

ARTÍCULOS ORIGINALES

INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ANÁLISIS ESPECTRAL DE DATOS GEORADAR PARA LA ESTIMACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE PROFUNDIDAD DE BOFEDAL EN LA MICROCUENCA APACHETA, REGIÓN AYACUCHO, 2020.

Moncada Wilmer; Pereda Alex

Programa de investigación: Física

Área de investigación: biofísica

wilmer.moncada@unsch.edu.pe

RESUMEN

Las zonas de recarga hídrica en la microcuenca Apacheta obedecen a la funcionalidad superficial y subsuperficial de los ecosistemas de bofedales, que son amenazados por el sobre pastoreo y la degradación por efectos del cambio climático, por lo que el propósito de la investigación es estimar la distribución de profundidad del subsuelo de bofedal mediante el análisis espectral de datos georadar, en la microcuenca Apacheta de la región Ayacucho. Las prospecciones geofísicas generan secciones de radargrama del área muestreada a una altura aproximada de 4650 ms.n.m., que contienen datos de amplitud de onda reflejada del subsuelo de bofedal, los cuales son mapeados en capas con interpolación IDW a diferentes profundidades entre 0,5 a 20m, con intervalos de 0,5m. El análisis estadístico incluye el cálculo de la media, desviación estándar y varianza de la profundidad de subsuelo de bofedal en los transectos muestreados, además del ajuste de datos con la función de distribución normal, la correlación espacial de la profundidad de subsuelo de bofedal mediante el análisis del semivariograma. Los resultados indican que para valores altos en el semivariograma denotan una elevada variación espacial de la profundidad del subsuelo de bofedal. La distribución de densidad discrimina el contenido de agua y humedad en el suelo con respecto al suelo rocoso. Esto es relevante, para entender el comportamiento de los fenómenos de escorrentía subsuperficial, los procesos de infiltración y de transporte que ocurren en su interior de manera muy lenta, desde zonas altas a las más bajas.

Palabras claves: Georadar. Bofedal. Subsuelo. GPR.

SPECTRAL ANALYSIS OF GEO-RADAR DATA FOR THE ESTIMATION OF BOG DEPTH DISTRIBUTION IN THE APACHETA MICRO-WATERSHED, AYACUCHO REGION, 2020.

ABSTRACT

The water recharge zones in the Apacheta micro-watershed are due to the surface and subsurface functionality of the wetland ecosystems, which are threatened by overgrazing and degradation due to the effects of climate change, so the purpose of the research is to estimate the depth distribution of the wetland subsoil through spectral analysis of geo-radar data in the Apacheta micro-watershed in the Ayacucho region. The geophysical surveys generate radargram sections of the sampled area at an approximate height of 4650 masl, containing reflected wave amplitude data of the bofedal subsoil, which are mapped in layers with IDW interpolation at different depths between 0,5 to 20 m, with 0,5 m intervals. The statistical analysis includes the calculation of the mean, standard deviation and variance of the depth of bog subsoil in the sampled transects, in addition to the adjustment of data with the normal distribution function, the spatial correlation of the depth of bog subsoil by means of the semivariogram analysis. The results indicate that high values in the semivariogram denote a high spatial variation of the depth of the bog subsoil. The density distribution discriminates the water and moisture content in the soil with respect to the rocky soil. This is relevant to understand the behavior of the subsurface runoff phenomena, the infiltration and transport processes that occur in its interior in a very slow way, from higher to lower zones.

Keywords: Georadar. Bofedal. Underground. GPR

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas de bofedales en la microcuenca Apacheta vienen siendo afectados por la disminución de las precipitaciones, el incremento de la temperatura máxima del aire y de la superficie del suelo, repercutiendo directamente en el desarrollo de la vegetación de bofedal, humedad del

suelo y uso de suelo, los que a su vez impactan negativamente en la superficie del suelo (erosión, degradación, pérdida de vegetación) por aumento de la velocidad de los vientos, por nombrar algunos (Moncada et al., 2015; Pereda et al., 2018; Moncada and Willems, 2020). La intervención del hombre en los ecosistemas de bofedal a transformado su funcionalidad ocupándolos en centros poblados y actividades agrícolas-

ganaderas (Henao, 1988). En la actualidad, existen proyectos de recuperación, rehabilitación y restauración con la participación de la población (Hartman and Cleveland, 2018); los cuales se realizan sin ningún fundamento científico en relación al beneficio de su biomasa y sin conocer el comportamiento biofísico del subsuelo de bofedal (Moreau et al., 2003).

El uso del Georadar de Penetración Terrestre, GPR, permite estimar zonas saturadas de humedad, con presencia de agua en el subsuelo mediante el cálculo del índice de refracción complejo (Dawrea et al., 2021), además de mapear las propiedades del subsuelo y aguas subterráneas a diferentes profundidades (Davis et al., 1966). La ondas del georadar viajan por el subsuelo hasta encontrarse con un material con propiedades electromagnéticas distintas, que las reflejan con un cambio en la velocidad original, debido al contraste entre los materiales, lo cual provoca que la onda resultante llegue a la antena receptora del GPR con un retraso medible por el propio equipo (Kearey et al., 2002). Como cualquier método geofísico, la calidad y precisión de la información que el GPR provee, se ve limitada por una serie de factores inherentes al subsuelo prospectado, además de agentes externos como el ruido o la dificultad que surge al interpretar las imágenes obtenidas con GPR cuando se emplean especialmente antenas no blindadas ya que los elementos superficiales reflectantes dan lugar a la aparición en los radargramas de contrastes no deseados que distorsionan la señal electromagnética, generando falsos positivos (Molina

et al., 2008). Algunos métodos permiten realizar un levantamiento 3D con una serie de conjuntos direccionales de levantamientos 2D muy adyacentes en un área, obteniéndose una estructura del subsuelo en 3D de manera precisa mediante el procesamiento de datos utilizando una migración 3D tipo Kirchhoff (Yokota et al., 2009).

