(draw_labels=True)
plt.scatter(longitudes_a, latitudes_a, s=50, color='blue', marker='*')

```

```

# Mostrar la figura
plt.show()
# Bofedal 1
data_a =
pd.read_excel('/home/lugorio/Pasta_personal/UNSCH/UNSCH_trabajos/Tesis_Mauro/datos/T2.xlsx')

# Extraer las columnas de Amplitud y profundidad.
Amplitud_Ao_a = 71.6 #np.max(Amplitud_Ao)
Amplitud_Am_a = data_a['Amplitude']
profundidad_a = data_a['Depth(m)']
Lat_a = data_a['Latitude']
Lon_a = data_a['Longitude']
# Bofedal 2
data_b =
pd.read_excel('/home/lugorio/Pasta_personal/UNSCH/UNSCH_trabajos/Tesis_Mauro/datos/T7.xlsx')

# Extraer las columnas de Amplitud y profundidad.
Amplitud_Ao_b = 71.6 #np.max(Amplitud_Ao)
Amplitud_Am_b = data_b['Amplitude']
profundidad_b = data_b['Depth(m)']
Lat_b = data_b['Latitude']
Lon_b = data_b['Longitude']
from matplotlib.colors import ListedColormap
from matplotlib.ticker import LinearLocator, FuncFormatter

# Crear figura con 1 fila y 2 columnas
fig, axs = plt.subplots(1, 2, figsize=(15, 6))
fig.suptitle('Resultados Bofedal-1', fontsize=16)
# Graficar dispersión de Er2 vs profundidad
colors = ['tan', 'limegreen', 'gray', 'blue', 'red', 'gold', 'steelblue', 'brown', 'pink', 'purple',
'navy', 'black', 'cyan']
cmap = ListedColormap(colors)
axs[0].scatter(Lon_a, profundidad_a, c=Er2_a, cmap=cmap)
axs[0].set_xlabel('Longitude', size=17)
axs[0].set_ylabel('Profundidad [m]', size=17)
axs[0].grid(True)
cb = fig.colorbar(axs[0].collections[0], ax=axs[0])
cb.set_label("Permitividad Dieléctrica", size=17)
cb.locator = LinearLocator(numticks=14)
cb.formatter = FormatStrFormatter('% .1f')
cb.update_ticks()
# Invertir el eje 'y' (profundidad) de 20 a 0 metros
axs[0].set_ylim(20, 0)

```

```

# Formatear el eje x para mostrar las latitudes y longitudes en notación normal
def format_coord(x, pos):
    # Convierte el valor en la posición x a notación normal (sin notación científica)
    return f'{x:.2f}' # Gráfico 2# Graficar coordenadas

# Aplicar el formateador al eje x
axs[0].xaxis.set_major_formatter(FuncFormatter(format_coord))

# Graficar histograma de Er2
axs[1].grid(alpha=0.9, linestyle=':')
# Eliminar valores de inf con una máscara booleana
mask = np.logical_and(np.isfinite(Er2_a), ~np.isnan(Er2_a))
data_filtered = Er2_a[mask]
# Graficar histograma con los datos filtrados
bins1 = [0, 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 85, 90]
axs[1].hist(data_filtered, bins=bins1)
axs[1].set_xlabel('Permitividades Dieléctricas', size=17)
axs[1].set_ylabel('Datos', size=17)
#axs[1].set_title('Histograma', size=17)

# Obtener el conteo de datos en cada bin del histograma
n, bins1, patches = axs[1].hist(data_filtered, bins=bins1)

# Agregar el valor de conteo encima de cada barra
for i in range(len(patches)):
    if n[i] > 0:
        axs[1].text(x=bins1[i]+(bins1[i+1]-bins1[i])/2, y=n[i]+10, s=str(int(n[i])), ha='center',
        fontsize=12)
# Agregar líneas verticales punteadas
labels = [1, 5, 10, 20, 30, 40, 80, 85]
for label in labels:
    axs[1].axvline(x=label, color='gray', linestyle=':')
# Agregar los valores de los ticks en el centro de la gráfica
for label in labels:
    axs[1].text(label, axs[1].get_ylim()[1], str(label), color='red', ha='center') #Para q sea en
la mitad, dividir esto 'axs[1].get_ylim()[1]' entre 2

plt.show()
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.gaussian_process import GaussianProcessRegressor
from sklearn.gaussian_process.kernels import RBF, WhiteKernel, ConstantKernel as C
from matplotlib.ticker import FuncFormatter, ScalarFormatter
import time

```

```

#####DATOS#####
#####
#data_a =
pd.read_excel('/home/lugorio/Pasta_personal/UNSCH/UNSCH_trabajos/Tesis_Mauro/datos/T2.xlsx')

# Extraer las columnas de Amplitud y profundidad.
#Amplitud_Ao_a = 71.6 #np.max(Amplitud_Ao)
#profundidad_a = data_a['Depth(m)']

#Lon_a = data_a['Longitude']

#Er2_a = funcion_PD(Amplitud_Ao_a,Amplitud_Am_a, decimales_)
#####DATOS#####
#####

# Obtén el tamaño total de la Serie
total_size = 1000

# Generar datos ficticios de temperaturas, 2 es para la mitad y 4 cuarta parte,
pr_1b[:total_size // 8]
profundidad_a = np.array(profundidad_a[:total_size])
profundidad_b = np.array(profundidad_b[:total_size])
longitude_a = np.array(Lon_a[:total_size])
longitude_b = np.array(Lon_b[:total_size])
permitividad_a = np.array(Er2_a[:total_size])
permitividad_b = np.array(Er2_b[:total_size])

# Registro del tiempo de inicio
start_time = time.time()

# Definir el modelo con el kernel (hiperparámetros iniciales)
kernel = C(1.0, (1e-3, 1e3)) * RBF(1.0, (1e-2, 1e9)) + WhiteKernel(noise_level=1e-7)
model = GaussianProcessRegressor(kernel=kernel, n_restarts_optimizer=10)

fig, axes = plt.subplots(1, 2, figsize=(10, 4)) # Crear una figura con 2 subplots

# Recorremos las profundidades y permitividades para ambos casos
for profundidad, longitud, permitividad, ax, title in zip(
    [profundidad_a, profundidad_b], [longitude_a, longitude_b], [permitividad_a,
    permitividad_b], axes, ["Bofedal B1", "Bofedal B2"]
):
    # Combinar las coordenadas
    coordinates = np.column_stack((profundidad, longitud))

# Ajustar el modelo a los datos

```

```

model.fit(coordinates, permitividad)

# Generar una malla de coordenadas para la predicción
profundidad_grid, longitude_grid = np.meshgrid(
    np.linspace(min(profundidad), max(profundidad), 100), np.linspace(min(longitude),
max(longitude) + 0.0001, 100)
)
coordinates_grid = np.column_stack((profundidad_grid.ravel(), longitude_grid.ravel()))

# Realizar predicciones utilizando el modelo ajustado
permitividad_pred, sigma = model.predict(coordinates_grid, return_std=True)
permitividad_pred_grid = permitividad_pred.reshape(profundidad_grid.shape)

rounded_permitividad_pred_grid = np.around(permitividad_pred_grid, decimals=2)

# Crear un gráfico de contorno para las predicciones de temperatura
contour_plot = ax.contourf(longitude_grid, profundidad_grid,
rounded_permitividad_pred_grid, levels=20, cmap='viridis')
colorbar = plt.colorbar(contour_plot, ax=ax, label='P.D.')

formatter = ScalarFormatter(useMathText=False)
ax.xaxis.set_major_formatter(FuncFormatter(format_coord))
ax.yaxis.set_major_formatter(formatter)
ax.invert_yaxis()

ax.set_xlabel('Longitud', fontsize=16)
ax.set_ylabel('Profundidad [m]', fontsize=16)
ax.set_title(f'Interpolación Kriging Universal\n{title}', fontsize=16, loc='center', pad=20)

plt.tight_layout()
plt.show()

# Registro del tiempo de finalización
end_time = time.time()
# Cálculo del tiempo transcurrido
elapsed_time = end_time - start_time
print(f"El código tardó {elapsed_time:.4f} segundos en ejecutarse.")

