

Espectrorradiometría aplicada al análisis de rocas basálticas del Grupo Serra Geral en Rio Grande do Sul, Brasil

Spectroradiometry Applied to the Analysis of Basaltic Rocks from the Serra Geral Group in Rio Grande do Sul, Brazil

Lorenzo Fossa Sampaio Mexias¹✉ , Morvana Machado¹, Laurindo Antonio Guasseli², Deyvis Cano²

Filiación institucional

¹ Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto– Grupo de Pesquisa LATITUDE, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

² Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Recibido: 05-06-24

Aprobado: 15-08-24

Publicado: 20-08-24

RESUMEN

Objetivo. Este estudio examina la influencia del posicionamiento de rocas basálticas del Grupo Serra Geral en Río Grande do Sul, Brasil, sobre las firmas espectrales, analizadas con espectroscopía de reflectancia. **Métodos.** Se examinaron las firmas espectrales de seis muestras de diferentes puntos del derrame: base, núcleo y cima; además de interacciones de lava-sedimento, amígdalas tardías y un dique intrusivo posterior a la deposición. Se utilizó un espectrorradiómetro FieldSpec3 para obtener las firmas espectrales. Para cada orientación se obtuvieron promedios de 10 lecturas con 4 lecturas por muestra, haciendo un total de 240 firmas espectrales. Estas fueron procesadas en el software ViewSpecPro v.6 y se aplicó un suavizado exponencial simple para mitigar el “ruido” espectral. **Resultados.** Los resultados del análisis ANOVA sobre la variabilidad, mediante la desviación estándar de las firmas espectrales, muestran que, aunque todas las muestras son basálticas, se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre ellas ($p < 0,05$). También se observó que las muestras con mayor heterogeneidad son más sensibles al posicionamiento, especialmente en términos de reflectancia y en la profundidad de las bandas de reflectancia espectral. **Conclusiones.** Se concluye que el posicionamiento de las muestras influye fuertemente en la firma espectral y puede estar relacionado con las características estructurales, mineralógicas y geométricas de cada muestra.

Palabras clave: vulcanismo; reflectancia; posición de muestras; longitud de onda; teledetección.

ABSTRACT

Objective. This study examines the influence of the positioning of basaltic rocks from the Serra Geral Group in Rio Grande do Sul, Brazil, on spectral signatures, analyzed using reflectance spectroscopy. **Methods.** Spectral signatures of six samples from different points of the spill were examined: base, core, and top; In addition to lava-sediment interactions, late amygdalae, and an intrusive dike after deposition. A FieldSpec3 spectroradiometer was used to obtain the spectral signatures. For each orientation, averages of 10 readings were obtained with 4 readings per sample, making a total of 240 spectral signatures. These were processed in ViewSpecPro v.6 software and simple exponential smoothing was applied to mitigate spectral “noise”. **Results.** The results of the ANOVA analysis on variability, using the standard deviation of spectral signatures, show that, although all samples are basaltic, statistically significant differences were found between them ($p < 0.05$). It was also observed that samples with higher heterogeneity are more sensitive to positioning, especially in terms of reflectance and in the depth of the reflectance and spectral absorption bands. **Conclusions.** It is concluded that the positioning of the samples strongly influences the spectral signature and may be related to the structural, mineralogical and geometrical characteristics of each sample.

Keywords: volcanism; reflectance; sample position; wavelength; remote sensing.

Citar como: Sampaio Mexias, L. F., Machado, M., Guasseli, L. A., y Cano, D. (2024). Espectrorradiometría aplicada al análisis de rocas basálticas del Grupo Serra Geral en Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Peruana de Ingeniería, Arquitectura y Medio Ambiente*, 1(2), 92-102. <https://doi.org/10.37711/repiama.2024.1.2.6>

Introducción

La espectroscopía es la medición de la radiación electromagnética en función de la longitud de onda emitida o reflejada por un determinado material, donde la curva espectral representa la información sobre el objetivo (Asadzadeh & de Souza Filho, 2016). En el ámbito de las geociencias, especialmente para los geólogos, la diferenciación de tipos litológicos es fundamental, tanto para la investigación como para su aplicación en diversas áreas. Por ello, se han desarrollado y aplicado métodos para identificar diferentes características mineralógicas, estructurales, geoquímicas y geofísicas, entre otras. La espectroscopía de reflectancia surge como un método rápido, no destructivo y, relativamente, de bajo costo para análisis más detallados (Fang et al., 2018). Sin embargo, a pesar de la gran variedad de rocas, minerales y sus bibliotecas espectrales, este método necesita mejoras y aún carece de datos espectrales debido a la especificidad de las muestras y la representatividad de las condiciones de laboratorio (Xie et al., 2022).

Los estudios de reflectancia espectral son esenciales para la identificación de minerales y el mapeo de características geológicas, siendo las bandas de absorción diagnósticas fundamentales para aplicaciones de teledetección, especialmente en terrenos complejos (Ahmad et al., 2016). La preparación de la superficie de las muestras puede alterar significativamente los espectros infrarrojos térmicos de las rocas debido a factores como la rugosidad (Rost et al., 2018). Esto refuerza la necesidad de una preparación meticulosa para un análisis espectral preciso, ya que las variaciones superficiales pueden generar discrepancias en los datos registrados. Además, propiedades físicas como el tamaño de grano y la porosidad influyen en la reflectancia y en la profundidad de las bandas espectrales (Mandon et al., 2022). No obstante, aún faltan estudios detallados sobre la influencia del posicionamiento de rocas en las firmas espectrales mediante espectroscopía de reflectancia.