Se espera que este método a emplear permita estimar la distribución de profundidades del subsuelo de bofedal, mediante el análisis espectral de los datos radargrama adquiridos con el GPR, Gepard, el cual se muestra como una alternativa eficiente, rápida y no destructiva para la estimación de zonas saturadas de humedad o contenido de agua en el subsuelo de bofedal de la microcuenca Apacheta en la región Ayacucho.

MATERIALES Y MÉTODOS

La microcuenca Apacheta, se ubica en la cabecera de la cuenca Cachi en el distrito de Paras, provincia de Cangallo, Región Ayacucho, en las longitudes 74° 37' 26.4" W a 74° 45' 32.4" W y latitudes 13° 17' 6" S a 13° 26' 9.6" S. La línea limítrofe, figura 1, separa el área sur perteneciente a la región Ayacucho del área norte perteneciente a la provincia de Huaytará de la región Huancavelica. Tiene un área aproximada de 14.348,21 ha, con altitud mínima de 4112 ms.n.m., altitud máxima de 5045 ms.n.m., y altitud media de 4651 ms.n.m. (Moncada y Willems, 2020).

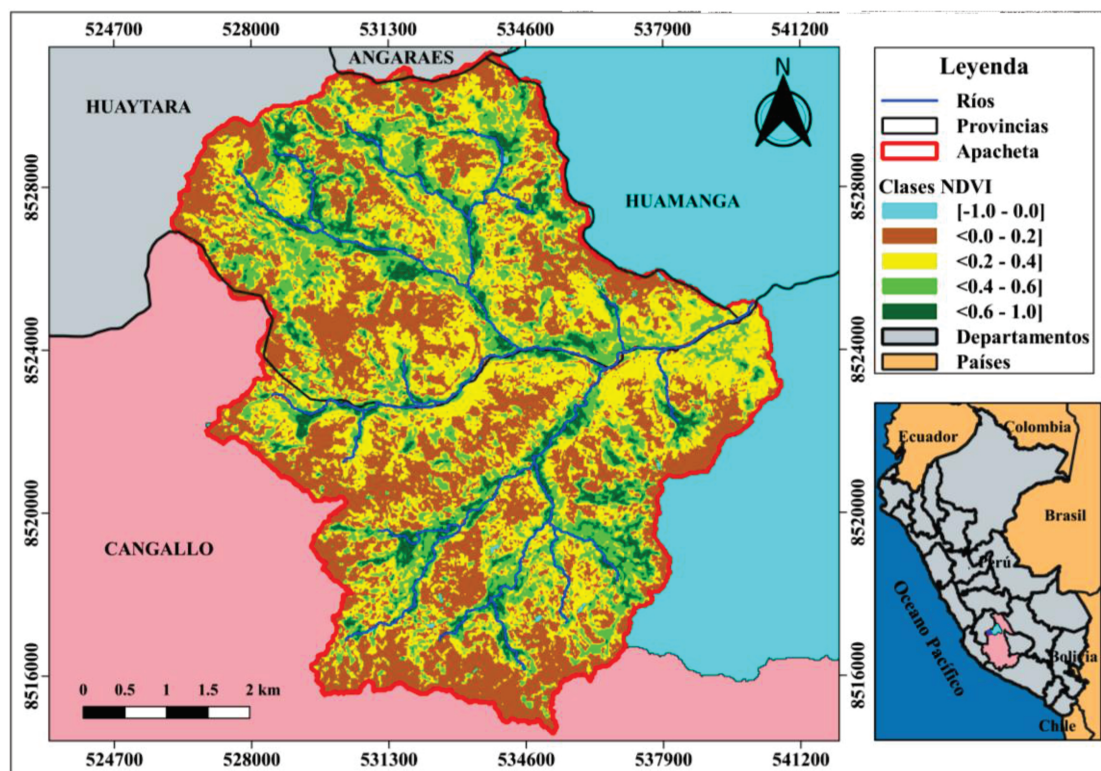


Figura 1: Ubicación geográfica de la microcuenca Apacheta, Región Ayacucho.

Tiene tres estadios estacionales climáticos, el lluvioso con valores altos de precipitación acumulada de 145,96mm, temperatura mínima del aire 1,55°C y humedad relativa 74,04%; el estadio seco, con valores altos de velocidad del viento 3,16m/s y bajos de temperatura mínima del aire -

2,40°C; el estadio intermedio, con valores altos de temperatura máxima del aire de 13,38°C y radiación solar 552,37Ly. La media anual de la precipitación acumulada es 71,09mm, la temperatura máxima del aire 12,73°C, la temperatura mínima del aire -0,35°C, la humedad relativa

40,43%, la velocidad del viento 2,91m/s y la radiación solar 514,43Ly. (Moncada et al., 2020).

En primer término, la metodología involucra la prospección geofísica del subsuelo de bofedal, realizada con el GPR, Gepard, en una zona de bofedal a lo largo de cinco transectos de 20m y separados 2 metros uno del otro (recogidas en noviembre de 2020), llegando a obtener datos de amplitud de onda reflejada del subsuelo hasta una profundidad de 20m. Las trazas de georadar con los tiempos de recorrido recogidos se georreferenciaron en el sistema de coordenadas UTM mediante el propio sistema de GPS del equipo en tiempo real.