.....(*El código continua)

```

**Anexo 3. Muestra de datos de amplitud de onda de radar reflejada, permitividad dieléctrica y clases de textura del subsuelo de bofedal a lo largo de dos transectos T1 y T2 de 20 m de longitud y 20 m de profundidad, prospectados con el GPR-Gepard, en la microcuenca Apacheta, el 12 de octubre de 2022.**

El transecto T1 tiene 127246 puntos prospectados separados cada 0.0400801 m y agrupados en 499 grupos de datos verticales.

El transecto T2 tiene 143821 puntos prospectados separados cada 0.0354609 m y agrupados en 564 grupos de datos verticales.

Grupo	Prof-T1-2(m)	D-T1(m)	Amp-T1	Lat-T1	Long-T1	PD-T1	ClaseT1	D-T2(m)	Amp-T2	Lat-T2	Long-T2	PD-T2	ClaseT2
1	0	0.04008	4	-13.3912	-74.6984	1.0132	A	0.035461	2	-13.40917	-74.70636	1.0037	A
1	0.08	0.04008	0	-13.3912	-74.6984	1.0006	A	0.035461	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
1	0.16	0.04008	-31	-13.3912	-74.6984	2.1370	B	0.035461	2	-13.40917	-74.70636	1.0037	A
1	0.24	0.04008	0	-13.3912	-74.6984	1.0006	A	0.035461	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
1	0.32	0.04008	38	-13.3912	-74.6984	3.1854	B	0.035461	-6	-13.40917	-74.70636	1.0291	A
1	0.39	0.04008	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
1	0.47	0.04008	-26	-13.3912	-74.6984	1.7009	A	0.035461	17	-13.40917	-74.70636	1.2540	A
1	0.55	0.04008	-40	-13.3912	-74.6984	3.6403	B	0.035461	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
1	0.63	0.04008	-26	-13.3912	-74.6984	1.7009	A	0.035461	-16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
1	0.71	0.04008	33	-13.3912	-74.6984	2.3713	B	0.035461	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
1	0.79	0.04008	26	-13.3912	-74.6984	1.7009	A	0.035461	31	-13.40917	-74.70636	2.1370	B
1	0.87	0.04008	-6	-13.3912	-74.6984	1.0291	A	0.035461	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
1	0.95	0.04008	-36	-13.3912	-74.6984	2.8129	B	0.035461	-39	-13.40917	-74.70636	3.4012	B
1	1.03	0.04008	-6	-13.3912	-74.6984	1.0291	A	0.035461	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
1	1.1	0.04008	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	39	-13.40917	-74.70636	3.4012	B
1	1.18	0.04008	24	-13.3912	-74.6984	1.5713	A	0.035461	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
1	1.26	0.04008	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	-40	-13.40917	-74.70636	3.6403	B
1	1.34	0.04008	7	-13.3912	-74.6984	1.0396	A	0.035461	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
1	1.42	0.04008	-1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.035461	39	-13.40917	-74.70636	3.4012	B
1	1.5	0.04008	7	-13.3912	-74.6984	1.0396	A	0.035461	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
1	1.58	0.04008	-1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.035461	-40	-13.40917	-74.70636	3.6403	B
1	1.66	0.04008	-11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.035461	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
1	1.74	0.04008	-1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.035461	38	-13.40917	-74.70636	3.1854	B
1	1.81	0.04008	24	-13.3912	-74.6984	1.5713	A	0.035461	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
1	1.89	0.04008	47	-13.3912	-74.6984	6.3253	C	0.035461	-38	-13.40917	-74.70636	3.1854	B
1	1.97	0.04008	37	-13.3912	-74.6984	2.9900	B	0.035461	-4	-13.40917	-74.70636	1.0132	A
1	2.05	0.04008	0	-13.3912	-74.6984	1.0006	A	0.035461	39	-13.40917	-74.70636	3.4012	B
1	2.13	0.04008	2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.035461	11	-13.40917	-74.70636	1.0997	A
1	2.21	0.04008	0	-13.3912	-74.6984	1.0006	A	0.035461	-39	-13.40917	-74.70636	3.4012	B
1	2.29	0.04008	2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.035461	-13	-13.40917	-74.70636	1.1417	A

Grupo	Prof-T1-2(m)	D-T1(m)	Amp-T1	Lat-T1	Long-T1	PD-T1	ClaseT1	D-T2(m)	Amp-T2	Lat-T2	Long-T2	PD-T2	ClaseT2
1	2.37	0.04008	0	-13.3912	-74.6984	1.0006	A	0.035461	30	-13.40917	-74.70636	2.0343	B
1	2.45	0.04008	2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.035461	16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
1	2.52	0.04008	0	-13.3912	-74.6984	1.0006	A	0.035461	-28	-13.40917	-74.70636	1.8536	A
1	2.6	0.04008	2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.035461	5	-13.40917	-74.70636	1.0203	A
1	2.68	0.04008	11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.035461	51	-13.40917	-74.70636	9.3675	C
1	2.76	0.04008	2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.035461	15	-13.40917	-74.70636	1.1927	A
1	2.84	0.04008	-33	-13.3912	-74.6984	2.3713	B	0.035461	-36	-13.40917	-74.70636	2.8129	B
1	2.92	0.04008	-41	-13.3912	-74.6984	3.9059	B	0.035461	-31	-13.40917	-74.70636	2.1370	B
1	3	0.04008	-33	-13.3912	-74.6984	2.3713	B	0.035461	23	-13.40917	-74.70636	1.5141	A
1	3.08	0.04008	-25	-13.3912	-74.6984	1.6334	A	0.035461	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
1	3.16	0.04008	3	-13.3912	-74.6984	1.0076	A	0.035461	-26	-13.40917	-74.70636	1.7009	A
1	3.23	0.04008	-25	-13.3912	-74.6984	1.6334	A	0.035461	-5	-13.40917	-74.70636	1.0203	A
1	3.31	0.04008	1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.035461	47	-13.40917	-74.70636	6.3253	C
1	3.39	0.04008	-11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.035461	29	-13.40917	-74.70636	1.9401	A
1	3.47	0.04008	1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.035461	-29	-13.40917	-74.70636	1.9401	A
1	3.55	0.04008	-11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.035461	-42	-13.40917	-74.70636	4.2017	B
1	3.63	0.04008	-17	-13.3912	-74.6984	1.2540	A	0.035461	-29	-13.40917	-74.70636	1.9401	A
1	3.71	0.04008	-11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.035461	9	-13.40917	-74.70636	1.0659	A
1	3.79	0.04008	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	-29	-13.40917	-74.70636	1.9401	A
1	3.87	0.04008	41	-13.3912	-74.6984	3.9059	B	0.035461	-21	-13.40917	-74.70636	1.4127	A
1	3.95	0.04008	42	-13.3912	-74.6984	4.2017	B	0.035461	43	-13.40917	-74.70636	4.5322	B
1	4.02	0.04008	41	-13.3912	-74.6984	3.9059	B	0.035461	14	-13.40917	-74.70636	1.1660	A
1	4.1	0.04008	-36	-13.3912	-74.6984	2.8129	B	0.035461	-48	-13.40917	-74.70636	6.9345	C
1	4.18	0.04008	31	-13.3912	-74.6984	2.1370	B	0.035461	14	-13.40917	-74.70636	1.1660	A
1	4.26	0.04008	37	-13.3912	-74.6984	2.9900	B	0.035461	-48	-13.40917	-74.70636	6.9345	C
1	4.34	0.04008	31	-13.3912	-74.6984	2.1370	B	0.035461	-21	-13.40917	-74.70636	1.4127	A
1	4.42	0.04008	-40	-13.3912	-74.6984	3.6403	B	0.035461	-46	-13.40917	-74.70636	5.7909	B
1	4.5	0.04008	-14	-13.3912	-74.6984	1.1660	A	0.035461	-21	-13.40917	-74.70636	1.4127	A
1	4.58	0.04008	39	-13.3912	-74.6984	3.4012	B	0.035461	-19	-13.40917	-74.70636	1.3267	A
1	4.66	0.04008	37	-13.3912	-74.6984	2.9900	B	0.035461	8	-13.40917	-74.70636	1.0518	A
1	4.73	0.04008	9	-13.3912	-74.6984	1.0659	A	0.035461	-19	-13.40917	-74.70636	1.3267	A
1	4.81	0.04008	-31	-13.3912	-74.6984	2.1370	B	0.035461	-32	-13.40917	-74.70636	2.2489	B
1	4.89	0.04008	-13	-13.3912	-74.6984	1.1417	A	0.035461	-19	-13.40917	-74.70636	1.3267	A
1	4.97	0.04008	-25	-13.3912	-74.6984	1.6334	A	0.035461	-32	-13.40917	-74.70636	2.2489	B
1	5.05	0.04008	-15	-13.3912	-74.6984	1.1927	A	0.035461	-23	-13.40917	-74.70636	1.5141	A
1	5.13	0.04008	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.035461	-4	-13.40917	-74.70636	1.0132	A
1	5.21	0.04008	30	-13.3912	-74.6984	2.0343	B	0.035461	-23	-13.40917	-74.70636	1.5141	A
1	5.29	0.04008	29	-13.3912	-74.6984	1.9401	A	0.035461	-42	-13.40917	-74.70636	4.2017	B
1	5.37	0.04008	18	-13.3912	-74.6984	1.2888	A	0.035461	-23	-13.40917	-74.70636	1.5141	A
1	5.44	0.04008	-9	-13.3912	-74.6984	1.0659	A	0.035461	-3	-13.40917	-74.70636	1.0076	A
1	5.52	0.04008	-20	-13.3912	-74.6984	1.3680	A	0.035461	-23	-13.40917	-74.70636	1.5141	A
1	5.6	0.04008	-9	-13.3912	-74.6984	1.0659	A	0.035461	-3	-13.40917	-74.70636	1.0076	A
1	5.68	0.04008	-4	-13.3912	-74.6984	1.0132	A	0.035461	-20	-13.40917	-74.70636	1.3680	A

Grupo	Prof-T1-2(m)	D-T1(m)	Amp-T1	Lat-T1	Long-T1	PD-T1	ClaseT1	D-T2(m)	Amp-T2	Lat-T2	Long-T2	PD-T2	ClaseT2
1	5.76	0.04008	3	-13.3912	-74.6984	1.0076	A	0.035461	-19	-13.40917	-74.70636	1.3267	A
1	5.84	0.04008	39	-13.3912	-74.6984	3.4012	B	0.035461	-20	-13.40917	-74.70636	1.3680	A
1	5.92	0.04008	53	-13.3912	-74.6984	11.7314	D	0.035461	-19	-13.40917	-74.70636	1.3267	A
1	6	0.04008	61	-13.3912	-74.6984	39.6465	D	0.035461	-16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
