

A DINÂMICA DE USO DA TERRA NAS VEREDAS DA ÁREA DE PRESERVAÇÃO AMBIENTAL DO RIO PADEIROS

THE DYNAMICS OF LAND USE IN THE VEREDAS OF THE PADEIROS RIVER ENVIRONMENTAL PRESERVATION

LA DINÁMICA DEL USO DE LA TIERRA EN LAS VEREDAS DEL ÁREA DE PRESERVACIÓN AMBIENTAL DEL RÍO PANDEIROS.

Jefferson William Lopes Almeida¹

Marcos Esdras Leite²

Manoel Reinaldo Leite³

Resumo: No semiárido norte-mineiro, as veredas desempenham um papel fundamental no equilíbrio hidrológico dos cursos d'água do bioma Cerrado. Nas últimas décadas, estudos têm indicado que a ação antrópica compromete a capacidade de resiliência desse ecossistema na Área de Proteção Ambiental (APA) do Rio Pandeiros. Nesse contexto, esta pesquisa avaliou a dinâmica do uso e cobertura da terra no entorno imediato das veredas nos anos de 2015 e 2023. Para isso, delimitou-se uma zona de influência de 500 metros (buffer) ao longo dos principais canais de drenagem. O mapeamento do uso e cobertura da terra foi realizado por meio do método de árvore de decisão, utilizando como insumos imagens ópticas, índices espectrais e variáveis topográficas. Essa abordagem permitiu distinguir as veredas dos demais elementos naturais e antrópicos da paisagem. No período analisado, constatou-se uma redução da cobertura vegetal em 65,7 km², destacando-se a perda de 23,9 km² especificamente nas áreas de vereda. Os resultados evidenciaram a capacidade do método não paramétrico da árvore de decisão em mapear as classes propostas. Para validar os resultados obtidos, realizaram-se três campanhas de campo para coleta de amostras de verdade terrestre. A precisão da classificação foi avaliada por meio da matriz de erros e do coeficiente Kappa. Embora os resultados tenham atingido um índice Kappa considerado adequado pela literatura, observou-se que, nos extratos de vegetação herbácea, a cobertura mais rasa e próxima ao solo dificultou a diferenciação dessa classe no processo de mapeamento.

Palavras-chave: Veredas; Cobertura vegetal; Impacto ambiental; Sensoriamento remoto.

Abstract: In the semi-arid region of northern Minas Gerais, veredas have been shown to play a fundamental role in the hydrological balance of watercourses in the Cerrado biome. In recent decades, scientific research has indicated that human activity has led to a

¹Doutorando em Desenvolvimento Social (PPGDS-UNIMONTES). Email: jeffersonlopesalmeida@gmail.com. Orcid iD: <https://orcid.org/0009-0000-6438-5980>.

² Doutor em Geografia pela Universidade Federal de Uberlândia - UFU. Professor do Departamento de Geociências da Universidade Estadual de Montes Claros-UNIMONTES. Professor do Programa de Pós-Graduação em Geografia/ UNIMONTES e do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Social/ UNIMONTES. Email: marcosesdrasleite@gmail.com. Orcid iD: <https://orcid.org/0000-0002-9020-6445>.

³Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia do Departamento de Biologia da UNIMONTES. Coordenador do Núcleo de Estudos Sismológicos do Município de Montes Claros. Email: leitemanuelreinaldo2@gmail.com. Orcid iD: <https://orcid.org/0000-0003-3744-5903>.

degradation of the ecosystem's resilience within the Rio Pandeiros Environmental Protection Area (APA). In this context, the present research evaluated the dynamics of land use and land cover in the immediate vicinity of the veredas in 2015 and 2023. To this end, a 500-meter buffer zone was delineated along the primary drainage channels. The mapping of land use and land cover was executed through the implementation of a decision tree methodology, incorporating optical images, spectral indices, and topographic variables as inputs. This methodological approach enabled the differentiation of the veredas from other elements of the landscape, both natural and anthropogenic. During the period under analysis, a reduction in vegetation cover of 65.7 km² was observed, with a notable loss of 23.9 km² specifically in the trail areas. The findings indicated the efficacy of the nonparametric decision tree method in mapping the proposed classes. To validate the results obtained, three field campaigns were conducted to collect ground truth samples. The accuracy of the classification was evaluated using the error matrix and the Kappa coefficient. While the results obtained from a Kappa index deemed sufficient by the extant literature, it was noted that, in herbaceous vegetation extracts, the shallower coverage closer to the ground posed a challenge in differentiating this class during the mapping process.

Keywords: Veredas; Vegetation cover; Environmental impact; Remote sensing.

Resumen: En la región semiárida del norte de Minas Gerais, se ha demostrado que las veredas desempeñan un papel fundamental en el equilibrio hidrológico de los cursos de agua del bioma del Cerrado. En las últimas décadas, las investigaciones científicas han indicado que la actividad humana ha degradado la resiliencia del ecosistema dentro del Área de Protección Ambiental (APA) del Río Pandeiros. En este contexto, la presente investigación evaluó la dinámica del uso y la cobertura del suelo en las inmediaciones de las veredas en los años 2015 y 2023. Para ello, se delimitó una zona de amortiguamiento de 500 metros a lo largo de los principales canales de drenaje. El mapeo del uso y la cobertura del suelo se llevó a cabo mediante la implementación de una metodología de árbol de decisión, incorporando imágenes ópticas, índices espectrales y variables topográficas como insumos. Este enfoque metodológico permitió diferenciar las veredas de otros elementos del paisaje, tanto naturales como antropogénicos. Durante el período analizado, se observó una reducción de la cobertura vegetal de 65,7 km², con una pérdida notable de 23,9 km² específicamente en las áreas de vereda. Los resultados indicaron la eficacia del método no paramétrico del árbol de decisión para cartografiar las clases propuestas. Para validar los resultados obtenidos, se llevaron a cabo tres campañas de campo para recoger muestras de referencia. La precisión de la clasificación se evaluó mediante la matriz de error y el coeficiente Kappa. Si bien los resultados alcanzaron un índice Kappa considerado adecuado por la bibliografía especializada, se observó que, en los estratos de vegetación herbácea, la cobertura más superficial y cercana al suelo representó un desafío para diferenciar esta clase durante el proceso de cartografía.

Palabras clave: Veredas; Cobertura vegetal; Impacto ambiental; Teledetección.

Introdução

O Cerrado é o segundo maior bioma do Brasil, com uma área que varia entre 1,8 e 2 milhões de km², o que representa aproximadamente 25% do território nacional. Em extensão, fica atrás apenas da Floresta Amazônica (Godoi; Beviláqua Marin, 2023). Mesmo sendo considerada como a savana mais biodiversa do mundo, o Cerrado ainda não recebe a devida atenção por parte das autoridades governamentais no que diz respeito à preservação ambiental. Em detrimento disso, o foco maior continua voltado aos programas de combate ao desmatamento em regiões com reconhecimento internacional, como a Amazônia e a Mata Atlântica (Fernandes; Pessoa 2011; Sano *et al.*, 2019b).

