



EXPANSÃO URBANA: ANÁLISE GEOESPACIAL COM APRENDIZADO DE MÁQUINA EM POUSO ALEGRE, MINAS GERAIS, BRASIL (1993-2024)

Rodrigo José Zonzin Esteves¹, Cauã Oliveira Lima²;

¹ Universidade Federal de São João del Rei, Departamento de Computação,
São João del Rei, Brasil. rodrigojzonzin@gmail.com

² Universidade Federal do Pará, Instituto de Filosofia e Ciências Humanas,
Belém, Brasil. caualima@museu-goeldi.br

RESUMEN. La ocupación urbana brasileña presenta similitudes y características distintas en las ciudades y el estudio de sus causas implica una compleja interrelación de variables. Además, analizar la dinámica del uso y ocupación de la tierra es esencial para una comprensión profunda de las consecuencias sociales, económicas y ecológicas. En este sentido, el objetivo de este estudio es analizar la dinámica de expansión del principal área urbana del municipio minero de Pouso Alegre, entre 1993 y 2024. La metodología utilizada consiste en i) identificación de la región de interés, ii) clasificación temática de imágenes LANDSAT mediante el algoritmo Random Forest y iii) análisis de las regiones que mostraron mayor crecimiento urbano. Los resultados demuestran que la porción sur de la ciudad tuvo como vector de crecimiento el Aeropuerto Regional Pouso Alegre, en el extremo sur de la región de interés. Además, los datos demuestran el éxito de las Unidades de Conservación en la protección ambiental, mostrando un crecimiento significativo en la ocupación forestal en el Parque Municipal y Reserva Ecológica.

Palabras-clave: Forestal; Landsat; Ocupación urbana; Random Forest; Uso do solo.

RESUMO. A ocupação urbana brasileira apresenta similaridades e características distintas nas cidades e o estudo de suas causas envolve uma complexa inter-relação de variáveis. Além disso, analisar as dinâmicas de uso e ocupação do solo é fundamental para uma compreensão aprofundada das consequências sociais, econômicas e ecológicas. Neste sentido, o presente estudo tem por finalidade analisar a dinâmica da expansão da mancha urbana principal do município mineiro de Pouso Alegre, entre 1993 e 2024. A metodologia empregada consiste em i) identificação da região de interesse, ii) classificação temática de imagens LANDSAT através do algoritmo *Random Forest* e iii) análise das regiões que apresentaram maior crescimento urbano. Os resultados demonstram que a porção sul da cidade apresentou como vetor de crescimento o Aeroporto Regional de Pouso Alegre, no extremo sul da região de interesse. Além disso, os dados demonstram o sucesso das Unidades de Conservação na proteção ambiental, apresentando um crescimento significativo da ocupação florestal no Parque Municipal e na Reserva Ecológica.

Palavras-chave: Florestal; Landsat; Ocupação urbana; Random Forest; Uso do solo.

ABSTRACT. Brazilian urban occupation shows similarities and discrepancies across the country and studying its causes involves a complex interrelationship of variables. Additionally, analyzing land use and occupation dynamics is a fundamental step for a deeper understanding of its social, economic and ecological consequences. In this context, the present study aims to analyze the dynamics of the main urban area in the municipality of Pouso Alegre, Minas Gerais, between 1993 and 2024. To meet this purpose, the methodology includes i) delimitation of the area of interest, ii) thematic classification of LANDSAT images using the Random Forest algorithm and iii) analysis of regions that showed the most urban growth. The results demonstrate that the most southern part of the city had the Regional Airport as its growth vector. Additionally, the data show the success of its Conservation Units (Unidades de Conservação) in environmental protection, with a significant growth of forest cover in the Municipal Park and the Ecological Reserve.

Keywords: Forest; Land use; Landsat; Random forest; Urban occupation.

1. INTRODUÇÃO

A expansão urbana é um fenômeno de interesse multidisciplinar e de difícil conceituação, utilizado como método de pesquisa em diversas áreas de estudo, desde



engenharias às ciências humanas. Em uma abordagem sucinta, a expansão urbana é caracterizada pelo crescimento contínuo da infraestrutura que acomoda os assentamentos humanos de longa permanência (Angel, 2023). Definir as causas da expansão urbana é uma tarefa ainda mais desafiadora que sua própria definição, considerando a complexa inter-relação de aspectos geográficos, econômicos e ambientais (Galster *et al.*, 2006). Do ponto de vista geográfico, o impacto de rios, aquíferos, clima e topografia estão relacionados como determinantes da expansão urbana (Desalvo e Su, 2019). Por outro lado, aspectos socioeconômicos como crescimento populacional, renda média e produtividade também contribuem para o espalhamento das urbes (Silva, Esteves e Silva, 2024).