1	6.08	0.04008	53	-13.3912	-74.6984	11.7314	D	0.035461	4	-13.40917	-74.70636	1.0132	A
1	6.15	0.04008	-10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	-16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
1	6.23	0.04008	-2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.035461	-12	-13.40917	-74.70636	1.1196	A
1	6.31	0.04008	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.035461	25	-13.40917	-74.70636	1.6334	A
1	6.39	0.04008	36	-13.3912	-74.6984	2.8129	B	0.035461	-12	-13.40917	-74.70636	1.1196	A
1	6.47	0.04008	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.035461	-53	-13.40917	-74.70636	11.7314	D
1	6.55	0.04008	35	-13.3912	-74.6984	2.6518	B	0.035461	-12	-13.40917	-74.70636	1.1196	A
1	6.63	0.04008	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.035461	12	-13.40917	-74.70636	1.1196	A
1	6.71	0.04008	-3	-13.3912	-74.6984	1.0076	A	0.035461	-12	-13.40917	-74.70636	1.1196	A
1	6.79	0.04008	8	-13.3912	-74.6984	1.0518	A	0.035461	-12	-13.40917	-74.70636	1.1196	A
1	6.86	0.04008	26	-13.3912	-74.6984	1.7009	A	0.035461	23	-13.40917	-74.70636	1.5141	A
1	6.94	0.04008	8	-13.3912	-74.6984	1.0518	A	0.035461	30	-13.40917	-74.70636	2.0343	B
1	7.02	0.04008	21	-13.3912	-74.6984	1.4127	A	0.035461	23	-13.40917	-74.70636	1.5141	A
1	7.1	0.04008	18	-13.3912	-74.6984	1.2888	A	0.035461	-1	-13.40917	-74.70636	1.0014	A
1	7.18	0.04008	-49	-13.3912	-74.6984	7.6323	C	0.035461	23	-13.40917	-74.70636	1.5141	A
1	7.26	0.04008	18	-13.3912	-74.6984	1.2888	A	0.035461	-1	-13.40917	-74.70636	1.0014	A
1	7.34	0.04008	3	-13.3912	-74.6984	1.0076	A	0.035461	-29	-13.40917	-74.70636	1.9401	A
1	7.42	0.04008	-17	-13.3912	-74.6984	1.2540	A	0.035461	-31	-13.40917	-74.70636	2.1370	B
1	7.5	0.04008	3	-13.3912	-74.6984	1.0076	A	0.035461	-29	-13.40917	-74.70636	1.9401	A
1	7.57	0.04008	26	-13.3912	-74.6984	1.7009	A	0.035461	-17	-13.40917	-74.70636	1.2540	A
1	7.65	0.04008	11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.035461	-19	-13.40917	-74.70636	1.3267	A
1	7.73	0.04008	15	-13.3912	-74.6984	1.1927	A	0.035461	-17	-13.40917	-74.70636	1.2540	A
1	7.81	0.04008	11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.035461	33	-13.40917	-74.70636	2.3713	B
1	7.89	0.04008	15	-13.3912	-74.6984	1.1927	A	0.035461	-5	-13.40917	-74.70636	1.0203	A
1	7.97	0.04008	27	-13.3912	-74.6984	1.7741	A	0.035461	-16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
1	8.05	0.04008	16	-13.3912	-74.6984	1.2220	A	0.035461	-5	-13.40917	-74.70636	1.0203	A
1	8.13	0.04008	19	-13.3912	-74.6984	1.3267	A	0.035461	17	-13.40917	-74.70636	1.2540	A
1	8.21	0.04008	16	-13.3912	-74.6984	1.2220	A	0.035461	-1	-13.40917	-74.70636	1.0014	A
1	8.28	0.04008	-40	-13.3912	-74.6984	3.6403	B	0.035461	6	-13.40917	-74.70636	1.0291	A
1	8.36	0.04008	-8	-13.3912	-74.6984	1.0518	A	0.035461	63	-13.40917	-74.70636	61.7772	E
1	8.44	0.04008	45	-13.3912	-74.6984	5.3198	B	0.035461	45	-13.40917	-74.70636	5.3198	B
1	8.52	0.04008	50	-13.3912	-74.6984	8.4360	C	0.035461	-13	-13.40917	-74.70636	1.1417	A
1	8.6	0.04008	45	-13.3912	-74.6984	5.3198	B	0.035461	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
1	8.68	0.04008	24	-13.3912	-74.6984	1.5713	A	0.035461	60	-13.40917	-74.70636	32.6975	D
1	8.76	0.04008	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	32	-13.40917	-74.70636	2.2489	B
1	8.84	0.04008	-27	-13.3912	-74.6984	1.7741	A	0.035461	-46	-13.40917	-74.70636	5.7909	B
1	8.92	0.04008	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	4	-13.40917	-74.70636	1.0132	A
1	8.99	0.04008	18	-13.3912	-74.6984	1.2888	A	0.035461	8	-13.40917	-74.70636	1.0518	A
1	9.07	0.04008	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	8	-13.40917	-74.70636	1.0518	A

Grupo	Prof-T1-2(m)	D-T1(m)	Amp-T1	Lat-T1	Long-T1	PD-T1	ClaseT1	D-T2(m)	Amp-T2	Lat-T2	Long-T2	PD-T2	ClaseT2
1	9.15	0.04008	-5	-13.3912	-74.6984	1.0203	A	0.035461	-47	-13.40917	-74.70636	6.3253	C
1	9.23	0.04008	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	-24	-13.40917	-74.70636	1.5713	A
1	9.31	0.04008	-5	-13.3912	-74.6984	1.0203	A	0.035461	31	-13.40917	-74.70636	2.1370	B
1	9.39	0.04008	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
1	9.47	0.04008	38	-13.3912	-74.6984	3.1854	B	0.035461	-33	-13.40917	-74.70636	2.3713	B
1	9.55	0.04008	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
1	9.63	0.04008	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.035461	18	-13.40917	-74.70636	1.2888	A
1	9.7	0.04008	48	-13.3912	-74.6984	6.9345	C	0.035461	6	-13.40917	-74.70636	1.0291	A
1	9.78	0.04008	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.035461	13	-13.40917	-74.70636	1.1417	A
1	9.86	0.04008	28	-13.3912	-74.6984	1.8536	A	0.035461	6	-13.40917	-74.70636	1.0291	A
1	9.94	0.04008	52	-13.3912	-74.6984	10.4542	D	0.035461	13	-13.40917	-74.70636	1.1417	A
1	10.02	0.04008	37	-13.3912	-74.6984	2.9900	B	0.035461	12	-13.40917	-74.70636	1.1196	A
1	10.1	0.04008	44	-13.3912	-74.6984	4.9028	B	0.035461	-19	-13.40917	-74.70636	1.3267	A
1	10.18	0.04008	56	-13.3912	-74.6984	17.2399	D	0.035461	12	-13.40917	-74.70636	1.1196	A
1	10.26	0.04008	44	-13.3912	-74.6984	4.9028	B	0.035461	-3	-13.40917	-74.70636	1.0076	A
1	10.34	0.04008	39	-13.3912	-74.6984	3.4012	B	0.035461	12	-13.40917	-74.70636	1.1196	A
1	10.42	0.04008	30	-13.3912	-74.6984	2.0343	B	0.035461	41	-13.40917	-74.70636	3.9059	B
1	10.49	0.04008	29	-13.3912	-74.6984	1.9401	A	0.035461	52	-13.40917	-74.70636	10.4542	D
1	10.57	0.04008	30	-13.3912	-74.6984	2.0343	B	0.035461	41	-13.40917	-74.70636	3.9059	B
1	10.65	0.04008	29	-13.3912	-74.6984	1.9401	A	0.035461	-1	-13.40917	-74.70636	1.0014	A
1	10.73	0.04008	30	-13.3912	-74.6984	2.0343	B	0.035461	-17	-13.40917	-74.70636	1.2540	A
1	10.81	0.04008	29	-13.3912	-74.6984	1.9401	A	0.035461	-1	-13.40917	-74.70636	1.0014	A
1	10.89	0.04008	-9	-13.3912	-74.6984	1.0659	A	0.035461	-2	-13.40917	-74.70636	1.0037	A
1	10.97	0.04008	-31	-13.3912	-74.6984	2.1370	B	0.035461	-1	-13.40917	-74.70636	1.0014	A
1	11.05	0.04008	-9	-13.3912	-74.6984	1.0659	A	0.035461	63	-13.40917	-74.70636	61.7772	E
1	11.13	0.04008	-31	-13.3912	-74.6984	2.1370	B	0.035461	28	-13.40917	-74.70636	1.8536	A
1	11.2	0.04008	-22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.035461	-11	-13.40917	-74.70636	1.0997	A
1	11.28	0.04008	8	-13.3912	-74.6984	1.0518	A	0.035461	28	-13.40917	-74.70636	1.8536	A
1	11.36	0.04008	-19	-13.3912	-74.6984	1.3267	A	0.035461	43	-13.40917	-74.70636	4.5322	B
1	11.44	0.04008	-19	-13.3912	-74.6984	1.3267	A	0.035461	28	-13.40917	-74.70636	1.8536	A
1	11.52	0.04008	-33	-13.3912	-74.6984	2.3713	B	0.035461	21	-13.40917	-74.70636	1.4127	A
1	11.6	0.04008	-19	-13.3912	-74.6984	1.3267	A	0.035461	24	-13.40917	-74.70636	1.5713	A
1	11.68	0.04008	-6	-13.3912	-74.6984	1.0291	A	0.035461	21	-13.40917	-74.70636	1.4127	A
1	11.76	0.04008	-16	-13.3912	-74.6984	1.2220	A	0.035461	24	-13.40917	-74.70636	1.5713	A
1	11.84	0.04008	-6	-13.3912	-74.6984	1.0291	A	0.035461	38	-13.40917	-74.70636	3.1854	B
1	11.91	0.04008	-1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.035461	24	-13.40917	-74.70636	1.5713	A
1	11.99	0.04008	-6	-13.3912	-74.6984	1.0291	A	0.035461	38	-13.40917	-74.70636	3.1854	B
1	12.07	0.04008	-1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.035461	24	-13.40917	-74.70636	1.5713	A
1	12.15	0.04008	7	-13.3912	-74.6984	1.0396	A	0.035461	-14	-13.40917	-74.70636	1.1660	A
1	12.23	0.04008	-1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.035461	24	-13.40917	-74.70636	1.5713	A
1	12.31	0.04008	-23	-13.3912	-74.6984	1.5141	A	0.035461	39	-13.40917	-74.70636	3.4012	B
1	12.39	0.04008	-7	-13.3912	-74.6984	1.0396	A	0.035461	24	-13.40917	-74.70636	1.5713	A
1	12.47	0.04008	17	-13.3912	-74.6984	1.2540	A	0.035461	4	-13.40917	-74.70636	1.0132	A

Grupo	Prof-T1-2(m)	D-T1(m)	Amp-T1	Lat-T1	Long-T1	PD-T1	ClaseT1	D-T2(m)	Amp-T2	Lat-T2	Long-T2	PD-T2	ClaseT2
1	12.55	0.04008	17	-13.3912	-74.6984	1.2540	A	0.035461	24	-13.40917	-74.70636	1.5713	A
1	12.62	0.04008	17	-13.3912	-74.6984	1.2540	A	0.035461	42	-13.40917	-74.70636	4.2017	B
1	12.7	0.04008	20	-13.3912	-74.6984	1.3680	A	0.035461	24	-13.40917	-74.70636	1.5713	A
1	12.78	0.04008	41	-13.3912	-74.6984	3.9059	B	0.035461	27	-13.40917	-74.70636	1.7741	A
1	12.86	0.04008	20	-13.3912	-74.6984	1.3680	A	0.035461	50	-13.40917	-74.70636	8.4360	C
1	12.94	0.04008	23	-13.3912	-74.6984	1.5141	A	0.035461	27	-13.40917	-74.70636	1.7741	A
1	13.02	0.04008	20	-13.3912	-74.6984	1.3680	A	0.035461	15	-13.40917	-74.70636	1.1927	A