Em um contexto geral, as fitofisionomias presentes no Cerrado compreendem formações florestais, savânicas e campestres. As formações florestais podem ser classificadas em mata ciliar, mata de galeria, mata seca e cerradão. As formações savânicas englobam o cerrado sentido restrito, o parque de cerrado, o palmeiral e a vereda. Já as formações campestres subdividem-se em campo sujo, campo rupestre e campo limpo. (Ribeiro; Walter, 1998).

Esse bioma é composto por um complexo vegetacional, dividido em singulares fitofisionomias que se diferem uma das outras de acordo com fatores locais, como a composição do solo, o clima e a geomorfologia (Eiten, 1994). Nesse contexto, as veredas são inseridas como um ecossistema caracterizado por solos hidromórficos, argilosos, geralmente orgânicos e quase sempre com a presença de buritizais e florestas estacionais arbóreas, configuradas nas depressões dos chapadões e áreas periféricas (Ferreira, 2005).

Ribeiro; Walter (1998), afirmam que as veredas são comunidades hidrófilas formadas por dois estratos: um herbáceo-graminoso, que ocupa a maior parte da área, e outro arbóreo-arbustivo, com o predomínio de indivíduos da palmeira arbórea *Mauritia Flexuosa* L. f., conhecida também como buriti.

A formação das veredas está relacionada a três fatores fundamentais: primeiramente, à presença de uma superfície de aplainamento; em seguida, à sobreposição de camadas geológicas litificadas, sendo a superior permeável e a inferior impermeável; e, por fim, à existência de um nível de base local (Boaventura, 2007). Dessa forma, a superposição de camadas geológicas litificadas favorece o afloramento do lençol de água em toda a extensão da vereda.

As veredas desempenham um papel fundamental no equilíbrio hidrológico dos cursos d'água no ambiente do cerrado, pois constituem um sistema represador de água armazenada na chapada. Além disso, são responsáveis pela manutenção e multiplicação da fauna terrestre e aquática. Devido a essa relevância, as veredas são protegidas por leis específicas que tratam da conservação das Áreas de Preservação Permanente - APP (BRASIL, 2002).

Segundo Freitas; Maciente (2016), a expansão da fronteira agrícola no Cerrado tem comprometido a capacidade e resistência desse ecossistema. Diversas alterações no uso e cobertura da terra ocasionam a degradação do bioma e se estende para o ambiente frágil das veredas. Com isso, a delimitação desse subsistema exige técnicas mais precisas frente a aplicação de políticas voltadas ao planejamento ambiental.

A definição dos limites das veredas está ancorada na lei 12.651 de 25 de maio de 2012 (Código Florestal Brasileiro), a qual indica a faixa marginal da vereda em uma largura mínima de 50 metros, a partir do espaço permanentemente brejoso e encharcado (BRASIL, 2012). Conforme Freitas (2018) há muitas divergências sobre o entendimento da faixa legal de preservação desse subsistema, sobretudo, em relação ao espaço permanentemente brejoso e encharcado determinado em lei.

Mesmo com legislações específicas que asseguram sua proteção, as veredas constituem ambientes fragilizados pela ação humana, especialmente por práticas inadequadas de manejo e uso dos seus recursos (Alencar-Silva, 2007). Algumas formas de degradação encontradas nesse ambiente incluem a construção de barragens para irrigação de projetos agrícolas, o uso das áreas de várzeas como estradas naturais, a abertura de novas estradas com o uso de tratores sem planejamento, promovendo assim o assoreamento das zonas encharcadas (Guimarães; Araújo; Corrêa, 2002).

Melo (2008), lista outros fatores como: plantio de eucalipto até as margens da zona encharcada, comprometendo as condições estruturais. As regiões de gramíneas, muitas vezes, são utilizadas como área de pasto. Essa prática gera a compactação do solo pelo pisoteio do gado e contribui para a degradação da vegetação natural. O voçorocamento, em sentido perpendicular ou longitudinal à vereda, tem sido outra forma de impacto, com degradação completa dos solos. Outro fator de grande ameaça ao subsistema vereda são as queimadas. A concentração de matéria orgânica provoca a

propagação do fogo com maior rapidez, proporcionando a destruição da flora e da fauna desses ambientes (Hunter Junior, 1996).

Diante disso, estudos voltados para essa temática são essenciais para o desenvolvimento de estratégias que visem mitigar os impactos causados nesses subsistemas úmidos. Nas últimas décadas, imagens de sensoriamento remoto têm sido amplamente utilizadas na identificação e no monitoramento da vegetação, especialmente imagens ópticas de média resolução espacial, que permitem obter informações espectrais da cobertura vegetal em extensas áreas da superfície terrestre. Com o objetivo de identificar esse dinamismo ambiental, o arcabouço técnico oferecido pelas geotecnologias, como o sensoriamento remoto, representa uma alternativa viável para a delimitação e o monitoramento de ecossistemas em diferentes escalas espaciais e temporais.

Desse modo, a incorporação de dados de radar e de índices espectrais em métodos de classificação supervisionada contribui significativamente para a ampliação da capacidade discriminatória dos elementos que compõem a superfície terrestre. Nesse contexto, destaca-se o uso do método não paramétrico Árvore de Decisão (*Decision Tree*), reconhecido por seu elevado desempenho e acurácia na classificação de conjuntos de dados heterogêneos, especialmente quando integrados a informações provenientes de múltiplas fontes de dados geoespaciais (Gong *et al.*, 2011).

Clemente; Moreira (2023), destacam a eficiência do método Árvore de Decisão para discriminar diferentes componentes espaciais a partir dos valores oriundos de índices de vegetação no processo de separação das classes em feições geomorfológicas. Silva Júnior; Moraes (2020), utilizando dados do satélite Landsat-8, aplicaram o método de classificação por Árvore de Decisão para detecção de áreas queimadas, com base em limiares obtidos a partir do Índice de Queima Normalizada (NBR) e da Temperatura da Superfície.

