



Identificação de Sítios de Alto Potencial Produtivo no Vale do Jequitinhonha a Partir de Agrupamento Ambiental

Identification of Sites with High Productive Potential in the Jequitinhonha Valley based on Environmental Grouping

Maria Luiza de Azevedo¹; Bruno Henrique Ribeiro Pereira²; Artur Ferro de Souza³; Gustavo Henrique de Oliveira Mourão⁴; Luciano Emmert⁵; Eric Bastos Gorgens⁶

¹Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina/MG
marialuiza.azevedo@ufvjm.edu.br

²Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina/MG
bruno.pereira@ufvjm.edu.br

³Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina/MG
artur.ferro@ufvjm.edu.br

⁴Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina/MG
gustavo.mourao@ufvjm.edu.br

⁵Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina/MG
lucianoemmert@yahoo.com.br

⁶Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina/MG
eric.gorgens@ufvjm.edu.br

Resumo: Este estudo objetivou classificar áreas do Alto e Médio Jequitinhonha em sítios ambientalmente homogêneos e, subsequentemente, avaliar o potencial produtivo de cada um. A partir de uma amostra de 400 pontos, foram utilizadas 10 variáveis ambientais (climáticas e edáficas) em uma análise de agrupamento (cluster analysis) para definir os sítios. A altura máxima do dossel (LiDAR GEDI) foi utilizada como um indicador da produtividade atingível de cada sítio. A análise resultou na identificação de cinco sítios distintos, cada qual com um perfil ambiental específico. A avaliação do potencial produtivo revelou que os Sítios 2 e 3 se destacaram, apresentando as maiores alturas máximas observadas, o que pode indicar um potencial de produtividade superior. Conclui-se que esta abordagem de classificação é uma ferramenta para o zoneamento de precisão, pois a identificação de zonas ambientalmente homogêneas subsidia a otimização do planejamento e do manejo florestal na região.

Palavras-chaves: Análise de Agrupamento; GEDI; Zoneamento.

Abstract: This study aimed to classify the landscape of the Alto and Médio Jequitinhonha sub-regions into environmentally homogeneous sites and subsequently evaluate the productive potential of each. From a sample of 400 points, 10 environmental variables (climatic and edaphic) were used in a cluster analysis to define the sites. The potential of each group was evaluated based on maximum canopy height. The analysis resulted in the identification of five distinct sites with unique environmental profiles. The assessment of productive potential revealed that Sites 2 and 3 stood out, presenting the highest observed maximum heights, which indicates a superior achievable productivity potential. It is concluded that this classification approach is a robust tool for precision zoning, as the identification of environmentally homogeneous zones informs the optimization of forest planning and management in the region.

Keywords: Cluster Analysis; GEDI; Zoning.



INTRODUÇÃO

A silvicultura de eucalipto é um pilar da economia de Minas Gerais, o maior produtor de madeira plantada do Brasil, sustentando setores como siderurgia e celulose (Minas Gerais, 2025; Da Cunha et al., 2019). O Vale do Jequitinhonha destaca-se como uma importante fronteira para a expansão desta atividade, impulsionada pela demanda industrial e pela disponibilidade de terras (Chauvet et al., 2025). No entanto, o sucesso e a sustentabilidade da silvicultura na região dependem de um planejamento que considere suas complexidades ambientais.

A produtividade dos povoamentos no Vale do Jequitinhonha é afetada diretamente por sua heterogeneidade edafoclimática (Freitas et al., 2020; Landau; Guimarães, 2024). Essa variação resulta em um mosaico de potenciais de crescimento, o que acaba dificultando a realização de um manejo uniforme das áreas de plantio (Alvares et al., 2013; Embrapa, 2017). A análise tradicional, que foca em fatores isolados, muitas vezes falha em capturar as interações sinérgicas que definem um sítio verdadeiramente produtivo. Um planejamento eficaz exige, portanto, uma abordagem que integre múltiplos fatores para identificar combinações favoráveis de variáveis ambientais, superando as limitações dos métodos convencionais de classificação de sítios (Wu et al., 2024). A transição para a Silvicultura de Precisão, que adapta o manejo às condições locais, depende de ferramentas capazes de mapear essa variabilidade (Fardusi, 2017).

Para lidar com essa complexidade multivariada, a análise de agrupamento (cluster analysis) emerge como uma ferramenta estatística robusta. Ela permite agregar locais com perfis ambientais semelhantes em "sítios" ou "zonas" homogêneas, superando a análise de fatores isolados (Rody et al., 2010). A avaliação do potencial produtivo de cada um desses sítios pode então ser realizada de forma eficiente utilizando dados de sensoriamento remoto, como as métricas de altura do dossel fornecidas pelo sensor orbital LiDAR GEDI, que servem como um proxy direto da produtividade florestal (Dubayah et al., 2020).

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi aplicar a análise de agrupamento em um conjunto de variáveis ambientais para classificar a paisagem das sub-regiões do Alto e Médio Jequitinhonha em "sítios ambientais" com características homogêneas. Subsequentemente, o estudo buscou identificar, utilizando dados de altura do GEDI, quais desses sítios apresentaram as maiores alturas máximas, como indicador do desempenho máximo atingível.



MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido nas sub-regiões do Alto e Médio Jequitinhonha, localizadas no nordeste de Minas Gerais. O fluxo de trabalho foi executado utilizando uma integração entre a plataforma Google Earth Engine (GEE) para aquisição e processamento de dados geoespaciais, o ambiente R para a análise estatística, e o software QGIS para a elaboração cartográfica final.

As áreas de silvicultura foram selecionadas a partir da classificação do projeto MapBiomas (Coleção 9). Essa classificação abrange o mosaico de povoamentos da região, incluindo, portanto, plantios em diferentes estágios de desenvolvimento e idades. Nestas áreas, foram distribuídos aleatoriamente 400 pontos amostrais, para os quais foram extraídas as informações de altura do dossel e de variáveis ambientais. A altura do dossel foi obtida pela métrica de altura relativa do percentil 98 (RH98) do sensor GEDI (produto L4A). A escolha desta métrica foi estratégica para estimar o potencial produtivo dos sítios, pois representa a altura máxima do povoamento (Dubayah et al., 2020).

O conjunto de variáveis ambientais preditoras foi compilado a partir de diversas fontes de dados públicos. As variáveis climáticas foram derivadas da coleção WorldClim (Fick; Hijmans, 2017) compreendendo a Precipitação do Mês Mais Chuvoso (PW), Precipitação Anual (AP), Precipitação do Mês Mais Seco (PD), Temperatura Média Anual (AT), Temperatura Máxima (TM), Sazonalidade da Temperatura (TS) e Sazonalidade da Precipitação (PS). Os dados de solo, representados pelo Conteúdo de Água no Solo (WC) e o Teor de Argila no Solo (CC) foram obtidos da coleção OpenLandMap (Hengl, 2018; Hengl; Gupta, 2019). Adicionalmente, o Número Médio de Dias Claros (CD) para o período de 2014 a 2018 foi calculado a partir de dados do sensor MODIS. Todas essas camadas de informação foram integradas em um único cubo de dados rasterizado.

Para identificar os Sítios de Alto Potencial Produtivo, foi realizada a análise de agrupamento (*cluster analysis*) sobre as 10 variáveis ambientais, utilizando o pacote mclust no software R. Para a análise, as variáveis foram padronizadas (média 0 e desvio padrão 1) para garantir que todas tivessem o mesmo peso. O objetivo da clusterização foi agrupar os 400 pontos amostrais em um número ótimo de clusters para que cada cluster representasse um sítio com características ambientais internamente homogêneas e distintas dos demais.



Após a definição dos sítios, o potencial produtivo de cada um foi avaliado. Para isso, analisou-se a distribuição da métrica RH98 (altura máxima do dossel) dentro de cada grupo, utilizada como o principal indicador do potencial máximo de crescimento de cada sítio ambiental. Finalmente, para a representação cartográfica, os pontos com os resultados do agrupamento foram processados no software QGIS (QGIS, 2016). A delimitação das fronteiras de cada sítio foi realizada através da criação de Polígonos de Voronoi, que foram subsequentemente dissolvidos com base no identificador de cada cluster, gerando o mapa final das zonas ambientais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação da análise de agrupamento sobre as 10 variáveis ambientais permitiu classificar a paisagem das sub-regiões do Alto e Médio Jequitinhonha em cinco sítios ambientalmente distintos. Cada sítio representa uma zona com um perfil de características climáticas e edáficas internamente homogêneo que ilustra o mosaico de condições de crescimento dos plantios comerciais (Figura 1).

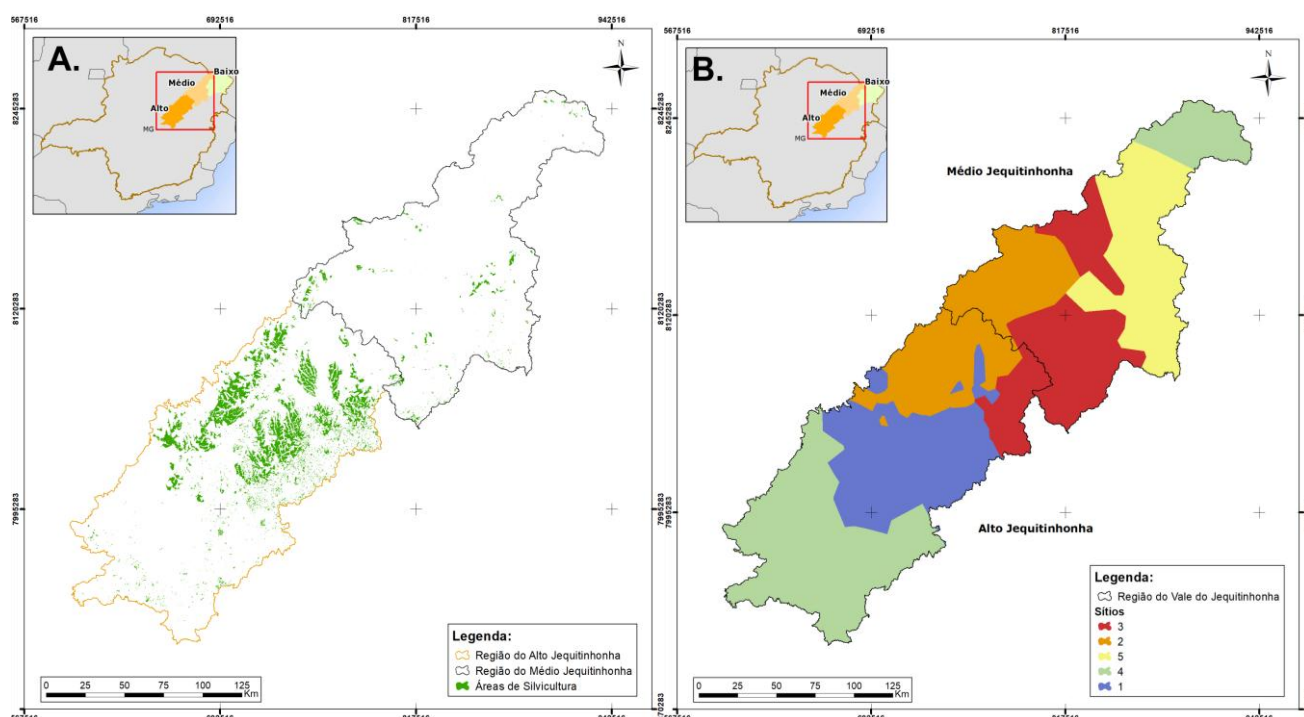


Figura 1. Caracterização espacial da área de estudo e dos sítios ambientais identificados. A) Distribuição dos povoamentos de silvicultura nas sub-regiões do Alto e Médio Jequitinhonha; B) Mapa dos cinco sítios ambientais gerados a partir da análise de agrupamento.



A identificação destes sítios indica que a produtividade florestal na região não é governada por fatores isolados, mas sim pela combinação sinérgica das condições climáticas e edáficas. Esta abordagem de zoneamento, baseada em perfis ambientais, é o primeiro passo para a implementação da silvicultura de precisão, pois permite que as estratégias de manejo sejam direcionadas para zonas com respostas homogêneas, otimizando o uso de recursos e o potencial produtivo.

Uma vez definidos e mapeados estes sítios, buscou-se avaliar como essa heterogeneidade ambiental se traduz em potencial produtivo. Para isso, analisou-se a altura máxima do dossel (GEDI) como indicador do desempenho máximo em cada zona. Os Sítios 3 e 2 destacaram-se por apresentar as maiores alturas, atingindo 38,3 m e 35,7 m, respectivamente, o que indica um potencial de produtividade superior. Estes valores foram substancialmente superiores aos dos demais grupos — Sítio 5 (31,6 m), Sítio 4 (31,1 m) e Sítio 1 (30,4 m).

Os sítios com o maior potencial produtivo atingível (Sítios 3 e 2) encontram-se geograficamente concentrados na zona de transição entre o Alto e o Médio Jequitinhonha. Esta localização estratégica proporciona a maior incidência de radiação solar, evidenciada pelos valores mais elevados de Número de Dias Claros (CD de 117 e 113, respectivamente). Este achado corrobora outros estudos que apontam a radiação solar como um dos principais fatores impulsionadores da produtividade florestal (Wagner et al., 2014; Moore et al., 2018). Além disso, o Sítio 3 (38,3 m) combina um clima favorável: maior precipitação durante o mês seco (PD = 12 mm). Em contraste, o Sítio 2 (35,7 m) demonstra a resiliência conferida por solos superiores. Mesmo enfrentando a maior sazonalidade de chuvas do estudo (PS = 90), ele sustenta alta produtividade graças ao maior teor de argila (CC = 46%) e capacidade de retenção de água (WC = 37%), que mitigam o estresse hídrico. Os sítios de menor desempenho, como o Sítio 5 (31,6 m) é limitado por um déficit hídrico (menor AP = 975 mm) e estresse por calor (maior AT = 22.1), enquanto o Sítio 4 (31,1 m) apresenta instabilidade climática, notadamente a alta sazonalidade de temperatura (TS = 19,92). Por fim, o Sítio 1 (30,4 m), de menor desempenho geral, menor incidência de luz (CD = 93.2) e solos com menor capacidade de retenção de água (WC = 31%).



Este zoneamento é uma ferramenta estratégica que permite alocar práticas de manejo específicas para cada sítio. Áreas de alto potencial (Sítios 2 e 3) podem ser destinadas à intensificação produtiva, enquanto áreas de menor potencial (1, 4 e 5) podem receber práticas adaptativas, como o uso de clones tolerantes a estresses. Assim, a metodologia otimiza o planejamento e a eficiência do uso da terra no Vale do Jequitinhonha.

CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou a expressiva heterogeneidade ambiental do Vale do Jequitinhonha, segmentando-a de forma quantitativa em cinco sítios produtivos distintos. Esta diferenciação valida a importância do zoneamento como ferramenta para um planejamento e manejo mais eficazes, superando abordagens uniformes, permitindo direcionar práticas específicas para cada realidade. A análise da altura máxima do dossel em cada zona sugere o potencial de produtividade atingível, permitindo uma hierarquização dos sítios com base neste critério. Conclui-se que a classificação de sítios via análise de agrupamento é uma ferramenta eficaz para o zoneamento de aptidão, subsidiando a silvicultura de alta performance na região.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, CNPq (projetos 402513/2024-0 e 402513/2024-0), e FAPEMIG (projetos APQ-00943-21 e APQ-00185-22).

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- CHAUVET, X.D.M.; DE JESUS FRANÇA, L.C.; MUCIDA, D.P. et al. Quatro Décadas do Setor Florestal em Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 18(02), 1308-1333, 2025.
- DA CUNHA, G.T.; LEITE, I.; LOPES, R.M.O. et al. Panorama do setor florestal brasileiro com ênfase no estado de Minas Gerais. *Enciclopédia biosfera*, Goiânia, v.16, p. 1582, 2019.
- DUBAYAH, R.; BLAIR, J.B.; GOETZ, S. et al. The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Science of remote sensing*, 1, 100002, 2020.



EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Prognose de produção para a cultura do eucalipto. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

FARDUSI, M.J., CHIANUCCI, F., & BARBATI, A. Concept to practice of geospatial-information tools to assist forest management and planning under precision forestry framework: A review. *Ann. Silv. Res*, 41(1), 3-14, 2017.

FICK, S.E., & HIJMANS, R.J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315, 2017.

FREITAS, E.C.S.; DE PAIVA, H.N.; NEVES, J.C.L. et al. Modeling of eucalyptus productivity with artificial neural networks. *Industrial Crops and Products*, 146, 112149, 2020.

HENGL, T. Clay content in % (kg/kg) at 6 standard depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m resolution (Version v0.2) [data set]. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/ZENODO.2525663>. Acesso em 07 de julho de 2025.

HENGL, T.; GUPTA, S. Soil water content (volumetric %) for 33 kPa and 1500 kPa suctions predicted at 6 standard depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m resolution [data set]. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/ZENODO.2784001>. Acesso em em 07 de julho de 2025.

LANDAU, E.C.; GUIMARÃES, D.P. (ed.). Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha: caracterização ambiental, demográfica, agrária e socioeconômica. Brasília, DF: Embrapa, 2024.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano Estadual Agrícola para o Desenvolvimento Sustentável de Florestas Plantadas de Minas Gerais. Belo Horizonte: SEAPA, 2025.

MOORE, C.E.; BERINGER, J.; DONOHUE, R. J. et al. Seasonal, interannual and decadal drivers of tree and grass productivity in an Australian tropical savanna. *Global Change Biology*, v. 24, n. 6, p. 2530-2544, 2018.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project QGIS Association, 2016. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>



RODY, Y.P.; ALMEIDA, A.Q.D.; RIBEIRO, A. et al. Delimitação de sítios ambientais homogêneos no Estado do Espírito Santo, com base no relevo, solo e clima. *Ciência Rural*, 40, 2493-2498, 2010.

WANG, Q.; NI-MEISTER, W.; NI, W. et al. The Potential of Forest Biomass Inversion Based on Canopy-Independent Structure Metrics Tested by Airborne LiDAR Data. In IGARSS 2019-2019 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 7354-7357, 2019.

WAGNER, F.; ROSSI, V., AUBRY-KIENTZ, M. et al. Pan-tropical analysis of climate effects on seasonal tree growth. *PLoS One*, v. 9, n. 3, p. e92337, 2014.

WU, B.; LEI, X.; XU, Q. et al. Forest site classification and grading using mixed-variables clustering and nonlinear mixed-effects modeling based on forest inventory data. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, cpaf017, 2024.