O Sensoriamento Remoto (SR) consiste na obtenção de dados através da interação radiação eletromagnética (REM) com a matéria por meio de um sistema sensor (Novo e Ponzoni, 2001). Ademais, os diferentes alvos presentes na superfície terrestre apresentam “assinaturas singulares” no espectro da REM, permitindo com que técnicas de SR obtenham dados para abordagens variadas no estudo de alvos da superfície terrestre (Liu, 2006).

As pesquisas no Brasil e no mundo têm empregado técnicas e metodologias de SR para a análise de uso e ocupação do solo, denominado por *Land Use and Land Cover* (LULC). Uma análise conduzida no estado brasileiro de Rondônia, apresentou as mudanças de cobertura florestal entre os anos de 2009 e 2019 através da classificação temática de imagens Landsat (Floreano e de Moraes, 2021). Para além da análise de mudanças de LULC, pesquisadores na Etiópia utilizaram algoritmos de aprendizado de máquina para a predição do crescimento urbano nas regiões agroflorestais (Temesgen *et al.*, 2021). Além disso, um estudo na cidade mineira de Viçosa, utilizou dados termais do satélite Landsat para estudar o processo de expansão urbana com base nas variações do campo térmico superficial da cidade (Fialho e Santos, 2023).

Dessa forma, o propósito deste trabalho é analisar a ocupação do solo através do uso de Sensoriamento Remoto e algoritmos de aprendizado de máquina para analisar as tendências de expansão urbana tanto na mancha urbana principal quanto em todo o município de Pouso Alegre, Minas Gerais, Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

Para a análise da expansão urbana, foram obtidos os vetores de limites municipais e setores censitários fornecidos pelo IBGE (IBGE, 2022). A fim de se obter uma caracterização precisa da mancha urbana principal (MUP), os setores censitários considerados de “Alta Densidade de Edificações” foram filtrados com auxílio da biblioteca Geopandas, no Python. Em seguida, aplicou-se um *buffer* de 450 metros ao redor da região, cuja finalidade é englobar aspectos de transição entre a zona urbana e a zona rural.¹

Após a obtenção dos polígonos do município (Figura 1a) e da MUP (Figura 1b), os vetores foram exportados para a clipagem dos rasters de uso e cobertura do solo (LULC).

¹ Disponível em github.com/RodrigoZonzin/pousoAlegre_LULC

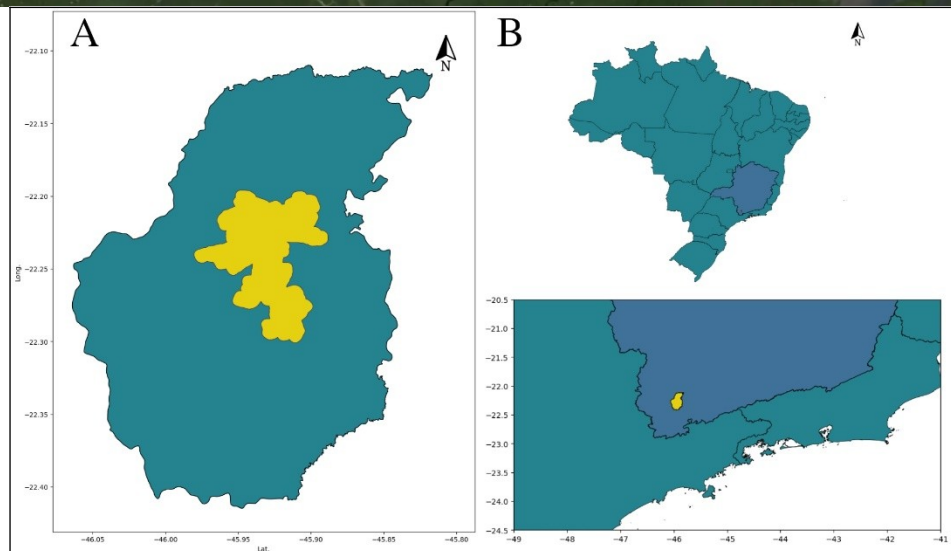


Figura 1: Área de Estudo. Fonte: Os autores (2024).

