

GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO LEVANTAMENTO PEDOLÓGICO E À CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS NA REGIÃO DO CERRADO, DISTRITO FEDERAL, BRASIL

GEOTECHNOLOGIES APPLIED TO SOIL SURVEYS AND SOIL CLASSIFICATION IN THE CERRADO REGION, FEDERAL DISTRICT, BRAZIL

GEOTECNOLOGÍAS APLICADAS AL ESTUDIO PEDOLÓGICO Y A LA CLASIFICACIÓN DE SUELOS EN LA REGIÓN DEL CERRADO, DISTRITO FEDERAL, BRASIL

Roberto de Paula Pinto¹
Isaías da Silva Pereira²
Carlos Rodrigues Pereira³
Fábio Ferreira Dias⁴

RESUMO: Os levantamentos convencionais de solos envolvem atividades integradas de gabinete, campo, análises laboratoriais, interpretação pedológica e elaboração cartográfica, o que os torna onerosos e, em muitos casos, de difícil atualização espacial e temporal. Nesse contexto, o uso de geotecnologias tem se consolidado como alternativa promissora para o levantamento e a classificação de solos, especialmente quando associado à interpretação da paisagem e ao conhecimento pedológico. O presente estudo teve como objetivo realizar o levantamento pedológico e a classificação de solos por meio da integração de técnicas de geoprocessamento e critérios pedológicos, visando à elaboração de mapa de solos da região do Jardim Botânico de Brasília, Fazenda Água Limpa e áreas adjacentes pertencentes à Marinha, à Aeronáutica e ao IBGE, no Distrito Federal. Foram utilizadas imagens do satélite CBERS-4A, modelos digitais de elevação, informações de vegetação, material de origem e bases cartográficas obtidas em bases oficiais. O processamento espacial foi realizado no software QGIS. A acurácia do mapeamento digital foi avaliada por comparação com levantamento semidetalhado convencional preexistente, por meio do índice Kappa. O mapeamento obtido apresentou índice Kappa de 0,42 e concordância global aproximada de 80%, indicando desempenho satisfatório para a escala adotada. As classes predominantes foram Latossolos Vermelho-Amarelos e Neossolos Quartzarênicos, cuja distribuição espacial mostrou forte associação com relevo, vegetação e litologia. Os resultados evidenciam que as geotecnologias podem contribuir de forma consistente para o levantamento pedológico e a classificação de solos, desde que ajustadas às especificidades ambientais e à escala dos dados disponíveis, constituindo ferramenta com elevado potencial para o planejamento territorial, a avaliação da aptidão de uso e a gestão ambiental em áreas de Cerrado.

Palavras-chave: Classificação de Solos. Levantamento. Geoprocessamento.

¹Discente do curso de Mestrado em Engenharia de Biossistemas na Universidade Federal Fluminense.

²Coorientador. Professor Doutor do curso Engenharia de Biossistemas na Universidade Federal Fluminense.

³Professor Doutor do curso Engenharia de Biossistemas na Universidade Federal Fluminense.

⁴Orientador. Professor Doutor do curso Engenharia de Biossistemas na Universidade Federal Fluminense.

ABSTRACT: Conventional soil surveys involve integrated activities in the office, in the field, laboratory analyses, pedological interpretation, and cartographic mapping, which makes them costly and, in many cases, difficult to update spatially and temporally. In this context, the use of geotechnologies has established itself as a promising alternative for soil surveying and classification, especially when combined with landscape interpretation and pedological knowledge. The objective of this study was to conduct a pedological survey and soil classification by integrating geoprocessing techniques with pedological criteria, with the aim of producing a soil map of the region encompassing the Brasília Botanical Garden, the Água Limpa Farm, and adjacent areas belonging to the Navy, the Air Force, and the IBGE in the Federal District. CBERS-4A satellite imagery, digital elevation models, vegetation data, source material, and cartographic data obtained from official sources were used. Spatial processing was performed using QGIS software. The accuracy of the digital mapping was evaluated by comparing it to a preexisting conventional semi-detailed survey, using the Kappa index. The resulting map showed a Kappa coefficient of 0.42 and an overall agreement of approximately 80%, indicating satisfactory performance for the scale used. The predominant classes were Red-Yellow Latosols and Quartzarenic Neosols, whose spatial distribution showed a strong association with topography, vegetation, and lithology. The results demonstrate that geotechnologies can consistently contribute to soil surveying and soil classification, provided they are adapted to the specific environmental conditions and the scale of the available data, constituting a tool with high potential for land-use planning, land-use suitability assessment, and environmental management in Cerrado areas.

Keywords: Soil Classification. Survey. Geoprocessing.

RESUMEN: Este artículo ha analizado que los estudios convencionales del suelo implican actividades integradas de trabajo de oficina, trabajo de campo, análisis de laboratorio, interpretación edafológica y elaboración cartográfica, lo que los hace costosos y, en muchos casos, difíciles de actualizar tanto espacial como temporalmente. En este contexto, el uso de las geotecnologías se ha consolidado como una alternativa prometedora para el estudio y la clasificación de los suelos, especialmente cuando se combina con la interpretación del paisaje y los conocimientos edafológicos. El presente estudio tuvo como objetivo realizar el levantamiento edafológico y la clasificación de suelos mediante la integración de técnicas de geoprocésamiento y criterios edafológicos, con el fin de elaborar un mapa de suelos de la región del Jardín Botánico de Brasília, la Finca Água Limpa y las zonas adyacentes pertenecientes a la Armada, la Fuerza Aérea y el IBGE, en el Distrito Federal. Se utilizaron imágenes del satélite CBERS-4A, modelos digitales de elevación, información sobre la vegetación, material de origen y bases cartográficas obtenidas de fuentes oficiales. El procesamiento espacial se llevó a cabo con el software QGIS. La precisión de la cartografía digital se evaluó comparándola con un levantamiento semidetallado convencional preexistente, mediante el índice Kappa. El mapeo obtenido presentó un índice Kappa de 0,42 y una concordancia global aproximada del 80%, lo que indica un rendimiento satisfactorio para la escala adoptada. Las clases predominantes fueron los latosoles rojo-amarillos y los neosoles cuarzárenicos, cuya distribución espacial mostró una fuerte asociación con el relieve, la vegetación y la litología. Los resultados ponen de manifiesto que las geotecnologías pueden contribuir de manera consistente al levantamiento edafológico y a la clasificación de suelos, siempre que se adapten a las especificidades ambientales y a la escala de los datos disponibles, constituyendo una herramienta con un elevado potencial para la ordenación del territorio, la evaluación de la aptitud de uso y la gestión ambiental en las zonas del Cerrado.

