

Durval, S.; Manzon, G. U Uso del algoritmo Random Forest para el mapeo del uso y ocupación del suelo relacionados con bienes minerales en la APA das Cabeceiras do Rio Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.

Uso del algoritmo Random Forest para el mapeo del uso y ocupación del suelo relacionados con bienes minerales en la APA das Cabeceiras do Rio Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.

Durval, Segundo¹ **Manzon, Gustavo**¹

¹ Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil

ORCID: Durval [0009-0008-9662-397X](https://orcid.org/0009-0008-9662-397X) Manzon [0000-0002-5124-5898](https://orcid.org/0000-0002-5124-5898)

Correspondencia: floresteiroaventureiro@gmail.com gustavo.nunes@ufmt.br

RESUMEN


Brasil posee una de las mayores redes de áreas protegidas del mundo, abarcando aproximadamente el 18 % de su territorio. Las unidades de conservación se dividen en diferentes categorías (UC de protección integral y UC de uso sostenible), las cuales deben analizarse por separado para verificar su compatibilidad con la actividad minera. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño del algoritmo Random Forest aplicado a datos Sentinel-2, generando una matriz de confusión y utilizando el coeficiente Kappa, con el propósito de medir la concordancia entre clasificaciones categóricas en el mapeo del uso y ocupación del suelo en el Área de Protección Ambiental (APA) Cabeceiras del río Cuiabá. Se obtuvo una precisión global del 91,11 % (164/180) y un coeficiente Kappa de 0,87. Como resultado final, se generó un producto innovador orientado a la toma de decisiones más sostenibles en el uso de los recursos naturales y minerales, de relevancia tanto regional como global.

Palabras clave: *Protección ambiental, algoritmo, Random Forest, Índice Kappa, bienes minerales.*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 18 febrero 2026

Uso del algoritmo Random Forest para el mapeo del uso y ocupación del suelo relacionados con bienes minerales en la APA das Cabeceiras do Rio Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.

Durval, Segundo ⁽¹⁾, Manzon, Gustavo ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil,  0009-0008-9662-397X, floresteiroaventureiro@gmail.com.

⁽²⁾ Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil,  0000-0002-5124-5898, gustavo.nunes@ufmt.br.

Resumen: Brasil posee una de las mayores redes de áreas protegidas del mundo, abarcando aproximadamente el 18 % de su territorio. Las unidades de conservación se dividen en diferentes categorías (UC de protección integral y UC de uso sostenible), las cuales deben analizarse por separado para verificar su compatibilidad con la actividad minera. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño del algoritmo Random Forest aplicado a datos Sentinel-2, generando una matriz de confusión y utilizando el coeficiente Kappa, con el propósito de medir la concordancia entre clasificaciones categóricas en el mapeo del uso y ocupación del suelo en el Área de Protección Ambiental (APA) Cabeceiras del río Cuiabá. Se obtuvo una precisión global del 91,11 % (164/180) y un coeficiente Kappa de 0,87. Como resultado final, se generó un producto innovador orientado a la toma de decisiones más sostenibles en el uso de los recursos naturales y minerales, de relevancia tanto regional como global.

Palabras clave: Protección ambiental, algoritmo, Random Forest, coeficiente Kappa, bienes minerales.

Use of the Random Forest Algorithm for Land Use and Land Cover Mapping Associated with Mineral Resources in the Environmental Protection Area (APA) of the Cuiabá River Headwaters, Mato Grosso, Brazil.

Abstract: Brazil possesses one of the largest networks of protected areas in the world, covering approximately 18% of its territory. Conservation units are divided into different categories (strict protection units and sustainable use units), which must be analyzed separately to assess their compatibility with mining activities. This study aimed to evaluate the performance of the Random Forest algorithm applied to Sentinel-2 data, generating a confusion matrix and using the Kappa coefficient to measure agreement among categorical classifications in land use and land cover mapping within the Cuiabá River Headwaters Environmental Protection Area (EPA). An overall accuracy of 91.11% (164/180) and a Kappa coefficient of 0.87 were obtained. As a final product, was created a innovative product aimed at supporting more sustainable decision-making in the use of natural and mineral resources, which are of both regional and global importance.

Keywords: Environmental protection, algorithm, Random Forest, Kappa index, mineral resources.

1. INTRODUCCIÓN

El Cerrado es el segundo bioma más grande de Brasil; es considerado un hotspot para la conservación de la biodiversidad y constituye un importante proveedor de servicios ecosistémicos que generan beneficios para las poblaciones humanas que dependen directa e indirectamente de este bioma como fuente de alimentos, agua, materiales y polinizadores (Alencar *et al.*, 2020).

Debido a la fuerte presión antrópica sobre el bioma, el mapeo y el monitoreo de los cambios en el uso del suelo son fundamentales para el diseño de estrategias y políticas de protección del bioma y su biodiversidad, así como para el ordenamiento territorial y el desarrollo económico (Luca *et al.*, 2025).

Brasil posee una de las mayores redes de áreas protegidas del mundo, abarcando aproximadamente el 18 % de su territorio nacional (Barros-Rosa *et al.*, 2025). Sin embargo, solo una pequeña fracción de estas áreas está estrictamente protegida, clasificada en las categorías I a III de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN), correspondiendo a cerca del 6 % de todas las unidades de conservación (Rodrigues *et al.*, 2024). Las unidades de conservación se dividen en diferentes categorías (UC de protección integral y UC de uso sostenible), las cuales deben analizarse por separado para verificar su compatibilidad con la actividad minera. En este contexto, las Áreas de Protección Ambiental (APA), clasificadas como unidades de uso sostenible, representan la mayoría y están frecuentemente más expuestas a presiones antrópicas,

tales como la deforestación, la expansión agrícola, la minería y los incendios.

El uso de algoritmos de clasificación de imágenes para el mapeo del uso y cobertura del suelo ha sido una herramienta ampliamente utilizada por el gobierno brasileño y ha contribuido a que las instituciones responsables de la fiscalización y el licenciamiento de proyectos identifiquen áreas de relevancia ambiental, como las unidades de conservación (UC) y las Áreas de Protección Ambiental (APA) (Cho, 2021).

El Área de Protección Ambiental (APA) Cabeceiras del río Cuiabá, creada por la Ley Estatal n.º 7.161/1999, es una Unidad de Conservación de Uso Sostenible del grupo de protección ambiental, que abarca aproximadamente y tiene como objetivo proteger los nacimientos de ríos, fauna y flora de la región, compatibilizando el uso sostenible de los recursos naturales con la conservación de la biodiversidad (MMA, 2024).

La actividad minera constituye un importante vector económico en Brasil; sin embargo, presenta un alto grado de impacto ambiental que debe ser mitigado por quienes la ejercen, en conformidad con el sistema jurídico de protección ambiental brasileño, buscando la preservación y conservación ambiental mediante un uso antrópico sostenible (Silva, 2021). Brasil extrae cerca de 80 recursos minerales que sirven como insumos para diversas cadenas productivas. Aunque la percepción general es que los productos minerales están presentes en la vida cotidiana en bienes más evidentes, como vehículos automotores, construcción civil, mobiliario, teléfonos móviles y computadoras, existen muchas otras cadenas productivas que requieren sustancias minerales, destacándose la agricultura (fertilizantes, correctivos y remineralizadores de suelos), la industria alimentaria (insumos para el procesamiento de alimentos), la industria electroelectrónica (generación y transmisión de datos) y la producción y transmisión de energía, entre otras. Desde el agua mineral hasta los minerales radiactivos, existe una amplia diversidad de recursos minerales de los cuales la sociedad no puede prescindir (MME, 2020).

En este contexto, el presente estudio propone una clasificación utilizando el algoritmo Random Forest para identificar no solo tipos y estructuras de vegetación en relación con los recursos minerales, sino también otras formas de recursos naturales, como los nacimientos de ríos y los recursos hídricos, así como formas de uso antrópico, como las áreas agrícolas.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el desempeño del algoritmo Random Forest aplicado a datos Sentinel-2, generando una matriz de confusión y utilizando el coeficiente Kappa (Landis y Koch, 1977), con el fin de analizar la concordancia entre clasificaciones categóricas en el mapeo del uso y ocupación del suelo en el APA Cabeceiras del río Cuiabá, como: suelo expuesto, agua, suelo agrícola en barbecho, agricultura, vegetación sabánica abierta y vegetación sabánica con cobertura forestal densa con la presencia de recursos minerales y recursos hídricos disponibles en el área de estudio.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Materiales

El área de estudio se localiza en el Área de Protección Ambiental (APA) Cabeceiras del río Cuiabá, en la región centro-sur del estado de Mato Grosso, Brasil, dentro del bioma Cerrado. Esta área protegida abarca aproximadamente 462.320 hectáreas, distribuidas en seis municipios.

Las imágenes satelitales utilizadas se organizaron de la siguiente manera: (i) los datos empleados para la clasificación del uso y ocupación del suelo provinieron de imágenes Sentinel-2, obtenidas a través del programa de observación y monitorización de la Tierra, Copernicus, correspondientes al mes de mayo de 2025; (ii) los datos utilizados para el análisis comparativo del coeficiente Kappa, recolectados como regiones de interés (ROI) para validación, fueron obtenidos a partir de imágenes de los satélites Landsat y Sentinel disponibles en Google Earth; (iii) los datos sobre recursos minerales fueron obtenidos a través de la Agencia Nacional de Minería (ANM) (geo.anm.gov.br), que utiliza imágenes Sentinel-2 y Landsat 8 y 9.

2.1.1. Métodos

Este estudio se basó en la composición de cuatro imágenes adquiridas por el satélite Sentinel-2 (S2_L2A_CDAS), correspondientes a datos multiespectrales obtenidos por el sensor MultiSpectral Instrument (MSI), el cual dispone de 13 bandas espectrales en las regiones del visible (VIS), infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR). La recolección y el procesamiento de las clases se realizaron utilizando el software de procesamiento digital de imágenes ENVI.

Para la clasificación del uso y ocupación del suelo, se seleccionaron regiones de interés (ROI) dentro de la Unidad de Conservación de Uso Sostenible correspondiente al Área de Protección Ambiental (APA) Cabeceiras del río Cuiabá, empleando el software ENVI. Se definieron seis clases de uso del suelo presentes en el área de estudio: suelo expuesto, agua, suelo agrícola en barbecho, agricultura, vegetación sabánica abierta y vegetación sabánica con cobertura forestal densa, como se muestra en la Figura 1.

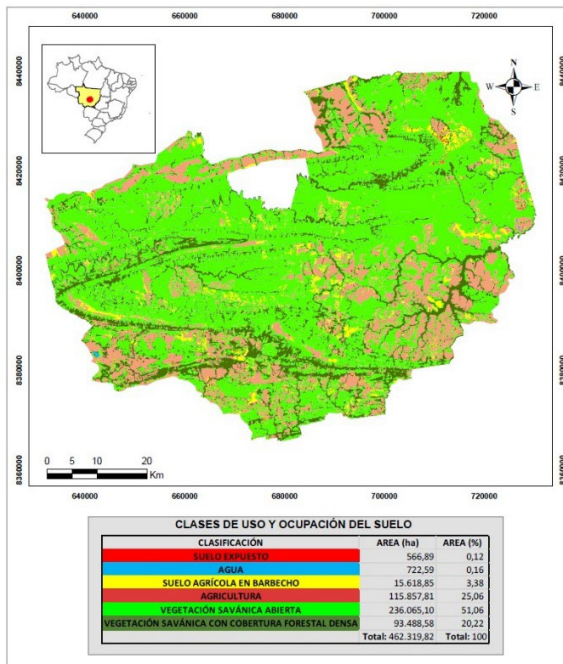


Figura 1. Clasificación del uso y ocupación del suelo del APA das Cabeceiras do Rio Cuiabá mediante el algoritmo Random Forest.

Para la validación de la selección de las ROI (Regiones de Interés), mediante el coeficiente Kappa, se muestrearon 30 puntos para cada clase de uso y ocupación del suelo, totalizando 180 puntos muestrales. En cuanto a los datos de recursos minerales, se verificaron pela la base de datos proporcionada por la Agencia Nacional de Minería (ANM), tales como basalto, diamante, fosfato, mineral de manganeso, mineral de oro, mineral de zinc, mármol y tierras raras (Figura 2).

Para la generación de la matriz de confusión y el cálculo del coeficiente Kappa, también se utilizó un software de procesamiento digital de imágenes (PDI), específicamente el ENVI..

3. RESULTADOS

La relevancia de comparar las clases de uso y ocupación del suelo con los recursos minerales identificados en el Área de Protección Ambiental (APA) Cabeceiras del río Cuiabá, Mato Grosso, Brasil, radica en demostrar la importancia de estos recursos para el comercio mundial. Entre ellos se destacan: la seguridad alimentaria global (fosfato); la siderurgia global (minerales de manganeso); la influencia en los mercados financieros internacionales y en la industria electrónica (oro); las industrias automotriz, de la construcción y farmacéutica (zinc); y los componentes estratégicos de alta relevancia geopolítica, fundamentales para la transición energética y digital como motores eléctricos y sistemas electrónicos avanzados (tierras raras), como se muestra en la Figura 2.

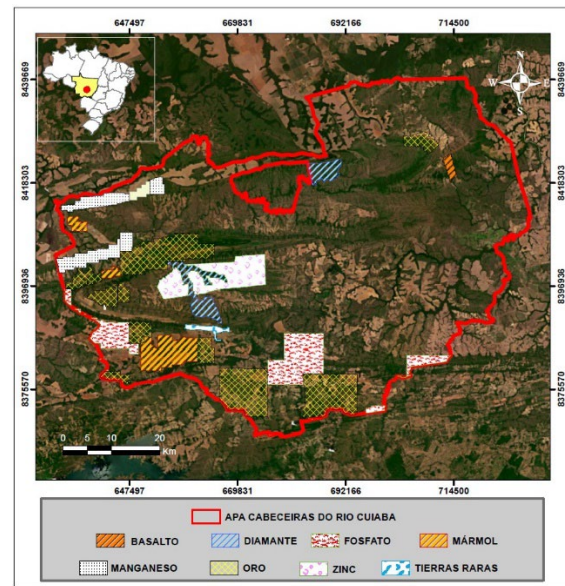


Figura 2. Bienes minerales existentes en la APA Cabeceiras do Rio Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.

Otro recurso natural identificado en el área de estudio, y que posee gran relevancia, son los recursos hídricos. Estudios recientes desarrollados por el Ministerio Público del Estado de Mato Grosso (Brasil) identificaron cerca de 2.157 posibles nacimientos de ríos que, además de la necesidad de preservación de los manantiales, también presentan preocupaciones relacionadas con la protección de especies de fauna silvestre (principalmente especies amenazadas de extinción), así como con la conservación de remanentes de ecosistemas de Cerrado y Amazonía, paisajes y elementos escénicos.

El uso del algoritmo Random Forest, asociado a la matriz de confusión y evaluado mediante el coeficiente Kappa (Landis y Koch, 1977), resultó satisfactorio para validar la metodología empleada, obteniéndose los siguientes valores: una precisión global del 91,11 % (164/180) y un coeficiente Kappa de 0,87, de acuerdo con la tabla 1.

Tabla 1. Coeficiente Kappa de las clasificaciones de uso y ocupación del suelo.

Coeficiente Kappa de las clasificaciones	Escala del Coeficiente Kappa (adaptado de Landis e Koch, 1977)	
	Coeficiente Kappa	Calidad del Mapa Temático
Random Forest		
Precisión general = 91,11% (164/180)		
Coeficiente Kappa = 0,87	0,80-1,00	Excelente

Como producto final, se generó una integración entre la clasificación obtenida mediante el algoritmo Random Forest, validada por el coeficiente Kappa, los recursos minerales y los recursos hídricos, constituyendo un producto inédito (Figura 3) que, en un futuro próximo, contribuirá tanto a la ciencia como al sector productivo en la toma de decisiones más sostenibles respecto al uso

de los recursos naturales y minerales, los cuales son de importancia tanto a nivel regional como global, como se muestra en la Figura.