1	13.1	0.04008	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.035461	4	-13.40917	-74.70636	1.0132	A
1	13.18	0.04008	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.035461	15	-13.40917	-74.70636	1.1927	A
1	13.26	0.04008	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	11	-13.40917	-74.70636	1.0997	A
1	13.33	0.04008	15	-13.3912	-74.6984	1.1927	A	0.035461	-12	-13.40917	-74.70636	1.1196	A
1	13.41	0.04008	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	11	-13.40917	-74.70636	1.0997	A
1	13.49	0.04008	-21	-13.3912	-74.6984	1.4127	A	0.035461	-12	-13.40917	-74.70636	1.1196	A
1	13.57	0.04008	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	11	-13.40917	-74.70636	1.0997	A
1	13.65	0.04008	44	-13.3912	-74.6984	4.9028	B	0.035461	42	-13.40917	-74.70636	4.2017	B
1	13.73	0.04008	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	37	-13.40917	-74.70636	2.9900	B
1	13.81	0.04008	2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.035461	40	-13.40917	-74.70636	3.6403	B
1	13.89	0.04008	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	37	-13.40917	-74.70636	2.9900	B
1	13.97	0.04008	2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.035461	40	-13.40917	-74.70636	3.6403	B
1	14.04	0.04008	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	41	-13.40917	-74.70636	3.9059	B
1	14.12	0.04008	20	-13.3912	-74.6984	1.3680	A	0.035461	40	-13.40917	-74.70636	3.6403	B
1	14.2	0.04008	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	24	-13.40917	-74.70636	1.5713	A
1	14.28	0.04008	-29	-13.3912	-74.6984	1.9401	A	0.035461	25	-13.40917	-74.70636	1.6334	A
1	14.36	0.04008	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	24	-13.40917	-74.70636	1.5713	A
1	14.44	0.04008	34	-13.3912	-74.6984	2.5051	B	0.035461	-17	-13.40917	-74.70636	1.2540	A
1	14.52	0.04008	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	24	-13.40917	-74.70636	1.5713	A
1	14.6	0.04008	32	-13.3912	-74.6984	2.2489	B	0.035461	-2	-13.40917	-74.70636	1.0037	A
1	14.68	0.04008	21	-13.3912	-74.6984	1.4127	A	0.035461	16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
1	14.75	0.04008	5	-13.3912	-74.6984	1.0203	A	0.035461	-2	-13.40917	-74.70636	1.0037	A
1	14.83	0.04008	-15	-13.3912	-74.6984	1.1927	A	0.035461	11	-13.40917	-74.70636	1.0997	A
1	14.91	0.04008	5	-13.3912	-74.6984	1.0203	A	0.035461	17	-13.40917	-74.70636	1.2540	A
1	14.99	0.04008	-8	-13.3912	-74.6984	1.0518	A	0.035461	31	-13.40917	-74.70636	2.1370	B
1	15.07	0.04008	5	-13.3912	-74.6984	1.0203	A	0.035461	20	-13.40917	-74.70636	1.3680	A
1	15.15	0.04008	16	-13.3912	-74.6984	1.2220	A	0.035461	31	-13.40917	-74.70636	2.1370	B
1	15.23	0.04008	5	-13.3912	-74.6984	1.0203	A	0.035461	20	-13.40917	-74.70636	1.3680	A
1	15.31	0.04008	15	-13.3912	-74.6984	1.1927	A	0.035461	31	-13.40917	-74.70636	2.1370	B
1	15.39	0.04008	25	-13.3912	-74.6984	1.6334	A	0.035461	38	-13.40917	-74.70636	3.1854	B
1	15.46	0.04008	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.035461	38	-13.40917	-74.70636	3.1854	B
1	15.54	0.04008	3	-13.3912	-74.6984	1.0076	A	0.035461	38	-13.40917	-74.70636	3.1854	B
1	15.62	0.04008	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.035461	38	-13.40917	-74.70636	3.1854	B
1	15.7	0.04008	5	-13.3912	-74.6984	1.0203	A	0.035461	39	-13.40917	-74.70636	3.4012	B
1	15.78	0.04008	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.035461	38	-13.40917	-74.70636	3.1854	B
1	15.86	0.04008	55	-13.3912	-74.6984	15.0541	D	0.035461	-21	-13.40917	-74.70636	1.4127	A

Grupo	Prof-T1-2(m)	D-T1(m)	Amp-T1	Lat-T1	Long-T1	PD-T1	ClaseT1	D-T2(m)	Amp-T2	Lat-T2	Long-T2	PD-T2	ClaseT2
1	15.94	0.04008	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.035461	-4	-13.40917	-74.70636	1.0132	A
1	16.02	0.04008	0	-13.3912	-74.6984	1.0006	A	0.035461	29	-13.40917	-74.70636	1.9401	A
1	16.1	0.04008	4	-13.3912	-74.6984	1.0132	A	0.035461	-4	-13.40917	-74.70636	1.0132	A
1	16.17	0.04008	0	-13.3912	-74.6984	1.0006	A	0.035461	29	-13.40917	-74.70636	1.9401	A
1	16.25	0.04008	4	-13.3912	-74.6984	1.0132	A	0.035461	16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
1	16.33	0.04008	1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.035461	-37	-13.40917	-74.70636	2.9900	B
1	16.41	0.04008	4	-13.3912	-74.6984	1.0132	A	0.035461	3	-13.40917	-74.70636	1.0076	A
1	16.49	0.04008	12	-13.3912	-74.6984	1.1196	A	0.035461	35	-13.40917	-74.70636	2.6518	B
1	16.57	0.04008	4	-13.3912	-74.6984	1.0132	A	0.035461	3	-13.40917	-74.70636	1.0076	A
1	16.65	0.04008	-24	-13.3912	-74.6984	1.5713	A	0.035461	34	-13.40917	-74.70636	2.5051	B
1	16.73	0.04008	4	-13.3912	-74.6984	1.0132	A	0.035461	63	-13.40917	-74.70636	61.7772	E
1	16.81	0.04008	-24	-13.3912	-74.6984	1.5713	A	0.035461	34	-13.40917	-74.70636	2.5051	B
1	16.89	0.04008	-9	-13.3912	-74.6984	1.0659	A	0.035461	-10	-13.40917	-74.70636	1.0818	A
1	16.96	0.04008	37	-13.3912	-74.6984	2.9900	B	0.035461	34	-13.40917	-74.70636	2.5051	B
1	17.04	0.04008	-1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.035461	18	-13.40917	-74.70636	1.2888	A
1	17.12	0.04008	12	-13.3912	-74.6984	1.1196	A	0.035461	34	-13.40917	-74.70636	2.5051	B
1	17.2	0.04008	0	-13.3912	-74.6984	1.0006	A	0.035461	18	-13.40917	-74.70636	1.2888	A
1	17.28	0.04008	12	-13.3912	-74.6984	1.1196	A	0.035461	-20	-13.40917	-74.70636	1.3680	A
1	17.36	0.04008	0	-13.3912	-74.6984	1.0006	A	0.035461	18	-13.40917	-74.70636	1.2888	A
1	17.44	0.04008	12	-13.3912	-74.6984	1.1196	A	0.035461	10	-13.40917	-74.70636	1.0818	A
1	17.52	0.04008	20	-13.3912	-74.6984	1.3680	A	0.035461	18	-13.40917	-74.70636	1.2888	A
1	17.6	0.04008	21	-13.3912	-74.6984	1.4127	A	0.035461	39	-13.40917	-74.70636	3.4012	B
1	17.67	0.04008	25	-13.3912	-74.6984	1.6334	A	0.035461	18	-13.40917	-74.70636	1.2888	A
1	17.75	0.04008	21	-13.3912	-74.6984	1.4127	A	0.035461	39	-13.40917	-74.70636	3.4012	B
1	17.83	0.04008	20	-13.3912	-74.6984	1.3680	A	0.035461	19	-13.40917	-74.70636	1.3267	A
1	17.91	0.04008	4	-13.3912	-74.6984	1.0132	A	0.035461	29	-13.40917	-74.70636	1.9401	A
1	17.99	0.04008	20	-13.3912	-74.6984	1.3680	A	0.035461	32	-13.40917	-74.70636	2.2489	B
1	18.07	0.04008	33	-13.3912	-74.6984	2.3713	B	0.035461	30	-13.40917	-74.70636	2.0343	B
1	18.15	0.04008	20	-13.3912	-74.6984	1.3680	A	0.035461	26	-13.40917	-74.70636	1.7009	A
1	18.23	0.04008	7	-13.3912	-74.6984	1.0396	A	0.035461	29	-13.40917	-74.70636	1.9401	A
1	18.31	0.04008	7	-13.3912	-74.6984	1.0396	A	0.035461	50	-13.40917	-74.70636	8.4360	C
1	18.38	0.04008	7	-13.3912	-74.6984	1.0396	A	0.035461	29	-13.40917	-74.70636	1.9401	A
1	18.46	0.04008	20	-13.3912	-74.6984	1.3680	A	0.035461	38	-13.40917	-74.70636	3.1854	B
1	18.54	0.04008	7	-13.3912	-74.6984	1.0396	A	0.035461	63	-13.40917	-74.70636	61.7772	E
1	18.62	0.04008	20	-13.3912	-74.6984	1.3680	A	0.035461	38	-13.40917	-74.70636	3.1854	B
1	18.7	0.04008	21	-13.3912	-74.6984	1.4127	A	0.035461	11	-13.40917	-74.70636	1.0997	A
1	18.78	0.04008	26	-13.3912	-74.6984	1.7009	A	0.035461	-20	-13.40917	-74.70636	1.3680	A
1	18.86	0.04008	21	-13.3912	-74.6984	1.4127	A	0.035461	11	-13.40917	-74.70636	1.0997	A
1	18.94	0.04008	-10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	-4	-13.40917	-74.70636	1.0132	A
1	19.02	0.04008	-18	-13.3912	-74.6984	1.2888	A	0.035461	-29	-13.40917	-74.70636	1.9401	A
1	19.09	0.04008	-10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	-4	-13.40917	-74.70636	1.0132	A
1	19.17	0.04008	-18	-13.3912	-74.6984	1.2888	A	0.035461	-14	-13.40917	-74.70636	1.1660	A
1	19.25	0.04008	-10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.035461	-4	-13.40917	-74.70636	1.0132	A

Grupo	Prof-T1-2(m)	D-T1(m)	Amp-T1	Lat-T1	Long-T1	PD-T1	ClaseT1	D-T2(m)	Amp-T2	Lat-T2	Long-T2	PD-T2	ClaseT2
1	19.33	0.04008	20	-13.3912	-74.6984	1.3680	A	0.035461	46	-13.40917	-74.70636	5.7909	B
1	19.41	0.04008	17	-13.3912	-74.6984	1.2540	A	0.035461	38	-13.40917	-74.70636	3.1854	B
1	19.49	0.04008	20	-13.3912	-74.6984	1.3680	A	0.035461	33	-13.40917	-74.70636	2.3713	B
1	19.57	0.04008	17	-13.3912	-74.6984	1.2540	A	0.035461	2	-13.40917	-74.70636	1.0037	A
1	19.65	0.04008	0	-13.3912	-74.6984	1.0006	A	0.035461	33	-13.40917	-74.70636	2.3713	B
1	19.73	0.04008	0	-13.3912	-74.6984	1.0006	A	0.035461	2	-13.40917	-74.70636	1.0037	A
1	19.8	0.04008	21	-13.3912	-74.6984	1.4127	A	0.035461	-36	-13.40917	-74.70636	2.8129	B
1	19.88	0.04008	36	-13.3912	-74.6984	2.8129	B	0.035461	2	-13.40917	-74.70636	1.0037	A
1	19.96	0.04008	21	-13.3912	-74.6984	1.4127	A	0.035461	1	-13.40917	-74.70636	1.0014	A
