ReGeo ISSN: 2177-3246

O FUTURO DA MINERAÇÃO DE CARVÃO EM MOATIZE (MOÇAMBIQUE) FACE ÀS POLÍTICAS CLIMÁTICAS: UMA PROJEÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL PARA 2050

THE FUTURE OF COAL MINING IN MOATIZE (MOZAMBIQUE) IN THE FACE OF CLIMATIC POLICIES: A SPATIO-TEMPORAL PROJECTION FOR 2050

EL FUTURO DE LA MINERÍA DEL CARBÓN EN MOATIZE (MOZAMBIQUE) FRENTE A LAS POLÍTICAS CLIMÁTICAS: UNA PROYECCIÓN ESPACIO-TEMPORAL PARA 2050

https://doi.org/10.56238/revgeov17n7-051

Data de submissão: 25/05/2026 **Data de publicação:** 09/07/2026

Ivan Latinho Naite
Doutorando em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: ivannaite@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0009-0004-8143-2514

Gilney Figueira Zebende
Doutor em Física
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: gfzebende@uefs.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-2420-9805

RESUMO

A expansão da mineração de carvão tem promovido profundas transformações territoriais na Bacia Carbonífera de Moatize (BCM), Moçambique, configurando importantes desafios ambientais e socioeconômicos em contexto global marcado pela transição energética e pelas políticas climáticas. Neste sentido, o presente estudo teve como objetivo analisar e simular as mudanças no uso e cobertura da terra (UCT) entre 2015 e 2050, com ênfase na expansão das áreas de mineração de carvão, utilizando o modelo Patch-generating Land Use Simulation (PLUS). Os mapas de UCT para os anos de 2015 e 2025 foram produzidos a partir de imagens Landsat processadas na plataforma Google Earth Engine (GEE), empregando o algoritmo Random Forest. O modelo PLUS foi calibrado e validado para o período 2015–2025 utilizando fatores ambientais, socioeconômicos, de acessibilidade e índices espectrais derivados de sensoriamento remoto. Os resultados demostram elevado desempenho do modelo, com acurácia global de 0,819, coeficiente Kappa de 0,636 e Figure of Merit (FoM) de 0,314. Entre 2015 e 2025, as áreas de mineração expandiram aproximadamente 140,21%, enquanto as áreas vegetadas apresentaram redução de 10,23%. As projeções para 2050 indicam continuidade da expansão minerária, podendo as áreas de mineração atingir cerca de 16,7% da área total, acompanhadas pela redução da cobertura vegetal para aproximadamente 56,6%. Os resultados evidenciam um processo contínuo de antropização da paisagem impulsionado pela mineração de carvão, reforçando as contradições entre a expansão de combustíveis fósseis e os esforços globais de transição energética. O estudo demonstra o potencial do modelo PLUS como ferramenta de apoio ao planejamento territorial e à gestão ambiental em regiões de economia extrativa.

Palavras-chave: Mineração de Carvão. Geotecnologias. Moatize. *Random Forest*. Modelo PLUS.

ABSTRACT

Coal mining expansion has promoted profound territorial transformations in the Moatize Coal Basin, Mozambique (MCB), generating significant environmental and socioeconomic challenges with the

context of global energy transition and climatic policies. In this regard, the present study aimed to analyze and simulate land use and land cover (LULC) changes between 2015 and 2050, with emphasis on the expansion of coal mining areas, using the Patch-generating Land Use Simulation (PLUS) model. LULC maps for 2015 and 2025 were produced from Landsat imagery processed on the Google Earth Engine (GEE) platform using the Random Forest algorithm. The PLUS model was calibrated and validated for the 2015–2025 period using environmental, socioeconomic, accessibility driving factors, and spectral indices derived from remote sensing data. The results demonstrated high model performance, achieving an overall accuracy of 0.819, a Kappa coefficient of 0.636, and a Figure of Merit (FoM) of 0.314. Between 2015 and 2025, mining areas expanded by approximately 140.21%, while vegetated areas decreased by 10.23%. Projections for 2050 indicate the continued expansion of mining activities, with mining areas potentially reaching approximately 16.7% of the total area, accompanied by a reduction of vegetated cover to nearly 56.6%. The findings reveal a continuous process of landscape anthropic patterns driven by coal mining, highlighting the contradictions between fossil fuel expansion and global efforts towards energy transition. The study demonstrates the potential of the PLUS model as a supporting tool for territorial planning and environmental management in extractive economy regions.

Keywords: Coal Mining. Geotechnologies. Moatize. *Random Forest*. PLUS Model.

RESUMEN

La expansión de la minería de carbón ha promovido profundas transformaciones territoriales en la Cuenca Carbonífera de Moatize, Mozambique, generando importantes desafíos ambientales y socioeconómicos em el contexto de la transición energética global y de las políticas climáticas. En este sentido, el presente estudio tuvo como objetivo analizar y simular los cambios em el uso y cobertura de la tierra (UCT) entre 2015 y 2050, com énfasis em la Expansión de las áreas de minería de carbón, utilizando el modelo Patch-generating Land Use Simulation (PLUS). Los mapas de UCT para los años 2015 y 2025 fueron elaborados a partir de imágenes Landsat procesadas em la plataforma Google Earth Engine (GEE) mediante el algoritmo Random Forest. El modelo PLUS fue calibrado y validado para el período 2015–2025 utilizando factores ambientales, socioeconómicos, de accesibilidad, e índices espectrales derivados de sensores remotos. Los resultados demostraron un alto desempeño del modelo, alcanzando una exactitud global de 0,819, un coeficiente Kappa de 0,636 y un Figure of Merit (FoM) de 0,314. Entre 2015 y 2025, las áreas mineras se expandieron aproximadamente un 140,21%, mientras que las áreas vegetadas disminuyeron un 10,23%. Las proyecciones para 2050 indican la continuidad de la Expansión minera, pudiendo las áreas de minería alcanzar cerca del 16,7% del área total, acompañadas por una reducción de la cobertura vegetal hasta aproximadamente el 56,6%. Los resultados evidencian un proceso continuo de antropización del paisaje impulsado por la minería de carbón, reforzando las contradicciones entre la Expansión de los combustibles fósiles y los esfuerzos globales de transición energética. El estudio demuestra el potencial del modelo PLUS como herramienta de Apoyo para la planificación territorial y la Gestión ambiental em regiones de economía extractiva.

Palabras clave: Minería del Carbón. Geotecnologías. Moatize. *Random Forest*. Modelo PLUS.

1 INTRODUÇÃO

A transição energética global tem impulsionado o crescimento das fontes renováveis nas últimas décadas, sobretudo em resposta às políticas climáticas voltadas à redução das emissões de gases de efeito estufa. Dados recentes da Demanda Global de Energia (DGE) indicam um crescimento significativo da participação da chamada "energia limpa" na matriz energética mundial desde 2010, especialmente entre 2022 e 2024. Contudo, apesar do avanço das energias renováveis, os combustíveis fósseis continuam desempenhando papel fundamental no abastecimento energético global. Em 2024, a DGE aumentou mais de 2%, acima da média histórica observada entre 2010 e 2023, impulsionada, entre outros fatores, pela crescente demanda por refrigeração decorrente das ondas de calor registadas em diferentes regiões do planeta (BP, 2025; IEA, 2025b).

Nesse contexto, o carvão mineral permanece como uma das principais fontes energéticas globais, sobretudo em países industrializados e economias emergentes. A demanda mundial por carvão atingiu aproximadamente 8,8 bilhões de toneladas em 2024, estabelecendo um novo recorde histórico, ainda que o ritmo de crescimento tenha desacelerado em relação aos anos anteriores. Após a crise provocada pela Covid-19 em 2020, a recuperação econômica global e os elevados preços do gás natural contribuíram para o aumento do consumo de carvão em diversas regiões do mundo. Embora a expansão anual da demanda tenha diminuído progressivamente desde 2021, o crescimento acumulado do consumo global de carvão desde 2020 ultrapassa 16% (IEA, 2025a). Dessa forma, apesar das crescentes pressões ambientais e climáticas, o carvão continua sendo estratégico para a segurança energética de vários países, evidenciando as contradições existentes entre a transição energética e a permanência dos combustíveis fósseis na matriz energética global.

Nas últimas décadas, Moçambique consolidou-se como um dos principais polos da economia extrativa na África Austral, impulsionado sobretudo pela exploração de carvão mineral na região de Moatize, província de Tete. A exploração carbonífera intensificou-se após a assinatura, em 2007, de contratos de concessão que permitiram a exploração em larga escala de reservas estimadas em cerca de 2,5 bilhões de toneladas, com horizonte operacional projetado até 2050 (Mosca; Selemane, 2011). A mineração comercial iniciou-se oficialmente em 2011, envolvendo empresas multinacionais como a Vale Moçambique (atualmente Vulcan), JINDAL África, Rio Tinto (atual *International Coal Ventures Limited* – ICVL) e Minas Moatize Ltd. Desde então, a região passou por profundas transformações territoriais, caracterizadas pela rápida urbanização, expansão de infraestruturas, crescimento populacional e intensificação das atividades econômicas associadas ao setor mineiro.

Entretanto, a expansão acelerada da mineração de carvão em Moatize também tem provocado notáveis impactos socioambientais, incluindo degradação da cobertura vegetal, alterações nos padrões

de uso e cobertura da terra (UCT), fragmentação da paisagem e aumento das pressões sobre os sistemas socioecológicos locais (Tsuji; Otsuki, 2023). Tais transformações reforçam a necessidade de estratégias de planejamento territorial e gestão sustentável da terra capazes de equilibrar crescimento econômico, exploração mineral e conservação ambiental (Awotwi *et al.*, 2018; Tiamgne; Kalaba; Nyirenda, 2021).

Nesse sentido, os modelos de mudanças no uso e cobertura da terra (*Land Use and Land Cover Change* – LULCC) têm se destacado como ferramentas importantes para compreender e prever dinâmicas espaciais futuras em regiões submetidas à rápida industrialização e expansão urbana. Entre os modelos mais utilizados destacam-se os Autômatos Celulares (AC), capazes de integrar fatores biofísicos, socioeconômicos e espaciais na simulação da dinâmica territorial. Dentre esses modelos, o *Patch-generating Land Use Simulation* (PLUS) (Liang *et al.*, 2021) tem se destacado por sua capacidade de simular padrões espaciais complexos por meio da integração entre regras de expansão territorial, fatores dinamizadores (*driving factors*) e mecanismos de geração de "manchas" (*patches*). Outros modelos amplamente utilizados incluem o *CLUMondo* (Zhao *et al.*, 2022) e o *Future Land Use Simulation* (FLUS) (Liu *et al.*, 2017).

Apesar da crescente aplicação de modelos de simulação espacial em estudos de mudanças no uso da terra, ainda são limitadas as pesquisas voltadas à expansão futura da mineração de carvão em contextos africanos, particularmente em Moçambique, utilizando o modelo PLUS associado a fatores ambientais e socioeconômicos. No caso especifico da Bacia Carbonífera de Moatize (BCM), os estudos existentes têm se concentrado predominantemente na caracterização geológica (Hatton; Fardell, 2012; Vasconcelos; Chafy; Xerinda, 2014), na qualidade do carvão e evolução térmica (Fernandes *et al.*, 2015; Galasso *et al.*, 2019), na contaminação ambiental (Marove *et al.*, 2020) e nas dimensões sociopolíticas do desenvolvimento extrativo (Kirshner; Broto; Baptista, 2019; Tsuji; Otsuki, 2023). As investigações baseadas em sensoriamento remoto voltadas à modelagem e projeção espaço-temporal do uso da terra permanecem escassas. Estudos existentes, como Sedano *et al.* (2016) e Naite *et al.* (2026), exploraram as mudanças na cobertura da terra e os processos de degradação usando imagens de satélite; no entanto, nenhum estudo integrou sistematicamente dados multitemporais de satélite, fatores ambientais e socioeconômicos, e o modelo PLUS para simular a dinâmica futura de UCT impulsionada pela mineração de carvão na BCM, especialmente diante das atuais políticas climáticas globais e dos cenários de transição energética.

Diante deste contexto, o presente estudo tem como objetivo principal analisar e simular as futuras mudanças no uso e cobertura da terra no distrito de Moatize, Moçambique, com ênfase na expansão das áreas de mineração de carvão até o ano de 2050, utilizando o modelo PLUS. Espera-se que os resultados contribuam para a compreensão das dinâmicas espaço-temporais associadas à

mineração e forneçam subsídios para o planejamento territorial e ambiental em regiões de economia extrativa.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo foi realizado sob o distrito de Moatize, localizado na província de Tete, região centro de Moçambique, na África Austral, aproximadamente 20 km a nordeste da cidade de Tete, entre as latitudes 15º37'–16º38' e as longitudes 33º22'–34º28'. O distrito possui uma área aproximada de 8.462 km2, dos quais cerca de 86,9% correspondem a concessões mineiras, sendo aproximadamente 70,8% atualmente ativas (MITADER, 2015).

A área especifica analisada neste estudo corresponde à Bacia Carbonífera de Moatize (BCM), uma região estratégica para a exploração de carvão mineral em Moçambique e que também possui o estatuto de Zona Franca Industrial (ZFI). Para fins de modelagem e análise espacial, foi delimitada uma área de aproximadamente 702 km2, compreendida entre as coordenadas 33º59'–33º86'E e 16º25'–16º06'S (Figura 1).

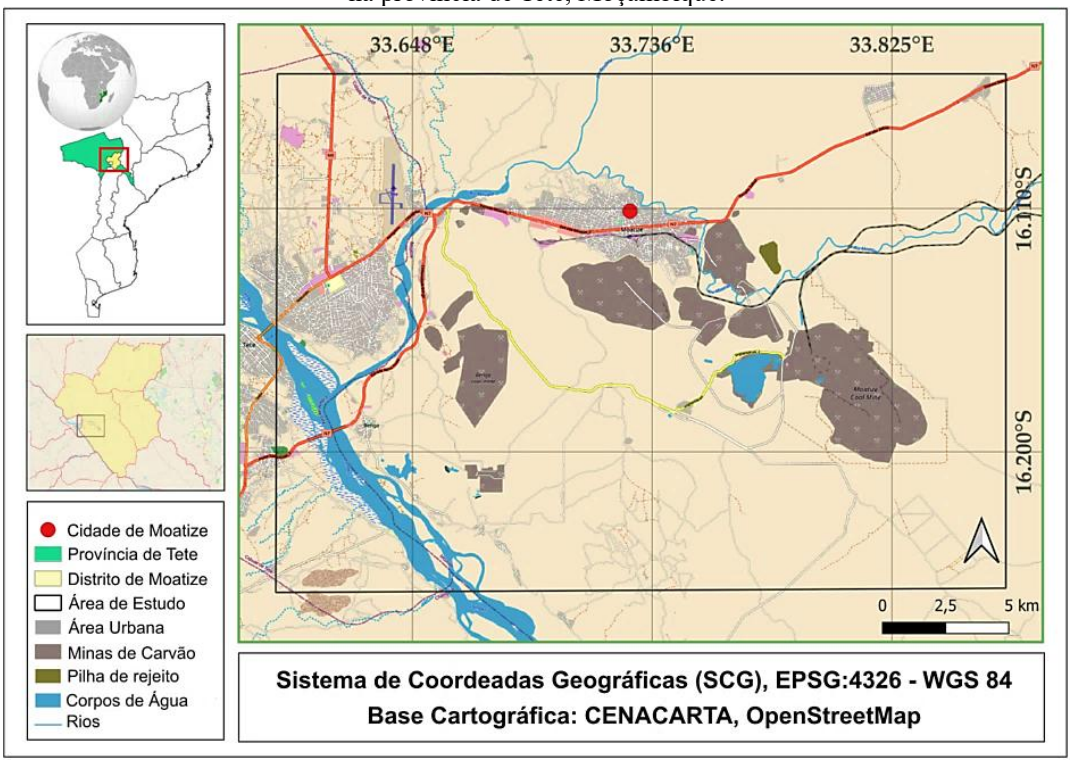
Do ponto de vista físico-geográfico, a região apresenta características climáticas distintas, enquadrando-se em dois regimes segundo a classificação climática de Köppen. A porção sul é predominantemente marcada por condições semiáridas do tipo estepe seca, enquanto a região norte apresenta clima tropical chuvoso. A temperatura média anual é de aproximadamente 26,5 °C, com máximas variando entre 32,5 °C e 40 °C durante o mês de outubro, e mínimas próximas de 20,5 °C em julho. A precipitação média anual varia entre 250 mm e 500 mm, concentrando-se principalmente entre os meses de novembro e abril, período responsável por cerca de 99% do total anual precipitado, sendo janeiro o mês mais chuvoso. A estação seca estende-se de maio a outubro, com precipitações mensais geralmente inferiores a 6 mm.

A cobertura vegetal da região é predominantemente composta por formações de Savana, caracterizadas por vegetação arbustiva e rasteira, intercalada por árvores de médio porte, incluindo espécies típicas como o baobá. Em grande parte da bacia, a vegetação apresenta distribuição esparsa, especialmente nas áreas mais impactadas pelas atividades antrópicas.

Sob ponto de vista hidrográfico, a região integra a bacia do Zambeze, um dos maiores sistemas fluviais do continente africano. No interior da BCM destacam-se os rios *Revúboè* e Moatize, que atravessam a bacia carbonífera, desempenhando importante papel na drenagem regional e na exposição natural de algumas camadas de carvão mineral.

De acordo com os dados do censo populacional mais recente do Instituto Nacional de Estatística (INE), o distrito de Moatize possui uma população superior a 331 mil habitantes (INE, 2019). Observa-se significativa concentração populacional nas áreas urbanizadas próximas ao corredor mineiro, onde a densidade demográfica atinge aproximadamente 38,3 habitantes por quilômetro quadrado, refletindo o intenso processo de urbanização associado à expansão das atividades de mineração de carvão.

Figura 1. Localização geográfica da área de estudo, correspondente a Bacia Carbonífera de Moatize (BCM), localizado na província de Tete, Moçambique.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

2.2 O MODELO PLUS

O modelo *Patch-generating Land Use Simulation* (PLUS), é amplamente usado para simular e projetar mudanças futuras no uso e cobertura da terra (UCT) (Liang *et al.*, 2021). O modelo integra mecanismos de aprendizado de máquina e autômatos celulares, permitindo representar tanto os padrões espaciais de expansão territorial quanto os fatores dinamizadores associados às mudanças no uso da terra.

O PLUS é composto por dois módulos principais: (1) o *Land Expansion Analysis Strategy* (LEAS) e o (2) *Cellular Automata based on Random Seeds* (CARS). O módulo LEAS é responsável por analisar as mudanças históricas no uso da terra, relacionando as transições observadas entre os anos passados, neste caso específico de 2015 e 2025, aos diferentes fatores dinamizadores (*driving factors*). Para isso, o modelo emprega o algoritmo *Random Forest Classification* (RFC), que identifica

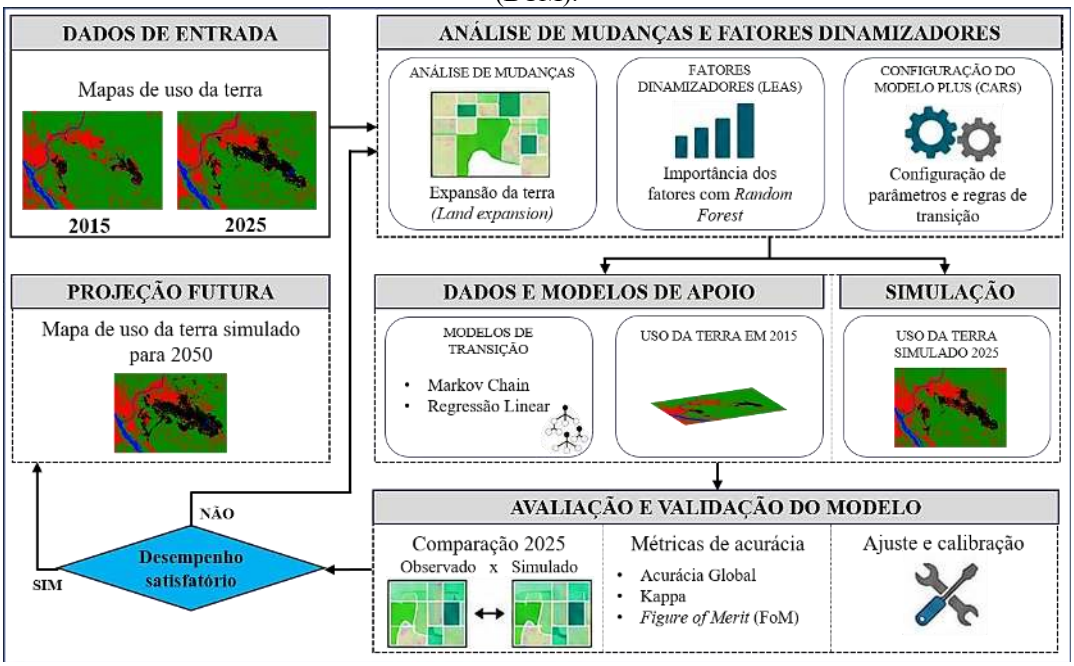
a contribuição relativa de cada variável explicativa e gera superfícies de probabilidades de expansão (*development potential*) para cada classe de UCT.

As superfícies probabilísticas geradas pelo LEAS são posteriormente utilizadas pelo módulo CARS*,* responsável pela simulação espacial da dinâmica futura do uso da terra. Esse módulo opera com base em princípios de autômatos celulares e mecanismos de crescimento em nível de *patch,* possibilitando reproduzir padrões espaciais mais realistas de expansão territorial. O processo de alocação espacial incorpora a demanda futura da terra, os efeitos da vizinhança, a geração aleatória de sementes (*random seeds*) e uma matriz de conversão, responsável por restringir ou permitir determinadas transições entre classes de uso da terra conforme condições biofísicas e regras de ocupação estabelecidas.

Neste estudo, os cenários simulados combinaram superfícies de probabilidade, restrições espaciais e trajetórias de demanda especificas para representar a dinâmica futura da paisagem na região de Moatize. O modelo considerou simultaneamente fatores ambientais, socioeconômicos e espaciais em diferentes escalas, permitindo simular tanto a magnitude quanto a distribuição espacial das mudanças futuras no uso da terra. A calibração inicial do modelo foi realizada para o período de 2015 a 2025, com o objetivo de validar o desempenho da simulação a partir da comparação entre o mapa simulado e o uso da terra observado em 2025. A escolha desse intervalo temporal deve-se à necessidade de capturar as transformações espaciais mais significativas decorrentes da intensificação da atividade mineradora na região, iniciada em larga escala a partir de 2011.

Após a etapa de calibração e validação, o modelo foi implementado para projetar os cenários futuros de UCT até o ano de 2050, horizonte temporal associado às projeções de exploração das reservas carboníferas na Bacia Carbonífera de Moatize (BCM). A Figura 2 apresenta o fluxograma metodológico adotado para a modelagem de simulação futura na área de estudo.

Figura 2. Fluxograma metodológico adotado para a modelagem de simulação futura de uso da terra na área de estudo (BCM).



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

2.3 DADOS E PROCESSAMENTOS

2.3.1 Mapas de uso e cobertura da terra

Os mapas de uso e cobertura da terra (UCT) referentes aos anos 2015 e 2025 foram elaborados a partir de imagens de refletância de superfície da Coleção 2 do programa *Landsat,* previamente calibradas radiometricamente e corrigidas atmosfericamente. Foram utilizados os sensores *Landsat 8 – Operational Land Imagery* (OLI) e *Landsat 9 – Operational Land Imagery 2* (OLI-2). As especificações relativas às bandas espectrais, regiões do espectro eletromagnético e intervalos de comprimento de onda encontram-se disponíveis no *Earth Engine Data Catalog* (https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat, acessado em 20 de março de 2026). Todo o processamento dos dados foi realizado na plataforma *Google Earth Engine* (GEE) (Gorelick *et al.*, 2017; Kumar; Mutanga, 2018)

Inicialmente, foram selecionadas imagens com cobertura de nuvens inferior a 10%, aplicando-se o método *Temporal Dark Outlier Masks* (TDOM) em conjunto com as bandas *Quality Assessment* (QA) disponíveis nas coleções *Landsat.* Posteriormente, foram geradas composições anuais de mediana, com o objetivo de minimizar inferências atmosféricas residuais, ruídos espectrais, variações especificas entre sensores e efeitos sazonais, assegurando maior consistência temporal dos mosaicos produzidos. A classificação do UCT foi realizada por meio do algoritmo de aprendizado de máquina *Random Forest* (RF), amplamente utilizado em estudos ambientais devido à sua elevada capacidade preditiva, robustez estatística e resistência ao sobreajuste (*overfitting*). Fundamentado na abordagem

essemble, o RF combina múltiplas árvores de decisão por meio da técnica *bootstrap agregating (bagging),* permitindo reduzir a variância e aumentar a estabilidade das previsões (Cardille; Crowley; Clintos, 2024).

O algoritmo foi parametrizado com os seguintes valores: *numberOfTrees*=100; *VariablePerSplit*=4 e *bagFraction*=0,7. Para o processo de classificação foram utilizadas 18 variáveis, incluindo seis bandas espectrais e 12 índices espectrais, selecionados em função da sua sensibilidade à vegetação, superfícies expostas, áreas construídas, corpos hídricos e superfícies associadas à mineração de carvão (Tabela 1).

Com o objetivo de garantir a representatividade e a qualidade das amostras de treinamento e validação, foi realizada uma jornada de campo para coleta de pontos de referência para o ano de 2025. As coordenadas foram obtidas utilizando um dispositivo *Garmin GPS* com precisão aproximada de 4 metros. As amostras foram redistribuídas proporcionalmente entre as classes de UCT, totalizando 2.292 pontos, com mais de 200 amostras por classe (Tabela 2). Para o treinamento e validação do modelo foi adotada uma proporção de 70% e 30%, respectivamente.

Tabela 1. Variáveis usadas na classificação das imagens de 2015 e 2025.

Nome da variável	Acrônimo	Fórmula	Citação
Albedo	Albedo	$(Blue + Red + NIR + SWIR1 + SWIR2)/5$	(Liang; Strahler; Walthall, 1999)
Automated Water Extraction Index	AWEI	$4 \times (Green - SWIR2) - (0.25 \times NIR + 2.75 \times SWIR1)$	(Feyisa et al., 2014)
Bare Soil Index	BSI	$\frac{[(SWIR1 + Red) - (NIR + Blue)]}{[(SWIR1 + Red) + (NIR + Blue)]}$	(Zha; Gao; And, 2003)
Enhanced Coal Dust Index	ECDI	$\frac{(SWIR1 - NIR + SWIR2)}{(SWIR1 + NIR - SWIR2)}$	(Xia et al., 2022)
Enhanced Vegetation Index	EVI	$2.5 \times \frac{NIR - Red}{NIR + 6 \times Red - 7.5 \times Blue + 1}$	(Liu; Huete, 1995)
Modified Normalized Difference Water Index	MNDWI	$(Green - SWIR1) - (0.25 \times NIR + 2.75 \times SWIR2)$	(Xu, 2006)
Normalized Difference Build-up Index	NDBI	$(SWIR1 - NIR)/(SWIR1 + NIR)$	(Zha; Gao; And, 2003)
Normalized Difference Coal Index	NDCI	$\frac{(SWIR1 - NIR)}{(SWIR1 + NIR)}$	(Ma, 2014)
Normalized Difference Moisture Index	NDMI	$(NIR - SWIR1)/(NIR + SWIR1)$	(Gao, 1996)
Normalized Difference Water Index	NDWI	$(Green - NIR)/(Green + NIR)$	(McFeeters, 1996)
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	$(NIR - Red)/(NIR + Red)$	(Rouse et al., 1973)
Soil-adjusted Vegetation Index	SAVI	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red + L} \times (1 + L); L = 0.5$	(Huete, 1988)

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Tabela 2. Principais classes utilizadas para a classificação do uso e cobertura da terra para a BCM.

Classes	Descrição	Amostras
Área vegetada	Natural, herbáceas e arbustos, incluindo floresta fechada de folhas largas (fc > 0,4).	1116
Área não vegetada	Superfícies expostas, incluindo infraestrutura urbana, estradas não pavimentadas.	700
Corpos de água	Rios, lagos, barragens, reservatórios e outras superfícies de corpos de água.	231
Área de mineração	Áreas diretamente relacionadas com a extração de carvão mineral em larga escala.	245

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

2.3.2 Fatores dinamizadores da expansão

As probabilidades de transição e expansão do uso e cobertura da terra (UCT) foram definidas a partir da relação entre o mapa de expansão territorial observado no período de 2015 a 2025 e os fatores dinamizadores da mudança (*driving factors*). Esses fatores atuam como variáveis explicativas no módulo LEAS, permitindo identificar os principais condicionantes espaciais associados às dinâmicas de transformação da paisagem.

A seleção das variáveis foi realizada com base na disponibilidade de dados geoespaciais compatíveis com a área de estudo, bem como na sua relevância em estudos de modelagem espacial aplicados à dinâmica do uso da terra e expansão minerária. Foram consideradas variáveis ambientais, socioeconômicas e de acessibilidade, totalizando 11 fatores explicativos (Tabela 3).

As variáveis ambientais incluíram altitude, declividade e índices espectrais derivados de imagens *Landsat,* como o BSI, o NDVI e o NDCI, os quais apresentam elevada sensibilidade às superfícies expostas, vegetação e áreas associadas à mineração de carvão, respectivamente.

Tabela 3. Variáveis utilizadas no LEAS para gerar os Potenciais de Desenvolvimento empregues no CARS

Fatores	Variável	Resolução	Fonte
Naturais	Altitude	12 m	ASTER DEM
	Declividade	12 m	ASTER DEM
	BSI	30 m	Google Earth Engine
	NDVI	30 m	Google Earth Engine
	NDCI	30 m	Google Earth Engine
Acessibilidade	Proximidade de superfície construída	30 m	Uso e cobertura da terra
	Proximidade de corpos de água	30 m	Uso e cobertura da terra
	Proximidade de linha férrea	30 m	Uso e cobertura da terra
	Proximidade de áreas mineiras	30 m	Uso e cobertura da terra
	Proximidade de estradas principais	30 m	Uso e cobertura da terra
Socioeconômicos	Densidade populacional	100 m	WorldPop

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

2.3.3 Avaliação da acurácia

As validações das simulações realizadas no modelo PLUS foram conduzidas por meio da matriz de confusão, permitindo calcular métricas estatísticas de desempenho, incluindo o Coeficiente Kappa, Acurácia global e o *Figure of Merite* (FoM). Entre essas métricas, o FoM é considerado um

dos indicadores mais rigorosos para avaliação de modelos de mudança de UCT, uma vez que avalia especificamente a correspondência espacial entre as mudanças observadas e simuladas.

O FoM é definido como a razão entre a intersecção das mudanças corretamente simuladas e o total das mudanças observadas e previstas pelo modelo. Valores reduzidos indicam baixo desempenho preditivo, enquanto valores elevados reflete maior capacidade do modelo reproduzir adequadamente as dinâmicas espaciais da paisagem. De acordo com diversos autores (Liu *et al.*, 2017; Pontius *et al.*, 2017), os valores do FoM podem ser interpretados como: baixo (<0,05), fraco (0,05–0,01), aceitável (0,01–0,02), bom (0,20–0,30) e muito bom (>0,30). A Equação 1 apresenta a formulação para o cálculo do FoM:

$$FoM = B/(A + B + C) \quad (1)$$

Em que:

A: representa a área incorretamente simulada devido às mudanças observadas que foram previstas como persistências; **B**: representa a área corretamente simulada devido às mudanças observadas e previstas (acertos de mudança); **C**: representa a área incorretamente simulada devido às mudanças observadas que foram previstas como classes incorretas (mudança perdida); **D**: representa a área incorretamente simulada devido às áreas persistentes observadas que foram previstas como mudança (falsa mudança).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CLASSIFICAÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA PARA 2015 E 2025

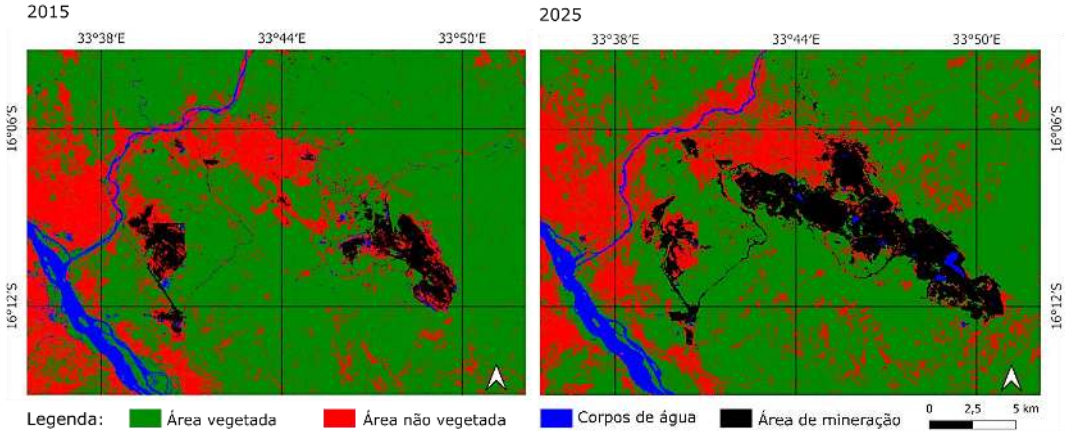
Os mapas classificados de 2015 e 2025 apresentaram elevada precisão temática, alcançando acurácia global de 0,92 e 0,95, e índices Kappa de 0,89 e 0,92, respectivamente. Esses resultados mostram-se consistentes com produtos globais de referência, incluindo o *ESA Africa Land Cover 20m Resolution* e o *Global Land Cover with Classification System at 30m* (GLC_FCS30) (Ma *et al.*, 2017; Phan; Kuch; Lehnert, 2020; Zhang *et al.*, 2021), corroborando a robustez e a confiabilidade dos mapas produzidos.

A Figura 3 mostra as mudanças substanciais nos mapas 2015 e 2025. Os resultados evidenciam mudanças expressivas na dinâmica do uso e cobertura da terra (UCT) na Bacia Carbonífera de Moatize (BCM) entre 2015 e 2025 (Tabela 4), refletindo a intensificação das atividades mineradoras e da expansão antrópica associada ao desenvolvimento da economia extrativa na região. Observa-se uma redução significativa das áreas vegetadas, que passaram de 47.215,08 hectares (ha) em 2015 para 42.386,58 ha em 2025, representando uma perda aproximada de 10,23%. Essa redução está

diretamente relacionada à expansão das áreas mineiras, da urbanização e das superfícies expostas decorrentes das atividades de exploração de carvão, abertura de vias de acesso, implantação de infraestruturas e expansão de assentamentos humanos próximos ao corredor mineiro.

A diminuição da cobertura vegetal observada neste estudo corrobora tendências reportadas em outras regiões da África Subsaariana, onde a rápida expansão das atividades extrativas tem provocado fragmentação da paisagem, degradação ambiental e perda de ecossistemas naturais (Useni Sikuzani *et al.*, 2024). Além disso, a supressão da vegetação em áreas semiáridas, como Moatize, tende a aumentar a vulnerabilidade ambiental, favorecendo processos erosivos, redução da biodiversidade e alterações nos ciclos hidrológicos locais.

Figura 3. Mapas de uso e cobertura da terra da área de estudo (BCM) em 2015 (a esquerda) e 2025 (a direita), ilustrando mudanças substanciais, com destaque para a expansão da área de mineração em cerca de 140%.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Tabela 4. Mudanças no uso e cobertura da terra entre as classes em 2015 e 2025, na área de estudo (BCM).

Classes	2015		2025		Variação (%)
	Área (ha)	Proporção (%)	Área (ha)	Proporção (%)	
Área vegetada	47.215,08	74,41	42.386,58	66,80	-10,23
Área não vegetada	11.872,62	18,71	13.544,28	21,35	+14,08
Corpos de água	1.971,72	3,11	1.776,87	2,80	-9,88
Área de mineração	2.390,58	3,77	5.742,27	9,05	+140,21
Total	63.450,00	100	63.450,00	100	–

Fonte: Elaborada pelos autores (2026)

As áreas não vegetadas apresentaram crescimento de 11.872,62 ha para 13.544,28 ha, correspondendo a aumento de 14,08%. Esse crescimento pode ser associado tanto à expansão das áreas urbanizadas quanto ao aumento de superfícies expostas resultantes da remoção da vegetação e movimentação de solos associadas às operações mineiras. Em regiões de mineração a céu aberto, a expansão de superfícies desnudas constitui um dos principais indicadores de transformação antrópica

da paisagem, sendo frequentemente associada à intensificação da degradação da terra e aumento da suscetibilidade à erosão e emissão de poeiras (Xia *et al.*, 2022; Yan *et al.*, 2024).

Os corpos de água apresentaram ligeira redução, passando de 1.971,72 ha para 1.776,87 ha, equivalente a uma diminuição de 9,88%. Embora essa variação seja relativamente moderada quando comparada às demais classes, ela pode refletir alterações hidrológicas associadas a mineração, incluindo assoreamento, mudanças nos padrões de drenagem, captação de água para atividades industriais e variabilidade climática regional. Estudos anteriores destacam que atividades de mineração em bacias hidrográficas frequentemente afetam a disponibilidade e qualidade dos recursos hídricos, sobretudo em regiões com forte sazonalidade pluviométrica (Zhou *et al.*, 2023; Zhu; Ling, 2024).

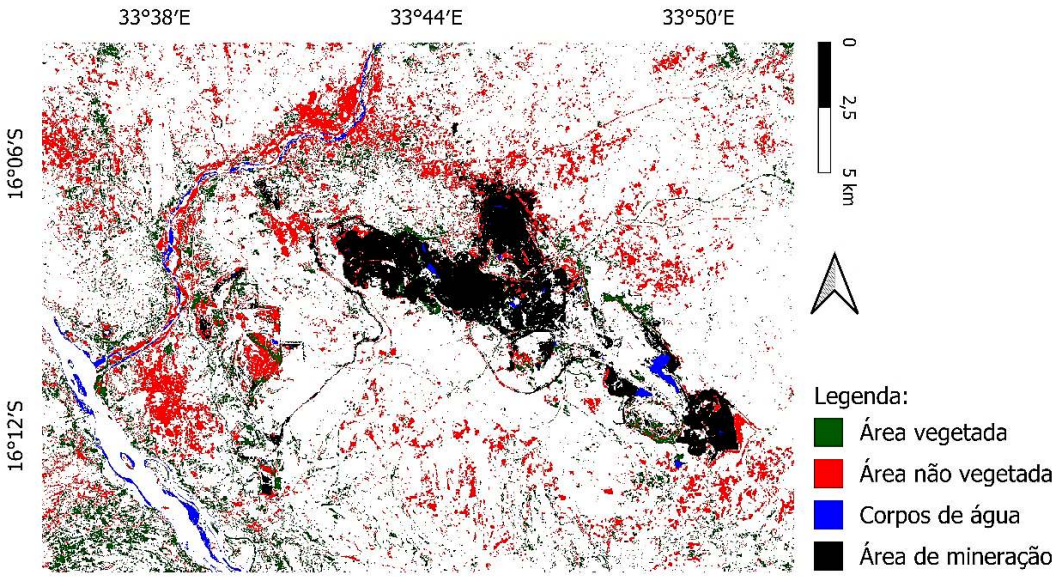
A classe de mineração apresentou a mudança mais expressiva observada no período analisado. Elas aumentaram de 2.390,58 ha em 2015 para 5.742,27 ha em 2025, representando um crescimento de aproximadamente 140,21%. Esse resultado evidencia a rápida expansão da exploração carbonífera em Moatize após a consolidação das concessões mineiras e instalação de grandes empresas multinacionais na região. O crescimento acelerado de áreas de mineração confirma o papel central do carvão mineral na dinâmica econômica regional e demonstra a forte pressão exercida pelas atividades extrativas sobre a paisagem local (Blanche *et al.*, 2024; Joy *et al.*, 2024; Pacheco *et al.*, 2025).

3.2 DESEMPENHO E VALIDAÇÃO DO MODELO

O desempenho do modelo PLUS foi inicialmente avaliado a partir do mapa de expansão do uso e cobertura da terra (*Land expansion)* referente ao período de 2015–2025, o qual permitiu identificar espacialmente as áreas de persistência e transição entre diferentes classes de uso da terra. O mapa de expansão demonstrou uma dinâmica territorial fortemente associada à intensificação das atividades mineradores na Bacia Carbonífera de Moatize (BCM), evidenciando principalmente a conversão de áreas vegetadas em superfícies não vegetadas e áreas de mineração (Figura 4). As maiores mudanças espaciais concentram-se nas proximidades do corredor mineiro e das principais infraestruturas de transporte, revelando a influência direta da mineração sobre a reorganização da paisagem regional.

A análise espacial das transições também evidenciou que as áreas vegetadas constituíram a principal classe cedente para a expansão minerária e das superfícies expostas. Esse comportamento reflete o avanço progressivo das atividades extrativas sobre áreas naturais, corroborando os padrões em outras regiões (Li *et al.*, 2024).

Figura 4. Mapa de expansão 2015–2025 gerado no PLUS para a região de estudo (BCM).



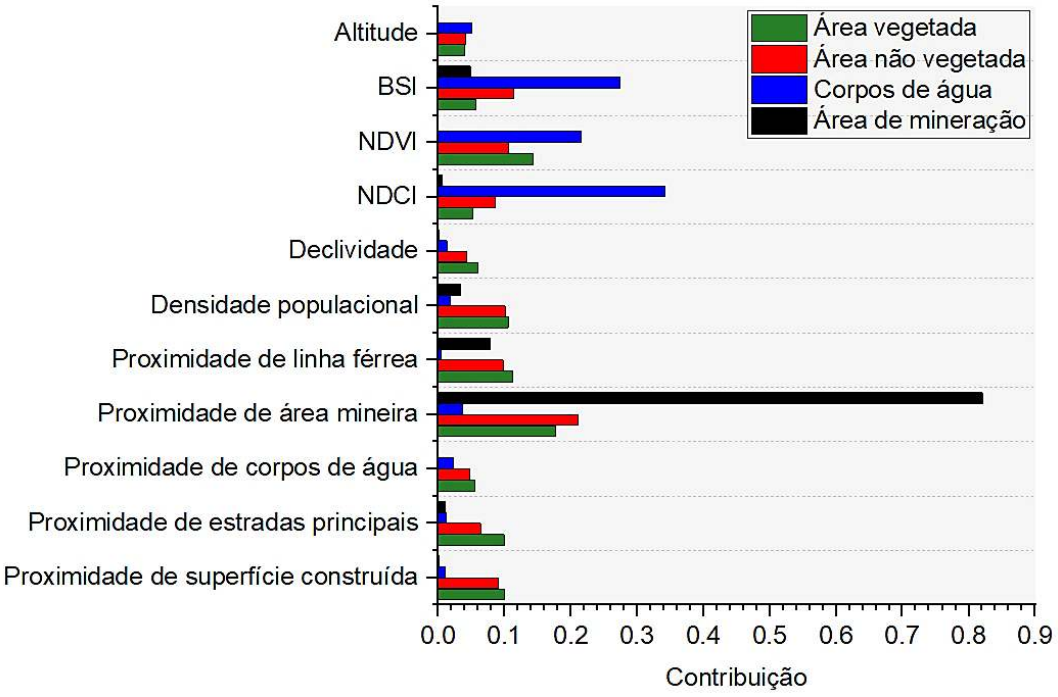
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Com base no mapa *Land expansion*, o módulo LEAS do modelo PLUS analisou a contribuição dos fatores dinamizadores (*driving factors*) na dinâmica de expansão territorial por meio do algoritmo *Random Forest.* Os resultados mostram que os fatores relacionados à acessibilidade e às condições naturais exercem influência significativa sobre os padrões espaciais simulados. Entre os principais fatores de contribuição destacaram-se a proximidade de áreas mineiras, proximidade de estradas principais, proximidade de superfícies construídas, densidade populacional e os índices espectrais associados à vegetação e superfícies expostas, particularmente o NDVI, BSI e NDCI (Figura 5).

A elevada contribuição da proximidade de áreas mineiras evidencia o forte caráter de expansão espacial agregada (*patch expansion*) associado às atividades de mineração de carvão em Moatize, indicando que novas áreas mineradas tendem a se desenvolver próximas às frentes de exploração já existentes. De forma semelhante, a influência das estradas principais e linhas férreas demostra a dependência logística da atividade mineira, uma vez que a expansão territorial ocorre preferencialmente em áreas com maior acessibilidade para transporte de carvão, equipamentos e insumos (Tiamgne *et al.*, 2025).

Os índices espectrais também apresentaram importância relevante na discriminação das classes simuladas. O NDVI contribuiu significativamente para a identificação das áreas vegetadas, enquanto o BSI e o NDCI mostraram elevada sensibilidade às superfícies de água, superfícies expostas e áreas associadas à mineração. Esses resultados reforçam a importância da integração entre variáveis espectrais, ambientais e socioeconômicas na modelagem de mudanças do uso da terra em regiões de economia extrativa (Naite; Fernandez; Zebende, 2026)

Figura 5. Importância das variáveis usadas no módulo LEAS, para as classes de uso da terra na área de estudo (BCM).



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A validação do modelo foi realizada por meio da matriz de confusão, permitindo avaliar a precisão das simulações produzidas pelo módulo CARS. Os resultados indicaram desempenho satisfatório do modelo na representação das dinâmicas espaço-temporais observadas entre 2015 e 2025. A simulação alcançou acurácia global de 0,819 e coeficiente Kappa de 0,636, indicando elevada concordância entre os padrões simulados e os dados observados (Tabela 5). De cordo com a literatura, valores de Kappa superiores a 0,60 são geralmente considerados substanciais em estudos de modelagem espacial e mudanças no uso da terra, refletindo boa capacidade preditiva do modelo (Zhao *et al.*, 2023). Além disso, o modelo apresentou *Figure of Merit* (FoM) de 0,314, valor considerado elevado (muito bom) para simulações de mudanças de uso e cobertura da terra, demostrando que o modelo PLUS foi capaz de reproduzir adequadamente os padrões espaciais de transformação da paisagem em Moatize, fornecendo elevada confiabilidade para as projeções futuras realizadas neste estudo.

A classe de área vegetada apresentou elevados índices de desempenho, com acurácia do produtor de 0,884 e acurácia do usuário de 0,876, além de baixos erros de comissão (0,123) e omissão (0,115). Esses resultados demonstram elevada capacidade do modelo em identificar corretamente as áreas vegetadas, refletindo a forte assinatura espectral da vegetação e sua ampla representatividade espacial na área de estudo (BCM).

A classe de área não vegetada apresentou os menores índices de precisão, com acurácia de produtor e do usuário de 0,612, além de erros de comissão e omissão relativamente elevados (0,387). Esse comportamento indica maior dificuldade do modelo em diferenciar superfícies expostas, áreas urbanizadas e zonas degradadas, as quais frequentemente apresentam respostas espectrais semelhantes em ambientes de mineração (Li *et al.*, 2024; Tiamgne *et al.*, 2025).

Os corpos de água apresentaram desempenho intermediário, com acurácia do produtor e do usuário de 0,725. Os erros observados podem estar relacionados à sazonalidade hidrológica regional, bem como à reduzida dimensão espacial de algumas feições hídricas, dificultando sua discriminação em imagens *Landsat* de resolução moderada (Ren; Zhao; He, 2025; Xia *et al.*, 2022; Yan *et al.*, 2025).

Por sua vez, a classe de mineração apresentou os melhores resultados de desempenho entre todas as categorias analisadas, atingindo acurácia de usuário de 0,919 e acurácia do produtor 0,861, acompanhadas de baixos erros de comissão (0,080) e omissão (0,138). Esses resultados demonstram elevada eficiência do modelo PLUS em representar espacialmente a dinâmica de expansão das áreas mineradas, refletindo a forte diferenciação espectral dessas superfícies e a elevada influência dos fatores direcionadores associados à atividade carbonífera.

De modo geral, os resultados de validação confirmam a robustez do modelo PLUS na simulação das mudanças de UCT em Moatize, especialmente para a classe de mineração, que é o potencial objeto do presente estudo.

Tabela 5. Acurácias para cada classe de uso da terra, entre os mapas classificado e simulado, para 2025, na área de estudo (BCM).

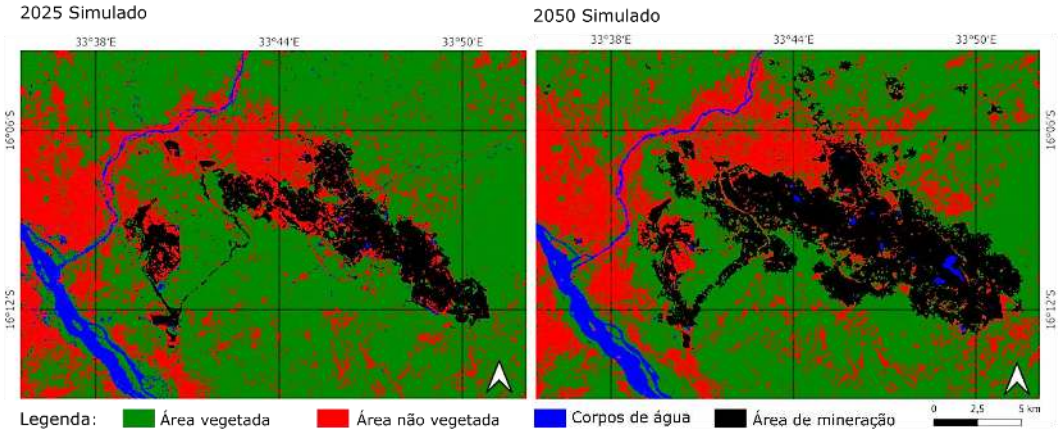
Classes	Erro		Acurácia	
	De comissão	De omissão	Do produtor	De usuário
Área vegetada	0,123	0,115	0,884	0,876
Área não vegetada	0,387	0,387	0,612	0,612
Corpos de água	0,274	0,274	0,725	0,725
Área de mineração	0,080	0,138	0,861	0,919

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

3.3 PROJEÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA PARA 2050

Os cenários simulados pelo modelo PLUS indicam que a BCM continuará passando por intensas transformações territoriais até o ano de 2050, sobretudo em função da expansão das atividades mineradoras e do crescimento de superfícies antropizadas (Figura 6.) A projeção espaço-temporal evidencia uma tendência contínua de substituição da cobertura vegetal por áreas não vegetadas e áreas de mineração, refletindo a permanência da pressão exercida pela economia extrativa sobre a paisagem.

Figura 6. Mapas de uso e cobertura da terra da área de estudo (BCM) simulados para 2025 (a esquerda) e 2050 (a direita), ilustrando dinâmica de classes, com destaque para a expansão da área de mineração em cerca de 140%.



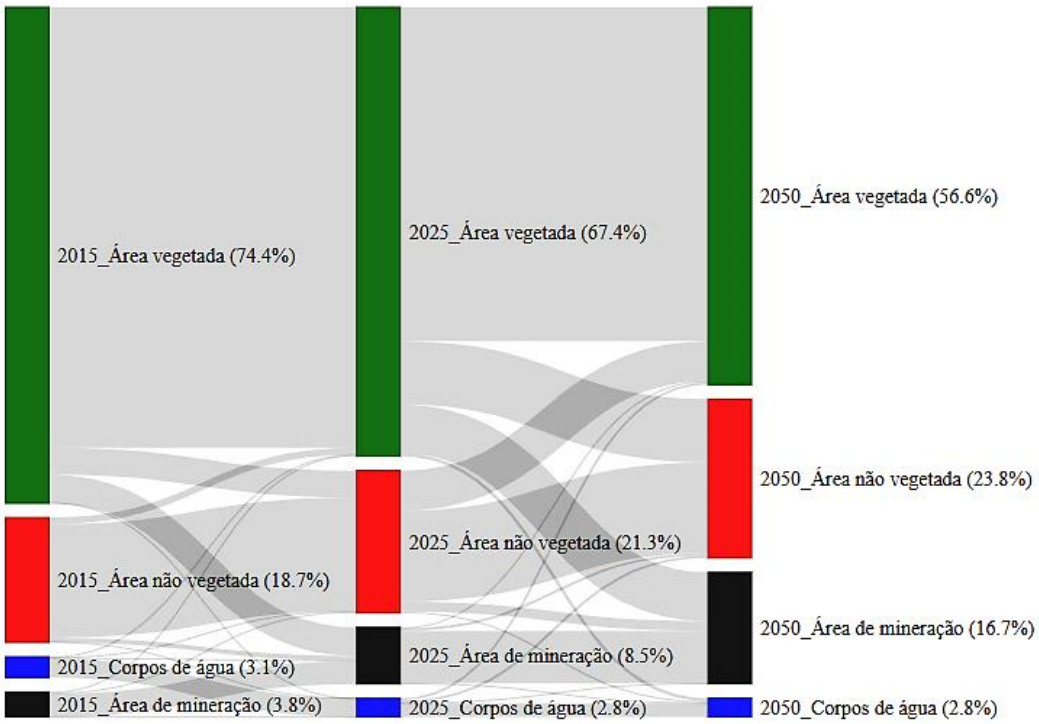
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Os resultados demonstram que a área vegetada continuará apresentando redução expressiva ao longo do período analisado. Em 2015, essa classe ocupava aproximadamente 74,4% da área total da região de estudo, reduzindo para 67,4% em 2025 e atingindo 56,6% em 2050. Essa tendência evidencia um processo progressivo de fragmentação da vegetação natural, associado principalmente à expansão minerária, ao crescimento urbano e à ampliação das infraestruturas de suporte às atividades extrativas. A análise do fluxo de transição mostra que grande parte das áreas convertidas em mineração e superfícies não vegetadas tem origem direta nas áreas vegetadas, indicando que a cobertura natural continua funcionando como principal classe das transformações territoriais (Figura 7).

As áreas não vegetadas também apresentam crescimento contínuo ao longo das simulações, passando de 18,7% em 2015 para 21,3% em 2025 e alcançando 23,8% em 2050. Esse aumento está de algum modo relacionado à expansão de solos expostos, áreas urbanizadas, depósitos de rejeitos, estradas mineiras e demais superfícies antropizadas associadas à atividade carbonífera. Em regiões de mineração a céu aberto, o crescimento de superfícies desnudas constitui um dos principais indicadores de degradação ambiental e intensificação da pressão antrópica sobre a paisagem local (Blanche *et al.*, 2024; Joy *et al.*, 2024; Pacheco *et al.*, 2025).

A classe de mineração apresentou a dinâmica de expansão mais significativa entre todas as categorias analisadas. As áreas mineiras aumentaram de aproximadamente 3,8% em 2015 para 8,5% em 2025, podendo atingir cerca de 16,7% da área total da bacia em 2050. Esses resultados sugerem que a atividade mineradora continuará desempenhando papel central na reorganização territorial da região de Moatize nas próximas décadas, mesmo diante das atuas políticas climáticas globais voltadas à redução do uso de combustíveis fósseis, sobretudo da eliminação de carvão mineral como fonte de energia até 2050 (IPCC, 2018).

Figura 7. Mapa de circulação 2015–2050 de uso e cobertura da terra da área de estudo (BCM), ilustrando transições de classes, com destaque para a expansão da área de mineração em detrimento das áreas vegetadas.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

O padrão espacial das simulações indica que a expansão da mineração tende a ocorrer principalmente em áreas próximas às atuais frentes de exploração e aos principais corredores de infraestrutura, principalmente estradas e linhas férreas, evidenciando a forte dependência logística da atividade mineradora. Os corpos de água mantiveram relativa estabilidade até 2050, embora pequenas reduções e alterações espaciais possam refletir possíveis impactos indiretos da mineração sobre os sistemas hidrológicos locais, incluindo alterações nos padrões de drenagem, assoreamento e aumento da pressão sobre os recursos hídricos.

De forma geral, os resultados revelam um processo contínuo de antropização da paisagem da BCM, marcado pela redução da cobertura vegetal e intensificação das áreas degradadas e mineradas. Esse cenário evidencia as contradições entre a expansão da exploração carbonífera e os compromissos globais de transição energética, além de apontar potencias impactos ambientais, como fragmentação da paisagem, perda de biodiversidade e comprometimento de serviços ecossistêmicos. Assim, os cenários simulados reforçam a necessidade de estratégicas integradas de planejamento territorial, monitoramento ambiental e recuperação de áreas degradadas, destacando também o potencial do modelo PLUS como ferramenta de apoio à tomada de decisão em regiões de atividades extrativas.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo analisou e simulou as dinâmicas espaço-temporais do uso e cobertura da terra na Bacia Carbonífera de Moatize (BCM), Moçambique, entre 2015 e 2050, utilizando o modelo *Putch-generating Land Use Simulations* (PLUS) integrado a fatores naturais, socioeconômicos e de acessibilidade. Os resultados evidenciam intensas transformações territoriais associadas à expansão da mineração de carvão, revelando um processo contínuo de antropização da paisagem regional.

Entre 2015 e 2025, observou-se redução significativa das áreas vegetadas, acompanhada pelo crescimento das superfícies não vegetadas e, principalmente, pela forte expansão das áreas de mineração. As simulações futuras indicam que essa tendência deverá persistir até 2050, com as áreas mineradas podendo atingir aproximadamente 16,7% da área total na região de estudo, enquanto a cobertura vegetal poderá reduzir para cerca de 56,6%. Esses resultados revelam que a mineração continuará desempenhando papel central na reorganização territorial da região, mesmo diante dos atuais cenários globais de transição energética e redução da dependência de combustíveis fósseis.

A análise dos fatores determinantes mostrou que a dinâmica de expansão territorial foi fortemente influenciada pela proximidade de áreas mineiras, estradas principais, linhas férreas, densidade populacional e índices espectrais associados à vegetação e superfícies expostas. A integração desses fatores permitiu ao modelo reproduzir adequadamente os padrões espaciais observados, alcançando acurácia global de 0,819, coeficiente Kappa de 0,636 e *Figure of Merit* (FoM) de 0,314, indicadores que demonstram desempenho robusto e elevada confiabilidade das simulações realizadas.

Os cenários projetados evidenciam importantes implicações ambientais e territoriais para a região de Moatize, incluindo fragmentação da cobertura vegetal, expansão de áreas degradadas, aumento da pressão sobre os recursos hídricos e intensificação da vulnerabilidade socioecológica. Tais resultados reforçam a necessidade de implementação de estratégias integradas de planejamento territorial, gestão ambiental e recuperação de áreas degradadas, especialmente em regiões submetidas à forte dependência de atividades extrativas.

Além disso, o estudo contribui cientificamente ao demonstrar o potencial do modelo PLUS na simulação de dinâmicas territoriais associadas à mineração de carvão em contextos africanos, preenchendo uma lacuna ainda pouco explorada na literatura. A integração entre sensoriamento remoto, modelagem espacial e fatores direcionadores mostrou-se eficiente para compreender padrões de transformação da paisagem e construir cenários prospectivos capazes de subsidiar políticas públicas e estratégias de desenvolvimento sustentável.

Por fim, recomenda-se que pesquisas futuras incorporem cenários alternativos de políticas climáticas, variáveis econômicas e projeções de demanda energética global, bem como dados de maior

resolução espacial e temporal, visando aprimorar a capacidade preditiva dos modelos e aprofundar a compreensão das interações entre mineração, mudanças climáticas e transformação territorial.

REFERÊNCIAS

AWOTWI, Alfred *et al.* Monitoring land use and land cover changes due to extensive gold mining, urban expansion, and agriculture in the Pra River Basin of Ghana, 1986–2025. **Land Degradation & Development**, v. 29, n. 10, p. 3331–3343, ago. 2018. https://doi.org/10.1002/ldr.3093.

BLANCHE, Mefomdjo Fotie *et al.* Assessment of land cover degradation due to mining activities using remote sensing and digital photogrammetry. **Environmental Systems Research**, v. 13, n. 1, set. 2024. https://doi.org/10.1186/s40068-024-00372-5.

BP. **bp Energy Outlook: 2025 edition**. , 26 nov. 2025. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2025.pdf>

CARDILLE, Jeffrey A.; CROWLEY, David, Morgan A. snd Saah; CLINTOS, Nicholas E. (ORGS.). **Cloud-Based Remote Sensing with Google Earth Engine: Fundamentals and Applications**. *[S.l.]*: Springer International Publishing, 2024.

FERNANDES, Paulo *et al.* The thermal history of the Karoo Moatize-Minjova Basin, Tete Province, Mozambique: An integrated vitrinite reflectance and apatite fission track thermochronology study. **Journal of African Earth Sciences**, v. 112, p. 55–72, dez. 2015. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.09.009.

FEYISA, Gudina L. *et al.* Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 140, p. 23–35, jan. 2014. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029.

GALASSO, Francesca *et al.* Thermal history and basin evolution of the Moatize-Minjova Coal Basin (NCondedzi sub-basin, Mozambique) constrained by organic maturation levels. **Journal of African Earth Sciences**, 2019.

GAO, Bo-cai. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 257–266, dez. 1996. https://doi.org/10.1016/s0034-4257(96)00067-3.

GORELICK, Noel *et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18–27, dez. 2017. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031.

HATTON, William; FARDELL, Anna. New discoveries of coal in Mozambique - Development of the coal resource estimation methodology for International Resource Reporting Standards. **International Journal of Coal Geology**, v. 89, p. 2–12, jan. 2012. https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.02.010.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295–309, ago. 1988. https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-x.

IEA. **Coal Mid-Year Update**. , jul. 2025a. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/1e9f8356-4ec9-4c7d-9673-beaea204b44d/CoalMid-YearUpdate2025.pdf>

IEA. **World Energy Outlook 2025**. , 26 nov. 2025b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025>

INE. **Estatistica do Distrito de Moatize**. , 26 out. 2019. Disponível em: <https://www.ine.gov.mz>

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Global Warming of 1.5oC**, p. 630, 2018.

JOY, Md Saharik *et al.* Forest fragmentation and forest cover dynamics: Mining induced changes in the West Singhbhum District of Jharkhand. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 36, p. 101350, nov. 2024. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101350.

KIRSHNER, Joshua; BROTO, Vanesa Castán; BAPTISTA, Idalina. Energy landscapes in Mozambique: The role of the extractive industries in a post-conflict environment. **Environment and Planning A: Economy and Space**, v. 52, n. 6, p. 1051–1071, jul. 2019. https://doi.org/10.1177/0308518x19866212.

KUMAR, Lalit; MUTANGA, Onisimo. Google Earth Engine Applications Since Inception: Usage, Trends, and Potential. **Remote Sensing**, v. 10, n. 10, p. 1509, set. 2018. https://doi.org/10.3390/rs10101509.

LI, Shengpeng *et al.* Simulating land use change for sustainable land management in China's coal resource-based cities under different scenarios. **Science of The Total Environment**, v. 916, p. 170126, mar. 2024. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170126.

LIANG, Shunlin; STRAHLER, Alan H.; WALTHALL, Charles. Retrieval of Land Surface Albedo from Satellite Observations: A Simulation Study. **Journal of Applied Meteorology**, v. 38, n. 6, p. 712–725, jun. 1999. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038%3C0712:rolsaf%3E2.0.co;2.

LIANG, Xun *et al.* Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 85, p. 101569, jan. 2021. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101569.

LIU, Hui Qing; HUETE, Alfredo. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 2, p. 457–465, mar. 1995. https://doi.org/10.1109/tgrs.1995.8746027.

LIU, Xiaoping *et al.* A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. **Landscape and Urban Planning**, v. 168, p. 94–116, dez. 2017. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.019.

MA, Baodong D. **Remote Sensing of Monitoring Typical Environmental Elements Change in Mining Area—A Case Study of Shendong Mining Area**. PhD Thesis—*[S.l.]*: Northeastern University, 2014.

MA, Lei *et al.* Evaluation of Feature Selection Methods for Object-Based Land Cover Mapping of Unmanned Aerial Vehicle Imagery Using Random Forest and Support Vector Machine Classifiers. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 6, n. 2, p. 51, fev. 2017. https://doi.org/10.3390/ijgi6020051.

MAROVE, Carlos A. *et al.* Leaching of hazardous elements from Mozambican coal and coal ash. **Journal of African Earth Sciences**, v. 168, p. 103861, ago. 2020. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103861.

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425–1432, 1996. https://doi.org/10.1080/01431169608948714.

MITADER. **Perfil Ambiental Distrital de Moatize**. , 26 out. 2015. Disponível em: <https://www.biblioteca.biofund.org.mz>

MOSCA, João; SELEMANE, Tomás. **El dorado Tete: os mega projectos de mineração**. Maputo: Centro de Integridade Pública, 2011.

NAITE, Ivan Latinho; FERNANDEZ, Basílio Fernandez; ZEBENDE, Gilney Figueira. Coal Mining as a Driver of Land Use and Land Cover Change and Degradation: A Case in Moatize City, Mozambique. **Land Degradation and Development**, v. 1, n. 1, p. 1–18, mar. 2026. https://doi.org/10.1002/ldr.70566.

PACHECO, Admilson da Penha *et al.* Land Cover Transformations in Mining-Influenced Areas Using PlanetScope Imagery, Spectral Indices, and Machine Learning: A Case Study in the Hinterlands de Pernambuco, Brazil. **Land**, v. 14, n. 2, p. 325, fev. 2025. https://doi.org/10.3390/land14020325.

PHAN, Thanh Noi; KUCH, Verena; LEHNERT, Lukas W. Land Cover Classification using Google Earth Engine and Random Forest Classifier—The Role of Image Composition. **Remote Sensing**, v. 12, n. 15, p. 2411, jul. 2020. https://doi.org/10.3390/rs12152411.

PONTIUS, Robert Gilmore *et al.* Methods to summarize change among land categories across time intervals. **Journal of Land Use Science**, v. 12, n. 4, p. 218–230, jun. 2017. https://doi.org/10.1080/1747423x.2017.1338768.

REN, He; ZHAO, Yanling; HE, Tingting. Remote Sensing in Mining-Related Eco-Environmental Monitoring and Assessment. **Remote Sensing**, v. 18, n. 1, p. 103, dez. 2025. https://doi.org/10.3390/rs18010103.

ROUSE, J. W. *et al.* Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with Erts. **In Proceedings of the 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium**, p. 48–62, 10 dez. 1973.

SEDANO, F. *et al.* The impact of charcoal production on forest degradation: a case study in Tete, Mozambique. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 9, p. 094020, set. 2016. https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/094020.

TAKAM TIAMGNE, Xavier *et al.* Multi-scenario land use simulation for fast human growth regions: A case study of Zambia's Solwezi mining district. **Resources Policy**, v. 107, p. 105661, ago. 2025. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105661.

TAKAM TIAMGNE, Xavier; KALABA, Felix K.; NYIRENDA, Vincent R. Land use and cover change dynamics in Zambia's Solwezi copper mining district. **Scientific African**, v. 14, p. e01007, nov. 2021. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e01007.

TSUJI, Hiroyuki; OTSUKI, Kei. The trajectory of extractive urbanism: Examining the implications of Vale is presence and withdrawal for the coal frontier and its urban spaces in Tete. **The Extractive Industries and Society**, v. 13, p. 101170, 2023.

USENI SIKUZANI, Yannick *et al.* Investigating of Spatial Urban Growth Pattern and Associated Landscape Dynamics in Congolese Mining Cities Bordering Zambia from 1990 to 2023. **Resources**, v. 13, n. 8, p. 107, jul. 2024. https://doi.org/10.3390/resources13080107.

VASCONCELOS, Lopo; CHAFY, Algy; XERINDA, Leonardo. Determination of the limit of oxidation in zones of sub-outcorpping Chipanga Coal Seam, Moatize Coal Basin, Mozambique. **Journal of African Earth Sciences**, v. 99, p. 554–567, nov. 2014. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.05.006.

XIA, Nan *et al.* Identification and monitoring of coal dust pollution in Wucaiwan mining area, Xinjiang (China) using Landsat derived enhanced coal dust index. **PLOS ONE**, v. 17, n. 4, p. e0266517, abr. 2022. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266517.

XU, Hanqiu. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 14, p. 3025–3033, jul. 2006. https://doi.org/10.1080/01431160600589179.

YAN, Weitao *et al.* Spatiotemporal Patterns of Vegetation Evolution in a Deep Coal CMining Subsidence Area: A Remote Sensing Study of Liangbei, China. **Remote Sensing**, v. 16, n. 17, p. 3204, ago. 2024. https://doi.org/10.3390/rs16173204.

YAN, Xiaoxiao *et al.* A Novel Landsat-Derived Multispectral Index for Coal Dust Detection: Spatiotemporal Dispersion Patterns and Natural Driving Forces. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 18, p. 15198–15208, 2025. https://doi.org/10.1109/jstars.2025.3567467.

ZHA, Y.; GAO, J.; AND, S. Ni. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 3, p. 583–594, 2003. https://doi.org/10.1080/01431160304987.

ZHANG, Xiao *et al.* GLC_FCS30: global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery. **Earth System Science Data**, v. 13, n. 6, p. 2753–2776, jun. 2021. https://doi.org/10.5194/essd-13-2753-2021.

ZHAO, Xin *et al.* Combining LSTM and PLUS Models to Predict Future Urban Land Use and Land Cover Change: A Case in Dongying City, China. **Remote Sensing**, v. 15, n. 9, p. 2370, abr. 2023. https://doi.org/10.3390/rs15092370.

ZHAO, Yanhua *et al.* A CLUMondo Model-Based Multi-Scenario Land-Use Change Simulation in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration, China. **Sustainability**, v. 14, n. 22, p. 15336, nov. 2022. https://doi.org/10.3390/su142215336.

ZHOU, Guoqing *et al.* Coordination Analysis between the Development of Urban Built-Up Areas and Urban Environmental Factors through Remote Sensing of Nighttime Lights: A Case Study in Nanjing, China. **Remote Sensing**, v. 15, n. 13, p. 3279, jun. 2023. https://doi.org/10.3390/rs15133279.

ZHU, Yaoyao; LING, Gabriel Hoh Teck. Spatio-Temporal Changes and Driving Forces Analysis of Urban Open Spaces in Shanghai between 1980 and 2020: An Integrated Geospatial Approach. **Remote Sensing**, v. 16, n. 7, p. 1184, mar. 2024. https://doi.org/10.3390/rs16071184.