Por lo tanto, este estudio tuvo como objetivo analizar las curvas espectrales en función de la variación de las dimensiones morfológicas y el posicionamiento de las muestras de rocas Basálticas, recolectadas en canteras ubicadas en la unidad geológica del Grupo Serra Geral en Brasil. También se discuten los efectos de las variaciones mineralógicas y texturales en diferentes partes del derrame (base, núcleo y cima), así como los productos tardíos de la cristalización rápida de la lava que llenan las cavidades de la roca (amígdalas) y el dique intrusivo posterior al evento principal de deposición volcánica, comparándolos con las rocas circundantes.

Métodos

Tipo y área de estudio

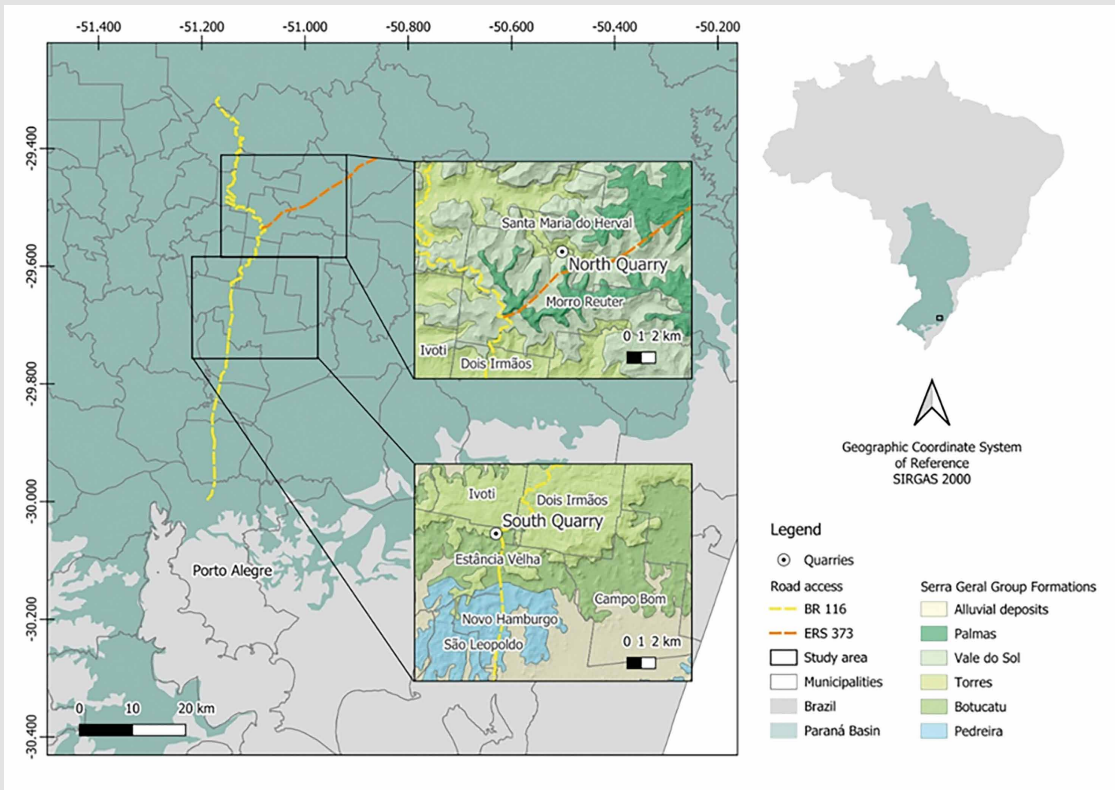
El Grupo Serra Geral es una unidad geológica de amplia distribución en el norte del estado de Río Grande do Sul (RS) y constituye gran parte de la cuenca del río Paraná en Brasil, siendo considerada la mayor provincia ígnea del mundo (ver Figura 1). El estudio se realizó específicamente en los municipios de Santa Maria do Herval y Estância Velha. Estos lugares están conformados principalmente por rocas volcánicas básicas a intermedias (97 % basaltos, basaltos-andesíticos y andesitas) y, en menor proporción, por rocas volcánicas ácidas (3 % riolitos, dacitas y riolodacitas), además de presentar interacciones volcano-sedimentarias con las areniscas eólicas de la Formación Botucatu. Los derrames magmáticos se formaron durante el Cretácico inferior, en un corto período de tiempo (135 a 131 millones de años) en términos de la escala geológica (Rossetti et al., 2018). El área se encuentra entre los 100 y 400 m s. n. m. y su relieve está compartimentado en depresiones (depresión periférica), terrazas, sierras y plateaus (meseta meridional), predominando los argisoles, nitisoles, neosoles y chernosoles/cambisoles (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023). La región presenta un clima templado subtropical, con veranos calurosos e inviernos rigurosos, y precipitaciones relativamente uniformes, con un promedio anual aproximado de 1700 mm (Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão do RS, 2021).

Población y muestra

Se recolectaron in situ seis muestras de fragmentos de rocas Basálticas volcánicas básicas a intermedias atribuidas a la Formación Torres del Grupo Serra Geral, con el objetivo de obtener características geológicas distintas (ver Tabla 1). Las canteras, dispuestas en forma de anfiteatro, son los lugares más propicios para este tipo de estudio, ya que las rocas recolectadas pueden extraerse en sus porciones menos alteradas por

Figura 1

Área de las canteras donde se recolectaron las muestras de basaltos en los municipios demarcados en RS: Santa Maria do Herval (1:120.000) y Estância Velha (1:100.000)