1	20.04	0.04008	1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.035461	-10	-13.40917	-74.70636	1.0818	A
2	0	0.08016	5	-13.3912	-74.6984	1.0203	A	0.070922	2	-13.40917	-74.70636	1.0037	A
2	0.08	0.08016	0	-13.3912	-74.6984	1.0006	A	0.070922	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
2	0.16	0.08016	-32	-13.3912	-74.6984	2.2489	B	0.070922	2	-13.40917	-74.70636	1.0037	A
2	0.24	0.08016	0	-13.3912	-74.6984	1.0006	A	0.070922	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
2	0.32	0.08016	37	-13.3912	-74.6984	2.9900	B	0.070922	-6	-13.40917	-74.70636	1.0291	A
2	0.39	0.08016	9	-13.3912	-74.6984	1.0659	A	0.070922	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
2	0.47	0.08016	-26	-13.3912	-74.6984	1.7009	A	0.070922	17	-13.40917	-74.70636	1.2540	A
2	0.55	0.08016	-41	-13.3912	-74.6984	3.9059	B	0.070922	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
2	0.63	0.08016	-26	-13.3912	-74.6984	1.7009	A	0.070922	-16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
2	0.71	0.08016	33	-13.3912	-74.6984	2.3713	B	0.070922	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
2	0.79	0.08016	27	-13.3912	-74.6984	1.7741	A	0.070922	31	-13.40917	-74.70636	2.1370	B
2	0.87	0.08016	-6	-13.3912	-74.6984	1.0291	A	0.070922	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
2	0.95	0.08016	-36	-13.3912	-74.6984	2.8129	B	0.070922	-39	-13.40917	-74.70636	3.4012	B
2	1.03	0.08016	-6	-13.3912	-74.6984	1.0291	A	0.070922	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
2	1.1	0.08016	11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.070922	37	-13.40917	-74.70636	2.9900	B
2	1.18	0.08016	25	-13.3912	-74.6984	1.6334	A	0.070922	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
2	1.26	0.08016	11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.070922	-39	-13.40917	-74.70636	3.4012	B
2	1.34	0.08016	7	-13.3912	-74.6984	1.0396	A	0.070922	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
2	1.42	0.08016	-2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.070922	37	-13.40917	-74.70636	2.9900	B
2	1.5	0.08016	7	-13.3912	-74.6984	1.0396	A	0.070922	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
2	1.58	0.08016	-2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.070922	-39	-13.40917	-74.70636	3.4012	B
2	1.66	0.08016	-11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.070922	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
2	1.74	0.08016	-2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.070922	38	-13.40917	-74.70636	3.1854	B
2	1.81	0.08016	23	-13.3912	-74.6984	1.5141	A	0.070922	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
2	1.89	0.08016	46	-13.3912	-74.6984	5.7909	B	0.070922	-38	-13.40917	-74.70636	3.1854	B
2	1.97	0.08016	39	-13.3912	-74.6984	3.4012	B	0.070922	-5	-13.40917	-74.70636	1.0203	A
2	2.05	0.08016	0	-13.3912	-74.6984	1.0006	A	0.070922	38	-13.40917	-74.70636	3.1854	B
2	2.13	0.08016	1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.070922	10	-13.40917	-74.70636	1.0818	A
2	2.21	0.08016	0	-13.3912	-74.6984	1.0006	A	0.070922	-38	-13.40917	-74.70636	3.1854	B
2	2.29	0.08016	1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.070922	-12	-13.40917	-74.70636	1.1196	A
2	2.37	0.08016	0	-13.3912	-74.6984	1.0006	A	0.070922	29	-13.40917	-74.70636	1.9401	A
2	2.45	0.08016	1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.070922	15	-13.40917	-74.70636	1.1927	A
2	2.52	0.08016	0	-13.3912	-74.6984	1.0006	A	0.070922	-27	-13.40917	-74.70636	1.7741	A

Grupo	Prof-T1-2(m)	D-T1(m)	Amp-T1	Lat-T1	Long-T1	PD-T1	ClaseT1	D-T2(m)	Amp-T2	Lat-T2	Long-T2	PD-T2	ClaseT2
2	2.6	0.08016	1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.070922	6	-13.40917	-74.70636	1.0291	A
2	2.68	0.08016	14	-13.3912	-74.6984	1.1660	A	0.070922	49	-13.40917	-74.70636	7.6323	C
2	2.76	0.08016	1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.070922	15	-13.40917	-74.70636	1.1927	A
2	2.84	0.08016	-34	-13.3912	-74.6984	2.5051	B	0.070922	-35	-13.40917	-74.70636	2.6518	B
2	2.92	0.08016	-43	-13.3912	-74.6984	4.5322	B	0.070922	-25	-13.40917	-74.70636	1.6334	A
2	3	0.08016	-34	-13.3912	-74.6984	2.5051	B	0.070922	23	-13.40917	-74.70636	1.5141	A
2	3.08	0.08016	-24	-13.3912	-74.6984	1.5713	A	0.070922	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
2	3.16	0.08016	8	-13.3912	-74.6984	1.0518	A	0.070922	-26	-13.40917	-74.70636	1.7009	A
2	3.23	0.08016	-24	-13.3912	-74.6984	1.5713	A	0.070922	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
2	3.31	0.08016	-2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.070922	49	-13.40917	-74.70636	7.6323	C
2	3.39	0.08016	-11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.070922	28	-13.40917	-74.70636	1.8536	A
2	3.47	0.08016	-2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.070922	-23	-13.40917	-74.70636	1.5141	A
2	3.55	0.08016	-11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.070922	-29	-13.40917	-74.70636	1.9401	A
2	3.63	0.08016	-16	-13.3912	-74.6984	1.2220	A	0.070922	-23	-13.40917	-74.70636	1.5141	A
2	3.71	0.08016	-11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.070922	10	-13.40917	-74.70636	1.0818	A
2	3.79	0.08016	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.070922	-23	-13.40917	-74.70636	1.5141	A
2	3.87	0.08016	41	-13.3912	-74.6984	3.9059	B	0.070922	-5	-13.40917	-74.70636	1.0203	A
2	3.95	0.08016	44	-13.3912	-74.6984	4.9028	B	0.070922	30	-13.40917	-74.70636	2.0343	B
2	4.02	0.08016	41	-13.3912	-74.6984	3.9059	B	0.070922	8	-13.40917	-74.70636	1.0518	A
2	4.1	0.08016	-37	-13.3912	-74.6984	2.9900	B	0.070922	-40	-13.40917	-74.70636	3.6403	B
2	4.18	0.08016	33	-13.3912	-74.6984	2.3713	B	0.070922	8	-13.40917	-74.70636	1.0518	A
2	4.26	0.08016	38	-13.3912	-74.6984	3.1854	B	0.070922	-10	-13.40917	-74.70636	1.0818	A
2	4.34	0.08016	33	-13.3912	-74.6984	2.3713	B	0.070922	8	-13.40917	-74.70636	1.0518	A
2	4.42	0.08016	-41	-13.3912	-74.6984	3.9059	B	0.070922	-2	-13.40917	-74.70636	1.0037	A
2	4.5	0.08016	-15	-13.3912	-74.6984	1.1927	A	0.070922	8	-13.40917	-74.70636	1.0518	A
2	4.58	0.08016	40	-13.3912	-74.6984	3.6403	B	0.070922	-2	-13.40917	-74.70636	1.0037	A
2	4.66	0.08016	36	-13.3912	-74.6984	2.8129	B	0.070922	8	-13.40917	-74.70636	1.0518	A
2	4.73	0.08016	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.070922	-2	-13.40917	-74.70636	1.0037	A
2	4.81	0.08016	-32	-13.3912	-74.6984	2.2489	B	0.070922	-31	-13.40917	-74.70636	2.1370	B
2	4.89	0.08016	-15	-13.3912	-74.6984	1.1927	A	0.070922	-2	-13.40917	-74.70636	1.0037	A
2	4.97	0.08016	-25	-13.3912	-74.6984	1.6334	A	0.070922	-26	-13.40917	-74.70636	1.7009	A
2	5.05	0.08016	-16	-13.3912	-74.6984	1.2220	A	0.070922	-2	-13.40917	-74.70636	1.0037	A
2	5.13	0.08016	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.070922	-1	-13.40917	-74.70636	1.0014	A
2	5.21	0.08016	31	-13.3912	-74.6984	2.1370	B	0.070922	-2	-13.40917	-74.70636	1.0037	A
2	5.29	0.08016	29	-13.3912	-74.6984	1.9401	A	0.070922	-21	-13.40917	-74.70636	1.4127	A
2	5.37	0.08016	19	-13.3912	-74.6984	1.3267	A	0.070922	-2	-13.40917	-74.70636	1.0037	A
2	5.44	0.08016	-12	-13.3912	-74.6984	1.1196	A	0.070922	-10	-13.40917	-74.70636	1.0818	A
2	5.52	0.08016	-23	-13.3912	-74.6984	1.5141	A	0.070922	-34	-13.40917	-74.70636	2.5051	B
2	5.6	0.08016	-12	-13.3912	-74.6984	1.1196	A	0.070922	-10	-13.40917	-74.70636	1.0818	A
2	5.68	0.08016	4	-13.3912	-74.6984	1.0132	A	0.070922	-9	-13.40917	-74.70636	1.0659	A
2	5.76	0.08016	4	-13.3912	-74.6984	1.0132	A	0.070922	-4	-13.40917	-74.70636	1.0132	A
2	5.84	0.08016	4	-13.3912	-74.6984	1.0132	A	0.070922	-9	-13.40917	-74.70636	1.0659	A
2	5.92	0.08016	53	-13.3912	-74.6984	11.7314	D	0.070922	-11	-13.40917	-74.70636	1.0997	A

Grupo	Prof-T1-2(m)	D-T1(m)	Amp-T1	Lat-T1	Long-T1	PD-T1	ClaseT1	D-T2(m)	Amp-T2	Lat-T2	Long-T2	PD-T2	ClaseT2
2	6	0.08016	62	-13.3912	-74.6984	48.9486	E	0.070922	-33	-13.40917	-74.70636	2.3713	B
2	6.08	0.08016	53	-13.3912	-74.6984	11.7314	D	0.070922	-11	-13.40917	-74.70636	1.0997	A
2	6.15	0.08016	-10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.070922	-33	-13.40917	-74.70636	2.3713	B
2	6.23	0.08016	1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.070922	-16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
2	6.31	0.08016	24	-13.3912	-74.6984	1.5713	A	0.070922	-1	-13.40917	-74.70636	1.0014	A
2	6.39	0.08016	34	-13.3912	-74.6984	2.5051	B	0.070922	-16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
2	6.47	0.08016	24	-13.3912	-74.6984	1.5713	A	0.070922	-39	-13.40917	-74.70636	3.4012	B