El análisis de las anomalías de suelo en los radargrama se realiza aplicando la interpolación IDW de los datos de amplitud de onda reflejada, en planos, para cada profundidad desde 0,5m hasta 20m, con intervalos de 0,5m, obteniendo mapas de distribución espacial que explican el comportamiento de la composición del subsuelo en función de la frecuencia de puntos de amplitud de onda reflejada y de su densidad de probabilidad.

Análisis estadístico: incluye las siguientes etapas principales:

1. Estadísticas descriptivas, media, desviación estándar y varianza de la profundidad de subsuelo de bofedal en los transectos muestreados.
2. Análisis del mejor ajuste de datos con la función de distribución normal de la profundidad del subsuelo de bofedal.
3. Correlación espacial de la profundidad del subsuelo de bofedal analizando el semivariograma de los datos de amplitud de onda reflejada para cada profundidad, los cuales indican cómo una medida puntual está correlacionada con las otras medidas con respecto a la distancia relativa, dado que el georadar permite un muestreo espacial denso, los semivariogramas también pueden explicar dicho comportamiento para distancias de retardo pequeñas (menos de 1m), por lo que se debe toma en cuenta que los valores altos en el semivariograma denotan elevada variación espacial de la profundidad del subsuelo de bofedal.

Propiedades electromagnéticas de las ondas de radar

Los valores de la permitividad eléctrica para los distintos

tipos de material vienen dadas por la permitividad (ϵ), (Kovacs et al., 1995).

$$\epsilon = (1 + 0.845\rho)^2 \quad (1)$$

donde ρ es la gravedad específica y ϵ , es la permitividad eléctrica correspondiente al valor relativo con respecto al vacío (adimensional).

La relación entre el tiempo de viaje de la onda del georadar (twt en ns) y la gravedad específica se convierte en:

$$twt = \frac{2d}{c} \cdot (1 + 0.845\rho) \quad (2)$$

donde d es la profundidad del subsuelo de bofedal; c es la velocidad de la onda en el vacío (m/ns). En el rango de velocidades de 0,20 m/ns a 0,24 m/ns , la gravedad específica casi se duplica (de 0,3 a 0,6).

La concentración de agua en el subsuelo de bofedal (WE) se define como:

$$WE = \frac{\rho}{2} \cdot 0.845 \cdot (c - v) \cdot twt \quad (3)$$

La precisión en la estimación de WE está directamente relacionada con la precisión de los tiempos de recorrido de la onda del georadar y la variabilidad espacial (o precisión) de la velocidad de la onda electromagnética (Kovacs et al., 1995).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Las secciones de radargrama, tomadas con el georadar, del área muestreada a una altura aproximada de 4650 ms.n.m., se muestran en los perfiles verticales del espectro radargrama de la señal de amplitud de onda reflejada del subsuelo de bofedal, el cual está compuesto principalmente por materia orgánica, producto de la descomposición y degradación de su vegetación con la humedad y el agua acumulada en el paso del tiempo, además de escombros de sedimentación y suelo rocoso. La figura 1, representa un perfil vertical del radargrama perteneciente a una sección de radar típica. Las reflexiones más significativas se obtuvieron para zonas con disponibilidad de agua saturada a una profundidad entre 5 a 10.5 m, los puntos rojos indican los transectos muestreados.

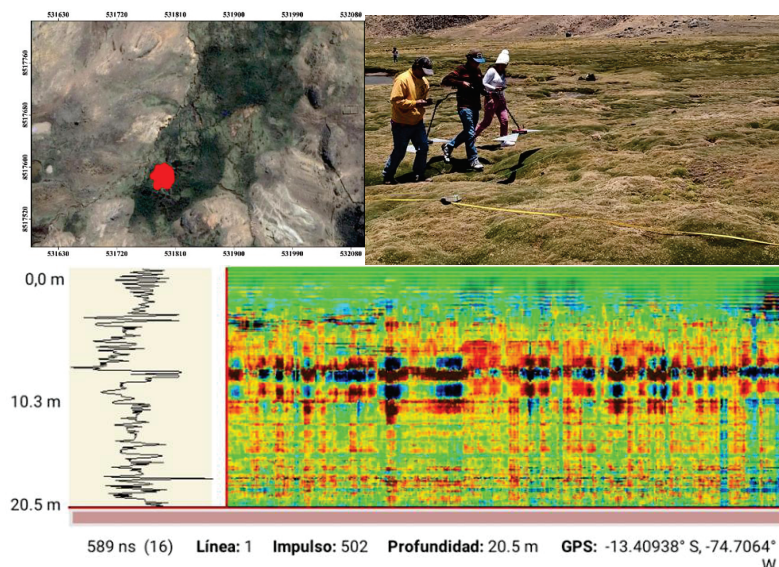


Fig. 1. Línea de perfil vertical de radargrama a lo largo de un transecto en el subsuelo de bofedal de la microcuenca Apacheta.