Além disso, utilizando-se o *Google Earth Engine* (GEE), obteve-se imagens do satélite Landsat 5 dos anos de 1993 e 2004. As imagens foram filtradas para o período de inverno no hemisfério sul, onde há menor precipitação no país, e os rasters com cobertura de nuvens inferior a 10% foram selecionados. Para a correção radiométrica, aplicou-se os fatores de escala em cada banda óptica da coleção de dados.

No comparativo entre os anos de 2014 e 2024, foram utilizadas as imagens do satélite Landsat 8 e Landsat 9, respectivamente. Em particular, para a obtenção dos rasters foi escolhida a coleção 2, que já apresenta os dados de reflectância de superfície com correção radiométrica e atmosférica. Por fim, as imagens foram recortadas com os limites municipais e selecionadas para a próxima etapa.

Ano	Data	GEE ID
1993	21/05/1993	LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/LT05_219075_19930521
2004	03/05/2004	LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/LT05_219075_20040503
2014	02/07/2014	LANDSAT/LC08/C02/T1_TOA/LC08_219075_20140702
2024	18/05/2024	LANDSAT/LC09/C02/T1_TOA/LC09_219075_20240518

Tabela 1: Imagens utilizadas

2.2. Metodologia

O passo inicial consistiu na seleção, para cada imagem, das bandas a serem utilizadas pelo algoritmo de classificação. Foram utilizadas as bandas do vermelho, do verde, do azul, do infravermelho próximo e do infravermelho de onda curta. Além disso, adicionou-se uma banda com os índices de vegetação e água, respectivamente, *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Normalized Difference Water Index* (NDWI). A adição dessas bandas tem por objetivo oferecer um espaço vetorial mais representativo dos conjuntos de dados, permitindo que o classificador opere com mais precisão sobre cada categoria.

Na identificação da caracterização de expansão urbana, utilizou-se a classificação temática das imagens, definidas pelas seguintes classes de interesse: regiões florestais (1), área urbana (2), pastos (3), corpos d'água (4) e áreas de solo exposto (5). As classes foram definidas em razão do uso difundido nos estudos de Sensoriamento Remoto no Brasil, como: a área urbana, a cobertura vegetal e a hidrografia estarem presentes na simulação do crescimento urbano em Curitiba-PR; floresta, pastagem, área urbana e corpos d'água na análise de alterações de LULC na Área de Preservação Permanente (APP) da sub-bacia São Francisco, localizado na bacia do rio Acre, na cidade de Rio Branco-AC, e as classes de agricultura, hidrografia, dunas, área urbana, área ocupada, pastagem e vegetação estão presentes em estudo de vulnerabilidade ambiental nas Unidades de Conservação (UCs) da Região Metropolitana de Natal (Freitas e Araki, 2021; Andrade e Rocha, 2022; Frazão *et al.*, 2023).

Durante a funcionalidade da classificação temática, foi utilizado o algoritmo *Random Forest*. A escolha deste algoritmo se deu por sua expressada eficácia em trabalhos de análise de mudança de LULC. Um estudo em Petrolina, em Pernambuco, demonstrou a efetividade do uso de séries temporais na classificação de LULC utilizando-se deste algoritmo (Brito *et al.*, 2023). Na cidade de São Paulo-SP, esta operação foi utilizada para o mapeamento de suscetibilidade à inundação em diferentes distritos, obtendo acurácia geral de 73% (Makita *et al.*, 2023).

Dessa forma, para cada imagem, uma amostra de 45 pixels por classe foi selecionada sobre a imagem em composição cor verdadeira. Essas amostras foram rotuladas de acordo com as classes de interesse para a classificação supervisionada. Em seguida, o algoritmo *Random Forest* foi executado cujos hiperparâmetros foram definidos como '*Number of Trees*' = 100, '*Variables Per Split*' = 2, '*Minimum Leaf Population*' = 1, '*Bag Fraction*' = 0.4 (Sun e Ongsomwang, 2023). Após o treinamento de cada cena, um mapa temático foi gerado e exportado.

Por fim, cada cena exportada foi recortada com o polígono da MUP. O somatório da área de cada classe foi obtido tanto para a MUP quanto para o município, a fim de se avaliar a coincidência ou não dos padrões de uso e ocupação do solo nas regiões.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A classificação supervisionada gerou 4 mapas temáticos (Figura 2) e outros 4 mapas foram obtidos para a análise da MUP (Figura 3). No período em análise, houve uma variação de 14,66%, 105,16%, -9,74%, 100,44% e -41,76% para as classes florestal, urbana, pasto, corpos d'água e solo exposto, respectivamente.

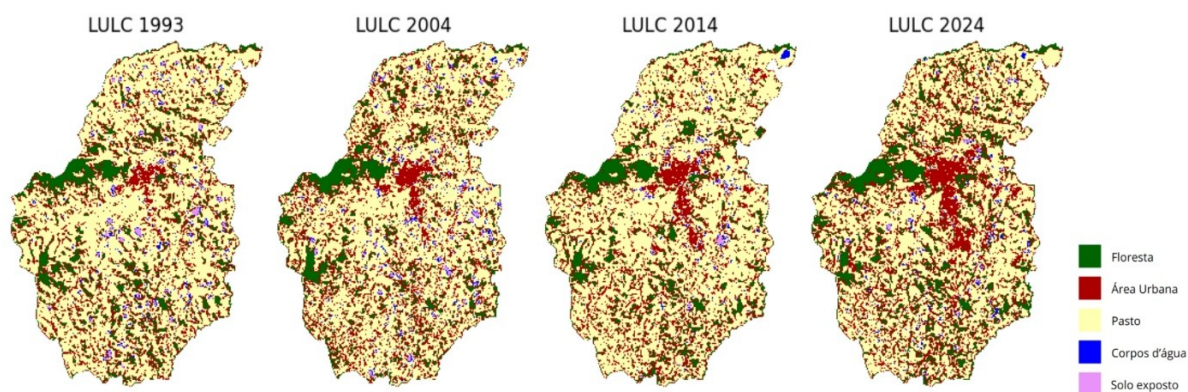


Figura 2: Mapas de LULC entre 1993 e 2024. Fonte: Os autores (2024).



A Tabela 2 apresenta as áreas superficiais em quilômetros quadrados de cada classe no município. As classes urbana e de solo exposto apresentaram variação positiva entre 1993 e 2004, com um acréscimo percentual de 55,95% e 1,50%, respectivamente. Da mesma maneira, a classe florestal apresentou aumento de 1,65% na ocupação da área do município.

A principal característica observada nos dados foi o contínuo crescimento da mancha urbana ao longo dos anos. Nas 4 datas analisadas, houve um crescimento relativo ao período anterior de 55,95%, 8,32% e 21,44%.

De forma semelhante, a classe florestal apresentou um crescimento consistente ao longo do período analisado, exceto pelo ano de 2014: 1,64%, -5,89% e 19,87%. Essa diferença pode ser explicada pela confusão de classes do classificador em razão do período de análise, cuja disponibilidade de imagens variou em 2 meses. Com efeito, o período 2014-2004 foi o único que apresentou crescimento para a classe pasto: 14,63%. Esses dados sugerem que, em razão da estiagem, a distribuição espectral dos pixels da classe pasto se aproximou da classe florestal, superestimando a sua ocupação no período.

Classe	1993	2004	2014	2024
Floresta	118,1736	120,1176	113,0382	135,5049
Área urbana	19,0129	29,6514	32,1192	39,0069
Pasto	390,992	370,8558	385,4871	352,8855
Corpos d'água	5,4585	12,8367	8,2584	10,9413
Solo exposto	11,2563	11,4246	5,9913	6,5556

Tabela 2: Área de cobertura das classes (km^2). Fonte: Os autores (2024).

Para a análise da MUP, a Tabela 3 apresenta a ocupação das classes no período de interesse. De 2004 a 1993, a classe urbana apresentou crescimento de 69,31%; para 2014-2004, o crescimento foi de 13,34% e entre 2024-2014, 19,55%. Esses resultados demonstram que o processo de urbanização está orientado para a expansão da região central do município. A figura 3 demonstra que o principal vetor da ocupação urbana foi ao redor do Aeroporto Regional de Pouso Alegre (SNZA), no extremo sul da MUP. Nesse sentido, nota-se que os bairros São Geraldo e São Carlos, que ficam entre o Centro de Pouso Alegre e o Aeroporto, apresentaram intensa ocupação urbana a partir de 2004. De forma similar, o bairro São João, na porção ocidental da cidade, a ocupação se intensificou a partir de 2024, demonstrando-se presente desde 2004.