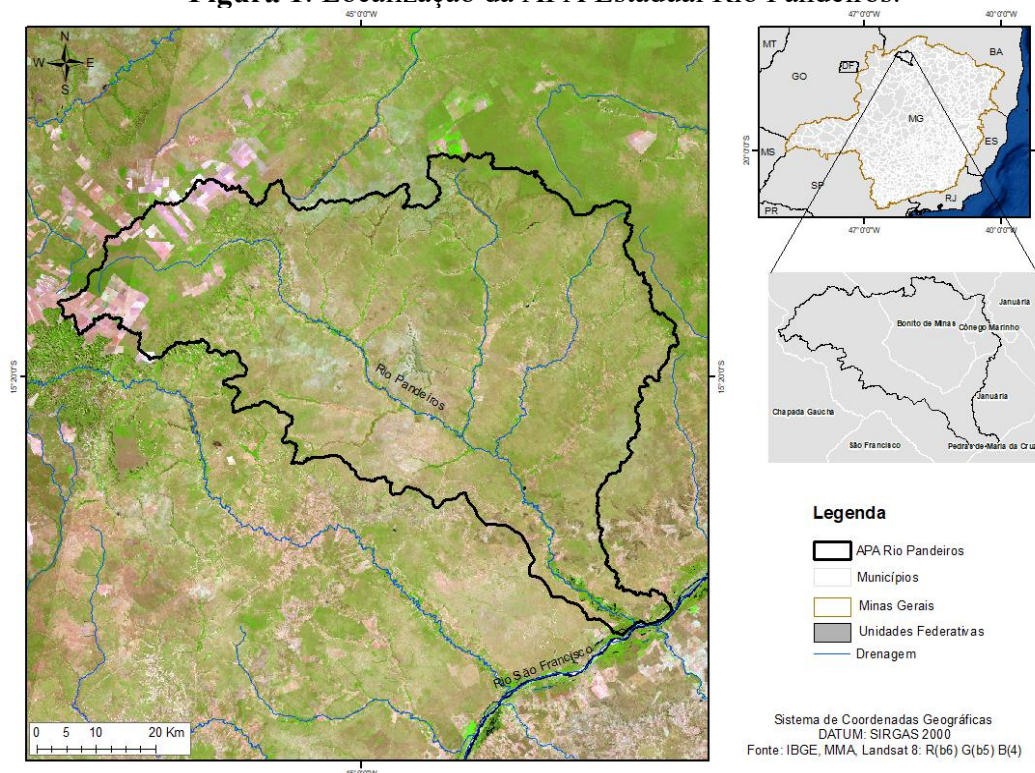
Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar a dinâmica espaço-temporal das áreas de entorno das veredas na Área de Proteção Ambiental (APA) Rio Pandeiros, nos anos de 2015 e 2023. Para tal, delimitou-se uma zona de influência (*Buffer*) de 500 metros ao longo dos principais canais de drenagem. O mapeamento do uso e cobertura da terra foi realizado por meio do método de Árvore de Decisão, utilizando como insumos imagens ópticas, índices espectrais e variáveis topográficas. Essa

abordagem permitiu distinguir as veredas dos demais elementos naturais e antrópicos presentes na paisagem.

Caracterizações da Área de Estudo

A Área de Proteção Ambiental (APA) Rio Pandeiros (Figura 1) está localizada no extremo norte do estado de Minas Gerais, entre as coordenadas 15°02'50" e 15°43'38" de latitude sul, e 45°17'26" e 44°37'29" de longitude oeste. Criada pela Lei nº 11.901, de 1º de setembro de 1995, essa unidade de conservação possui uma área estimada em 393.060 hectares, abrangendo os municípios de Januária, Bonito de Minas e Cônego Marinho (Nunes et al., 2009). A APA compreende, ainda, toda a bacia hidrográfica do Rio Pandeiros, integrando a margem esquerda da macrobacia do Rio São Francisco.

Figura 1: Localização da APA Estadual Rio Pandeiros.



Fonte: IBGE (2023), MMA (2024), Landsat/OLI R(b6) G (5) B (6). Elaborado pelos autores 2025.

Administrada pelo Instituto Estadual de Florestas (IEF-MG), a criação da APA Rio Pandeiros tem como finalidade a proteção dos mananciais e campos alagadiços, bem como das áreas de reprodução e desenvolvimento da ictiofauna. Para isso, a área do

pântano foi incorporada à unidade e transformada em Refúgio da Vida Silvestre por meio do Decreto nº 43.910, de 5 de novembro de 2004 (MINAS GERAIS, 2004).

No contexto climático, destaca-se o clima Tropical Subúmido-Úmido, situado próximo à transição com o Subúmido-Seco, com chuvas concentradas entre os meses de outubro e março. Os meses de novembro, dezembro e janeiro são os mais chuvosos, enquanto o período mais seco ocorre entre junho e agosto (Nimer; Brandão, 1989). Quanto à geologia da APA, sobressaem as formações dos grupos Bambuí, Urucuia e Areado, de gênese metassedimentar (IGA, 2006).

No contexto geomorfológico, a área é caracterizada por superfícies aplainadas, vales rasos e morros residuais isolados, típicos da Depressão Periférica do São Francisco, moldada por processos de desnudação causados pela drenagem, sobre ardósias, metassiltitos e calcários (Ross, 2006). Considerada uma região de transição entre os biomas Caatinga e Cerrado, a vegetação predominante na APA é o cerrado, com variações das seguintes fitofisionomias: cerrado denso, cerrado típico, cerrado ralo, vereda, floresta decídua (também conhecida como mata seca) e floresta semidecídua (Scolforo *et al.*, 2006).

Conforme o mapa de solos do estado de Minas Gerais, predominam na APA os seguintes tipos de solos, associados às fases do relevo e da vegetação: **LVAd1** – Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico, com horizonte A moderado, textura argilosa, fase Cerrado, em relevo plano a suavemente ondulado; **LVAd12** – Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico, com horizonte A fraco a moderado, textura média, associado ao Neossolo Quartzarênico órtico típico, também com horizonte A fraco a moderado, ambos em fase Caatinga hipoxerófila e relevo plano a suavemente ondulado; e **GMd1** – Gleissolo Melânico distrófico típico, com horizonte A proeminente, predominante nas áreas de veredas, em relevo plano (CETEC; FEAM; UFV; UFLA, 2010).

Nessa perspectiva, destaca-se que a APA Rio Pandeiros, ancorada no arcabouço legal nacional, constitui uma das categorias de Unidades de Conservação (UCs) previstas pela Lei nº 9.985/2000, que instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC) (BRASIL, 2000). Essa legislação foi posteriormente regulamentada pelo Decreto nº 4.340/2002. Legalmente, as APAs são classificadas como Unidades de Conservação de Uso Sustentável, o que permite a presença de populações humanas e a

exploração dos recursos naturais, desde que realizada de forma sustentável. Seu objetivo central é conciliar a conservação da biodiversidade com o uso racional desses recursos.

A criação das APAs ocorre por ato do Poder Público, nas esferas federal, estadual ou municipal, e sua gestão requer a elaboração de um plano de manejo, além da constituição de um conselho gestor com participação efetiva da sociedade civil. Nesse sentido, a APA Rio Pandeiros assume especial relevância no contexto do semiárido mineiro, pois pode contribuir significativamente para a mitigação da degradação ambiental em áreas caracterizadas por elevada vulnerabilidade ecossistêmica, como é o caso das veredas.

Procedimentos metodológicos

Na realização deste estudo, optou-se, inicialmente, por um levantamento bibliográfico acerca do subsistema vereda, com o objetivo de subsidiar o referencial teórico, bem como as etapas de campo e de laboratório. A etapa seguinte consistiu na aquisição de imagens orbitais, conforme detalhado a seguir:

- Imagens do sensor *Operational Land Imager (OLI)*, do satélite Landsat-8, referentes às órbitas/ponto 219/071, correspondentes às datas de 06/08/2015 e 03/07/2023. As imagens foram obtidas na plataforma Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Para garantir maior coerência na análise da cobertura vegetal arbóreo-arbustiva, optou-se por imagens captadas durante a estação seca.
- Modelo Digital de Elevação (MDE) oriundos do projeto TOPODATA, disponibilizados gratuitamente no endereço: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>. Os dados foram interpolados para resolução de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 metros), referentes às folhas cartográficas 15s45 e 15s46.

Nessa etapa, as imagens adquiridas foram submetidas a técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI). O primeiro passo consistiu na conversão dos números digitais (DN) em valores de radiância para cada banda das imagens *OLI*. Em seguida, com base nas imagens resultantes dessa conversão, foram gerados os índices de vegetação, os quais têm como objetivo realçar as propriedades espectrais da vegetação, principalmente nas regiões do visível e do infravermelho do espectro eletromagnético. Para isso, aplicaram-se, nas bandas correspondentes dos sensores *OLI*, os cálculos dos seguintes índices:

NDVI, SAVI, EVI, NDWI e NDBI por meio da ferramenta *Band Math* presente no *software* ENVI.

Além dos índices de vegetação, foram aplicados o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) e a Transformação por Componentes Principais (TCP) às imagens resultantes da correção radiométrica. O primeiro consistiu na criação de um modelo para gerar imagens-fração correspondentes às classes de vegetação, solo e água. Para isso, utilizaram-se as bandas 6, 5 e 4 do sensor OLI na implementação do MLME. Ressalta-se que a imagem de erro gerada pelo modelo não foi considerada na análise, uma vez que os erros identificados foram considerados irrelevantes para a interpretação dos dados relacionados ao ambiente de vereda.

O passo seguinte fundamentou-se na aplicação da Transformação por Componentes Principais (TCP), utilizando as bandas do vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio. Para isso, antes da execução da transformação, foram analisadas as estatísticas das bandas por meio da janela “Parâmetros dos Componentes Principais”. Com base na análise das contribuições espectrais de cada banda nas porções de pixels selecionados na imagem, a transformação foi realizada, resultando na geração da primeira, segunda e terceira componentes principais.

Construção da zona de influência (Buffer) de 500 metros

A partir do conhecimento prévio sobre o comportamento espacial das veredas, obtido por meio da literatura e complementado pelas observações realizadas durante o trabalho de campo, foi possível identificar, *in loco* (Figura 2), a vereda como um ambiente úmido que acompanha a linha de drenagem.

Figura 2: Vereda Amescla, subsistema que acompanha a linha de drenagem.



Fonte: autores, 2025.

Nessa perspectiva, optou-se pela construção de uma máscara correspondente a uma zona de influência com afastamento estimado de 500 metros a partir das linhas de drenagem, com o objetivo de auxiliar no processo de delimitação e mapeamento das veredas na APA Rio Pandeiros. Para isso, foi utilizado o arquivo vetorial de drenagem disponibilizado pela plataforma da Infraestrutura Estadual de Dados Espaciais (IEDE) (<https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>). Em seguida, foi delimitada, por meio de parâmetros no software QGIS 3.16, uma zona com 500 metros de largura a partir de cada margem da rede de drenagem, totalizando uma faixa de 1.000 metros de extensão transversal, considerada suficiente para abranger as áreas de veredas.

Além das etapas de laboratório descritas anteriormente, foram realizadas três campanhas de campo na área de estudo, com o objetivo de conhecer o contexto espacial do subsistema vereda, bem como coletar dados de referência representativos da verdade terrestre. Nessas visitas, foram analisados os diferentes usos e tipos de cobertura da terra.

O procedimento adotado seguiu os seguintes passos: inicialmente, era registrado o ponto de coordenada referente a cada uso observado, com o auxílio de um receptor de Sistema de Posicionamento Global (GPS). Em seguida, eram anotadas em caderno de

campo a descrição visual, a altitude associada e outras informações relevantes para o processo de classificação em laboratório.

Além disso, seguindo as recomendações propostas por Lillesand e Kiefer (1994), atentou-se para a importância de adquirir o maior número possível de amostras em diferentes pontos da área de estudo. Para isso, foi adotado o critério de espaçamento mínimo de 500 metros, conforme definido pela zona de interesse ao longo da margem da vereda.

Classificação supervisionada por árvore de decisão

Com base nos resultados da etapa anterior, recorreu-se ao algoritmo Árvore de Decisão (*Decision Tree*), método supervisionado de classificação empregado neste estudo, com o objetivo de obter uma distinção mais refinada das classes na zona de influência do subsistema vereda. Para isso, utilizou-se a interface *Classification > Decision Tree > New Decision Tree*, no software ENVI 5.5. No primeiro nó de decisão binário (raiz), a máscara de 500 metros (zona de influência) foi configurada como a primeira variável de entrada.

Dessa forma, nas etapas subsequentes (nós-folhas), foi possível introduzir diversas variáveis, independentemente do tamanho, ou seja, extrapolando ou não o limite definido pelo atributo do nó raiz. Na Tabela 1 estão listadas as 11 variáveis utilizadas para a classificação do uso e cobertura da terra na zona de influência das veredas da APA Rio Pandeiros, com seus respectivos nomes, equações e limiares associados, que subsidiaram o processo de classificação supervisionada por Árvore de Decisão no ano de 2023. Com o objetivo de monitorar a dinâmica do uso e cobertura da terra, optou-se por empregar as mesmas variáveis para o ano de 2015; no entanto, os limiares médios foram ajustados em função das diferenças nos níveis digitais observados nas imagens dos respectivos anos.

Tabela 1 - Variáveis utilizadas na construção do modelo de árvore de decisão.

Variável	Nome	Equação
(B11)	Mask	(B11) EQ 0
(B12)	NDVI	(B12) GE - 0.75
(B13)	SAVI	(B13) GE -1.85
(B14)	MLME solo	(B14) GE 0.88
(B21)	NDWI	(B21) GE - 0.59
(B23)	EVI	((B23) LE -0.50
(B24)	MLME veg	(B24) GE 0.70
(B27)	TCP1	(B27) LE 0.17
(B30)	NDBI	(B30) LE 0.15
(B33)	TCP2	(B33) LE 0.19
(B34)	Altimetria	(B34) LT 710

Elaboração: autores, 2024.

A variável MASK corresponde à zona de influência de 500 metros. No que tange ao Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME), as variáveis de entrada utilizadas na Árvore de Decisão foram MLME veg e MLME solo, correspondentes, respectivamente, aos modelos de vegetação e solo. Já as variáveis TCP1 e TCP2 derivam da Transformação por Componentes Principais (PCA). Além dessas variáveis, a árvore de decisão também incluiu os índices de vegetação — NDVI, SAVI, NDWI, NDBI e EVI — obtidos a partir do sensor OLI, bem como dados altimétricos provenientes do modelo SRTM-TOPODATA.

Quanto às equações inseridas na árvore de decisão, apresentadas na Tabela 1, os operadores relacionais utilizados para expressar as condições de divisão nos nós foram: **EQ** (*Equal to*): igual a (=); **GE** (*Greater than or Equal to*): maior ou igual a (\geq); **LE** (*Less than or Equal to*): menor ou igual a (\leq); e **LT** (*Less Than*): menor que (<). Ressalta-se que os limiares adotados na classificação foram definidos com base na média dos valores dos pixels de cada variável envolvida. Esse procedimento possibilitou estabelecer critérios representativos para a separação das classes, principalmente no que se refere às características espectrais e ambientais analisadas.

Com o objetivo de distinguir com maior precisão a classe *veredas* das demais, recorreu-se à rotina de classificação por Árvore de Decisão. Para isso, utilizou-se uma combinação de 11 atributos, conforme detalhado nos procedimentos metodológicos, com a finalidade de discriminar as seguintes classes:

- Água (referentes aos corpos hídricos);

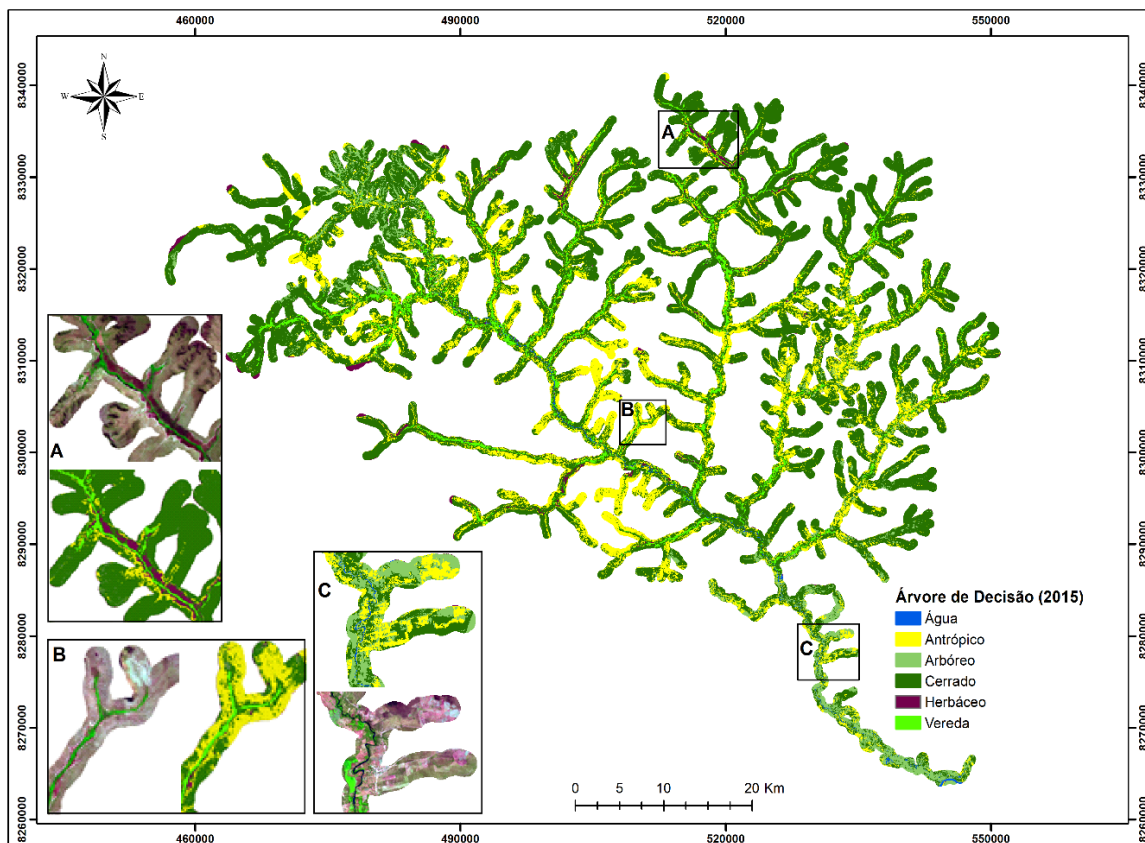
- Antrópico (abrangendo pastagem, pastagem degradada, solo exposto, silvicultura do eucalipto e atividades agrícolas);
- Arbóreo (árvores de maior porte presentes no ambiente de vereda);
- Cerrado;
- Herbáceo (gramíneas e outras espécies que se desenvolvem próximas ao solo no ambiente de vereda);
- Vereda.

Após os procedimentos descritos, a classificação foi executada de forma interativa por meio do algoritmo Árvore de Decisão. A escolha pelo método supervisionado da Árvore de Decisão (*Decision Tree*), de natureza determinística (não paramétrica), em detrimento dos métodos probabilísticos (paramétricos), baseou-se na sua capacidade de discriminar diferentes extratos vegetais na área de estudo. Métodos paramétricos calculam a probabilidade estatística de um determinado pixel pertencer a cada classe, o que pode levar à inclusão de distintos elementos espaciais em uma mesma categoria. A Árvore de Decisão, por outro lado, tende a apresentar desempenho mais satisfatório ao incorporar diversas variáveis na distinção dos elementos espaciais (Pal; Mather, 2003).

Resultados e discussão

A Figura 3 apresenta o resultado da classificação para o ano de 2015. Observa-se que, na área destacada pela letra (A), o modelo obteve um desempenho espacialmente satisfatório na identificação do subsistema vereda da APA Rio Pandeiros. Ou seja, a vereda acompanha a linha de drenagem e é circundada pelo cerrado *lato sensu*. Destacam-se ainda a presença do extrato herbáceo e áreas sem cobertura vegetal, resultado de ações antrópicas. Essa região, localizada ao norte da bacia hidrográfica do Rio Pandeiros, apresentou, em 2015, um ambiente mais preservado em comparação com as condições observadas em 2023.

Figura 3: Resultado da classificação utilizando o classificador Árvore de Decisão para o ano de 2015. A – Detalhe da região do alto Pandeiros. B - Detalhe da área do médio Pandeiros (vereda Amescla) e C – Detalhe da área classificada ao longo do rio Pandeiros - Imagem Landsat-8 (composição colorida: R (6); G (5); B (4)).



Fonte: autores, 2024.

Na vereda Amescla, área destacada pela letra (B), a classificação indica uma região em que o componente antrópico foi mais atuante. Mesmo com a cobertura vegetal da vereda em evidência, observa-se a ausência do extrato herbáceo e a conversão do cerrado, em estágio de regeneração recente, para outros usos antrópicos, como a pastagem. A região representada pela letra (C) constitui um exemplo do potencial do algoritmo Árvore de Decisão em distinguir ambientes com características espectrais semelhantes, mas com tipologia vegetal ou porte arbóreo distintos.

Esse é o caso do uso da variável altimetria, ao se determinar um limiar abaixo de 500 metros de altitude para a ocorrência da classe Arbóreo, relativa à Floresta Estacional Semidecidual, a jusante do rio Pandeiros. Comprova-se, assim, a facilidade de combinar outras variáveis espaciais para delimitar classes de forma intuitiva por meio do classificador.

As estatísticas da matriz de confusão (Tabela 2) indicam uma acurácia total de 95% para a classificação referente ao ano de 2015. Ainda que o coeficiente Kappa tenha alcançado 94,3% — valor considerado excelente, segundo Landis e Koch (1977) —, a classe Herbáceo apresentou desempenho inferior, com acurácia abaixo de 40%. Esse resultado evidencia a necessidade de maior atenção na diferenciação espectral das vegetações de porte mais rasteiro, caracterizadas pela ausência de arbustos e árvores.

Nesse contexto, o extrato herbáceo ocupou uma área de 19,1 km², o que corresponde a 1,3% da zona de influência das veredas. Apesar desse desempenho limitado, tal constatação não compromete a distinção da classe Vereda, foco principal do estudo, embora indique a necessidade de procedimentos mais específicos para uma melhor discriminação desse componente espacial.

Tabela 2 - Estatísticas relativas à acurácia da classificação da árvore de decisão para o ano de 2015

Classe	Amostra (n)	Usuário (%)	Água	Antrópico	Arbóreo	Cerrado	Herbáceo	Vereda
Água	20	100	20	0	0	0	0	0
Antrópico	65	95.4	2	62	0	0	1	0
Arbóreo	33	84.8	2	0	28	1	2	0
Cerrado	78	95	1	0	1	74	2	0
Herbáceo	39	97	1	0	0	0	38	0
Vereda	50	100	0	0	0	0	0	50
Total	285		26	62	29	75	43	50
Produtor (%)			0.12	100	86.8	99.6	36.1	100

Sucesso Total = 95 %

Kappa = 94.3 %

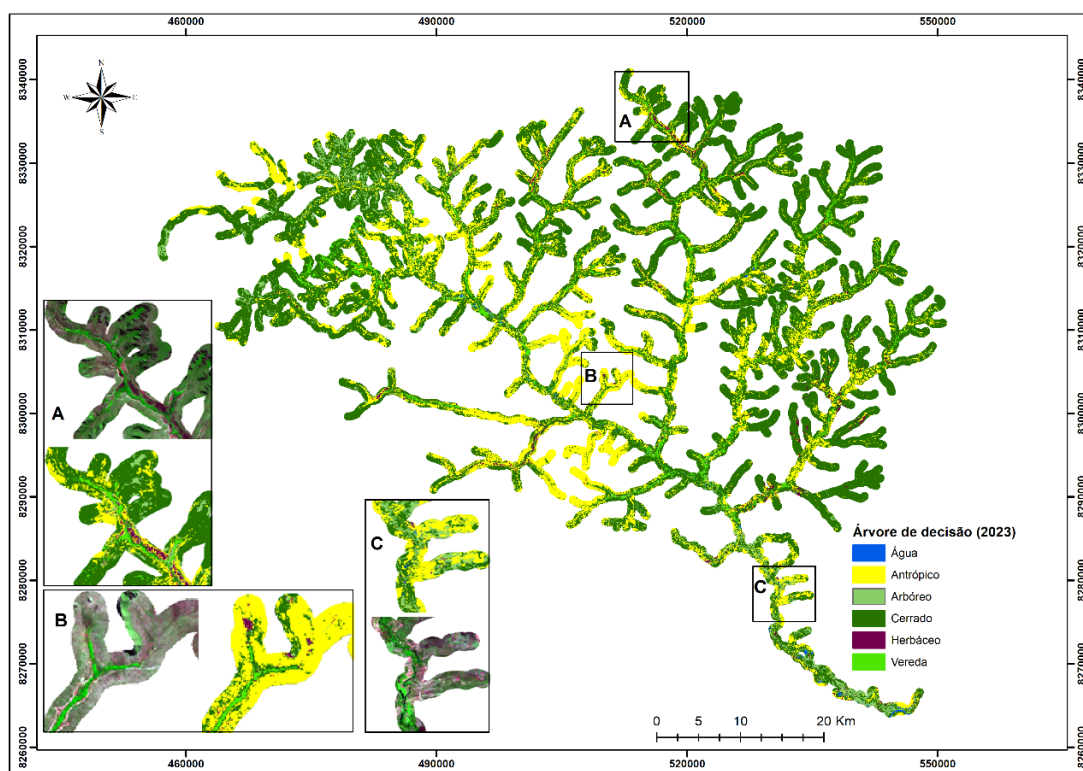
Fonte: autores, 2024.

Em 2015, a classe Cerrado, com 986 km² (cerca de 65,8% da área), foi a vegetação predominante na zona de influência da vereda. Na diferenciação da vegetação, a classe Arbóreo apresentou um quantitativo de 99,3 km², o que representa 6,7% da área. Essa classe se refere às árvores superiores, condizentes com a faixa de altura que diferencia as florestas (especialmente aquelas que margeiam os cursos d'água) do cerrado *lato sensu*.

A classe Vereda representou 5,1% da área, com cerca de 77,2 km². Já as áreas antrópicas ou em estágio de regeneração somaram 311,5 km², o que equivale a 20,7% da área. O componente antrópico em questão refere-se à pastagem, a áreas degradadas em estágio de recuperação (sobretudo em virtude de queimadas), finalidades agrícolas e outros usos, como infraestrutura urbana, em menor grau.

A Figura 4 apresenta o resultado da classificação para o ano de 2023. No que concerne às áreas em destaque, aquelas indicadas pelas letras (A), (B) e (C) demonstram uma maior atuação do componente antrópico, quando comparadas à classificação de 2015. De fato, observou-se um aumento no quantitativo dessa classe: de 20,8% para 25,5%, o que representa um acréscimo de aproximadamente 68,5 km² entre 2015 e 2023. Na área destacada pela letra (A), constata-se também a diminuição do extrato herbáceo, embora não tenha havido mudança substancial de área nos resultados obtidos para os dois anos, mantendo-se em 1,3%, ou 18,9 km², da zona de influência da vereda.