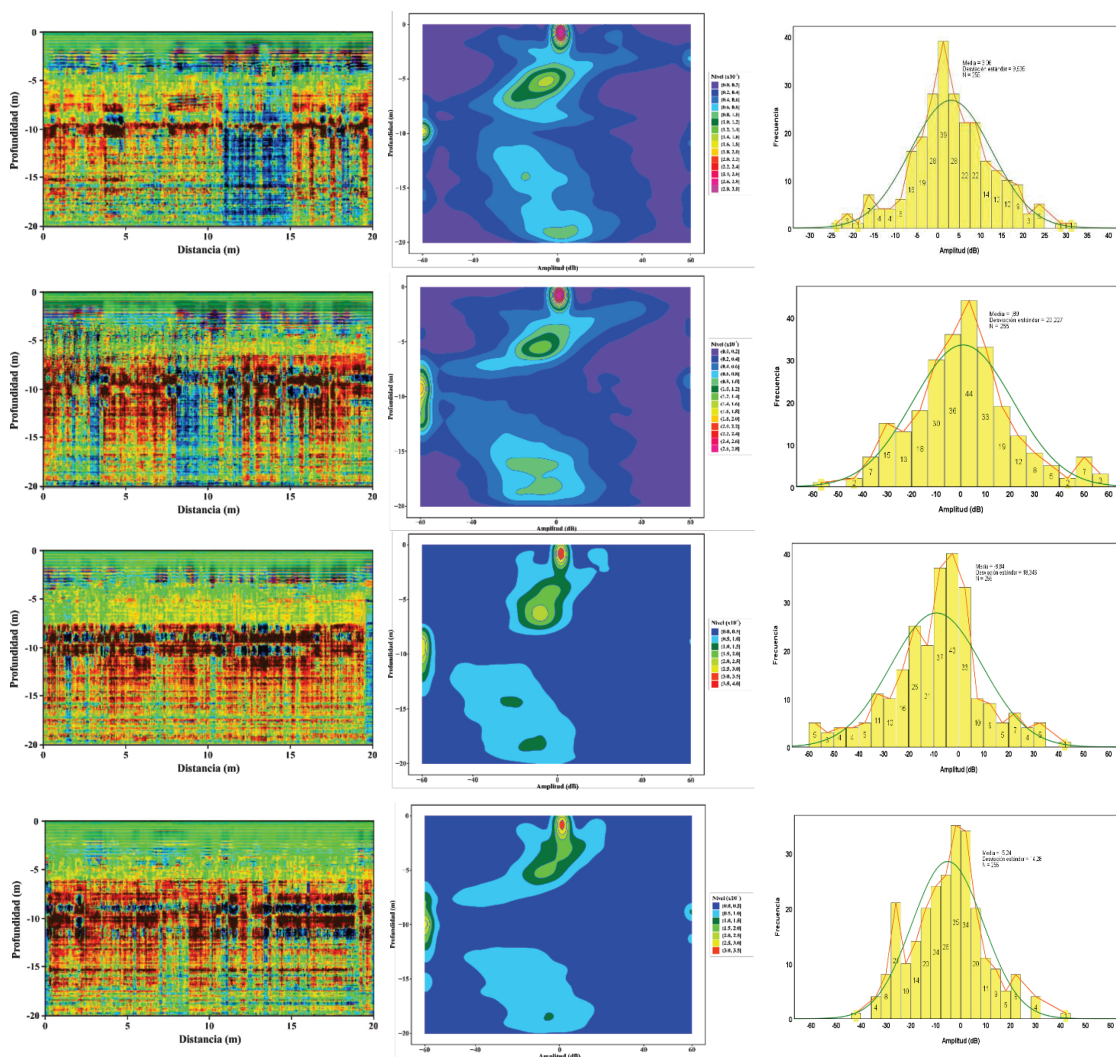
2. A lo largo de 5 transectos muestreados con el georadar, se observan capas continuas y bien definidas dentro del subsuelo de bofedal, figura 2, donde la intensidad de la señal recibida varió principalmente en función del estado de la materia orgánica, entre los primeros 5 m de profundidad, que compone el subsuelo de bofedal debido a su estratificación, así como de la naturaleza del sustrato, por lo que desde los 15 m hasta los 20 m se observa una capa uniforme de suelo rocoso. En el transecto 1 la mayor frecuencia de amplitud de onda se da entre los -5 a 10 dB, en el transecto 2 y 4 se da entre -10 a 10 dB, en el transecto 3 se da entre -10 a 5 dB, en el transecto 5 se da entre -25 a -10 dB. Siendo las zonas amarillas, anaranjadas, rojas y fucsias las de mayor densidad de frecuencia de amplitud de onda reflejada en el subsuelo de bofedal, perteneciente a suelo compacto.

En la cota de los 4650 ms.n.m., la cubierta vegetal de bofedal se superpone a la vegetación degradada más antigua, acumulada durante los años anteriores, almacenándose capa sobre capa, algunas de manera uniforme, otras encerrando vacío o gases por la descomposición de la materia orgánica y otras conduciendo agua de manera subsuperficial, tal como se muestra en los radargramas de los perfiles muestreados, regiones oscuras. El contraste de las propiedades electromagnéticas entre la vegetación superficial y la materia orgánica del subsuelo antigua, con el resto de su

composición, se diferencian en el coeficiente de reflexión, produciendo una reflexión débil, lo que significa que hay una mejor detección del agua con respecto a la demás composición del subsuelo.

La alta densidad de muestreo espacial de los datos georadar, genera una distribución robusta de la profundidad del subsuelo de bofedal, donde el conjunto de datos georadar permite obtener todas las variaciones del espesor de materia orgánica y composición del subsuelo de bofedal a diferentes profundidades, prácticamente no presenta limitaciones en la penetración del subsuelo; las técnicas tradicionales no podrían cubrir amplias áreas con la misma resolución espacial y están limitadas por el poder de penetración de la longitud de las ondas incidentes. Estas limitaciones son responsables de la subestimación tanto de la media como la desviación estándar de la profundidad del subsuelo de bofedal.

A menudo, la distribución normal ha resultado ser un buen modelo para describir la profundidad del subsuelo de bofedal, la cual, evoluciona desde una distribución bastante sesgada desde sus inicios hacia una distribución menos sesgada (incluso normal) en su máximo estacional, ya sea de precipitación o de mayor densidad de vegetación. Por el contrario, señalamos resultados similares a los dados por Skaugen (2007), donde un modelo basado en la función de distribución gamma se ajustaba a los datos experimentales de dos lugares de Noruega.



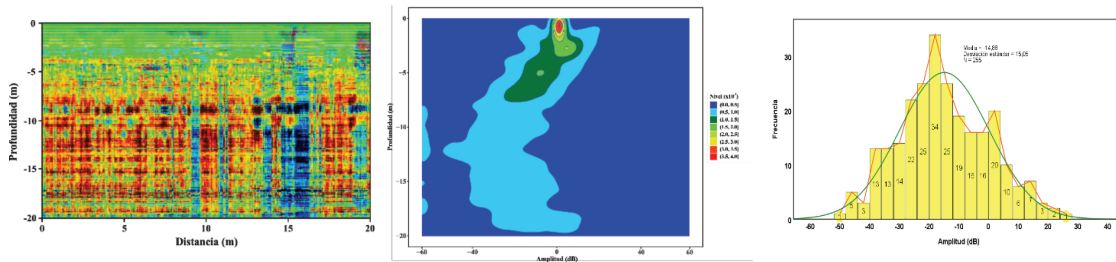
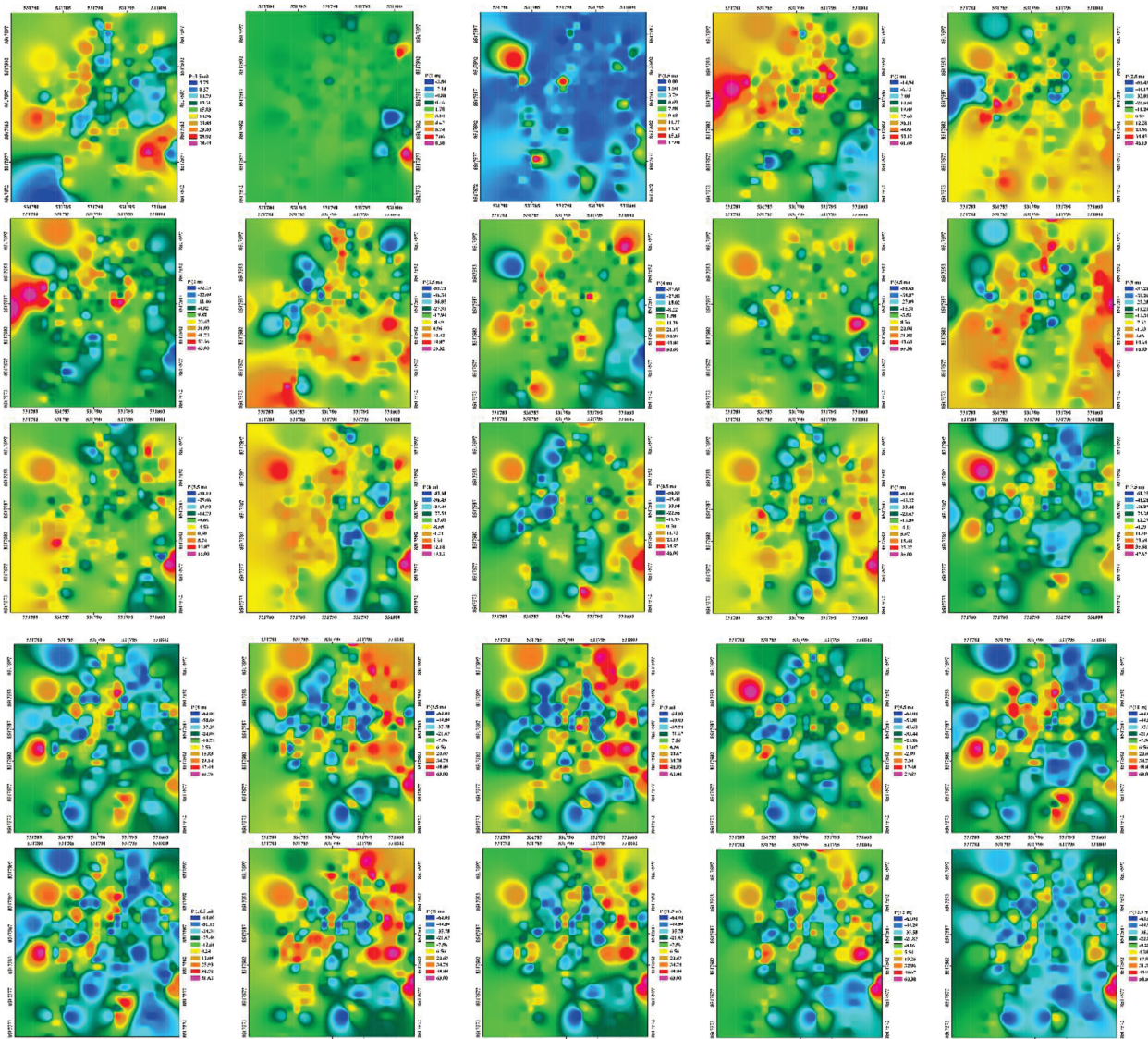


Fig. 2. Radargrama, densidad de amplitud e histograma de frecuencia de onda reflejada en 5 transectos de 20m, desde 0m a 20m de profundidad, en el subsuelo de bofedal en la microcuenca Apacheta.

3. En la Figura 3, se muestran 40 secciones planas a diferentes profundidades construidas mediante interpolación IDW, donde los colores celeste y azul corresponde a valores de menor amplitud de onda reflejada y los colores rojo y fucsia a valores mayores de amplitud de onda reflejada. Cada sección corresponde a los puntos muestreados en 5 transectos, para profundidades 0,5m hasta 20m. separadas 0.5 m. Se detecta claramente la reflexión debida a la presencia de agua para menores valores de amplitudes de onda reflejada, esto debido a la mayor absorbancia del agua; también se observan algunas reflexiones continuas a lo largo de las secciones,

debido a las características típicas de las capas dentro del subsuelo de bofedal. Por otro lado, la reflexión del fondo es más débil y se ve afectada en su mayor parte por el ruido. Se puede destacar que la señal detectada cerca de la superficie de bofedal es más ruidosa y no se puede detectar bien la reflexión principal, siendo esta muy dispersa, esto debido a la separación de las antenas con la superficie. Estos resultados son coherentes con la descripción de Koh et al. (1996), quienes observaron que la detección de la señal reflejada en el suelo es muy compleja.



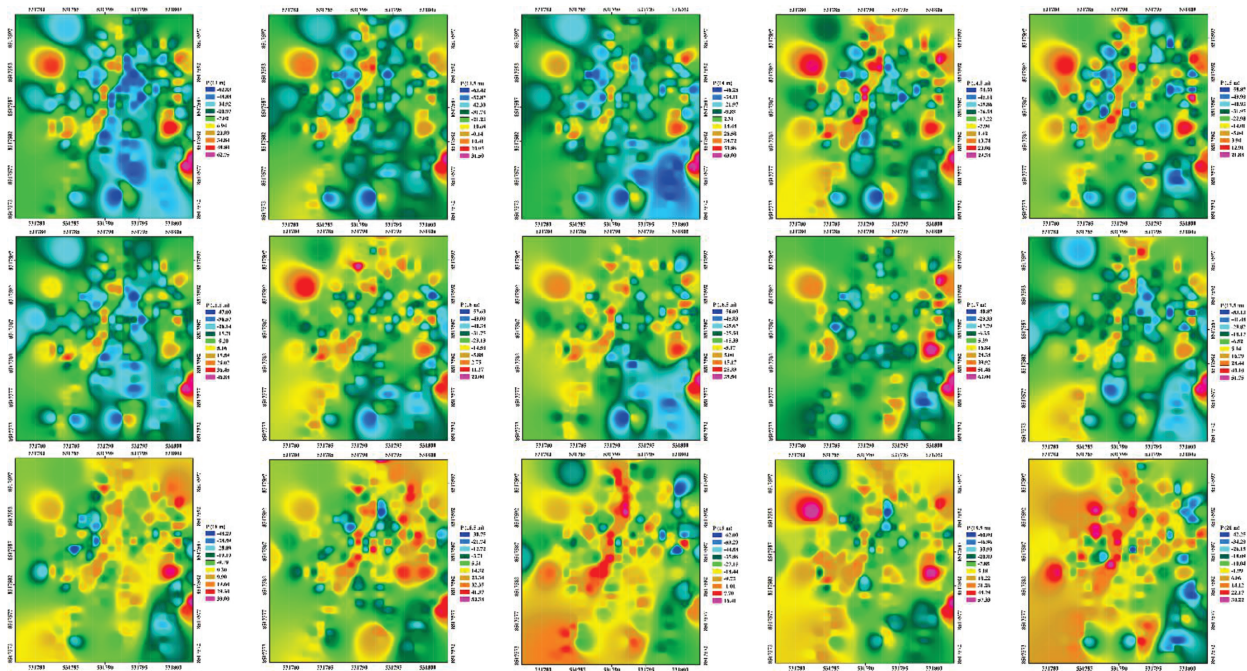
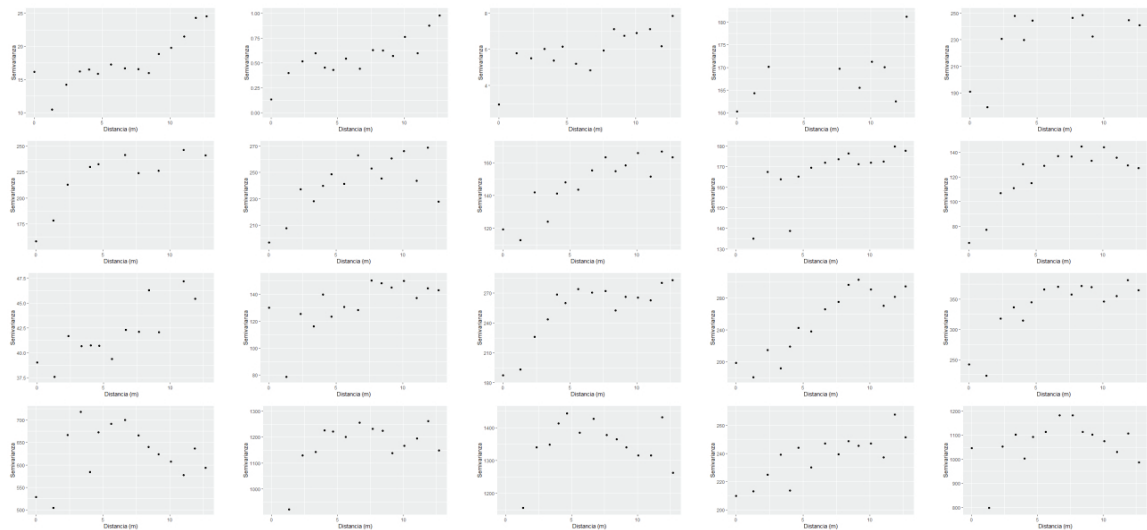


Fig. 3. Interpolación IDW de la amplitud de onda reflejada a profundidades de 0.5m a 20m, cada 0.5m, en el subsuelo de bofedal en la microcuenca Apacheta, medidas con el GPR, Gepard.

Para el caso de bofedales, el coeficiente de reflexión de la interfaz vegetación superficial y subsuelo depende de las propiedades de permitividad dieléctrica debido a su composición, como son algunos restos de roca (micaesquistos, ϵ , oscila entre 6 a 9); que para este caso el módulo del coeficiente de reflexión es aproximadamente 0,4. Por tanto, el alto contraste entre las propiedades electromagnéticas de las diferentes composiciones, vegetación, nieve ($\epsilon=2$), escombros (ϵ , oscila entre 5 a 6) con respecto al agua ($\epsilon=80$), justifica la fuerte reflectividad de la amplitud de la onda de radar.

5. Los semivariogramas de la amplitud de onda reflejada medidos cada 0.5m de profundidad desde los 0.5m hasta los 20m, correspondiente a los puntos muestreados en los cinco transectos se representan en la Fig. 4, donde el valor

medio es menor y la desviación estándar muestra un incremento significativo de la profundidad del subsuelo de bofedal en los transectos 2 y 3 con respecto a los otros tres transectos; también los semivariogramas a profundidades de 8.5m, 9m, 10m y 11m alcanzaron valores de semivarianza más altos por encima de los 1000, esto denota una mayor variación espacial del subsuelo de bofedal; de lo contrario, en el transecto 1, la desviación estándar es menor pero la media es mayor, mientras que los semivariogramas a diferentes profundidades no muestran comportamiento de forma regular, siendo estas muy dispersas en las primeras distancias. Las diferencias de la desviación estándar y la distribución espacial de la profundidad del subsuelo de bofedal están relacionadas con el comportamiento de las escorrentías subsuperficiales.



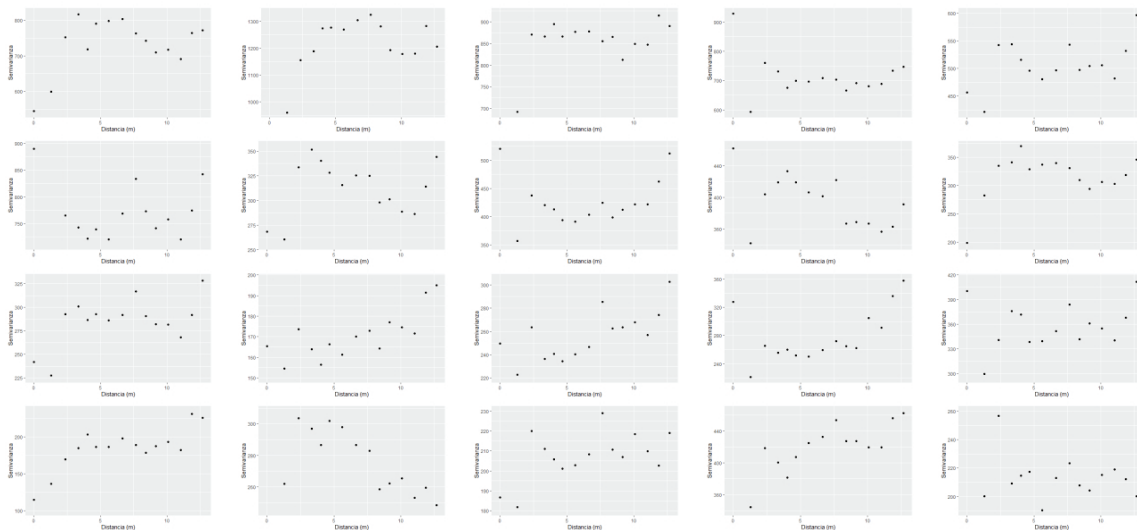


Fig. 4. Semivariograma de la amplitud de onda reflejada a diferentes profundidades, desde 0.5m a 20m, en el subsuelo de bofedal en la microcuenca Apacheta, medida con el GPR, Gepard.

Un análisis geoestadístico de la distribución de la profundidad del subsuelo de bofedal podría ser útil para analizar la confiabilidad de la distribución espacial de la información de la amplitud de onda reflejada a diferentes profundidades (Godio and Rege, 2016). Los semivariogramas confirman que existe una alta variabilidad espacial de la profundidad del subsuelo de bofedal a una distancia de unos 5m de un punto de medición. La variabilidad de la profundidad del subsuelo de bofedal se ve muy afectada por el área de mayor acumulación de materia orgánica o de bolsas con gases o de bolsas de agua acumulada.