2	6.55	0.08016	34	-13.3912	-74.6984	2.5051	B	0.070922	-16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
2	6.63	0.08016	24	-13.3912	-74.6984	1.5713	A	0.070922	-11	-13.40917	-74.70636	1.0997	A
2	6.71	0.08016	3	-13.3912	-74.6984	1.0076	A	0.070922	-16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
2	6.79	0.08016	7	-13.3912	-74.6984	1.0396	A	0.070922	-11	-13.40917	-74.70636	1.0997	A
2	6.86	0.08016	30	-13.3912	-74.6984	2.0343	B	0.070922	14	-13.40917	-74.70636	1.1660	A
2	6.94	0.08016	11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.070922	20	-13.40917	-74.70636	1.3680	A
2	7.02	0.08016	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.070922	14	-13.40917	-74.70636	1.1660	A
2	7.1	0.08016	25	-13.3912	-74.6984	1.6334	A	0.070922	-3	-13.40917	-74.70636	1.0076	A
2	7.18	0.08016	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.070922	14	-13.40917	-74.70636	1.1660	A
2	7.26	0.08016	18	-13.3912	-74.6984	1.2888	A	0.070922	-3	-13.40917	-74.70636	1.0076	A
2	7.34	0.08016	12	-13.3912	-74.6984	1.1196	A	0.070922	-21	-13.40917	-74.70636	1.4127	A
2	7.42	0.08016	-26	-13.3912	-74.6984	1.7009	A	0.070922	-36	-13.40917	-74.70636	2.8129	B
2	7.5	0.08016	12	-13.3912	-74.6984	1.1196	A	0.070922	-21	-13.40917	-74.70636	1.4127	A
2	7.57	0.08016	56	-13.3912	-74.6984	17.2399	D	0.070922	-36	-13.40917	-74.70636	2.8129	B
2	7.65	0.08016	15	-13.3912	-74.6984	1.1927	A	0.070922	-21	-13.40917	-74.70636	1.4127	A
2	7.73	0.08016	14	-13.3912	-74.6984	1.1660	A	0.070922	12	-13.40917	-74.70636	1.1196	A
2	7.81	0.08016	-15	-13.3912	-74.6984	1.1927	A	0.070922	14	-13.40917	-74.70636	1.1660	A
2	7.89	0.08016	14	-13.3912	-74.6984	1.1660	A	0.070922	12	-13.40917	-74.70636	1.1196	A
2	7.97	0.08016	41	-13.3912	-74.6984	3.9059	B	0.070922	3	-13.40917	-74.70636	1.0076	A
2	8.05	0.08016	20	-13.3912	-74.6984	1.3680	A	0.070922	12	-13.40917	-74.70636	1.1196	A
2	8.13	0.08016	-2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.070922	9	-13.40917	-74.70636	1.0659	A
2	8.21	0.08016	5	-13.3912	-74.6984	1.0203	A	0.070922	2	-13.40917	-74.70636	1.0037	A
2	8.28	0.08016	2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.070922	4	-13.40917	-74.70636	1.0132	A
2	8.36	0.08016	-24	-13.3912	-74.6984	1.5713	A	0.070922	63	-13.40917	-74.70636	61.7772	E
2	8.44	0.08016	2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.070922	20	-13.40917	-74.70636	1.3680	A
2	8.52	0.08016	43	-13.3912	-74.6984	4.5322	B	0.070922	-16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
2	8.6	0.08016	2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.070922	20	-13.40917	-74.70636	1.3680	A
2	8.68	0.08016	4	-13.3912	-74.6984	1.0132	A	0.070922	54	-13.40917	-74.70636	13.2446	D
2	8.76	0.08016	2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.070922	20	-13.40917	-74.70636	1.3680	A
2	8.84	0.08016	-25	-13.3912	-74.6984	1.6334	A	0.070922	-18	-13.40917	-74.70636	1.2888	A
2	8.92	0.08016	2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.070922	7	-13.40917	-74.70636	1.0396	A
2	8.99	0.08016	26	-13.3912	-74.6984	1.7009	A	0.070922	20	-13.40917	-74.70636	1.3680	A
2	9.07	0.08016	2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.070922	7	-13.40917	-74.70636	1.0396	A
2	9.15	0.08016	-22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.070922	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
2	9.23	0.08016	2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.070922	-42	-13.40917	-74.70636	4.2017	B
2	9.31	0.08016	-21	-13.3912	-74.6984	1.4127	A	0.070922	-16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A

Grupo	Prof-T1-2(m)	D-T1(m)	Amp-T1	Lat-T1	Long-T1	PD-T1	ClaseT1	D-T2(m)	Amp-T2	Lat-T2	Long-T2	PD-T2	ClaseT2
2	9.39	0.08016	2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.070922	-4	-13.40917	-74.70636	1.0132	A
2	9.47	0.08016	43	-13.3912	-74.6984	4.5322	B	0.070922	-16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
2	9.55	0.08016	2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.070922	-4	-13.40917	-74.70636	1.0132	A
2	9.63	0.08016	27	-13.3912	-74.6984	1.7741	A	0.070922	7	-13.40917	-74.70636	1.0396	A
2	9.7	0.08016	48	-13.3912	-74.6984	6.9345	C	0.070922	9	-13.40917	-74.70636	1.0659	A
2	9.78	0.08016	31	-13.3912	-74.6984	2.1370	B	0.070922	28	-13.40917	-74.70636	1.8536	A
2	9.86	0.08016	24	-13.3912	-74.6984	1.5713	A	0.070922	9	-13.40917	-74.70636	1.0659	A
2	9.94	0.08016	31	-13.3912	-74.6984	2.1370	B	0.070922	28	-13.40917	-74.70636	1.8536	A
2	10.02	0.08016	30	-13.3912	-74.6984	2.0343	B	0.070922	19	-13.40917	-74.70636	1.3267	A
2	10.1	0.08016	31	-13.3912	-74.6984	2.1370	B	0.070922	-25	-13.40917	-74.70636	1.6334	A
2	10.18	0.08016	52	-13.3912	-74.6984	10.4542	D	0.070922	6	-13.40917	-74.70636	1.0291	A
2	10.26	0.08016	31	-13.3912	-74.6984	2.1370	B	0.070922	-9	-13.40917	-74.70636	1.0659	A
2	10.34	0.08016	46	-13.3912	-74.6984	5.7909	B	0.070922	6	-13.40917	-74.70636	1.0291	A
2	10.42	0.08016	31	-13.3912	-74.6984	2.1370	B	0.070922	33	-13.40917	-74.70636	2.3713	B
2	10.49	0.08016	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.070922	25	-13.40917	-74.70636	1.6334	A
2	10.57	0.08016	31	-13.3912	-74.6984	2.1370	B	0.070922	6	-13.40917	-74.70636	1.0291	A
2	10.65	0.08016	17	-13.3912	-74.6984	1.2540	A	0.070922	13	-13.40917	-74.70636	1.1417	A
2	10.73	0.08016	28	-13.3912	-74.6984	1.8536	A	0.070922	6	-13.40917	-74.70636	1.0291	A
2	10.81	0.08016	17	-13.3912	-74.6984	1.2540	A	0.070922	13	-13.40917	-74.70636	1.1417	A
2	10.89	0.08016	-12	-13.3912	-74.6984	1.1196	A	0.070922	14	-13.40917	-74.70636	1.1660	A
2	10.97	0.08016	-11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.070922	43	-13.40917	-74.70636	4.5322	B
2	11.05	0.08016	20	-13.3912	-74.6984	1.3680	A	0.070922	63	-13.40917	-74.70636	61.7772	E
2	11.13	0.08016	-11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.070922	43	-13.40917	-74.70636	4.5322	B
2	11.2	0.08016	-15	-13.3912	-74.6984	1.1927	A	0.070922	22	-13.40917	-74.70636	1.4613	A
2	11.28	0.08016	-11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.070922	43	-13.40917	-74.70636	4.5322	B
2	11.36	0.08016	-9	-13.3912	-74.6984	1.0659	A	0.070922	46	-13.40917	-74.70636	5.7909	B
2	11.44	0.08016	-11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.070922	43	-13.40917	-74.70636	4.5322	B
2	11.52	0.08016	-33	-13.3912	-74.6984	2.3713	B	0.070922	36	-13.40917	-74.70636	2.8129	B
2	11.6	0.08016	-11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.070922	29	-13.40917	-74.70636	1.9401	A
2	11.68	0.08016	-7	-13.3912	-74.6984	1.0396	A	0.070922	-23	-13.40917	-74.70636	1.5141	A
2	11.76	0.08016	-11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.070922	25	-13.40917	-74.70636	1.6334	A
2	11.84	0.08016	-18	-13.3912	-74.6984	1.2888	A	0.070922	8	-13.40917	-74.70636	1.0518	A
2	11.91	0.08016	-11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.070922	-27	-13.40917	-74.70636	1.7741	A
2	11.99	0.08016	3	-13.3912	-74.6984	1.0076	A	0.070922	8	-13.40917	-74.70636	1.0518	A
2	12.07	0.08016	6	-13.3912	-74.6984	1.0291	A	0.070922	11	-13.40917	-74.70636	1.0997	A
2	12.15	0.08016	5	-13.3912	-74.6984	1.0203	A	0.070922	8	-13.40917	-74.70636	1.0518	A
2	12.23	0.08016	-4	-13.3912	-74.6984	1.0132	A	0.070922	11	-13.40917	-74.70636	1.0997	A
2	12.31	0.08016	-19	-13.3912	-74.6984	1.3267	A	0.070922	32	-13.40917	-74.70636	2.2489	B
2	12.39	0.08016	-15	-13.3912	-74.6984	1.1927	A	0.070922	11	-13.40917	-74.70636	1.0997	A
2	12.47	0.08016	20	-13.3912	-74.6984	1.3680	A	0.070922	-4	-13.40917	-74.70636	1.0132	A
2	12.55	0.08016	18	-13.3912	-74.6984	1.2888	A	0.070922	11	-13.40917	-74.70636	1.0997	A
2	12.62	0.08016	16	-13.3912	-74.6984	1.2220	A	0.070922	32	-13.40917	-74.70636	2.2489	B
2	12.7	0.08016	18	-13.3912	-74.6984	1.2888	A	0.070922	11	-13.40917	-74.70636	1.0997	A

Grupo	Prof-T1-2(m)	D-T1(m)	Amp-T1	Lat-T1	Long-T1	PD-T1	ClaseT1	D-T2(m)	Amp-T2	Lat-T2	Long-T2	PD-T2	ClaseT2
2	12.78	0.08016	42	-13.3912	-74.6984	4.2017	B	0.070922	27	-13.40917	-74.70636	1.7741	A
2	12.86	0.08016	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.070922	27	-13.40917	-74.70636	1.7741	A
2	12.94	0.08016	42	-13.3912	-74.6984	4.2017	B	0.070922	-22	-13.40917	-74.70636	1.4613	A
2	13.02	0.08016	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.070922	15	-13.40917	-74.70636	1.1927	A
2	13.1	0.08016	18	-13.3912	-74.6984	1.2888	A	0.070922	-18	-13.40917	-74.70636	1.2888	A
2	13.18	0.08016	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.070922	15	-13.40917	-74.70636	1.1927	A