Figura 4: Resultado da classificação utilizando o classificador Árvore de Decisão para o ano de 2023. A – Detalhe da região do alto Pandeiros. B - Detalhe da área do médio Pandeiros (vereda Amescla) e C – Detalhe da área classificada ao longo do rio Pandeiros - Imagem Landsat-8 (composição colorida: R (6); G (5); B (4)).



Fonte: autores, 2024.

Conforme a Tabela 3, a estatística da matriz de confusão para a classificação de 2023 indica um coeficiente Kappa de 95,7%. No entanto, a classe Herbáceo, assim como no resultado do ano de 2015, obteve uma acurácia de classificação inferior às demais, o que denota um componente a ser ajustado em futuras análises.

Tabela 3 - Estatísticas relativas à acurácia da classificação da árvore de decisão para o ano de 2023

Classe	Amostra (n)	Usuário (%)	Água	Antrópico	Arbóreo	Cerrado	Herbáceo	Vereda
Água	15	100	15	0	0	0	0	0
Antrópico	93	96.7	0	90	0	0	3	0
Arbóreo	40	95	0	0	38	1	1	0
Cerrado	102	96.7	0	1	2	98	1	0
Herbáceo	15	100	0	0	0	0	15	0
Vereda	20	100	0	0	0	0	0	20
Total	285		15	91	40	99	20	20
Produtor (%)			100	97.6	90.1	99.5	67.2	100
Sucesso Total = 96,4 %			Kappa = 95.7 %					

Fonte: autores, 2024.

A Tabela 4 apresenta as mudanças ocorridas no uso e cobertura da terra entre os anos de 2015 e 2023. No que se refere às classes de vegetação natural, o cerrado foi a que apresentou menor redução de área em comparação às demais, com uma perda aproximada de 13,7 km². A classe Arbóreo sofreu uma diminuição significativa, passando de 99,3 km² em 2015 para 71,2 km² em 2023, o que representa uma perda de 28,1 km². Já a classe Vereda também apresentou decréscimo, reduzindo-se de 77,2 km² para 53,3 km², totalizando uma perda de 23,9 km².

Tabela 4: Área e percentual de cobertura e uso da terra na área de influência da Vereda

Classe	Área (2015) (km ²)	(2015) %	Área (2023) (km ²)	(2023) %
Cerrado	986,0	65,8	972,3	64,7
Antrópico	311,5	20,8	380,0	25,3
Arbóreo	99,3	6,6	71,2	4,7
Vereda	77,2	5,2	53,3	3,6
Herbáceo	19,2	1,3	18,9	1,3
Água	5,6	0,4	3,0	0,2
Total	1498,8	100,0	1498,8	100,0

Fonte: autores, 2024.

Como se observa na zona de influência da vereda, no que se refere à cobertura vegetal, o cerrado predomina, seguido pela classe “Arbóreo”, representada por florestas decíduais ou semidecíduais, as quais estão concentradas, em sua maioria, a montante e a jusante da bacia hidrográfica do rio Pandeiros.

Mesmo ocupando a terceira posição em termos percentuais, a classe Vereda compreende uma formação de suma importância, pois acompanha os cursos d’água em uma região semiárida. As veredas estão imediatamente interligadas a espaços com vegetação rasteira, mais propensos a processos de degradação antrópica. Por sua vez, esse

espaço, representado pela classe Herbácea, foi o que apresentou menor desempenho na classificação, devido à semelhança espectral com solos expostos ou com diferentes estágios sucessionais de vegetação secundária — fator que corrobora os processos graduais de mudança promovidos pela atuação antrópica.

A classe “Antrópico” ocupa a segunda posição em representatividade de área na zona de influência das veredas, tanto no ano de 2015 quanto em 2023. A classe “Água” também foi classificada com o objetivo de se obter um mapeamento mais coerente com a área analisada. No entanto, mesmo com o foco da pesquisa direcionado ao componente vegetal, observa-se um decréscimo da área da classe “Água”: de aproximadamente 5,6 km² em 2015 para 3 km² em 2023. Destaca-se que, assim como a classe “Herbáceo”, a classe “Água” também requer ajustes metodológicos para análises mais assertivas.

Os resultados aqui apresentados corroboram estudos anteriores, como os de Neves (2011), Almeida (2016), Silva (2022) e Sales *et al.* (2023), os quais também identificaram impactos antrópicos nas proximidades das veredas da APA Pandeiros. Nesses trabalhos, foram observados fatores como incêndios florestais, pastagens resultantes da pecuária extensiva e assoreamento dos cursos d’água, elementos que têm contribuído para a descaracterização desse ambiente, reconhecidamente frágil e sensível a alterações antrópicas.

Considerações finais

Os resultados obtidos por meio do classificador Árvore de Decisão demonstraram ser mais robustos do que aqueles derivados de técnicas estatísticas convencionais, como os algoritmos paramétricos. Observa-se que, devido à sua capacidade de processamento em múltiplas etapas, o algoritmo permitiu a incorporação de diferentes variáveis na classificação de distintos extratos de vegetação.

Essa abordagem mostra-se particularmente eficaz em contextos nos quais os pixels apresentam respostas espectrais muito semelhantes, sendo, portanto, uma alternativa promissora para a separação de classes espacialmente distintas. No entanto, é importante destacar que o desempenho do método depende do conhecimento prévio do analista sobre os objetos mapeados, sendo a verificação em campo (*in loco*) essencial para uma interpretação precisa, especialmente em áreas com alto grau de fragmentação da paisagem.

Nesse cenário, o presente estudo teve como objetivo propor e aplicar uma metodologia voltada ao mapeamento das áreas de entorno das veredas na APA Pandeiros, considerando a vulnerabilidade desse subsistema frente às pressões antrópicas. Ainda que os resultados tenham alcançado um índice Kappa considerado excelente pela literatura, observou-se que, em algumas regiões, a classificação não refletiu plenamente a realidade. Isso se evidenciou, sobretudo, nos extratos de vegetação herbácea, cuja cobertura mais rasa e próxima ao solo dificultou a diferenciação adequada.

Apesar das limitações, os resultados relacionados à vegetação herbácea revelaram-se úteis para indicar a fragilidade ambiental nas áreas adjacentes às veredas. A análise temporal para os anos de 2015 e 2023 evidenciou um decréscimo nas áreas cobertas por vegetação natural. Tais conclusões reforçam a necessidade de medidas e ações efetivas voltadas à proteção e conservação das zonas imediatas às veredas, além de fornecer subsídios para futuras análises voltadas à caracterização desse ambiente de elevada relevância socioambiental.

Agradecimentos

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPQ) pelas bolsas de pesquisa. E a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro.