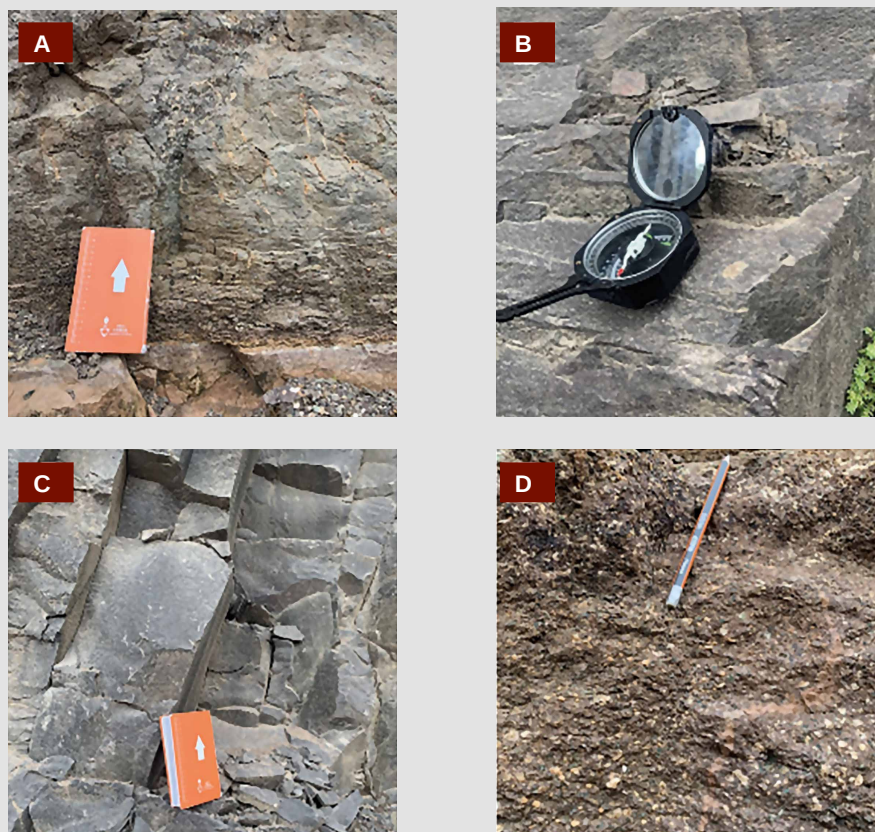


agentes meteorológicos. En función del objetivo de este trabajo, las muestras de basaltos y basaltos andesíticos (Frank, 2008) fueron recolectadas en diferentes facies volcánicas de los derrames, considerando morfologías de cima, núcleo y base, además de su geometría, arquitectura, productos secundarios (rellenando vesículas) y contactos litológicos.

La Figura 2 muestra la distribución espacial de los afloramientos en las canteras donde se recolectaron las muestras, y la Tabla 1 presenta la información relevante sobre cada muestra para una futura discusión sobre los posibles factores que influyen en los resultados obtenidos.

Tabla 1
Morfología volcánica de las muestras recolectadas

| Muestra | Morfología volcánica |
|---------|---|
| PN-1 | Lóbulo vesiculado de derrame pahoehoe compuesto |
| PS-D | Intrusión de dique en núcleo de derrame simple fracturado |
| PS-1 | Lóbulo vesiculado de derrame pahoehoe compuesto |
| PS-2 | Núcleo macizo de derrame pahoehoe simple |
| PS-3 | Base vesiculada de derrame pahoehoe simple |
| PS-4 | Cima vesiculada de derrame pahoehoe simple |

Figura 2*Distribución espacial en la cantera durante la recolección de muestras*

Nota. A) Base de derrame vesiculado. B) Dique posterior al derrame intruido. C) Núcleo macizo de derrame. D) Cima de derrame vesiculado.

Variable e instrumentos de recolección de datos

Para la adquisición de las firmas espectrales se utilizó el espectrorradiómetro FieldSpec3 (MalvernPanalytical), con un peso aproximado de 8 kg, un campo de visión (FOV) de 25°, resolución espectral de 1 nm, un rango de 350 a 2500 nm y capacidad de recolectar 10 espectros por segundo. El protocolo para medir la reflectancia fue activo, ya que la fuente de luz no estaba integrada en el equipo, sino que se utilizó una fuente de luz externa (Kalacska et al., 2018). Se empleó una lámpara halógena con 50 watts de potencia externa al equipo como única fuente de iluminación (ver Figura 3). Las muestras y los equipos fueron posicionados sobre una mesa de trabajo. La fibra óptica se colocó en posición vertical a una distancia mínima necesaria para evitar la presencia de sombras sobre la muestra. El primer ángulo de medición de cada muestra se determinó como 0° y luego se giró manualmente en dextrorso en ángulos aproximados de 90°, 180° y 270° a lo largo de los ejes X e Y paralelos a la base, con el eje Z perpendicular a la base, para analizar posibles variaciones en el espectro según estas posiciones. Para cada orientación se obtuvieron promedios de 10 lecturas del sensor, resultando en una reflectancia media basada en 40 lecturas por muestra, con un total de 240 firmas espectrales, las cuales fueron procesadas en el *software* ViewSpecPro v.6.

Técnicas y procedimientos de la recolección de datos

Los datos obtenidos a partir de las mediciones con el espectrorradiómetro fueron transferidos a la hoja de cálculo Excel, donde se organizaron en tablas dinámicas para su análisis. Se detectó un alto nivel de “ruido”

Figura 3

Posición de los equipos para la adquisición de datos



Nota. Muestras: PN-1 (A), PS-D (B), PS-1 (C), PS-3 (D), PS-2 (E) y PS-4 (F).

espectral, especialmente en los extremos de las firmas espectrales. Por lo tanto, se decidió excluir las bandas por debajo de 440 nm y por encima de 2210 nm. Para mitigar la variabilidad del “ruido” en la parte central de las firmas espectrales se aplicó el complemento de Excel para suavización exponencial simple, con un factor de suavización del 95 % (Figura 4). A continuación, se muestra los detalles de la formula.