2	13.26	0.08016	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.070922	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
2	13.33	0.08016	21	-13.3912	-74.6984	1.4127	A	0.070922	-26	-13.40917	-74.70636	1.7009	A
2	13.41	0.08016	3	-13.3912	-74.6984	1.0076	A	0.070922	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
2	13.49	0.08016	-11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.070922	-26	-13.40917	-74.70636	1.7009	A
2	13.57	0.08016	3	-13.3912	-74.6984	1.0076	A	0.070922	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
2	13.65	0.08016	42	-13.3912	-74.6984	4.2017	B	0.070922	37	-13.40917	-74.70636	2.9900	B
2	13.73	0.08016	7	-13.3912	-74.6984	1.0396	A	0.070922	17	-13.40917	-74.70636	1.2540	A
2	13.81	0.08016	13	-13.3912	-74.6984	1.1417	A	0.070922	35	-13.40917	-74.70636	2.6518	B
2	13.89	0.08016	12	-13.3912	-74.6984	1.1196	A	0.070922	17	-13.40917	-74.70636	1.2540	A
2	13.97	0.08016	3	-13.3912	-74.6984	1.0076	A	0.070922	35	-13.40917	-74.70636	2.6518	B
2	14.04	0.08016	12	-13.3912	-74.6984	1.1196	A	0.070922	46	-13.40917	-74.70636	5.7909	B
2	14.12	0.08016	12	-13.3912	-74.6984	1.1196	A	0.070922	35	-13.40917	-74.70636	2.6518	B
2	14.2	0.08016	16	-13.3912	-74.6984	1.2220	A	0.070922	10	-13.40917	-74.70636	1.0818	A
2	14.28	0.08016	12	-13.3912	-74.6984	1.1196	A	0.070922	31	-13.40917	-74.70636	2.1370	B
2	14.36	0.08016	16	-13.3912	-74.6984	1.2220	A	0.070922	10	-13.40917	-74.70636	1.0818	A
2	14.44	0.08016	38	-13.3912	-74.6984	3.1854	B	0.070922	-21	-13.40917	-74.70636	1.4127	A
2	14.52	0.08016	16	-13.3912	-74.6984	1.2220	A	0.070922	10	-13.40917	-74.70636	1.0818	A
2	14.6	0.08016	14	-13.3912	-74.6984	1.1660	A	0.070922	7	-13.40917	-74.70636	1.0396	A
2	14.68	0.08016	16	-13.3912	-74.6984	1.2220	A	0.070922	1	-13.40917	-74.70636	1.0014	A
2	14.75	0.08016	14	-13.3912	-74.6984	1.1660	A	0.070922	-4	-13.40917	-74.70636	1.0132	A
2	14.83	0.08016	-1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.070922	1	-13.40917	-74.70636	1.0014	A
2	14.91	0.08016	14	-13.3912	-74.6984	1.1660	A	0.070922	28	-13.40917	-74.70636	1.8536	A
2	14.99	0.08016	-1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.070922	7	-13.40917	-74.70636	1.0396	A
2	15.07	0.08016	14	-13.3912	-74.6984	1.1660	A	0.070922	12	-13.40917	-74.70636	1.1196	A
2	15.15	0.08016	18	-13.3912	-74.6984	1.2888	A	0.070922	33	-13.40917	-74.70636	2.3713	B
2	15.23	0.08016	14	-13.3912	-74.6984	1.1660	A	0.070922	35	-13.40917	-74.70636	2.6518	B
2	15.31	0.08016	18	-13.3912	-74.6984	1.2888	A	0.070922	42	-13.40917	-74.70636	4.2017	B
2	15.39	0.08016	30	-13.3912	-74.6984	2.0343	B	0.070922	36	-13.40917	-74.70636	2.8129	B
2	15.46	0.08016	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.070922	27	-13.40917	-74.70636	1.7741	A
2	15.54	0.08016	-1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.070922	-14	-13.40917	-74.70636	1.1660	A
2	15.62	0.08016	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.070922	27	-13.40917	-74.70636	1.7741	A
2	15.7	0.08016	-1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.070922	35	-13.40917	-74.70636	2.6518	B
2	15.78	0.08016	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.070922	27	-13.40917	-74.70636	1.7741	A
2	15.86	0.08016	29	-13.3912	-74.6984	1.9401	A	0.070922	-14	-13.40917	-74.70636	1.1660	A
2	15.94	0.08016	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.070922	-6	-13.40917	-74.70636	1.0291	A
2	16.02	0.08016	-5	-13.3912	-74.6984	1.0203	A	0.070922	27	-13.40917	-74.70636	1.7741	A
2	16.1	0.08016	8	-13.3912	-74.6984	1.0518	A	0.070922	-6	-13.40917	-74.70636	1.0291	A

Grupo	Prof-T1-2(m)	D-T1(m)	Amp-T1	Lat-T1	Long-T1	PD-T1	ClaseT1	D-T2(m)	Amp-T2	Lat-T2	Long-T2	PD-T2	ClaseT2
2	16.17	0.08016	-5	-13.3912	-74.6984	1.0203	A	0.070922	27	-13.40917	-74.70636	1.7741	A
2	16.25	0.08016	8	-13.3912	-74.6984	1.0518	A	0.070922	63	-13.40917	-74.70636	61.7772	E
2	16.33	0.08016	-5	-13.3912	-74.6984	1.0203	A	0.070922	27	-13.40917	-74.70636	1.7741	A
2	16.41	0.08016	8	-13.3912	-74.6984	1.0518	A	0.070922	-10	-13.40917	-74.70636	1.0818	A
2	16.49	0.08016	15	-13.3912	-74.6984	1.1927	A	0.070922	15	-13.40917	-74.70636	1.1927	A
2	16.57	0.08016	8	-13.3912	-74.6984	1.0518	A	0.070922	18	-13.40917	-74.70636	1.2888	A
2	16.65	0.08016	-17	-13.3912	-74.6984	1.2540	A	0.070922	44	-13.40917	-74.70636	4.9028	B
2	16.73	0.08016	8	-13.3912	-74.6984	1.0518	A	0.070922	34	-13.40917	-74.70636	2.5051	B
2	16.81	0.08016	-17	-13.3912	-74.6984	1.2540	A	0.070922	33	-13.40917	-74.70636	2.3713	B
2	16.89	0.08016	-10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.070922	-1	-13.40917	-74.70636	1.0014	A
2	16.96	0.08016	24	-13.3912	-74.6984	1.5713	A	0.070922	33	-13.40917	-74.70636	2.3713	B
2	17.04	0.08016	19	-13.3912	-74.6984	1.3267	A	0.070922	16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
2	17.12	0.08016	20	-13.3912	-74.6984	1.3680	A	0.070922	33	-13.40917	-74.70636	2.3713	B
2	17.2	0.08016	19	-13.3912	-74.6984	1.3267	A	0.070922	16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
2	17.28	0.08016	20	-13.3912	-74.6984	1.3680	A	0.070922	-26	-13.40917	-74.70636	1.7009	A
2	17.36	0.08016	19	-13.3912	-74.6984	1.3267	A	0.070922	16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
2	17.44	0.08016	13	-13.3912	-74.6984	1.1417	A	0.070922	15	-13.40917	-74.70636	1.1927	A
2	17.52	0.08016	19	-13.3912	-74.6984	1.3267	A	0.070922	16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
2	17.6	0.08016	19	-13.3912	-74.6984	1.3267	A	0.070922	48	-13.40917	-74.70636	6.9345	C
2	17.67	0.08016	27	-13.3912	-74.6984	1.7741	A	0.070922	16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
2	17.75	0.08016	19	-13.3912	-74.6984	1.3267	A	0.070922	38	-13.40917	-74.70636	3.1854	B
2	17.83	0.08016	21	-13.3912	-74.6984	1.4127	A	0.070922	16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
2	17.91	0.08016	19	-13.3912	-74.6984	1.3267	A	0.070922	16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
2	17.99	0.08016	20	-13.3912	-74.6984	1.3680	A	0.070922	16	-13.40917	-74.70636	1.2220	A
2	18.07	0.08016	30	-13.3912	-74.6984	2.0343	B	0.070922	18	-13.40917	-74.70636	1.2888	A
2	18.15	0.08016	20	-13.3912	-74.6984	1.3680	A	0.070922	22	-13.40917	-74.70636	1.4613	A
2	18.23	0.08016	17	-13.3912	-74.6984	1.2540	A	0.070922	19	-13.40917	-74.70636	1.3267	A
2	18.31	0.08016	13	-13.3912	-74.6984	1.1417	A	0.070922	22	-13.40917	-74.70636	1.4613	A
2	18.38	0.08016	2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.070922	19	-13.40917	-74.70636	1.3267	A
2	18.46	0.08016	13	-13.3912	-74.6984	1.1417	A	0.070922	22	-13.40917	-74.70636	1.4613	A
2	18.54	0.08016	2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.070922	44	-13.40917	-74.70636	4.9028	B
2	18.62	0.08016	13	-13.3912	-74.6984	1.1417	A	0.070922	22	-13.40917	-74.70636	1.4613	A
2	18.7	0.08016	13	-13.3912	-74.6984	1.1417	A	0.070922	1	-13.40917	-74.70636	1.0014	A
2	18.78	0.08016	32	-13.3912	-74.6984	2.2489	B	0.070922	-20	-13.40917	-74.70636	1.3680	A
2	18.86	0.08016	13	-13.3912	-74.6984	1.1417	A	0.070922	1	-13.40917	-74.70636	1.0014	A
2	18.94	0.08016	-24	-13.3912	-74.6984	1.5713	A	0.070922	4	-13.40917	-74.70636	1.0132	A
2	19.02	0.08016	-11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.070922	1	-13.40917	-74.70636	1.0014	A
2	19.09	0.08016	34	-13.3912	-74.6984	2.5051	B	0.070922	4	-13.40917	-74.70636	1.0132	A
2	19.17	0.08016	-11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.070922	1	-13.40917	-74.70636	1.0014	A
2	19.25	0.08016	5	-13.3912	-74.6984	1.0203	A	0.070922	-2	-13.40917	-74.70636	1.0037	A
2	19.33	0.08016	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.070922	1	-13.40917	-74.70636	1.0014	A
2	19.41	0.08016	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.070922	32	-13.40917	-74.70636	2.2489	B
2	19.49	0.08016	22	-13.3912	-74.6984	1.4613	A	0.070922	43	-13.40917	-74.70636	4.5322	B

Grupo	Prof-T1-2(m)	D-T1(m)	Amp-T1	Lat-T1	Long-T1	PD-T1	ClaseT1	D-T2(m)	Amp-T2	Lat-T2	Long-T2	PD-T2	ClaseT2
2	19.57	0.08016	17	-13.3912	-74.6984	1.2540	A	0.070922	32	-13.40917	-74.70636	2.2489	B
2	19.65	0.08016	8	-13.3912	-74.6984	1.0518	A	0.070922	36	-13.40917	-74.70636	2.8129	B
2	19.73	0.08016	-16	-13.3912	-74.6984	1.2220	A	0.070922	32	-13.40917	-74.70636	2.2489	B
2	19.8	0.08016	8	-13.3912	-74.6984	1.0518	A	0.070922	-25	-13.40917	-74.70636	1.6334	A
2	19.88	0.08016	47	-13.3912	-74.6984	6.3253	C	0.070922	32	-13.40917	-74.70636	2.2489	B
2	19.96	0.08016	8	-13.3912	-74.6984	1.0518	A	0.070922	27	-13.40917	-74.70636	1.7741	A