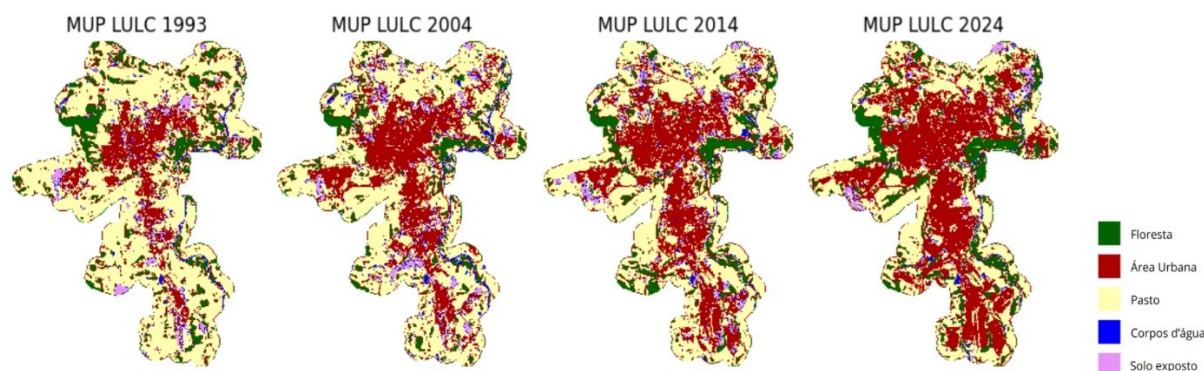


Figura 3: Mapas de LULC da MUP entre 1993 e 2024. Fonte: Os autores (2024).

Além disso, a análise da classe florestal demonstra uma recuperação dos espaços verdes na MUP, com crescimento de 15,40% entre 2024 e 1993. Pode-se observar que o Parque Municipal de Pouso Alegre, instituído em 1975, e convertido em Unidade de Conservação de Proteção Integral em 2000, recuperou sua ocupação florestal no período de análise (Pouso Alegre, 1975; Brasil, 2000). Além disso, a Reserva Biológica de Pouso Alegre, às margens do rio Sapucaí-Mirim, instituída em 1998, apresentou uma intensa recuperação florestal a partir de 1993, o que se explica pelo plano de manejo da UC (Pouso Alegre, 1998).

Classe	1993	2004	2014	2024
Floresta	8,3421	6,3864	7,2909	9,6273
Área urbana	9,0009	15,2397	17,2728	20,6505
Pasto	35,2962	30,0024	27,5796	22,6926
Corpos d'água	0,9342	1,4931	1,1889	1,4643
Solo exposto	2,1042	2,5551	2,3454	1,2429

Tabela 3: Área de cobertura das classes da MUP (km^2). Fonte: Os autores (2024).

4. CONCLUSÃO

O intenso processo de urbanização ao longo dos últimos anos pode resultar em consequências ambientais, sociais, econômicas e humanas irreversíveis. A substituição de matas primárias pela extensa mancha urbana altera de forma significativa o ciclo ecológico de diversos ecossistemas do município, principalmente em ambientes em planícies aluviais, vulneráveis a processos de erosão. Dessa maneira, é fundamental que o legislador e os executores de políticas urbanísticas levem em conta dados históricos da dinâmica de expansão da cidade, promovendo um maior desenvolvimento humano da cidade.

Em Pouso Alegre, observou-se uma intensa ocupação da MUP na porção sul da cidade, com nova infraestrutura habitacional apontando para o aeroporto SNZA. Por outro lado, o estudo evidencia o sucesso das políticas de proteção ambiental nas Unidades de Conservação do município, que contribuíram para o aumento da cobertura verde na cidade. Trabalhos futuros podem aprimorar as evidências obtidas analisando o crescimento urbano em função de variáveis topográficas, populacionais, de renda, de infraestrutura etc. Além disso, a inclusão do processo de verticalização é fundamental para uma compreensão aprofundada do fenômeno de crescimento das urbes.



REFERÊNCIAS

ANDRADE, G. G.; ROCHA, K. S. **Análise espaço temporal das alterações de uso e cobertura da terra em área de preservação permanente do igarapé São Francisco, Rio Branco - Acre - Brasil (2001-2021).** XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, p. 316-319, 2023.

ANGEL, S.; **Urban expansion: theory, evidence and practice.** In Buildings and Cities (Vol. 4, Issue 1), 2023. DOI: <https://doi.org/10.5334/bc.348>. Acesso em: 30 jun. 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. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm. Acesso em: 30 jun. 2024.

BRITO, P. V. da S.; CHAVES, M. E. D.; CARVALHO, H. F. de S.; SOUZA, F. C. de; SILVA, B. L. de C. e; FERREIRA, K. RR.; SANTOS, R. D. C. dos; QUEIROZ, G. R. de. **Uso de séries temporais para classificações de uso e cobertura da terra em Petrolina, Pernambuco.** XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, p 2524-2527, 2023.

DESALVO, J. S.; SU, Q. **The determinants of urban sprawl: theory and estimation.** International Journal of Urban Sciences, 23(1), 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/12265934.2018.1452627>. Acesso em: 30 jun. 2024.

IBGE, I. B. de G. e E. **Malha de Setores Censitários.** Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/26565-malhas-de-setores-censitarios-divisoes-intramunicipais.html?=&t=downloads>. Acesso em: 30 jun. 2024.

FIALHO, E. S.; SANTOS, L. G. F. dos. **Clima, Cidade e Crescimento: Uma investigação da expansão norte da cidade de Viçosa-MG, por meio da termografia de superfície (2000-2019).** Revista Brasileira de Climatologia, 32. 2023 DOI: <https://doi.org/10.55761/abclima.v32i19.15766>. Acesso em: 30 jun. 2024.

FLOREANO, I. X.; DE MORAES, L. A. F. **Land use/land cover (LULC) analysis (2009–2019) with Google Earth Engine and 2030 prediction using Markov-CA in the Rondônia State, Brazil.** Environmental Monitoring and Assessment, 193(4), 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09016-y>. Acesso em: 30 jun. 2024.

FRAZÃO, A. P.; AMARO, E. V.; SOUSA, S.B; GAMEIRO, S.; SILVA, J. V. **Análise das fragilidades ambientais das unidades de conservação da região metropolitana de Natal.** XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, p 1426-1429, 2023.

FREITAS, E. V.; ARAKI, H. **Simulation of urban growth: A case study for Curitiba city, Brazil.** Boletim de Ciencias Geodesicas, 27(Special issue), 2021. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702021000s00019>. Acesso em: 30 jun. 2024.

GALSTER, G.; HANSON, R.; RACTLIFFE, M. R.; WOLMAN, H.; COLEMAN, S.; FREIHAGE, J. (2006). **Wrestling sprawl to the ground - Defining and measuring an**



elusive concept. US Geological Survey Professional Paper, 1726, 2006.

LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto.** Campo Grande: 2ed. Oficina de Textos. 2006. ISBN: 85-7704-040-0.

MAKITA, F. H.; MENDES, T. S. G.; NEGRI, R. G.; PEREIRA, F. F. **Mapeamento de suscetibilidade a inundação usando modelo digital de terreno de alta resolução e random forest.** XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, p 2643-2646, 2023.

NOVO, E. M. L. M.; PONZONI, F. J. **Introdução ao Sensoriamento Remoto.** São José dos Campos: 4ed. BLUCHER, 2008. ISBN: 9788521205401.

POUSO ALEGRE. **Lei Ordinária nº 1.459, de 30 de setembro de 1975.** Cria o parque zoobotânico de Pouso Alegre. Disponível em: legislador.com.br/LegislatorWEB.ASP?WCI=LeiTexto&ID=122&inEspecieLei=1&nrLei=1459&aaLei=1975. Acesso em: 30 jun. 2024.

POUSO ALEGRE. **Lei Ordinária nº 3.411, de 13 de março de 1998.** Cria o Parque Municipal de Pouso Alegre e dá outras providências. Disponível em: <http://intranet.cmpa.mg.gov.br:8080/Sino.Siave/Normas/Exibir/56431>. Acesso em: 30 jun. 2024.

SILVA, R. R.; ESTEVES, R. J. Z.; SILVA, K. A. F. **A expansão Urbana Das Principais metrópoles Brasileiras De 2000 a 2020.** Cuadernos De Educación Y Desarrollo 16 (4): e4074, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55905/cuadv16n4-159>. Acesso em: 30 jun. 2024.

SUN, J.; ONGSOMWANG, S. **Optimal parameters of random forest for land cover classification with suitable data type and dataset on Google Earth Engine.** *Frontiers in Earth Science*, 11, 2023. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1188093>. Acesso em: 30 jun. 2024.

TEMESGEN, H.; WU, W.; LEGESSE, A.; YIRSAW, E. **Modeling and prediction of effects of land use change in an agroforestry dominated southeastern Rift-Valley escarpment of Ethiopia.** *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 21, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100469>. Acesso em: 30 jun. 2024.