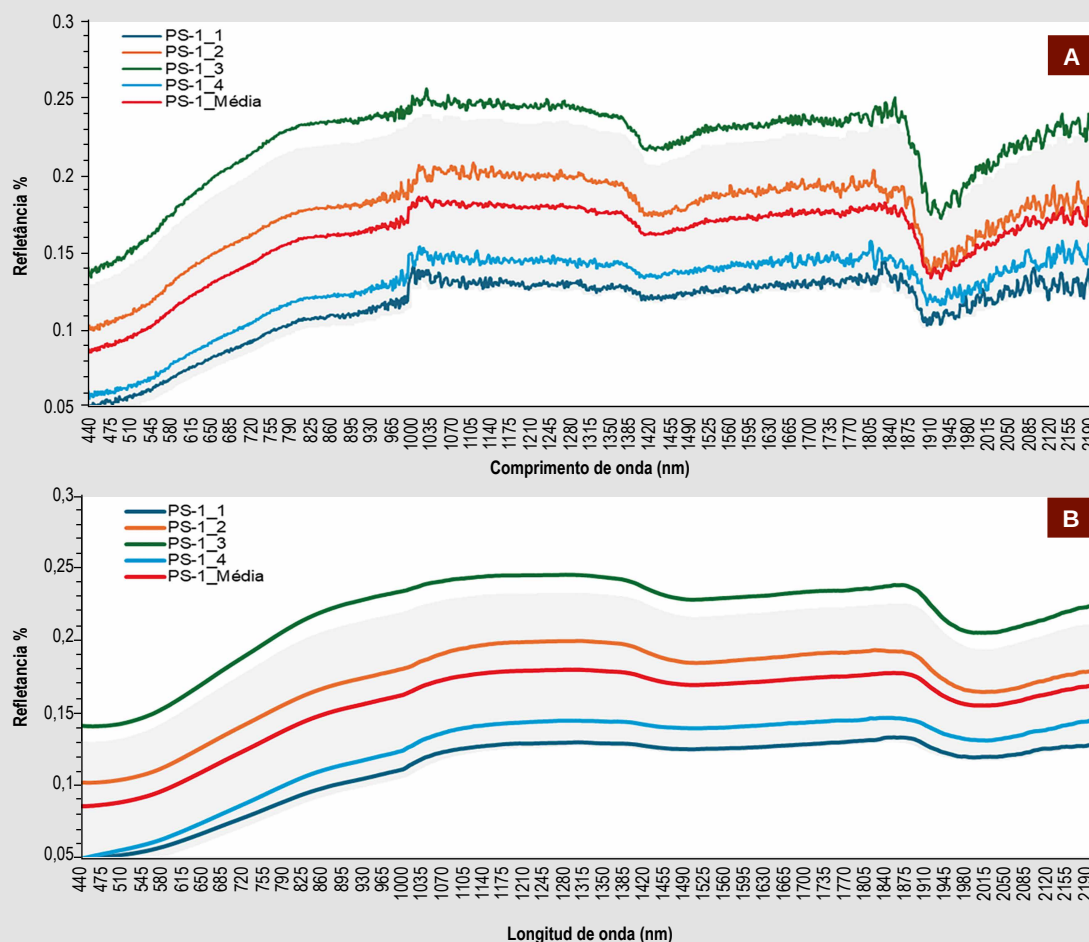
$$S_t = \alpha * X_t + (1 - \alpha) * S_{t-1}$$

Donde S_t es el valor suavizado en el tiempo t . X_t es el valor real en el tiempo t . S_{t-1} es el valor suavizado en el tiempo $t-1$. Y α es el parámetro de suavización (entre 0 y 1).

Análisis de datos

De las cuatro posiciones evaluadas se calculó una firma espectral promedio y su desviación estándar, siendo esto último utilizado para identificar las diferencias a través de la variabilidad o la dispersión de los valores de las firmas espectrales promedio. Las diferencias entre las seis muestras fueron evaluadas mediante un análisis de varianza (ANOVA). Luego de detectar diferencias significativas se aplicó la prueba de intervalos múltiples de Tukey, y los resultados fueron representados en un diagrama de caja y bigotes. Ambas pruebas se realizaron con un nivel de confianza del 95 %. Para realizar estos análisis se utilizaron los *softwares* estadísticos Infostat y MS Excel 2019.

Figura 4
Curvas espectrales de la muestra PS-3



Nota. Antes del procesamiento de eliminación de ruido (A) y después de la eliminación de ruido (B).

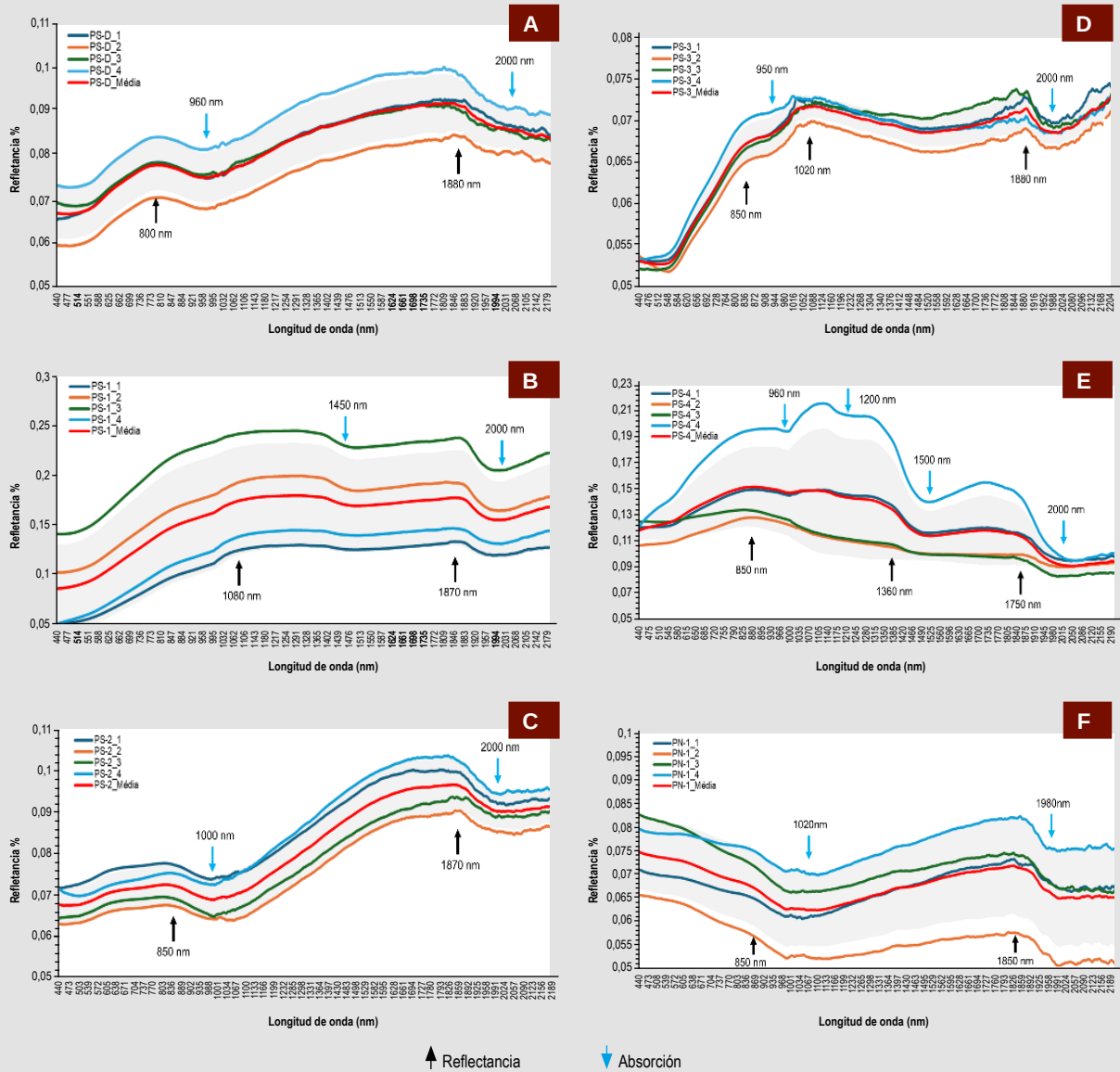
Resultados

Firmas espectrales

La Figura 5 muestra los gráficos de firmas espectrales obtenidos a partir del análisis de la variación rotacional de las diferentes superficies de cada muestra de roca Basálticas. Respectivamente, las siglas _1, _2, _3 y _4 (en tonos de celeste, verde, naranja azul y rojo) representan los valores de 0°, 90°, 180° y 270°, mientras que la media de las cuatro variaciones constituye la coloración roja. No se identificó un valor de rotación que exhibiera resultados estándar por encima o por debajo de la media en diferentes muestras.

Por su parte, la Figura 6 ilustra las curvas espectrales promedio obtenidas en cada muestra para las bandas del visible, infrarrojo cercano (es decir, NIR) e infrarrojo de onda corta (es decir, SWIR). Se indican las características de picos y valles más pronunciadas en la firma espectral, representadas en forma de flechas de color azul (apuntando hacia abajo) y negro (apuntando hacia arriba) respectivamente. Se observa que existen diferencias notables entre las muestras, especialmente entre PS-1 y PS-4, que presentan valores elevados de reflectancia a lo largo del espectro y bandas de absorción más prominentes. En contraste, las longitudes de onda con menores valores de reflectancia corresponden a las muestras PS-D, PS-2, PS-3 y PN-1. A pesar de las características similares de las muestras, hubo diferencias entre todas las firmas espectrales, siendo el núcleo del derrame

Figura 5
Firmas espectrales de cada muestra



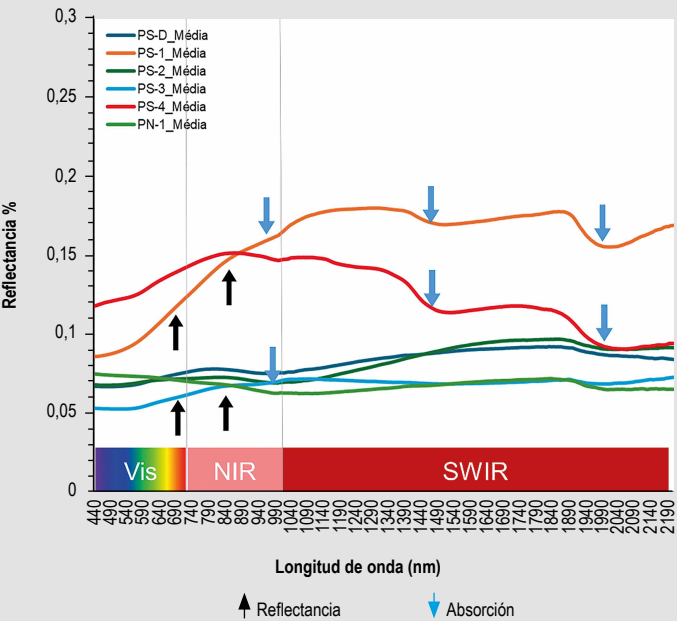
Nota. Diique Basáltico (A), interacción lava-sedimento (B), núcleo del derrame (C), base del derrame (D), tope del derrame (E), núcleo lobado del derrame (F). Las flechas negras y azules resaltan los potenciales picos y valles en las señales de reflectancia respectivamente.

(PS-2) y el diique (PS-D) las muestras que presentaron las mayores similitudes, considerando características cóncavas, convexas, de las señales de reflectancia.