2	20.04	0.08016	6	-13.3912	-74.6984	1.0291	A	0.070922	-5	-13.40917	-74.70636	1.0203	A
3	0	0.12024	4	-13.3912	-74.6984	1.0132	A	0.106383	2	-13.40917	-74.70636	1.0037	A
3	0.08	0.12024	0	-13.3912	-74.6984	1.0006	A	0.106383	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
3	0.16	0.12024	-32	-13.3912	-74.6984	2.2489	B	0.106383	2	-13.40917	-74.70636	1.0037	A
3	0.24	0.12024	0	-13.3912	-74.6984	1.0006	A	0.106383	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
3	0.32	0.12024	38	-13.3912	-74.6984	3.1854	B	0.106383	-7	-13.40917	-74.70636	1.0396	A
3	0.39	0.12024	10	-13.3912	-74.6984	1.0818	A	0.106383	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
3	0.47	0.12024	-27	-13.3912	-74.6984	1.7741	A	0.106383	17	-13.40917	-74.70636	1.2540	A
3	0.55	0.12024	-40	-13.3912	-74.6984	3.6403	B	0.106383	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
3	0.63	0.12024	-27	-13.3912	-74.6984	1.7741	A	0.106383	-15	-13.40917	-74.70636	1.1927	A
3	0.71	0.12024	33	-13.3912	-74.6984	2.3713	B	0.106383	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
3	0.79	0.12024	27	-13.3912	-74.6984	1.7741	A	0.106383	30	-13.40917	-74.70636	2.0343	B
3	0.87	0.12024	-5	-13.3912	-74.6984	1.0203	A	0.106383	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
3	0.95	0.12024	-37	-13.3912	-74.6984	2.9900	B	0.106383	-37	-13.40917	-74.70636	2.9900	B
3	1.03	0.12024	-5	-13.3912	-74.6984	1.0203	A	0.106383	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
3	1.1	0.12024	11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.106383	35	-13.40917	-74.70636	2.6518	B
3	1.18	0.12024	25	-13.3912	-74.6984	1.6334	A	0.106383	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
3	1.26	0.12024	11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.106383	-36	-13.40917	-74.70636	2.8129	B
3	1.34	0.12024	6	-13.3912	-74.6984	1.0291	A	0.106383	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
3	1.42	0.12024	-2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.106383	36	-13.40917	-74.70636	2.8129	B
3	1.5	0.12024	6	-13.3912	-74.6984	1.0291	A	0.106383	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
3	1.58	0.12024	-2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.106383	-37	-13.40917	-74.70636	2.9900	B
3	1.66	0.12024	-11	-13.3912	-74.6984	1.0997	A	0.106383	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
3	1.74	0.12024	-2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.106383	36	-13.40917	-74.70636	2.8129	B
3	1.81	0.12024	23	-13.3912	-74.6984	1.5141	A	0.106383	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
3	1.89	0.12024	47	-13.3912	-74.6984	6.3253	C	0.106383	-36	-13.40917	-74.70636	2.8129	B
3	1.97	0.12024	39	-13.3912	-74.6984	3.4012	B	0.106383	0	-13.40917	-74.70636	1.0006	A
3	2.05	0.12024	-1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.106383	36	-13.40917	-74.70636	2.8129	B
3	2.13	0.12024	2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.106383	8	-13.40917	-74.70636	1.0518	A
3	2.21	0.12024	-1	-13.3912	-74.6984	1.0014	A	0.106383	-36	-13.40917	-74.70636	2.8129	B
3	2.29	0.12024	2	-13.3912	-74.6984	1.0037	A	0.106383	-8	-13.40917	-74.70636	1.0518	A
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

\*Los datos continúan.



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 005-2025-FIMGC

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN CIENCIAS FÍSICO  
MATEMÁTICAS. ESPECIALIDAD DE FÍSICA**

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga de la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **RESOLUCIÓN DECANAL No 055-2025-FIMGC-D**, a los **nueve días del mes de abril de 2025**, siendo las **9:00 a.m.**, reunidos en el **Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas**, bajo la presidencia del **Dr. Walter Mario SOLANO REYNOSO** y los miembros: **Mg. Renato SOCA FLORES**, **Lic. Noel TORRES HUARIPAUCAR** y **Mg. Julio Francisco JIMENEZ ARANA**, actuando como secretario docente el **MSc. Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNÁNDEZ**, para proceder a la sustentación de tesis para optar el **Título Profesional de Licenciado en Ciencias Físico Matemáticas. Especialidad de Física**, del bachiller:

**Mauro HUALLPA NAVARRO**

Quien presentó la tesis denominada:

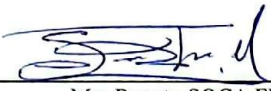
**“VARIACIÓN DE LA COMPOSICIÓN DEL SUBSUELO DE DOS BOFEDALES A DIFERENTES PROFUNDIDADES MEDIANTE DATOS RADARGRAMA, EN LA MICROCUENCA APACHETA-AYACUCHO”**

Los señores miembros del jurado, luego de expuesta la tesis y absueltas las preguntas, deliberaron y declararon:


Aprobado con dieciséis (16)


Siendo las **10:30 a.m.** del día **09 de abril de 2025**, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad con lo actuado, los miembros del jurado firman al pie del presente.

  
Dr. Walter Mario SOLANO REYNOSO  
Presidente

  
Mg. Renato SOCA FLORES  
Miembro

  
Lic. Noel TORRES HUARIPAUCAR  
Miembro

  
Mg. Julio Francisco JIMENEZ ARANA  
Miembro - Asesor

  
MSc. Saul Walter RETAMOZO FERNANDEZ  
Secretario docente de la FIMGC

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DE MINAS Y CIVIL  
Av. Independencia S/N  
Ciudad Universitaria  
Central Tel. 066 312510  
Anexo 151

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

## CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### CONSTANCIA N° 006-2025-JAHQ-FIMGC/UNSCH

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° 697-2024-FIMGC -D**, deja constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

**Nombres y Apellidos** : MAURO HUALLPA NAVARRO.  
**Escuela Profesional** : CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS.  
**Título de la Tesis** : "Variación de la composición del subsuelo de dos bofedales a diferentes profundidades mediante datos radargrama, en la microcuenca Apacheta – Ayacucho"  
**Evaluación de la Originalidad** : 7% Índice de Similitud.  
**Identificador de la entrega** : 2735198133.

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, 25 de agosto del 2025.

Dr. JUAN ALFREDO HUAMANCHAQUI QUISPE  
DNI N°: 41764585

“Variación de la composición  
del subsuelo de dos bofedales  
a diferentes profundidades  
mediante datos radargrama, en  
la microcuenca Apacheta –  
Ayacucho”

*por* Mauro Huallpa Navarro

---

**Fecha de entrega:** 25-ago-2025 03:59p. m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2735198133

**Nombre del archivo:** TESIS.pdf (4.11M)

**Total de palabras:** 41580

**Total de caracteres:** 187396

# “Variación de la composición del subsuelo de dos bofedales a diferentes profundidades mediante datos radargrama, en la microcuenca Apacheta – Ayacucho”

## INFORME DE ORIGINALIDAD

7%

INDICE DE SIMILITUD

7%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://repositorio.unsch.edu.pe">repositorio.unsch.edu.pe</a> Fuente de Internet	2%
2	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	1%
3	<a href="https://aquadocs.org">aquadocs.org</a> Fuente de Internet	1%
4	<a href="https://revistas.unsch.edu.pe">revistas.unsch.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%
5	<a href="https://www.iattc.org">www.iattc.org</a> Fuente de Internet	<1%
6	<a href="https://estudyando.com">estudyando.com</a> Fuente de Internet	<1%
7	<a href="https://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080">dspace.sti.ufcg.edu.br:8080</a> Fuente de Internet	<1%
8	<a href="https://livrosdeamor.com.br">livrosdeamor.com.br</a> Fuente de Internet	<1%

---

9	<a href="http://www.researchgate.net">www.researchgate.net</a> Fuente de Internet	<1 %
10	<a href="http://documents.mx">documents.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
11	<a href="http://www.ene.unb.br">www.ene.unb.br</a> Fuente de Internet	<1 %
12	Submitted to Universidad Privada San Juan Bautista Trabajo del estudiante	<1 %
13	<a href="http://ojs.econ.uba.ar">ojs.econ.uba.ar</a> Fuente de Internet	<1 %
14	<a href="http://analesdepediatria.org">analesdepediatria.org</a> Fuente de Internet	<1 %
15	YASNA PAMELA SEGURA SIERPE. "Reutilización de residuos de construcción en la fabricación de conglomerantes de activación alcalina.", Universitat Politecnica de Valencia, 2016 Publicación	<1 %
16	<a href="http://repositorio.unap.edu.pe">repositorio.unap.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
17	<a href="http://sedici.unlp.edu.ar">sedici.unlp.edu.ar</a> Fuente de Internet	<1 %

---

---

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo