



## **Regionalização da Amazônia a partir de variáveis ambientais**

### **Regionalization of the Amazon based on environmental variables**

Gustavo Henrique de Oliveira Mourão<sup>1</sup>, Igor Junio Rocha<sup>2</sup>, Luciano Emmert<sup>3</sup>, Maria Luiza de Azevedo<sup>4</sup>, Artur Ferro de Souza<sup>5</sup>, Eric Bastos Gorgens<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina/MG  
[gustavo.mourao@ufvjm.edu.br](mailto:gustavo.mourao@ufvjm.edu.br)

<sup>2</sup>Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina/MG  
[rocha-igor.ir@ufvjm.edu.br](mailto:rocha-igor.ir@ufvjm.edu.br)

<sup>3</sup>Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina/MG  
[lucianoemmert@yahoo.com.br](mailto:lucianoemmert@yahoo.com.br)

<sup>4</sup>Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina/MG  
[marialuiza.azevedo@ufvjm.edu.br](mailto:marialuiza.azevedo@ufvjm.edu.br)

<sup>5</sup>Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina/MG  
[artur.ferro@ufvjm.edu.br](mailto:artur.ferro@ufvjm.edu.br)

<sup>6</sup>Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina/MG  
[eric.gorgens@ufvjm.edu.br](mailto:eric.gorgens@ufvjm.edu.br)

**Resumo:** Regionalizações clássicas da vegetação sintetizam padrões biogeográficos, mas frequentemente ocultam variações ambientais relevantes. Este estudo propõe uma regionalização ambiental da Amazônia a partir de 16 variáveis ambientais avaliadas em 805 pontos distribuídos no bioma. A análise por misturas gaussianas identificou 11 classes que, ao serem geolocalizadas, exibiram organização espacial robusta. O mapa de calor padronizado e dendrograma evidenciou dois ramos principais e subgrupos coerentes envolvendo regimes de precipitação, energia atmosférica, vento, relevo e solo. Em comparação com as províncias de Morrone, observou-se forte heterogeneidade intra-provincial, notadamente em Xingu Tapajós, onde múltiplas classes coexistem. A regionalização discrimina 11 domínios contíguos e fornece base quantitativa para confrontar divisões fitogeográficas com gradientes ambientais mensuráveis, apoiando interpretações regionais e comparações úteis ao planejamento.

**Palavras-chaves:** Ecorregiões; Estratificação ambiental; Unidades ambientais.

**Abstract:** Classical vegetation regionalizations synthesize biogeographic patterns but often mask relevant environmental variation. This study derives an environmental regionalization of the Amazon from 16 environmental variables assessed at 805 points distributed across the biome. Gaussian mixture analysis identified 11 classes that, once geolocated, exhibited robust spatial organization. The standardized heatmap and dendrogram revealed two main branches and coherent subgroups involving precipitation regimes, atmospheric energy, wind, topography, and soils. When compared with Morrone's provinces, strong intra-provincial heterogeneity emerged, notably in Xingu-Tapajós, where multiple classes co-occur. The regionalization delineates 11 contiguous domains and provides a quantitative basis to confront phytogeographic divisions with measurable environmental gradients, supporting regional interpretation and comparisons relevant to planning.

**Keywords:** Ecoregions; Environmental stratification; Environmental units.



## **INTRODUÇÃO**

Ao longo do tempo, a Amazônia tem sido interpretada por diferentes esquemas de regionalização da vegetação, os quais variam entre abordagens universais (Ellenberg; Mueller-Dombois, 1967; Di Gregorio, 2005), continentais (Beard, 1955; Morrone, 2001) e voltadas ao contexto brasileiro (Eiten, 1983; IBGE, 2012). Essas abordagens consolidaram uma tradição fisionômica-ecológica para organizar grandes unidades vegetacionais. Ao mesmo tempo, evidenciaram a dificuldade de alcançar consenso pleno, dada a diversidade de escalas e terminologias empregadas para diferenciar fitofisionomias (IBGE, 2012). O debate contemporâneo evidencia o desafio de descrever e mapear a heterogeneidade amazônica de forma coerente e operacional. Entre as sínteses de recorte continental, a proposta de Morrone destaca-se por dividir a América Latina e Caribe em três regiões, oito sub-regiões e 70 províncias, as quais são definidas com base na vegetação predominante, táxons endêmicos ou característicos, sinonímias e relações biogeográficas (IBGE, 2012; Morrone, 2001).