Análisis de las diferencias mediante desviación estándar

Las Figuras 7A y 7B ilustran las diferencias en las desviaciones estándar de todas las muestras, es decir, se evalúa la variabilidad de toda la firma espectral promedio de todas las muestras. La prueba ANOVA indica que hay diferencias estadísticamente significativas entre las muestras ($p < 0,05$). Las muestras PS-1 y PS-4 presentan la mayor variabilidad. Las muestras PS-D y PS-2 muestran similitudes estadísticamente significativas (ver letras similares entre ellas), mientras que PS-3 y PN-1 son estadísticamente distintas de todas las demás, según la prueba de rangos múltiples de Tukey (ver letras diferentes entre ellas; $p < 0,05$).

Figura 6
Firmas espectrales medias de las seis muestras

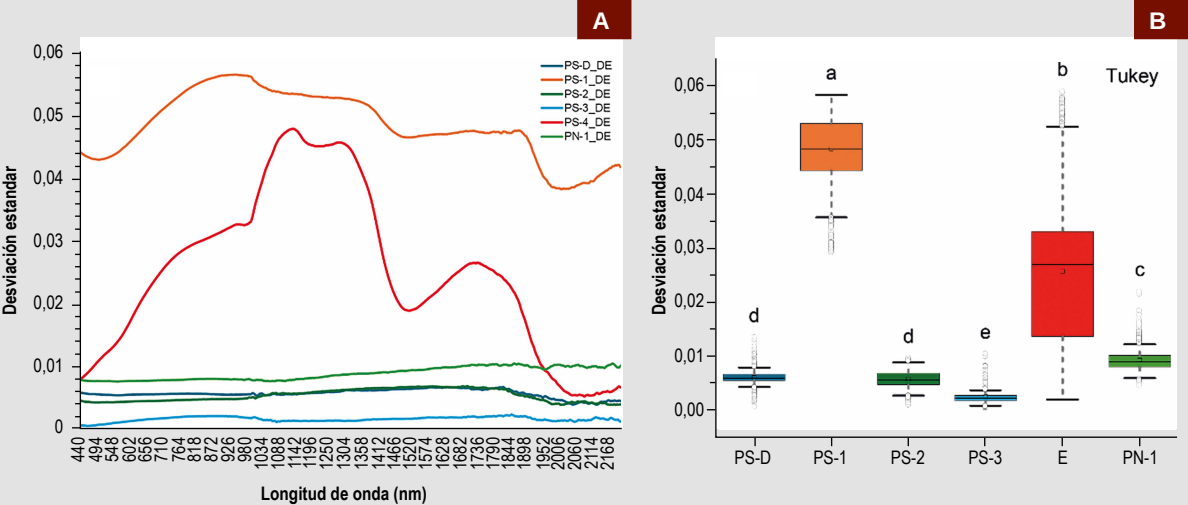


Nota. Las flechas negras y azules resaltan los potenciales picos y valles en la señales de reflectancia respectivamente.

Discusión

Típicamente, para el análisis composicional de rocas Basálticas, especialmente aquellas de granulometría fina, prevalece el uso de métodos geoquímicos debido a su mayor nivel de precisión. Sin embargo, estos métodos requieren más tiempo y costos en adquisición y análisis de muestras, especialmente en lugares de difícil acceso (Jiang et al., 2024). Incluso en el laboratorio, la espectroscopía de reflectancia tiene limitaciones relacionadas

Figura 7
Gráficos de desviación estándar



Nota. Curvas de desviación estándar obtenidas por la rotación posicional de las muestras (A). Análisis de caja y bigotes de las diferencias entre las muestras analizadas (B).

con el amplio campo de visión, que provoca una mezcla de elementos presentes en las muestras que se van a medir, lo que dificulta la interpretación del material analizado. Aunque varios estudios para análisis geológicos o pedológicos basados en espectroscopía de reflectancia se han realizado en regiones donde la vegetación no oscurece las imágenes (Badura & Dąbski, 2022), la cobertura vegetal y la meteorización química en la zona de estudio dificultan aún más la relación entre firmas espectrales de rocas in situ y vía satélite. Sin embargo, este trabajo puede servir como apoyo para análisis espectrales en exposiciones locales (es decir, afloramientos en canteras, cortes de carreteras, márgenes de ríos, movimientos de masa, etc.), potenciados por sensores de alta resolución espacial en levantamientos aéreos.

Dado que se trata de muestras basálticas, los bajos valores de reflectancia obtenidos en los análisis (0,05 % - 0,2 %) son consistentes, (Anbazhagan & Arivazhagan, 2009; Barthez et al., 2023; Kokaly et al., 2017) excepto la muestra PS-1 (ver Figura 4) que tiene porciones arenosas mezcladas. Las escasas características espectrales de los basaltos pueden deberse a la extrema extinción magnética, característica de los minerales máficos (Madani, 2015). El análisis cualitativo de las curvas espectrales indica variaciones composicionales y posicionales/rotacionales entre las muestras. Aquellas con superficies más rugosas e irregulares tienden a reflejar más luz y aparentan mayor reflectancia. La magnitud de la reflectancia entre 500 y 1000 nm también puede estar relacionada con la cantidad de vidrio volcánico en el sistema. Sin embargo, debido a la falta de estandarización en la rugosidad de la superficie de las muestras, dicho análisis sería impreciso (Rader et al., 2022).