Palabras clave: Clasificación de Suelos. Levantamiento. Geoprocésamiento.

I INTRODUÇÃO

O levantamento pedológico constitui uma das bases centrais para o planejamento do uso da terra, para a interpretação ambiental da paisagem e para a definição de estratégias de conservação e manejo dos recursos naturais. O conhecimento da distribuição espacial dos solos subsidia decisões técnicas relacionadas à aptidão agrícola, à conservação da água e do solo, ao zoneamento territorial, à recuperação de áreas degradadas e ao planejamento de obras e ocupações antrópicas (Embrapa, 2018; Lepsch, 2021). Apesar de sua importância, os levantamentos convencionais de solos ainda dependem de intensa atividade de campo, descrição morfológica, amostragem, análises laboratoriais e integração interpretativa de dados, o que frequentemente os torna lentos, caros e operacionalmente complexos, sobretudo em áreas extensas ou de difícil acesso. Essa limitação aparece claramente no texto-base deste estudo, que destaca o caráter moroso e oneroso dos levantamentos tradicionais e propõe o uso de geotecnologias como alternativa metodológica.

Nas últimas décadas, o avanço das geotecnologias tem ampliado significativamente a capacidade de observação, análise e interpretação espacial dos ambientes terrestres. Sensoriamento remoto, sistemas de informações geográficas, modelos digitais de elevação, álgebra de mapas e procedimentos de classificação digital passaram a integrar de modo cada vez mais consistente os estudos ambientais e agrários. No caso específico do solo, tais ferramentas permitem associar atributos da paisagem, como relevo, cobertura vegetal, rede de drenagem e material de origem, à distribuição espacial das classes pedológicas, contribuindo para o aperfeiçoamento do mapeamento digital de solos (Barbosa *et al.*, 2010; Dinamarca *et al.*, 2023). Essa abordagem não elimina a necessidade do raciocínio pedológico, mas potencializa sua capacidade de extrapolação espacial, reduzindo custos e aumentando a velocidade de geração de produtos cartográficos.

O uso de geotecnologias gratuitas em estudos de classificação temática tem mostrado resultados promissores em diferentes contextos. Duarte e Silva (2019), ao avaliarem o desempenho de três algoritmos na classificação de uso do solo a partir de bases gratuitas, destacaram que a qualidade do produto final depende da adequação entre o algoritmo empregado, a natureza da paisagem, a resolução espacial e a consistência da validação. Ainda que o foco desses autores não tenha sido especificamente o mapeamento pedológico, a conclusão é diretamente aplicável ao presente trabalho: o desempenho de qualquer classificação depende menos da automatização em si e mais da coerência metodológica entre

dados, escala, ambiente e objetivo analítico. De forma semelhante, Silva (2014), ao utilizar geotecnologias na delimitação e classificação do uso e ocupação do solo em áreas de matas ciliares no município de Alto Paraíso, Rondônia, demonstrou que o geoprocessamento pode subsidiar com elevada eficiência a discriminação espacial de unidades ambientais, desde que apoiado em critérios técnicos consistentes e em leitura integrada da paisagem.

A base conceitual para a utilização de geotecnologias no levantamento pedológico decorre da própria teoria dos fatores de formação do solo. Jenny (1941) formalizou o entendimento de que o solo resulta da interação entre clima, organismos, relevo, material de origem e tempo, estabelecendo uma lógica relacional entre o perfil pedológico e a paisagem. Tal perspectiva permanece central na pedologia moderna e é retomada pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, que reconhece a importância desses fatores na diferenciação e interpretação dos ambientes pedogenéticos (Embrapa, 2018). Em consequência, atributos observáveis por meio de imagens orbitais, modelos de relevo e bases temáticas tornam-se variáveis auxiliares relevantes para inferir a distribuição espacial de classes de solos, particularmente em ambientes tropicais com forte controle geomorfológico e vegetacional.

No contexto brasileiro, o Cerrado constitui um dos biomas mais importantes para estudos dessa natureza. Ocupando aproximadamente 24% do território nacional, o Cerrado apresenta alta diversidade de fitofisionomias, expressiva variabilidade de materiais de origem, mosaicos geomorfológicos amplos e intensa dinâmica de ocupação antrópica (Lewis *et al.*, 2022). Tal heterogeneidade ambiental torna esse bioma especialmente adequado ao uso de abordagens integradas entre pedologia e geotecnologias. Ao mesmo tempo, a pressão decorrente da expansão urbana, agropecuária e infraestrutural reforça a necessidade de instrumentos rápidos e tecnicamente consistentes para subsidiar o ordenamento territorial e a gestão sustentável dos recursos naturais.

No Distrito Federal, essa demanda é particularmente relevante. Mesmo em uma unidade federativa relativamente pequena, a distribuição dos solos apresenta forte variabilidade em função da interação entre superfícies aplainadas, bordas de chapadas, áreas dissecadas, formações hidromórficas e diferentes materiais litológicos. O reconhecimento dessa complexidade exige produtos cartográficos capazes de representar a organização espacial dos ambientes pedológicos com detalhamento compatível com as demandas de planejamento. No texto-base, essa limitação é explicitada ao se afirmar que o Distrito Federal não dispõe, em

toda a sua extensão, de mapeamentos detalhados de classificação de solos e de bases geológicas em escalas plenamente compatíveis com a gestão dos recursos naturais.

Além das bases cartográficas e temáticas, o estudo do solo exige referência a métodos analíticos e taxonômicos padronizados. O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos fornece a estrutura para a definição das classes até diferentes níveis categóricos (Embrapa, 2018), enquanto o Manual de Métodos de Análise de Solo descreve os procedimentos laboratoriais que sustentam a caracterização física, química e mineralógica das unidades pedológicas (Teixeira *et al.*, 2017). Ainda que o presente estudo tenha foco principal em interpretação espacial e geoprocessamento, esses referenciais permanecem fundamentais para dar solidez à inferência cartográfica e à coerência das unidades mapeadas.

Estudos anteriores desenvolvidos no Planalto Central reforçam a pertinência dessa abordagem. Barbosa *et al.* (2010) demonstraram que a relação entre geologia, geomorfologia e pedologia pode ser usada para modelar a distribuição dos solos no alto curso do Distrito Federal, destacando a utilidade da associação entre material de origem, posição na paisagem e evolução pedogenética. Em termos mais amplos, Lepsch (2021) salienta que os solos não se distribuem aleatoriamente no espaço, mas segundo padrões ditados por relevo, drenagem, litologia e tempo de intemperismo. No Cerrado, Ribeiro e Walter (2008) mostram que as fitofisionomias também refletem condições ambientais específicas, o que confere à vegetação valor indicativo na interpretação de ambientes pedológicos. Atwell *et al.* (2023) reforçam essa perspectiva ao discutirem a influência de fatores geomórficos do solo sobre padrões de vegetação, enquanto Kuzmin *et al.* (2019) evidenciam a importância dos gradientes ambientais na organização espacial das paisagens.

Nessa perspectiva, o mapeamento digital de solos não deve ser compreendido como simples automatização de classificações, mas como estratégia de integração entre leitura ambiental, critérios taxonômicos, análise espacial e validação comparativa. A qualidade dos resultados depende da escala dos dados utilizados, da coerência entre variáveis ambientais e classes pedológicas, da experiência interpretativa do pesquisador e da comparação com informações de referência. Por isso, a análise de acurácia, embora importante, deve ser interpretada com cautela. Foody (2020) chama atenção para limitações do índice Kappa na comparação de mapas temáticos, indicando que o valor numérico, isoladamente, não esgota a avaliação da qualidade cartográfica. Ainda assim, o índice permanece amplamente empregado como medida sintética de concordância entre classificações.

Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo realizar o levantamento pedológico e a classificação de solos por meio da integração de geotecnologias e interpretação pedológica, visando à elaboração de mapa de solos da região do Jardim Botânico de Brasília, Fazenda Água Limpa e áreas adjacentes, na escala de 1:25.000, com discriminação de classes até o segundo nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. O estudo parte da hipótese de que a integração entre relevo, vegetação, material de origem e imagens orbitais permite gerar um produto cartográfico coerente com a organização dos solos na paisagem do Cerrado do Distrito Federal.

2 MÉTODOS

O estudo foi realizado em área inserida no bioma Cerrado, abrangendo o Jardim Botânico de Brasília, a Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília e áreas adjacentes pertencentes à Marinha, à Aeronáutica e ao IBGE, localizadas na Região Administrativa de São Sebastião, Distrito Federal. Conforme descrito no texto-base, a região apresenta clima tropical sazonal, com quatro a seis meses de período seco e precipitação anual entre 1.200 e 1.800 mm, além de relevo típico do Planalto do Distrito Federal e cobertura vegetal predominantemente associada às diferentes fitofisionomias do Cerrado (IBGE, 2007).

6

A escolha da área de estudo justifica-se por três razões principais. A primeira é sua relevância ambiental, uma vez que reúne áreas protegidas, unidades de pesquisa e remanescentes expressivos de vegetação nativa. A segunda é sua importância científica, já que se trata de ambiente onde há interação entre relevo, vegetação, hidrografia e material de origem em escalas espacialmente expressivas para a pedologia. A terceira razão é a existência de levantamento semidetalhado convencional anterior, o que permite comparar o produto gerado por geotecnologias com um referencial cartográfico já consolidado (Cavedon; Sommer, 1990).

Foram utilizadas imagens digitais do satélite CBERS-4A, sensor WPM, adquiridas em 27 de junho de 2022, com resolução espacial de 8 m, fusionadas com a banda pancromática para obtenção de produto com resolução de 2 m. A composição colorida RGB 4-3-2 foi adotada por apresentar melhor resposta visual para a discriminação da vegetação e dos contrastes da superfície, conforme já indicado no texto-base e em estudos sobre reflectância de produtos CBERS (Martins *et al.*, 2018).

Além das imagens orbitais, foram utilizados dados planialtimétricos com curvas de nível equidistantes de 5 m, disponibilizados pela CODEPLAN (2020); mapa geológico em escala 1:100.000; bases vetoriais de drenagem, sistema viário, áreas urbanas e limites administrativos; e informações complementares sobre solos e vegetação obtidas junto a órgãos oficiais, especialmente IBGE, INPE e Embrapa. A organização e compatibilização dessas informações seguiram a lógica de integração de variáveis ambientais frequentemente utilizada em mapeamento digital de solos (Barbosa *et al.*, 2010; Dinamarca *et al.*, 2023).

Todas as bases foram padronizadas para o sistema de referência SIRGAS 2000, zona 23 Sul. Essa padronização foi necessária para garantir consistência geométrica, compatibilidade espacial entre camadas e confiabilidade nas operações de cruzamento temático. A qualidade posicional e a escala das bases foram consideradas na interpretação, visto que inconsistências entre escalas cartográficas podem comprometer a definição precisa dos limites pedológicos, especialmente em estudos de maior detalhamento.

A interpretação das fitofisionomias foi realizada a partir da imagem fusionada do CBERS-4A, buscando distinguir as classes Cerradão, Cerrado *sensu stricto*, Campo Cerrado, Vereda e Mata de Galeria, conforme referências de classificação da vegetação do Cerrado propostas por Ribeiro e Walter (2008) e utilizadas no texto-base. A vegetação foi considerada variável auxiliar relevante porque, em ambientes tropicais sazonais, a fisionomia vegetal frequentemente responde às condições de drenagem, textura, profundidade efetiva e fertilidade relativa do solo, além da posição topográfica.

Para a análise do relevo, utilizou-se modelo digital de elevação derivado das bases planialtimétricas disponíveis. A declividade foi calculada e reclassificada segundo os intervalos definidos pela Embrapa (2018) e adotados no texto-base: plano (0-3%), suave ondulado (3-8%), ondulado (8-20%), forte ondulado (20-45%), montanhoso (45-70%) e escarpado (>70%). Tal classificação foi empregada por representar faixas tradicionalmente utilizadas na interpretação morfopedológica do território brasileiro, com implicações diretas para infiltração, escoamento superficial, erosão e desenvolvimento dos perfis.

A elaboração do mapa de solos foi baseada na integração entre relevo, vegetação, material de origem e conhecimento pedológico. Inicialmente, as variáveis ambientais foram organizadas em ambiente SIG, permitindo o cruzamento espacial entre classes de declividade, fitofisionomias e compartimentos litológicos. Em seguida, aplicaram-se procedimentos de

álgebra de mapas, análise visual e interpretação temática para identificar padrões recorrentes de associação solo-paisagem.

A vetorização das camadas raster resultantes foi seguida de correções geométricas e topológicas, de modo a gerar unidades cartográficas contínuas e coerentes. A classificação das unidades foi realizada até o segundo nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2018), priorizando classes cuja ocorrência fosse compatível com a interação entre material de origem, relevo, drenagem e vegetação, conforme critérios pedológicos clássicos descritos por Lepsch (2021).

Embora o texto-base enfatize o uso de geotecnologias, é importante destacar que o processo de interpretação pedológica pressupõe articulação com critérios analíticos e taxonômicos já consolidados. Nesse sentido, o Manual de Métodos de Análise de Solo oferece a referência metodológica para caracterizações laboratoriais de apoio, ainda que o presente manuscrito tenha ênfase na análise espacial e na comparação com levantamento preexistente, e não na execução de nova campanha analítica detalhada (Teixeira *et al.*, 2017).

A avaliação da acurácia foi realizada mediante comparação entre o mapa de solos produzido por geotecnologias e o levantamento semidetalhado convencional dos solos do Jardim Botânico de Brasília, elaborado por Cavedon e Sommer (1990). O índice Kappa foi utilizado como medida de concordância entre os mapas, conforme descrito no texto-base e discutido por Foody (2020).

Ainda que o índice Kappa apresente limitações teóricas para interpretação isolada da qualidade cartográfica, sua utilização neste trabalho foi considerada adequada como indicador comparativo sintético, especialmente por permitir avaliar, de forma geral, o nível de concordância entre o produto digital e a base convencional. A interpretação do resultado considerou também a escala dos dados, a natureza dos limites pedológicos e o fato de que transições solo-paisagem nem sempre se expressam como fronteiras abruptas em campo ou em imagem.

3 RESULTADOS

Material de Origem e Condicionantes Pedogenéticos

O mapa geológico do Distrito Federal utilizado no estudo, originalmente produzido em escala 1:100.000, indicou a presença de unidades relacionadas ao Grupo Paranoá, com destaque para litologias como ardósia, metarritmito arenoso e quartzito. Conforme relatado no texto-

base, essas unidades foram interpretadas como importantes indicadoras do material de origem predominante na área, ainda que se reconheça a limitação da escala cartográfica para aplicações pedológicas mais detalhadas.

A relevância do material de origem para a gênese e a distribuição dos solos está amplamente reconhecida na literatura pedológica. O substrato influencia propriedades como textura, mineralogia, profundidade potencial de intemperismo e suscetibilidade à erosão, embora sua expressão pedológica dependa da interação com relevo, clima, drenagem e tempo de evolução (Jenny, 1941; Embrapa, 2018; Lepsch, 2021). No presente estudo, observou-se que materiais com maior predominância de quartzo favoreceram a ocorrência de ambientes arenosos associados a Neossolos Quartzarênicos, enquanto áreas vinculadas a litologias mais finas e com maior potencial de geração de frações argilosas estiveram mais relacionadas a Latossolos.

Essa interpretação é coerente com o texto-base, que associa quartzito e metarritmito arenoso à formação de solos mais arenosos e ardósia à presença de materiais mais argilosos. Contudo, os resultados também indicam que o material de origem, isoladamente, não explica toda a distribuição dos solos. Em muitas situações, sua contribuição foi secundária quando comparada ao papel organizador do relevo e à leitura integrada da paisagem. Esse comportamento já havia sido apontado por Barbosa *et al.* (2010), que demonstraram que a geologia é variável relevante, mas seu valor preditivo depende da compatibilidade de escala e da interação com fatores geomorfológicos.

9

Do ponto de vista metodológico, a limitação da base geológica reforça um dos pontos centrais deste trabalho: o potencial das geotecnologias é elevado, mas a qualidade do produto cartográfico depende diretamente da escala, da consistência e da resolução dos dados de entrada. Assim, a presença de mapas geológicos regionais em escalas relativamente pequenas deve ser interpretada com cautela quando utilizada em mapeamento pedológico semidetalhado.

Resposta da Vegetação e sua Relação com os Solos

Entre as imagens avaliadas para interpretação da cobertura vegetal, o CBERS-4A mostrou melhor adequação para o objetivo do estudo, sobretudo em função da resolução espacial obtida após a fusão com a banda pancromática. Segundo o texto-base, a vegetação foi distribuída em Vereda (0,18%; 32,52 ha), Cerradão (1,74%; 321,19 ha), Mata de Galeria (5,14%;

948,76 ha), Campo Cerrado (16,5%; 3.600,49 ha) e Cerrado sensu stricto (63,13%; 11.659,88 ha), além de áreas antrópicas e estradas, que somaram 10,26% (1.894,87 ha), conforme ilustrado na Figura 1.

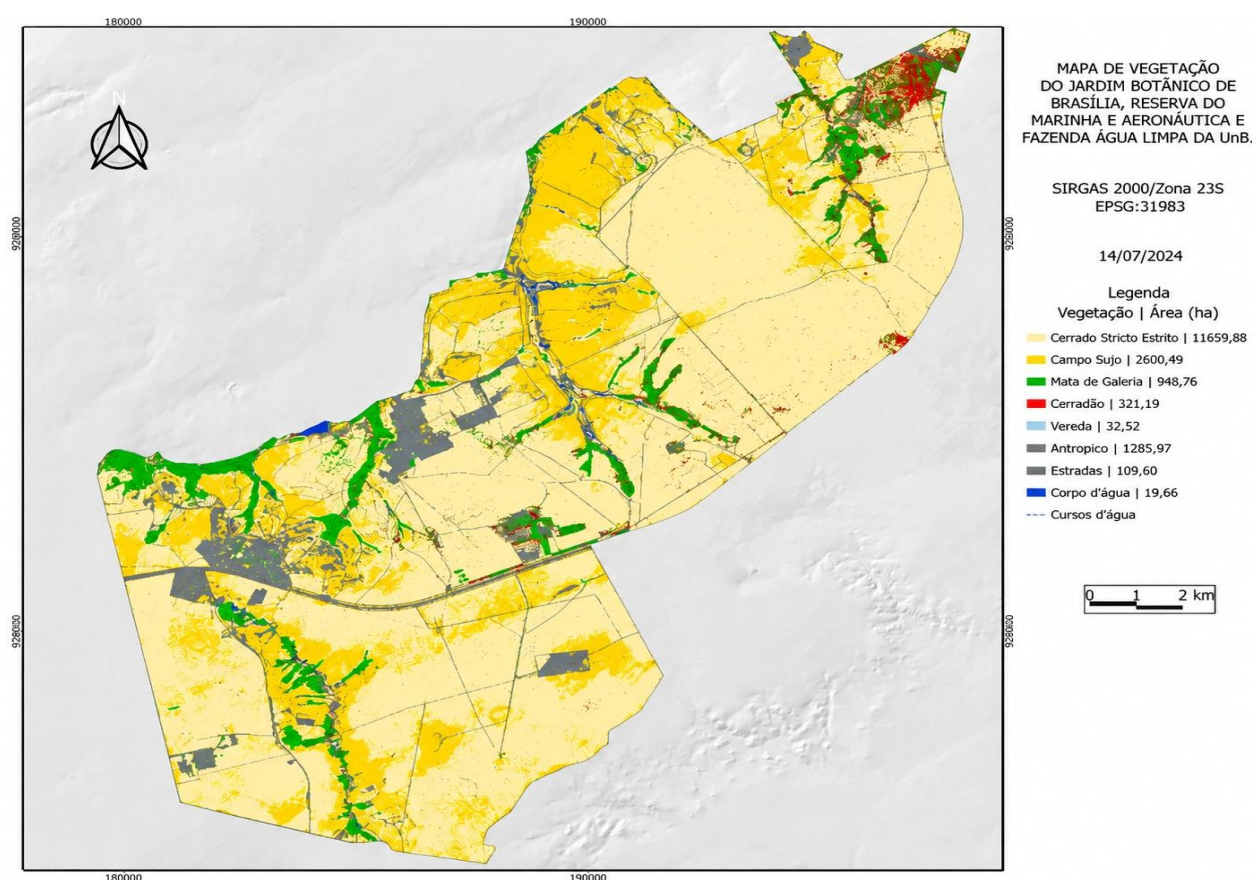


Figura 1 – Mapa de Vegetação

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A predominância de Cerrado sensu stricto é compatível com a paisagem típica do Planalto Central e com descrições clássicas da vegetação do Cerrado (Ribeiro; Walter, 2008). Mais importante, porém, é a forma como essas fitofisionomias se organizaram na paisagem em associação com relevo, drenagem e solo. As Veredas e Matas de Galeria concentraram-se em compartimentos mais úmidos e rebaixados, marcados por drenagem deficiente ou maior

influência do lençol freático. Já o Campo Cerrado e outras formações mais abertas apareceram com maior frequência em ambientes mais arenosos e menos favorecidos em retenção hídrica. O Cerrado *sensu stricto*, por sua vez, esteve amplamente associado aos ambientes ocupados por Latossolos.

Esses padrões reforçam o papel da vegetação como variável indicadora no levantamento pedológico. A literatura mostra que formações vegetais respondem não apenas ao clima regional, mas também a gradientes locais de solo, relevo, umidade e fertilidade relativa. Atwell *et al.* (2023) evidenciaram a influência de fatores geomórficos do solo sobre a vegetação, enquanto Kuzmin *et al.* (2019) destacaram como gradientes ambientais moldam a organização das paisagens. No Cerrado, Ribeiro e Walter (2008) demonstram que as fitofisionomias refletem variações significativas nas condições edáficas e hídricas. No presente estudo, portanto, a vegetação funcionou como variável auxiliar importante na delimitação das unidades pedológicas.

Do ponto de vista metodológico, esse resultado converge com as observações de Duarte e Silva (2019), segundo os quais a resposta espectral da superfície, quando bem interpretada e combinada com critérios ambientais consistentes, pode elevar significativamente a qualidade das classificações temáticas. Também dialoga com Silva (2014), que mostrou a utilidade do geoprocessamento na delimitação de padrões de uso e ocupação da terra em função de elementos fisiográficos e ambientais.

Relevo como Principal Organizador da Distribuição dos Solos

A análise das classes de declividade indicou amplo predomínio de relevo plano a suave ondulado, ocupando aproximadamente 90% da área total (16.638,31 ha), seguido por relevo ondulado, com 9,22% (1.703,99 ha). As classes forte ondulado e montanhoso apresentaram ocorrência reduzida, totalizando juntas 0,68% (125,96 ha), conforme os dados do texto-base, ilustrados na Figura 2.

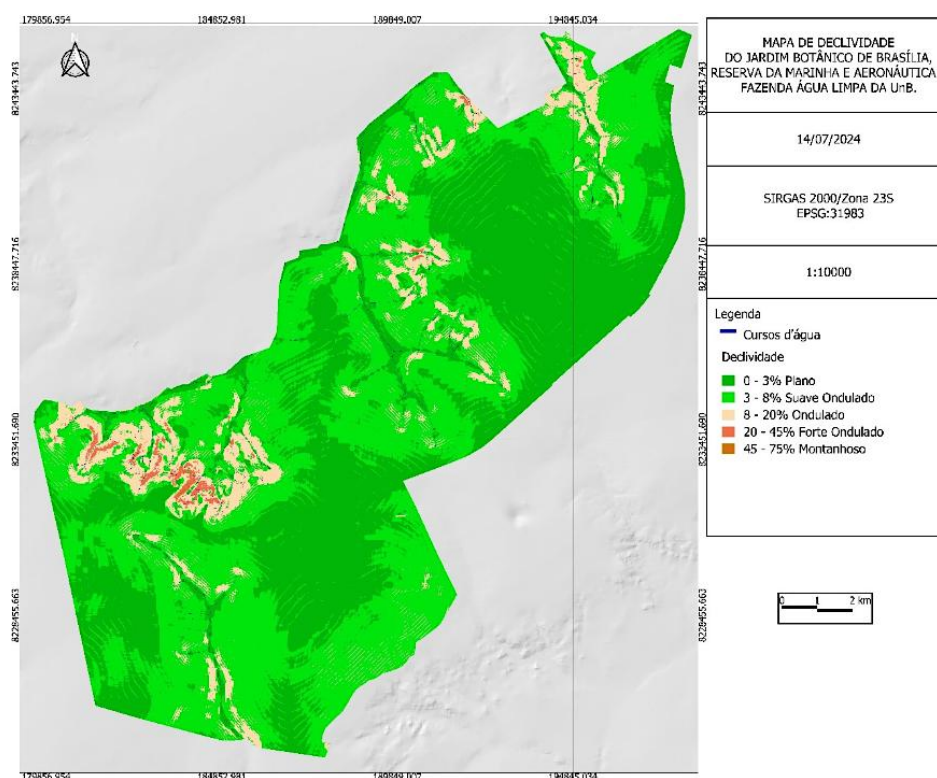


Figura 2 – Mapa de Relevo

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Esse resultado é altamente significativo para a interpretação pedológica da área. Superfícies planas e suavemente onduladas tendem a favorecer maior estabilidade geomorfológica, menor remoção de material e maior tempo relativo de atuação dos processos de intemperismo e pedogênese. Em regiões tropicais úmidas ou subúmidas, como o Distrito Federal, esse contexto conduz frequentemente à formação de solos profundos, bem drenados e fortemente intemperizados, como os Latossolos (Embrapa, 2018; Lepsch, 2021). Em contrapartida, áreas mais movimentadas, como bordas de chapadas e setores de maior dissecação, apresentam maior probabilidade de concentrar solos menos evoluídos, como Cambissolos.

No presente estudo, o relevo mostrou-se a variável de maior poder explicativo da organização espacial das classes de solos. Tal constatação aparece explicitamente no texto-base, que assinala que o fator de maior influência no intemperismo, na área analisada, foi o relevo associado ao tempo geológico. Essa conclusão é coerente com a tradição pedológica clássica inaugurada por Jenny (1941), segundo a qual o relevo constitui fator decisivo na redistribuição da água, na dinâmica de erosão e deposição, na espessura dos perfis e na intensidade dos processos pedogenéticos.

Além de seu papel direto, o relevo atua como variável integradora, influenciando a drenagem, a exposição, a profundidade efetiva, a estabilidade de superfície e até a própria expressão da vegetação. Por isso, em ambientes de Cerrado, a análise morfopedológica permanece uma das abordagens mais consistentes para a interpretação da distribuição dos solos.

Distribuição e Interpretação das Classes de Solos

A integração entre material de origem, relevo e vegetação permitiu classificar diferentes ordens e subordens de solos na área estudada. De acordo com o texto-base, os Latossolos Vermelho-Amarelos ocuparam 65% da área (11.909,09 ha), constituindo a classe dominante. Os Neossolos Quartzarênicos representaram cerca de 20% (3.705,29 ha), seguidos por Latossolos Vermelhos, com 1,45% (266,35 ha), Cambissolos, com 0,69% (126,27 ha), Organossolos, com 4,44% (813,90 ha), e Gleissolos, com 0,18% (32,33 ha). As áreas antropizadas totalizaram aproximadamente 8% da área, conforme apresentado na Figura 3.

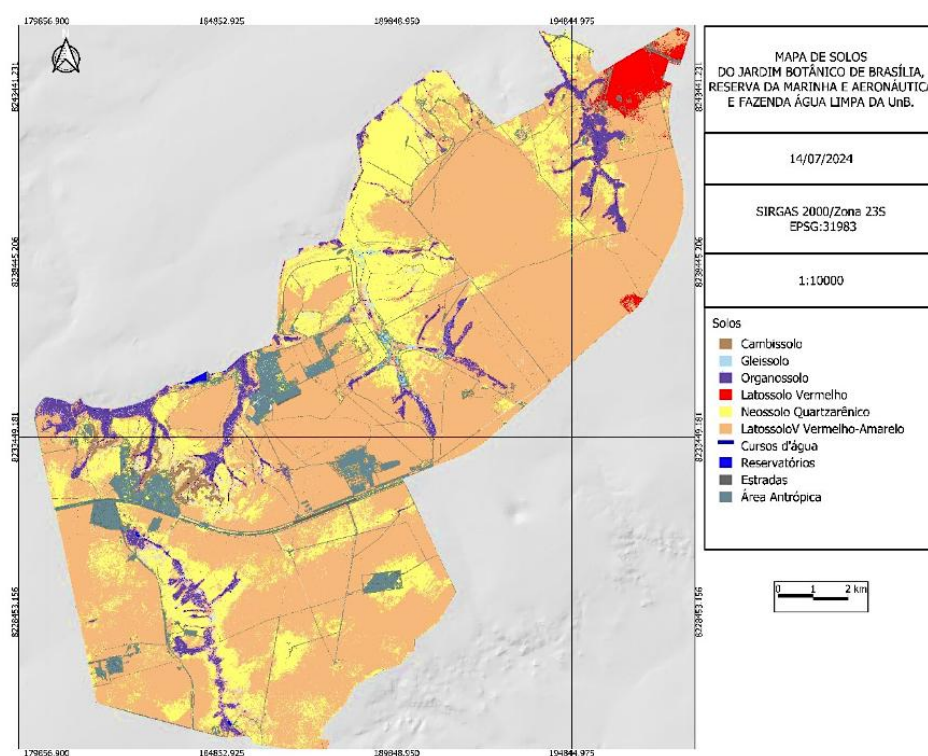


Figura 3 – Mapa de Solos

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A predominância dos Latossolos Vermelho-Amarelos indica que grande parte da paisagem estudada se encontra sob condições de estabilidade geomorfológica e forte evolução

pedogenética. Esses solos, típicos de superfícies antigas e bem drenadas, refletem a intensa atuação do intemperismo químico em clima tropical, com avançada dessilicatização e desenvolvimento de estrutura granular ou subgranular em perfis profundos (Embrapa, 2018; Lepsch, 2021). Sua distribuição em áreas de relevo plano a suave ondulado corrobora a interpretação de que a pedogênese foi favorecida por condições prolongadas de baixa remoção superficial.

Os Latossolos Vermelhos apareceram em menor proporção, mas também associados a ambientes de relevo mais regular e materiais com condições favoráveis à formação de frações mais argilosas. O fato de os Latossolos, em conjunto, dominarem a área reforça o forte controle da estabilidade da paisagem sobre a organização dos solos no Planalto Central.

Os Neossolos Quartzarênicos constituíram o segundo grupamento mais expressivo. Sua ocorrência esteve associada a materiais quartzosos e metarritmitos arenosos, com predomínio de quartzo na fração mineral e baixos teores de argila, o que confere textura arenosa, baixa retenção de água e elevada suscetibilidade à erosão. Esses solos são comuns em ambientes onde o material de origem, a posição na paisagem e a dinâmica de intemperismo favorecem o predomínio de constituintes mais resistentes à alteração. Sua associação com fitofisionomias mais abertas, como Campo Cerrado, é coerente com a limitação hídrica e nutricional relativa desses ambientes.

14

Os Cambissolos, por sua vez, concentraram-se em áreas de relevo mais movimentado, especialmente nas bordas de chapadas. Essa ocorrência é compatível com seu menor grau de evolução pedogenética, frequentemente relacionado a perfis menos espessos, maior influência do material de origem e condições geomorfológicas menos estáveis. Em contraste, Organossolos e Gleissolos foram identificados em posições mais baixas da paisagem, sujeitas ao encharcamento sazonal e ao acúmulo de matéria orgânica, o que é típico de ambientes com drenagem restrita, presença de lençol freático superficial e dinâmica hidromórfica.

A distribuição dessas classes reforça que os limites pedológicos refletem transições paisagísticas e não compartimentos rigidamente separados. Conforme discutido no texto-base, um solo não termina abruptamente para que outro comece; há, em regra, zonas de transição controladas pela variação gradual dos fatores de formação. Essa observação é particularmente importante no uso de geotecnologias, pois a interpretação cartográfica deve reconhecer a natureza contínua da paisagem mesmo quando precisa produzir unidades discretas para fins de mapa.

Áreas Antropizadas e Implicações para o Mapeamento

As áreas antropizadas corresponderam a aproximadamente 8% da área estudada, valor que supera a extensão de algumas classes naturais menos frequentes, como Cambissolos, Organossolos e Gleissolos individualmente considerados. Conforme o texto-base, essas áreas resultam de ocupações vinculadas à Marinha, à Aeronáutica, às atividades de pesquisa da Universidade de Brasília e à presença de estradas utilizadas, entre outras finalidades, para policiamento e aceiros em períodos de incêndios florestais.

A presença dessas áreas possui pelo menos duas implicações. A primeira é pedológica: a alteração do uso e da cobertura da terra pode modificar a expressão superficial dos solos, interferindo na leitura da vegetação e da drenagem e, portanto, nos critérios indiretos de interpretação espacial. A segunda é metodológica: em classificações baseadas em imagens e variáveis de paisagem, áreas antropizadas podem introduzir ruído temático, dificultando a delimitação de unidades naturais. Isso reforça a necessidade de leitura crítica das classes de uso e ocupação e confirma as observações de Silva (2014) e Duarte e Silva (2019) sobre a importância da adequação metodológica em processos classificatórios.

Desempenho do Mapeamento Digital e Avaliação Comparativa

15

O mapa de solos obtido por técnicas de geoprocessamento apresentou concordância global aproximada de 80% em relação ao levantamento convencional, com índice Kappa de 0,42. Em termos práticos, esse resultado sugere desempenho satisfatório da metodologia para a escala adotada, sobretudo considerando as limitações de entrada relacionadas à escala da base geológica e à própria complexidade dos limites pedológicos.

De acordo com Landis e Koch (1977), valores de Kappa nessa faixa são geralmente interpretados como indicativos de concordância moderada. Contudo, Foody (2020) adverte que o índice Kappa não deve ser supervalorizado como medida única de qualidade cartográfica, pois pode obscurecer nuances importantes da discordância espacial e temática. Essa crítica é particularmente pertinente em levantamentos de solos, nos quais os limites das classes são frequentemente transicionais e não abruptos. Portanto, o valor de 0,42 não deve ser interpretado de forma isolada como insuficiência metodológica, mas sim em conjunto com a coerência espacial do produto gerado, o comportamento das principais classes e a adequação da escala de análise.

No presente estudo, o mapeamento mostrou forte coerência entre classes de solos, compartimentos de relevo, padrões vegetacionais e material de origem, o que reforça sua validade técnica. A metodologia utilizada permitiu reproduzir, com nível satisfatório de correspondência, a lógica da organização pedológica da paisagem. Esse resultado confirma a hipótese de que a combinação entre relevo, vegetação e interpretação pedológica pode gerar mapas de solos confiáveis mesmo quando há limitações em alguns dados de entrada.

Além disso, os resultados obtidos dialogam com estudos mais amplos sobre mapeamento digital de solos e classificação temática. Dinamarca *et al.* (2023), ao apresentarem uma base nacional de propriedades físicas e hidráulicas dos solos no Chile, demonstraram que produtos espaciais dependem diretamente da qualidade e integração das covariáveis ambientais. Duarte e Silva (2019) reforçam que classificações feitas com geotecnologias gratuitas podem alcançar bons resultados quando há escolha criteriosa dos procedimentos. Assim, o presente estudo contribui ao mostrar que, no Cerrado do Distrito Federal, a interpretação pedológica apoiada por geotecnologias é capaz de gerar produto com utilidade prática para planejamento e gestão.

Potencialidades e Limitações da Abordagem

16

As geotecnologias aplicadas ao levantamento pedológico mostraram elevado potencial de uso, especialmente por integrarem bases de dados acessíveis, ferramentas livres e raciocínio interpretativo robusto. Entre suas principais potencialidades estão a redução do custo operacional, a maior rapidez na geração de mapas, a possibilidade de atualização cartográfica e a ampliação da capacidade de análise espacial. Tais características tornam essa abordagem relevante não apenas para o meio científico, mas também para o planejamento técnico, a gestão pública e, em perspectiva, para processos de extensão rural e avaliação ambiental.

Entretanto, os resultados também mostram limitações importantes. A primeira refere-se à escala das bases geológicas, cuja incompatibilidade com o detalhamento pretendido reduziu o poder discriminatório do material de origem. A segunda relaciona-se à própria natureza contínua da paisagem pedológica, que nem sempre pode ser plenamente representada por limites vetoriais discretos. A terceira diz respeito à dependência do conhecimento interpretativo do pesquisador: embora ferramentas digitais ampliem a capacidade de análise, elas não substituem a leitura pedológica do terreno.

Por isso, a metodologia aqui aplicada deve ser compreendida como instrumento de apoio qualificado ao levantamento de solos, e não como substituto absoluto da pedologia de campo. Sua maior força está justamente na integração entre dados espaciais e conhecimento pedogenético, o que permite ampliar a eficiência dos levantamentos sem perder a coerência científica.

4 CONCLUSÃO

As geotecnologias integradas à interpretação pedológica mostraram-se eficientes para o levantamento e a classificação de solos na área estudada, permitindo a elaboração de mapa de solos coerente com a organização da paisagem do Cerrado no Distrito Federal.

A distribuição espacial das classes de solos foi controlada principalmente pelo relevo, com contribuição complementar da vegetação e do material de origem. Os Latossolos Vermelho-Amarelos predominaram em superfícies mais estáveis e suavemente onduladas, enquanto os Neossolos Quartzarênicos estiveram associados a substratos mais arenosos e ambientes mais frágeis do ponto de vista pedogeomorfológico.

O índice Kappa de 0,42 e a concordância global aproximada de 80% indicam que a metodologia possui aplicabilidade prática para mapeamento pedológico semidetalhado. Contudo, a precisão do produto final depende da compatibilidade de escala e da qualidade das variáveis ambientais utilizadas, especialmente das bases geológicas.

17

A abordagem adotada apresenta potencial para subsidiar planejamento territorial, avaliação da aptidão de uso da terra e gestão ambiental, podendo ser aplicada em outras áreas e biomas, desde que respeitadas as especificidades pedoambientais locais.

REFERÊNCIAS

- ATWELL, M. A.; WUDDIVIRA, M. N.; FIEDLER, S.; OATHAM, M.; HERRMANN, L.; GLASNER, B.; VETTER, V.; JUNGKUNST, H. F. Influence of soil geomorphic factors on vegetation patterns in a model white sands ecosystem complex. *Catena*, v. 225, p. 107044, 2023.
- BARBOSA, I. O.; LACERDA, M. P. C.; BILICH, M. R. Soils distribution model based on relation between geology, geomorphology and pedology at the High Plateau of Distrito Federal, Brazil. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 2010.
- CASTRO, J. D. B.; NOGUEIRA, J. M. *Valoração Econômica do Meio Ambiente: Teorias e Práticas*. Curitiba: CRV, 2019.

CAVEDON, A. D.; SOMMER, S. *Levantamento Semidetalhado dos Solos do Jardim Botânico de Brasília*. Brasília: Governo do Distrito Federal, 1990.

CODEPLAN. *Sistema Cartográfico do Distrito Federal – Sicad: Cartas Topográficas 1:10.000*. Brasília: Companhia de Planejamento do Distrito Federal, 2020.

DINAMARCA, D. I.; GALLEGUILLOS, M.; SEGUEL, O.; URBINA, C. F. CLSoilMaps: a national soil gridded database of physical and hydraulic soil properties for Chile. *Scientific Data*, v. 10, 2023.

DUARTE, M. L.; SILVA, T. A. Avaliação do desempenho de três algoritmos na classificação de uso do solo a partir de geotecnologias gratuitas. *Revista de Estudos Ambientais*, v. 21, n. 1, p. 6-16, 2019.

EMBRAPA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018.

FOODY, G. M. Explaining the unsuitability of the kappa coefficient in the assessment and comparison of the accuracy of thematic maps obtained by image classification. *Remote Sensing of Environment*, v. 239, p. 111630, 2020.

IBGE. *Manual Técnico de Pedologia*. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007.

JENNY, H. *Factors of Soil Formation: a System of Quantitative Pedology*. New York: McGraw-Hill, 1941.

KUZMIN, S. B.; SHAMANOVA, S. I.; BELOZERTSEVA, I. A. Altitudinal zonation of landscapes on the local testing area in the Southern Baikal Region. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, n. 3, p. 105-115, 2019.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, v. 33, p. 159-174, 1977.

LEPSCH, I. F. *19 Lições de Pedologia*. 2. ed. Viçosa: Oficina de Textos, 2021.

LEWIS, K.; BARROS, F. V.; CURE, M. B.; DAVIES, C. A.; FURTADO, M. N.; HILL, T. C.; HIROTA, M.; MARTINS, D. L.; MAZZOCHINI, G. G.; MITCHARD, E. T. A. et al. Mapping native and non-native vegetation in the Brazilian Cerrado using freely available satellite products. *Scientific Reports*, v. 12, 2022.

MARTINS, V. S.; SOARES, J. V.; NOVO, E. M. L. M.; BARBOSA, C. C. F.; PINTO, C. T.; ARCANJO, J. S.; KALEITA. Continental-scale surface reflectance product from CBERS-4 MUX data: assessment of atmospheric correction method using coincident Landsat observations. *Remote Sensing of Environment*, 2018.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Principais fitofisionomias do Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (ed.). *Cerrado: Ecologia e Flora*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 152-212.

SILVA, C. C. S. *Uso de Geotecnologia na Delimitação e Classificação da Ocupação e Uso do Solo das Matas Ciliares: Estudo de Caso dos Principais Rios do Município de Alto Paraíso-RO*. 2014.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). *Manual de Métodos de Análise de Solo*. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.