Uma moldura espacial traduz condicionantes ambientais de fundo, como clima, relevo e solos, que estruturam tanto a composição biótica quanto os gradientes físicos. Por isso, uma regionalização fundamentada em variáveis ambientais pode oferecer uma leitura complementar e comparável dos padrões espaciais. Nesse sentido, a regionalização relaciona-se ao manejo florestal, pois a estratificação ambiental oferece suporte ao planejamento e à execução de inventários florestais e demais levantamentos sistemáticos. Embora os estratos definidos nem sempre coincidam perfeitamente com unidades de manejo, sua utilidade está em fornecer um ponto de partida para a compreensão da heterogeneidade da floresta. A estratificação permite identificar áreas com características semelhantes, o que facilita a aplicação de métodos diferenciados de amostragem, a definição de parâmetros de monitoramento e, sobretudo, a escolha de estratégias de manejo mais adequadas. O objetivo deste estudo é propor uma divisão ambiental da Amazônia derivada de variáveis edáficas, climáticas, energia e distúrbios ambientais, produzindo um mapa regionalizado que representa os principais gradientes ambientais que estruturam a floresta.



## **MATERIAL E MÉTODOS**

A área estudada abrange os limites geográficos do Bioma Amazônico. Para investigar os gradientes estruturais da floresta amazônica, utilizou-se os centróides de 805 transectos, provenientes do projeto Estimativa de Biomassa da Amazônia (Ometto et al. 2023). A distribuição majoritariamente aleatória dos transectos proporcionou uma amostragem espacial ampla e não tendenciosa. Em cada centróide, extraiu-se 16 variáveis ambientais preditoras em formato raster, sendo elas: fração de radiação fotossinteticamente ativa absorvida, elevação, evapotranspiração potencial, número de dias limpos, porcentagem de argila no solo, frequência de raios, velocidade do vento meridional, velocidade do vento zonal, sazonalidade da temperatura, temperatura média anual, temperatura máxima anual, precipitação anual, número de dias com precipitação superior a 20 mm, precipitação do mês mais úmido, sazonalidade da precipitação e porcentagem de água no solo. Mais detalhes sobre essas variáveis em Gorgens et al. (2021).

Os dados ambientais foram padronizados (média 0 e desvio padrão 1) antes da análise de agrupamento para evitar influência da escala. As análises espaciais foram feitas em linguagem R (R Core Team, 2025). A classificação dos pontos foi realizada pelo algoritmo Mclust (pacote “mclust”), o qual se baseia no ajuste de modelos de mistura gaussiana e seleção automática do número ótimo de grupos com base no Critério de Informação Bayesiano (BIC), penalizando modelos mais complexos para evitar sobreajuste.