Las bandas de absorción son una de las principales propiedades físicas utilizadas para identificar y cuantificar constituyentes (Ong et al., 2019). Varios minerales presentan bandas de absorción o reflectancia entre 950 y 1000 nm. Considerando la paragénesis de los basaltos, la hipótesis principal es que las características de absorción están relacionadas con la presencia de Fe^{2+} en clinopiroxenos del tipo augita (Cloutis et al., 2010). Por otro lado, las características de doble banda de reflectancia entre 600 y 850 nm (aumento de reflectancia en la banda roja), seguidas de una banda de absorción entre 850 y 1000 nm, suelen estar asociadas con la presencia de óxidos de hierro (es decir, hematita y goetita) en muestras de suelo (Jensen, 2009; Sousa et al., 2008). En este caso, la hipótesis es que estos minerales pueden estar presentes como opacos, ya que las muestras PS-D y PS-2 no presentan ningún grado de meteorización. De cualquier manera, ambos casos indican la presencia de hierro en el sistema.

Las bandas de absorción alrededor de 1900-2000 nm, presentes en todas las muestras, están relacionadas con la presencia de hidroxilos en la estructura cristalina de diversos minerales, así como en 1400 nm (Laukamp et al., 2021; Murphy, 2015). En la muestra PS-4, las bandas de absorción y reflectancia son más prominentes y distintas de las otras muestras. Esta firma se asemeja a curvas obtenidas para minerales del grupo de las zeolitas (Cloutis et al., 2002; Kokaly et al., 2017). Se destaca que la muestra PN-1 fue la única que presentó una curvatura descendente hasta los 1000 nm, sin que se encontrara una razón evidente. Los espectros se midieron en diferentes orientaciones para captar la radiación electromagnética en distintos ángulos, ya que la cristalografía de los minerales en las rocas produce superficies irregulares que pueden influir en las firmas espectrales. Se observó que los elevados valores de desviación estándar obtenidos en las muestras PS-1 y PS-4 parecen estar relacionados con la mayor heterogeneidad mineralógica y rugosidad del fragmento (Badura & Dąbski, 2022).

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo destacan la importancia de la metodología de adquisición de datos espectrales para muestras de rocas Basálticas. A medida que aumenta la heterogeneidad macroscópica (textural y mineralógica), la firma espectral tiende a variar significativamente según la posición de la muestra bajo la fibra óptica. Por lo tanto, en composiciones a escala centimétrica, se recomienda utilizar la media obtenida en más de tres rotaciones o realizar un tratamiento para segregar el material a ser analizado, dependiendo del objetivo del estudio.

La presencia de bandas de hidroxilo, óxidos de hierro, zeolita y calcita sirve como apoyo y sustento para futuros análisis petrológicos. También indica que las diferentes partes del derrame tendrán características

distintas, aunque el núcleo presenta similitudes espectrales con el dique. La espectroscopía de reflectancia puede proporcionar información útil sobre minerales y rocas de manera simple y rápida, además de potenciar la cartografía mediante la integración de datos de campo, laboratorio, imágenes aéreas y satelitales. Sin embargo, para análisis mineralógicos de laboratorio se recomienda complementar con otros métodos como petrografía visual y geoquímica, para mejorar la precisión e interpretación de las firmas espectrales.

En este estudio no se midieron curvas de reflectancia bidireccional, sin embargo, es un factor importante a considerar en trabajos futuros, ya que a escala de laboratorio las superficies de las muestras analizadas están alejadas de la reflectancia lambertiana. La característica rugosa de las muestras proporciona una mayor anisotropía en la adquisición de análisis de curvas espectrales, incidiendo no sólo los factores compositivos mineralógicos, sino también la geometría del fragmento de roca, siendo crucial en la mayor variación de la reflectancia.

Es importante resaltar que este trabajo tiene un carácter exploratorio donde se utiliza la técnica de la reflectancia en condiciones controladas de laboratorio para muestras de rocas de diferentes estructuras internas en flujos volcánicos. Sin embargo, a pesar de ser un método no invasivo, la interacción entre la luz y las muestras debe variar dependiendo de la geometría de adquisición, como se ve en la Figura 6.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM), por conceder el uso del radiómetro para la adquisición de las firmas espectrales y por su apoyo en la realización de este trabajo.

Referencias

- Ahmad, L., Shah, M. T., & Khan, S. D. (2016). Reflectance spectroscopy and remote sensing data for finding sulfide-bearing alteration zones and mapping geology in Gilgit-Baltistan, Pakistan. *Earth Science Informatics*, 9(1), 113–121. <https://doi.org/10.1007/S12145-015-0239-X/METRICS>
- Anbazhagan, S., & Arivazhagan, S. (2009). Reflectance spectra of analog basalts; implications for remote sensing of lunar geology. *Planetary and Space Science*, 57(12), 1346–1358. <https://doi.org/10.1016/J.PSS.2009.06.020>
- Asadzadeh, S., & de Souza Filho, C. R. (2016). A review on spectral processing methods for geological remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 47, 69–90. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2015.12.004>
- Badura, I., & Dąbski, M. (2022). Reflectance spectroscopy in geology and soil sciences: literature review. *Quaestiones Geographicae*, 41(3), 157–167. <https://doi.org/10.2478/QUAGEO-2022-0031>
- Barthez, M., Flahaut, J., Guitreau, M., Ito, G., & Pik, R. (2023). Understanding VNIR Plagioclase Signatures on Mars Through Petrographic, Geochemical, and Spectral Characterization of Terrestrial Feldspar-Bearing Igneous Rocks. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 128(8), e2022JE007680. <https://doi.org/10.1029/2022JE007680>
- Cloutis, E. A., Asher, P. M., & Mertzman, S. A. (2002). Spectral reflectance properties of zeolites and remote sensing implications. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 107(E9), 5–1. <https://doi.org/10.1029/2000JE001467>
- Cloutis, E. A., Klima, R. L., Kaletzk, L., Coradini, A., Golubeva, L. F., McFadden, L. A., Shestopalov, D. I., & Vilas, F. (2010). The 506 nm absorption feature in pyroxene spectra: Nature and implications for spectroscopy-based studies of pyroxene-bearing targets. *Icarus*, 207(1), 295–313. <https://doi.org/10.1016/J.ICARUS.2009.11.025>
- Fang, Q., Hong, H., Zhao, L., Kukolich, S., Yin, K., & Wang, C. (2018). Visible and Near-Infrared Reflectance Spectroscopy for Investigating Soil Mineralogy: A Review. *Journal of Spectroscopy*, 2018(1), 3168974. <https://doi.org/10.1155/2018/3168974>
- Frank, H. T. (2008). *Gênese e padrões de distribuição de minerais secundários na formação Serra Geral (Bacia do Paraná)*. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/15881>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2023). *Banco de Dados e Informações Ambientais, DBIA*. <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/geologia>
- Jensen, J. R. (2009). Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres (tradução da 2ª ed.). *Information Systems*, 2, 598. <http://www.parentese.com.br/pdf/jensen.pdf>
- Jiang, G., Chen, X., Zhou, K., Wang, J., Zhou, S., & Bai, Y. (2024). Estimation of lithium content in rock debris based on spectral feature coefficients. *Ore Geology Reviews*, 171, 106167. <https://doi.org/10.1016/J.OREGEOREV.2024.106167>
- Kalacska, M., Pablo Arroyo-Mora, J., Soffer, R., & Elmer, K. (2018). *ASD FieldSpec3 field measurement protocols v1*. <https://doi.org/10.17504/PROTOCOLS.IO.QU7DWN>