El análisis de los datos georadar en los cinco transectos muestreados en uno de los bofedales de la microcuenca Apacheta, ha permitido estimar la variabilidad espacial de la profundidad del subsuelo de bofedal con diferentes sustratos y composición. Los tiempos de prospección son muy útiles para un mapeo rápido y preciso de la profundidad del subsuelo de bofedal con alta resolución espacial y buena precisión vertical. La ventaja de las prospecciones geofísicas realizadas con el GPR, Gepard, emplea menos tiempo y no sufren los límites de las técnicas tradicionales, como es el caso de la perforación del subsuelo que trastocan la profundidad de la zona investigada, cuyas mediciones tienen una mejor calidad de datos de alta resolución mediante una cuidadosa calibración de la velocidad de onda, lo cual trasciende en el análisis geoestadístico de los datos mostrando una gran variación espacial de las capas del subsuelo de bofedal.

Los semivariogramas muestran la aparición de clústeres a distancias cortas, lo cual significa que algunas zonas se conectan con otras con comportamientos distintos a diferentes profundidades y que sólo tiene sentido para distancias cortas, dependiendo del contenido de humedad en el suelo y de su composición, que para este caso es de unos 20m de profundidad.

La distribución de densidad de la amplitud de la onda reflejada a diferentes profundidades del subsuelo de bofedal en cinco transectos diferentes, refleja bastante bien la

distribución de los datos experimentales y discrimina el contenido de agua y humedad en el suelo con respecto al suelo rocoso.

El comportamiento espacial de la humedad y del contenido de agua en diferentes profundidades son muy variables, lo cual explica su movimiento a través de escorrentías subsuperficiales de manera lentic, debido a la permeabilidad de la composición porosa del subsuelo en concordancia con el proceso de formación del bofedal por fenómenos de erosión y redistribución de materia orgánica acumulada.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Teledetección y Energías Renovables LABTELER de la Escuela Profesional de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga por permitirnos hacer uso del GPR, Gepard. En especial, al Instituto de Investigación e Innovación de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga por haber hecho posible su realización, quienes han aportado económicamente en su ejecución sin lo cual no hubiera sido posible su desarrollo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Davis, B.R., Lundien, J.R., Williamson, A.N., 1966. Feasibility Study of the Use of Radar to Detect Surface and Ground Water. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Dawrea, A., Zytner, R.G., Donald, J., 2021. Enhanced GPR data interpretation to estimate in situ water saturation in a landfill. *Waste Manag.* 120, 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.033>
- Godio, A., Rege, R.B., 2016. Analysis of georadar data to estimate the snow depth distribution. *J. Appl. Geophys.* 129, 92–100. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.03.036>
- Hartman, B.D., Cleveland, D.A., 2018. The socioeconomic factors that facilitate or constrain restoration management: Watershed rehabilitation and wet meadow (bofedal) restoration in the Bolivian Andes. *J. Environ. Manage.* 209, 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.025>

Henao, J., 1988. Introducción al manejo de cuencas hidrográficas. Universidad Santo Tomas, Bogota.

Kearey, P., Brooks, M., Hill, I., 2002. An Introduction to Geophysical Exploration, Tercera. ed. Wiley-Blackwell, USA.

Koh, G., Yankielun, N.E., Baptista, A.I., 1996. Snow Cover Characterization Using Multiband Fmcw Radars. *Hydrol. Process.* 10, 1609–1617. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199612\)10:12<1609::AID-HYP504>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199612)10:12<1609::AID-HYP504>3.0.CO;2-O)

Kovacs, A., Gow, A.J., Morey, R.M., 1995. The in-situ dielectric constant of polar firn revisited. *Cold Reg. Sci. Technol.* 23, 245–256. [https://doi.org/10.1016/0165-232X\(94\)00016-Q](https://doi.org/10.1016/0165-232X(94)00016-Q)

Molina, G., Claría, J., Rinaldi, V., 2008. Procesamiento de Imágenes de Geo - Radar Obtenidas en Escenarios con Múltiples Reflectantes Superficiales. Argentina. <https://doi.org/DOI:10.13140/2.1.3035.2644>

Moncada, W., Pereda, A., Aldana, C., Masias, M., Jimenez, J., 2015. Cuantificación hidrográfica de la cuenca del rio Cachi-Ayacucho, mediante imágenes satelitales. *Inst. Investig. Científica E Innov. Tecnológica UNSCH II.*

Moncada, W., Willems, B., 2020. Spatial and temporal analysis of surface temperature in the Apacheta micro-basin using Landsat thermal data. *Rev. Teledetec.* 0, 51–63. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13855>

Moncada, W., Willems, B., Rojas, J., 2020. Estimación de estadios estacionales a partir de parámetros climáticos medidos en la estación meteorológica de la microcuenca Apacheta, Región Ayacucho, 2000 al 2018. *Rev. Investig. Física UNMSM*23, 17-- 25.

Moreau, S., Bosseno, R., Gu, X.F., Baret, F., 2003. Assessing the biomass dynamics of Andean bofedal and totora high-protein wetland grasses from NOAA/AVHRR. *Remote Sens. Environ.* 85, 516–529. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00053-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00053-1)

Pereda, A., Moncada, W., Verde, L., 2018. Respuesta nival de la cabecera de cuenca Cachi-Apacheta de Ayacucho. Editorial Académica Española, Perú.

Skaugen, T., 2007. Modelling the spatial variability of snow water equivalent at the catchment scale. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1543–1550. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1543-2007>

Yokota, T., Inazaki, T., Shinagawa, S., Ueda, T., 2009. A 3D ground penetrating radar imaging of the heavy rainfall-induced deformation around a river levee: a case study of Ara River, Saitama, Japan*. *Explor. Geophys.* 40, 49–55. <https://doi.org/10.1071/EG08108>