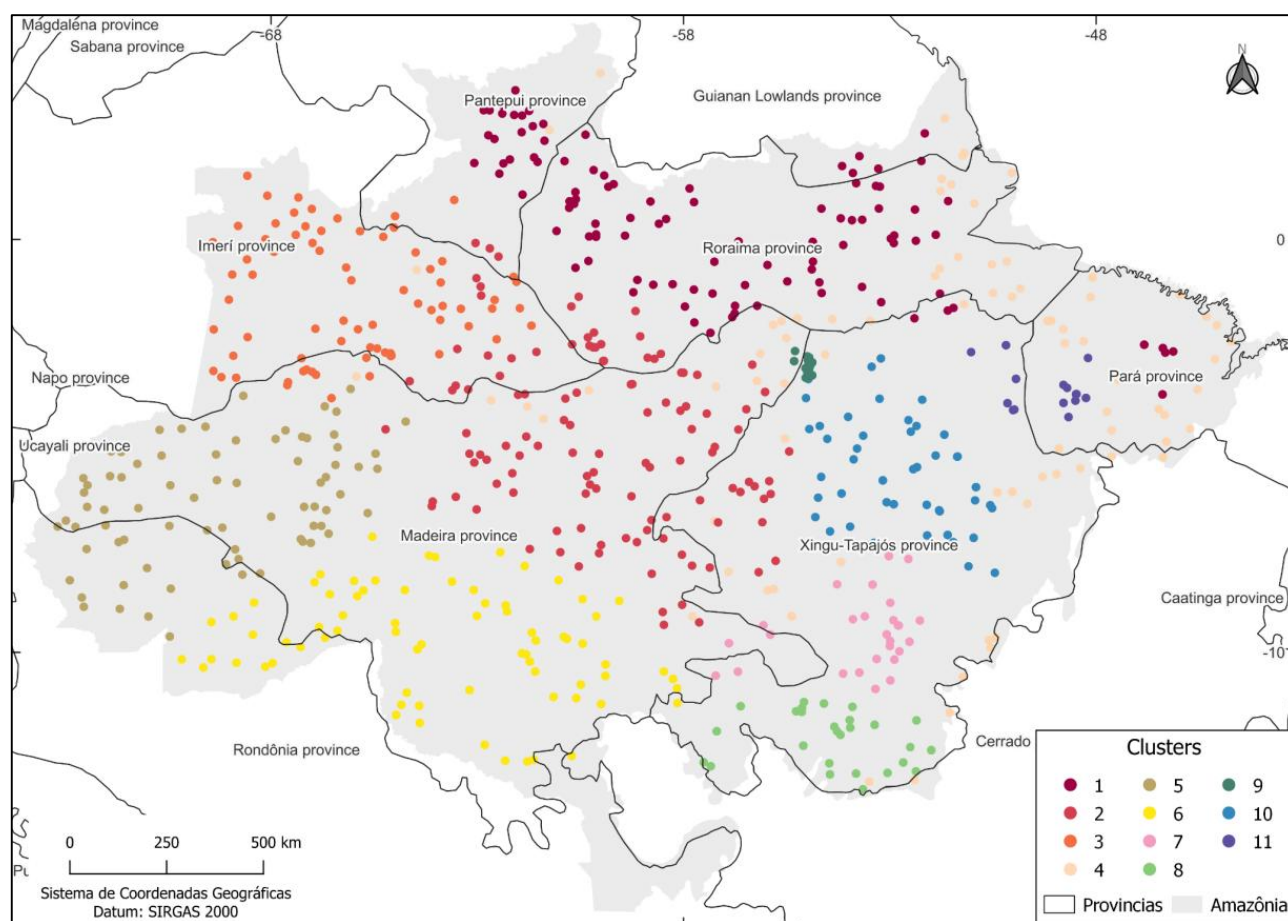
A estrutura média dos grupos foi visualizada num dendrograma evidenciando o z-scores médios das variáveis. O dendrograma foi construído pela função pheatmap (pacote pheatmap ) mediante agrupamento hierárquico das variáveis. O z-score foi obtido subtraindo a média global de cada variável do valor médio observado em determinado cluster e dividindo o resultado pelo desvio padrão global correspondente, permitindo comparações em escala padronizada. As colunas correspondem às variáveis e as linhas aos clusters. Cada célula apresenta um z-score médio. Tons quentes indicam valores acima da média global e tons frios indicam valores abaixo. O dendrograma no topo organiza as variáveis segundo a semelhança dos seus perfis de z-score ao longo dos clusters, usando distância euclidiana e ligação completa. Ramos curtos indicam maior similaridade e a hierarquia de nós evidencia conjuntos de variáveis que compartilham comportamento semelhante entre os grupos.



O mapa com os centróides de amostragem classificados foi sobreposto às províncias de Morrone (2001) para se avaliar a correspondência entre a estrutura ambiental gerada pelos clusters e as unidades biogeográficas.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O algoritmo de agrupamento identificou 11 clusters a partir das 16 variáveis ambientais, não considerando o uso das coordenadas geográficas dos centróides. Entretanto, devolvida a classificação aos locais de amostragem, os rótulos mostraram consistência geográfica com formação de agrupamentos espaciais (Figura 1). No entanto, os agrupamentos encontrados sugerem diferentes regiões de contatos se comparado às províncias propostas por Morrone (2001).



**Figura 1:** Mapa de pontos classificados a partir de 16 variáveis ambientais, sobreposto com a classificação de províncias proposta por Morrone (2001).

No centro-leste da Amazônia, a província do Pará apresenta três classes com distribuições agrupadas, enquanto Xingu-Tapajós reúne oito classes distintas. Essa



mudança espacial aponta elevada heterogeneidade ambiental nesta região. A província Imerí apresenta majoritariamente uma única classe. No sul, a província Madeira exibe um domínio relativamente homogêneo que contrasta com a faixa de transição para Rondônia e para o arco de contato com o Cerrado, onde se mantém apenas uma classe. Ainda na província Madeira, observam-se outras duas classes, uma no centro da Amazônia e outra formando uma faixa contínua em conjunto com a província de Rondônia.