- Kokaly, R. F., Clark, R. N., Swayze, G. A., Livo, K. E., Hoefen, T. M., Pearson, N. C., Wise, R. A., Benzal, W., Lowers, H. A., Driscoll, R. L., & Klein, A. J. (2017). USGS Spectral Library Version 7. *Data Series*. <https://doi.org/10.3133/DS1035>
- Laukamp, C., Rodger, A., Legras, M., Lampinen, H., Lau, I. C., Pejic, B., Stromberg, J., Francis, N., & Ramanaidou, E. (2021). Mineral Physicochemistry Underlying Feature-Based Extraction of Mineral Abundance and Composition from Shortwave, Mid and Thermal Infrared Reflectance Spectra. *Minerals*, 11(4), 347. <https://doi.org/10.3390/MIN11040347>
- Madani, A. (2015). Spectroscopy of olivine basalts using Field-Spec and ASTER data: A case study from Wadi Natash volcanic field, south Eastern Desert, Egypt. *Journal of Earth System Science*, 124(7), 1475–1486. <https://doi.org/10.1007/S12040-015-0618-1/METRICS-BADGE>
- Mandon, L., Beck, P., Quantin-Nataf, C., Dehouck, E., Thollot, P., Loizeau, D., & Volat, M. (2022). ROMA: A Database of Rock Reflectance Spectra for Martian In Situ Exploration. *Earth and Space Science*, 9(1), e2021EA001871. <https://doi.org/10.1029/2021EA001871>
- Murphy, R. J. (2015). Evaluating simple proxy measures for estimating depth of the ~ 1900 nm water absorption feature from hyperspectral data acquired under natural illumination. *Remote Sensing of Environment*, 166, 22–33. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2015.05.029>
- Ong, C., Carrère, V., Chabrilat, S., Clark, R., Hoefen, T., Kokaly, R., Marion, R., Souza Filho, C. R., Swayze, G., & Thompson, D. R. (2019). Imaging Spectroscopy for the Detection, Assessment and Monitoring of Natural and Anthropogenic Hazards. *Surveys in Geophysics*, 40(3), 431–470. <https://doi.org/10.1007/S10712-019-09523-1/TABLES/3-BADGE>
- Rader, E., Ackiss, S., Sehlke, A., Bishop, J., Orrill, B., Odegaard, K., Meier, M., & Doloughan, A. (2022). Average VNIR reflectance: A rapid, sample-free method to estimate glass content and crystallinity of fresh basaltic lava. *Icarus*, 383, 115084. <https://doi.org/10.1016/J.ICARUS.2022.115084>
- Rossetti, L., Lima, E. F., Waichel, B. L., Hole, M. J., Simões, M. S., & Scherer, C. M. S. (2018). Lithostratigraphy and volcanology of the Serra Geral Group, Paraná-Etendeka Igneous Province in Southern Brazil: Towards a formal stratigraphical framework. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 355, 98–114. <https://doi.org/10.1016/J.JVOLGEORES.2017.05.008>
- Rost, E., Hecker, C., Schodlok, M. C., & van der Meer, F. D. (2018). Rock Sample Surface Preparation Influences Thermal Infrared Spectra. *Minerals*, 8(11), 475. <https://doi.org/10.3390/MIN8110475>
- Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão do RS. (2021). *Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul/Rio Grande do Sul* (6ª ed.). Departamento de Planejamento Governamental. https://issuu.com/spggrs/docs/atlas_socioeconomico_do_rio_grande_do_sul
- Sousa, J. G. de A. J., Melo, J. A. D., & Marques, A. G. (2008). Comportamento espectral dos solos na paisagem a partir de dados coletados por sensores terrestre e orbital. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 32(2), 727–738. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200027>
- Xie, B., Wu, L., Mao, W., Zhou, S., & Liu, S. (2022). An Open Integrated Rock Spectral Library (RockSL) for a Global Sharing and Matching Service. *Minerals*, 12(2), 118. <https://doi.org/10.3390/MIN12020118>

Contribución de los autores

LFSM: conceptualización, curación de datos, visualización, redacción-original.

MM: visualización, revisión final del artículo, redacción-original.

LAG: supervisión, revisión final del artículo, redacción-revisión y edición.

DC: análisis e interpretación de datos, metodología, redacción-original.

Fuentes de financiamiento

La investigación fue realizada con recursos propios.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Correspondencia:

Deyvis Jefferson Cano Cochachi

E-mail: deyvis.cano@ufrgs.br