Referências

ALENCAR-SILVA, T. **Proposta metodológica para delimitação e classificação do ambiente de vereda utilizando imagens orbitais**. 2007. 87 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/MPBB-779G5T/1/alencar_silva_dissertacao.pdf. Acesso em: 26 jan. 2025.

ALMEIDA, J. W. L. **Métodos de sensoriamento remoto no mapeamento de veredas na APA Rio Pandeiros**. 2016. 130 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/IGCM-ADMP85/1/disserta_o_vers_o_final.pdf. Acesso em: 26 jan. 2025.

BOAVENTURA, R. S. **Veredas: berço das águas**. Belo Horizonte: Ecodinâmica, 2007.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 303**, de 20 de março de 2002. Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 13 maio 2002. Disponível em: https://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/20_12_2013_14.59.14.834f63ee467e90be10cdf563383b3ade.pdf. Acesso em: 5 jul. 2024.

BRASIL. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, §1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 19 jul. 2000. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm. Acesso em: 24 mai. 2025.

BRASIL. **Lei nº 12.651**, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 25 maio 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm. Acesso em: 5 jun. 2025.

CETEC; FEAM; UFV; UFLA. **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM, 2010.

CLEMENTE, C. M. S.; MOREIRA, A. A. M. Dinâmica da cobertura vegetal no semiárido baiano: um estudo de caso da Bacia Hidrográfica do Rio das Rãs. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 24, n. 91, p. 37–52, 2023. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCG249162327>.

EITEN, G. **Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas**. Brasília: UnB, 1994.

FERNANDES, P. A.; PESSOA, V. L. S. O cerrado e suas atividades impactantes: uma leitura sobre o garimpo, a mineração e a agricultura mecanizada. **Observatorium: Revista Eletrônica de Geografia**, Uberlândia, v. 3, n. 7, p. 19–37, out. 2011.

FERREIRA, I. M. **O afogar das veredas: uma análise comparativa espacial e temporal das veredas do Chapadão de Catalão (GO)**. 2003. 242 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2003.

FREITAS, C. J. **Análise de parâmetros morfométricos na identificação de áreas propícias à ocorrência de veredas**. 2018. 76 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

FREITAS, R. E.; MACIENTE, A. N. Culturas agrícolas líderes nas mesorregiões mais dinâmicas. **Radar da Tecnologia, Produção e Comércio Exterior**, n. 43, p. 63–74, fev. 2016. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6055/1/Radar_n43_culturas.pdf. Acesso em: 24 jan. 2024.

GODOI, E. L.; BEVILÁQUA MARIN, E. F. Vamos sujar o cerrado? Uma reflexão necessária. **Revista da Faculdade de Direito da UFG**, Goiânia, v. 47, n. 2, 2023. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/revfd/article/view/65551> . Acesso em: 24 jan. 2024.

GONG, B.; IM, J.; MOUNTRAKIS, G. An artificial immune network approach to multi-sensor land use/land cover classification. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 600–614, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.005> .

GUIMARÃES, A. J. M.; ARAÚJO, G. M.; CORRÊA, G. F. Estrutura fitossociológica em área natural e antropizada de uma vereda em Uberlândia, MG. **Acta Botanica Brasílica**, v. 16, n. 3, p. 317–329, jul./set. 2002.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/abb/a/FqWhFdYpBcRxr6PHMVr9xxy> .

Acesso em: 1 jul. 2025.

HUNTER JUNIOR, M. L. **Fundamentals of conservation biology**. USA: Blackwell Science, 1996.

IGA – INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS APLICADAS. **Áreas de proteção ambiental do Estado de Minas Gerais: demarcação e estudos para pré-zoneamento ecológico. APA Bacia do Rio Pandeiros**. Belo Horizonte: Governo do Estado de Minas Gerais, 2006. 271 p.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, Washington, v. 33, n. 1, p. 159–174, mar. 1977. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2529310> .

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 3. ed. United States of America: John Wiley & Sons, 1994. 1040 p.

MELO, D. R. Evolução das veredas sob impactos ambientais nos geossistemas Planaltos de Buritizeiro/MG. 2008. 341 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MPBB-7PCN62> . Acesso em: 5 dez. 2024.

MINAS GERAIS. **Decreto nº 43.910**, de 5 de novembro de 2004. Dispõe sobre a criação da Área de Proteção Ambiental - APA Estadual Rio Pandeiros. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/DEC/43910/2004/> . Acesso em: 5 dez. 2024.

NEVES, W. V. **Avaliação da vazão em bacias hidrográficas com veredas em diferentes estádios de conservação, na APA do Rio Pandeiros – MG**. 2011. 58 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2011.

NIMER, E.; BRANDÃO, A. M. P. M. **Balanço hídrico e clima da região do Cerrado**. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 169 p.

NUNES, Y. R. F. et al. Pandeiros: o Pantanal Mineiro. **MG. Biota**, v. 2, n. 2, p. 4–17, 2009. Disponível em: <https://periodicos.meioambiente.mg.gov.br/MB/article/view/53>. Acesso em: 2 jul. 2024.

PAL, M.; MATHER, P. M. Decision tree based classification of remotely sensed data. In: ASIAN CONFERENCE ON REMOTE SENSING – ACRS, 22., 2001, Singapore. **Anais...** Singapore: Asian Association on Remote Sensing, 2001. Disponível em: <https://acrs-aars.org/proceeding/ACRS2001/Papers/DPA3-05.pdf>. Acesso em: 24 maio 2025.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. (org.). **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina: Embrapa-CPAC, 1998. p. 89–166.

ROSS, J. L. S. **Ecogeografia do Brasil: subsídios para planejamento ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SALES, G. B. et al. Efeito da degradação sobre os atributos do solo em ecossistemas de veredas no cerrado de Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 43, 2023. DOI: <https://doi.org/10.4336/2023.pfb.43e202102190>.

SANO, E. E.; ROSA, R. R. T.; SCARAMUZZA, C. A. de M. et al. Land use dynamics in the Brazilian Cerrado in the period from 2002 to 2013. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00138>.

SCOLFORO, J. R. S.; CARVALHO, L. M. T. **Mapeamento e inventário da flora nativa e dos reflorestamentos de Minas Gerais**. Lavras: UFLA, 2006. 288 p.

SILVA, N. L. **Mudanças do uso e cobertura da terra e avaliação do potencial de impactos na Área de Proteção Ambiental do Rio Pandeiros – MG**. 2022. 130 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/47118>. Acesso em: 20 fev. 2025.

SILVA JÚNIOR, A. J.; MORAES, V. S. Análise de acurácia para o mapeamento de incêndios florestais em terras indígenas brasileiras utilizando classificação por árvore de decisão baseado em imagens OLI 0,85–11,0 µm. **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 1, n. 3, p. 12–28, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4584228>.

Recebido em 04 de fevereiro de 2025.

Aceito em 10 de setembro de 2025.

Publicado em 21 de outubro de 2025.