O dendrograma pode ser dividido em dois grandes grupos (Figura 2). No primeiro, surgem dois subconjuntos: o primeiro reúne porcentagem de argila no solo (clayContent), precipitação do mês mais úmido (pwettest) e temperatura média anual (tannual); o segundo agrega dias com precipitação superior a 20 mm (days20), precipitação anual (pannual) e fração de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (fapar). No segundo grande grupo, também se distinguem dois subconjuntos: um com evapotranspiração potencial (pet), sazonalidade da precipitação (pseason), componente zonal do vento (uspeed); e outro com frequência de raios (lightning), componente meridional do vento (vspeed) sazonalidade da temperatura (tseason), porcentagem de água no solo (waterContent), elevação (elevation), número de dias limpos (clearDays) e temperatura máxima anual (tmax). As cores do z-score evidenciam que diferentes clusters apresentam forte heterogeneidade entre as variáveis; essas diferenças sustentam a separação dos grupos, como ilustram o cluster 4, que exibiu o menor fapar em relação aos demais, e o cluster 3, que apresentou o maior pannual.

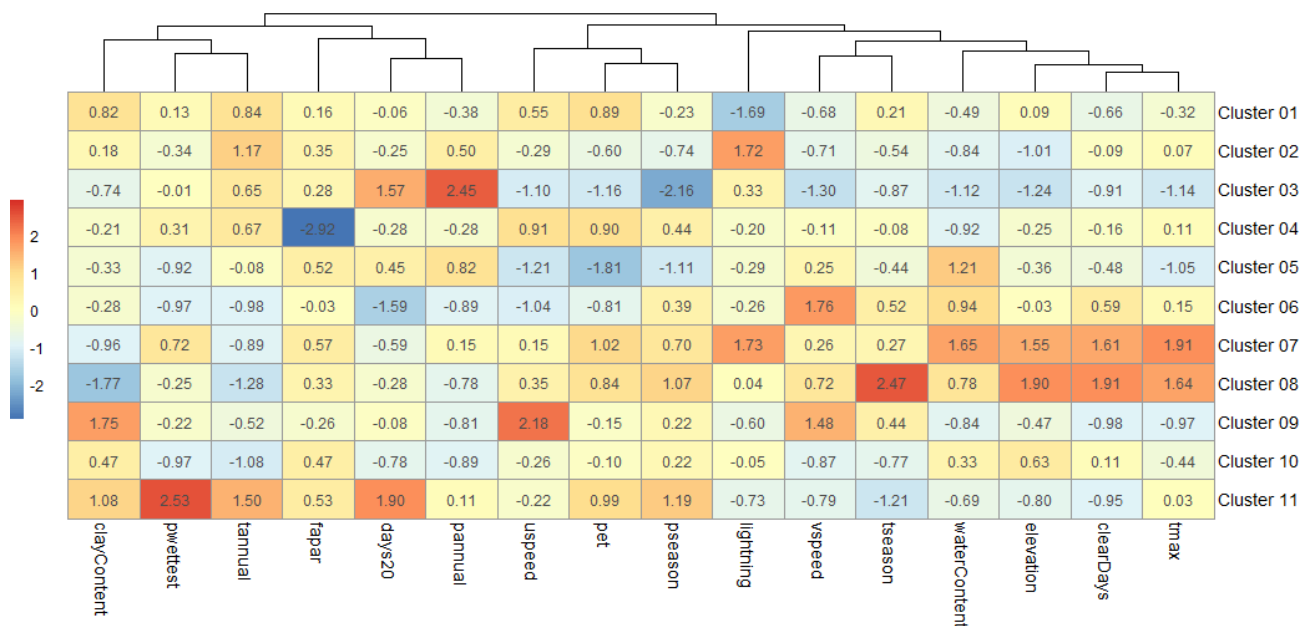
Delimitar áreas ambientalmente homogêneas resulta em estimativas de biomassa mais consistentes, uma vez que diminui a influência de vieses associados à heterogeneidade da paisagem (Jiang et al., 2020). No contexto amazônico, a definição de domínios ambientais possibilita orientar inventários florestais de forma mais eficiente, ao ajustar os métodos de amostragem às condições específicas de cada estrato. Essa abordagem contribui não apenas para aumentar a precisão das estimativas de biomassa, mas também para otimizar o uso de recursos no planejamento de levantamentos de grande escala.