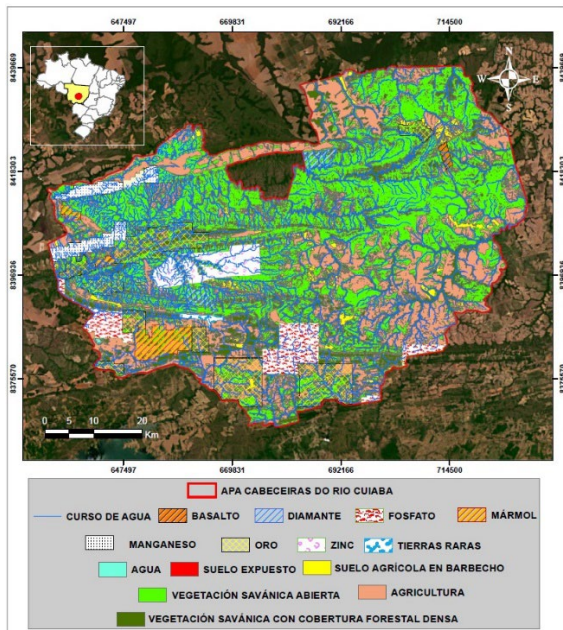


Figura 3. Clasificación Random Forest, bienes minerales y recursos hídricos existentes en la APA Cabeceiras do Rio Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.

4. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT); al Programa de Posgrado en Ciencias Forestales y Ambientales (PPGCFA) de la Facultad de Ingeniería Forestal (FENF), de la Universidad Federal de Mato Grosso (UFMT); y al Laboratorio de Sensoriamento Remoto y Geotecnologías (LabSensor) de la Facultad de Ingeniería Forestal (FENF-UFMT).

5. REFERENCIAS

Alencar, A., Shimbo, J.Z., Lenti, F., Marques, C.B., Zimbres, B., Rosa, M., Arruda, V., Castro, I., Ribeiro, J.P.F.M., Varela, V., Alencar, I., Piontekowski, V., Ribeiro, V., Bustamante, M.M.C., Sano, E.E. & Barroso, M. (2020). 'Mapping three decades of changes in the Brazilian savanna native vegetation using Landsat data processed in the Google Earth Engine platform', *Remote Sensing*, vol. 12, no. (6), 924. <https://doi.org/10.3390/rs12060924>.

Barros-Rosa, L., Moura Peluso, L., Lemes, P., Johnson, Mark, S., Dalmagro Higo, J., Nunes da Cunha, C., Henrique Zanella de Arruda, P., Mateus Penha Lucia, J. (2025). The ineffectiveness of current environmental and fire policies in the world's largest wetland. *Environmental Research Letters*, v. 20, n. (3), p. 034039. DOI: 10.1088/1748-9326/adb7f5.

Cho, D. F.; Schwaida, S. F.; Cicerelli, R. E.; Almeida, T.; Ramos, A. P. M.; Sano, E. E. (2021). Desempenho do Algoritmo de Classificação de Imagens Random Forest para Mapeamento do Uso e Cobertura do Solo no Cerrado Brasileiro. *Anuário do Instituto de*

Geociências, v. 44, doi: 10.11137/1982-3908_2021_44_37979.

Gian Luca, S., Moris Jose, V., Segura-Garcia, C., Ana Carolina, P., Jones Matthew, W., Machado Manoela, S., Motta Renzo Auxiliadora Costa, Alencar., Ane; Ascoli, D.; Oliveras Menor, I. (2025). Devegetation is a widespread driver of fire in the Brazilian Cerrado. *Journal of Environmental Management*, v. 385, p. 125637. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.125637.

Landis Richard, J., KOCH, Gary G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, v. 33, n. (1), p. 159–174.

Marcos Silva, B. (2021). *Mineração e meio ambiente: desafios legais e sustentabilidade*. 2. ed. São Paulo: Editora Ambiental.

Ministério de Minas e Energia. (2020). *Mineração no Brasil*. Brasília, DF: MME-Brasil. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br>. Acesso em: 10 fev. 2026.

Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA). (2024). *Área de Protecção Ambiental Cabeceiras do Rio Cuiabá*. Brasília, DF: MMA-Brasil. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br>. Acesso em: 12 fev. 2026.

Rodrigues, D.M.; Coradi, P.C.; Timm, N.d.S.; Fornari, M.; Grellmann, P.; Amado, T.J.C.; Teodoro, P.E.; Teodoro, L.P.R.; Baio, F.H.R.; Chiomento, J.L.T. (2024) Correction: Applying Remote Sensing, Sensors, and Computational Techniques to Sustainable Agriculture: From Grain Production to Post-Harvest. *Agriculture*, 14, (161). *Agriculture* 2025,15,1490.<https://doi.org/10.3390/agriculture15141490>.