Além disso, a regionalização atua como um instrumento estratégico para o monitoramento ambiental e o manejo florestal sustentável. Ao relacionar variáveis edáficas, climáticas e topográficas a padrões espaciais de vegetação, torna-se possível identificar áreas com maior vulnerabilidade a perturbações ou com maior potencial madeireira (Boulton et al., 2022; Serrano-Ramírez et al., 2022). Esse tipo de abordagem permite que planos de





manejo incorporem diferenciações regionais, alocando práticas específicas de exploração ou conservação conforme as características locais. Assim, a integração de variáveis ambientais mensuráveis ao processo de regionalização fortalece a capacidade de acompanhar mudanças estruturais da floresta, apoiar políticas de conservação e orientar práticas de manejo adaptadas à diversidade ambiental amazônica.



**Figura 2:** Mapa de calor de z-scores e dendrograma de variáveis ambientais e clusters.

## CONCLUSÃO

Novos dados de sensoriamento remoto permitem uma nova proposta de regionalização, consolidando um arcabouço ambiental capaz de dialogar com esquemas biogeográficos clássicos e, ao mesmo tempo, revelar diferenciações intra-provinciais que esses recortes tendem a atenuar. A metodologia fornece uma proposta inicial para integrar variáveis ambientais mensuráveis às leituras tradicionais da paisagem, com utilidade direta para o manejo, conservação e monitoramento. No contexto florestal, isso representa um avanço significativo, pois possibilita maior precisão na mensuração de estoques de biomassa e carbono, auxilia na definição de estratégias de manejo sustentável e otimiza o planejamento de ações voltadas à conservação dos recursos florestais.



## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, CNPq e FAPEMIG. Registram-se os apoios CNPq 403297/2016-8, 401053/2019-9, 306386-2022-4; Fundo Amazônia 14.2.0929.1; USAID AID-OAA-A-11-00012.

## REFERÊNCIAS

BEARD, J. S. The classification of tropical american vegetation-types. Ecology, Washington, DC: Ecological Society of America - ESA, v. 36, n. 1, p. 89-100, Jan. 1955.brasileiras

BOULTON, C. A et al. Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s. Nature Climate Change, v. 12, n. 3, p. 271-278, 2022.

DI GREGORIO, A. Land cover classification system (LCCS): classification concepts and user manual. Version 2. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO, 2005. 190 p. (Environment and natural resources series, n. 8).

ELLENBERG, H.; MUELLER-DOMBOIS, D. Tentative physiognomic-ecological classification of plant formations of the Earth. Berichte des Geobotanischen Institutes der Eidg. Techn. Hochschule Stiftung Rübel, Zurich: ETH, v. 37, p. 21-55, 1967.

EITEN, G. Classificação da vegetação do Brasil. Brasília, DF: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, 1983. 305 p.

GORGENS, E. B. et al. Resource availability and disturbance shape maximum tree height across the Amazon. Global Change Biology, v. 27, n. 1, p. 177-189, 2021.

IBGE. Manual técnico da vegetação brasileira: sistema fitogeográfico; inventário das formações florestais e campestres; técnicas e manejo de coleções botânicas; *procedimentos para mapeamentos*. 2. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. (Manuais técnicos em geociências, n. 1. ISBN 978-85-240-4272-0.

JIANG, X. et al. Stratification-based forest aboveground biomass estimation in a subtropical region using airborne lidar data. Remote Sensing, v. 12, n. 7, p. 1101, 2020.

MORRONE, J. J. Biogeografía de América Latina y el Caribe. Zaragoza [Espanha]: Sociedad Entomológica Aragonesa - SEA, 2001. 148 p.



OMETTO, Jean Pierre et al. A biomass map of the Brazilian Amazon from multisource remote sensing. Scientific Data, v. 10, n. 1, p. 668, 2023.

R Core Team (2025). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

SERRANO-RAMÍREZ, E. et al. Complex networks, an innovative methodology for functional zoning in forest management. iForest-Biogeosciences and Forestry, v. 15, n. 4, p. 299, 2022.