

Diversidade da paisagem

O cálculo de diversidade da paisagem foi realizado no *Google Earth Engine* (Gorelick et al. 2017) e é composto por médias feitas pixel a pixel entre os maiores valores padronizados (*Z-scores*) das imagens: **Variedade de landforms**, **Amplitude altitudinal**, **Valores de áreas úmidas** e **Diversidade de solo**. Utilizamos o *Google Earth Engine* devido a demanda computacional das análises e por ser uma plataforma baseada em nuvem, que oferece acesso remoto a uma vasta coleção de imagens de satélite e bases de dados geoespaciais de acesso livre e com capacidade computacional para realizar as análises em qualquer equipamento disponível (Gorelick et al. 2017). Isso possibilita que nossas análises sejam de livre acesso, escalonáveis para outras regiões do mundo e que contribuam para uma ciência mais transparente, reproduzível e livre.

Variedade de *landforms*

A classificação e distribuição espacial de *landforms* (formas de relevo) são a base para o cálculo da **diversidade da paisagem** e representam áreas com maiores estabilidade microclimática que resistirão aos impactos causados pelas mudanças climáticas (Anderson et al. 2016). Essa classificação é baseada em combinações de informações sobre a **inclinação** (*slope*), **orientação do relevo** (*aspect*), **índice de posição topográfica** (*topographic position index*), **índice de umidade** (*moisture index*) e a distribuição de **rios** e **lagos** dos ambientes. A combinação dessas variáveis representa a variação de umidade, radiação solar e deposição de sedimentos (Anderson et al. 2016) na paisagem.

A metodologia de classificação de formas de relevo foi baseada em estudos prévios conduzidos pela equipe da **TNC América do Norte**, publicada inicialmente em 2014 (Anderson et al. 2014) e refinada em estudos posteriores (Anderson et al. 2023).

Para o cálculo de **inclinação**, **orientação do relevo** e **índice de posição topográfica (TPI)**, utilizamos o modelo digital de elevação (DEM) do Merit-DEM (Yamazaki et al. 2017), em uma escala de 90 m. Escolhemos utilizar esse DEM por ser um produto em escala global, de livre acesso e com correções de vários vieses de modelos de elevação, principalmente vieses de elevação em áreas com alta densidade de florestas. Além disso, o Merit-DEM já possui um **acúmulo de fluxo** calculado sobre ele, em escala global, disponível no Merit-Hydro (Yamazaki et al. 2019). Essa camada de acúmulo de fluxo é corrigida para o efeito da densidade de árvores no cálculo da rede hidrográfica da região (Yamazaki et al. 2019), o que possibilita que nosso trabalho seja replicável e mais próximo da realidade dos biomas que modelamos.

Para complementar a superfície gerada pelo acúmulo de fluxo e definir a presença de **rios** e **lagos**, nós incluímos as classes de água do MapBiomas Coleção 7 (Project 2020). O MapBiomas é um projeto nacional de mapeamento e classificação de mudanças do uso do solo dos últimos 30 anos, a partir de dados de sensoriamento remoto.

* Índice de posição topográfica (TPI)

O cálculo do TPI foi feito em três escalas com uma janela circular com 7, 11 e 15 células de raio, calculando a diferença da média de elevação entre a célula focal e um conjunto de células vizinhas (i), divididos pelo número de células vizinhas (n).

$$TPI = \frac{\sum_i^n (vizinhana_i - focal)}{n}$$

O índice é composto pela média de TPI das três escalas, o que permite a consideração de níveis locais e regional de resolução da paisagem (Theobald et al. 2015). Os tamanhos das janelas foram definidos visualmente para que melhor representassem as formas de relevo.

* Orientação do relevo (*aspect*)

A orientação do relevo é calculado como um gradiente local das 4 células adjacentes. Os resultados são apresentados em graus, que representam a direção do relevo (0° = Norte, 90° = Leste, 180° = Sul e 270° = Oeste). Nós dividimos a orientação do relevo em dois grupos, baseados na quantidade de incidência solar, sendo células com valores entre 90° e 270° classificados como **faces frias** e valores entre 0° a 90° e 270° a 360° , classificados como **faces quentes**.

* Inclinação do relevo (*slope*)

A inclinação do relevo é calculada como um gradiente local das 4 células adjacentes, os resultados são apresentado em graus que representam a inclinação do relevo (0° a 90°).

* Índice de umidade (*moisture index*)

O índice de umidade (*moisture index*) foi calculado com base no **acúmulo de fluxo** do Merit-Hydro e a **inclinação do relevo** que calculamos anteriormente.

$$moisture.index = \frac{\log(fluxo + 1)}{(slope + 1)} \times 1000$$

O índice de umidade é a média do índice dentro de uma janela circular de uma célula de raio determinado. O tamanho do raio foi escolhido visualmente para suavizar o índice, mas representando bem a distribuição dos cursos d'água.

Transformando os índices em classes

Cada índice (TPI, inclinação, orientação e índice de umidade) foi transformado em classes (Tabela 1) para formarem os tipos de *landforms*. O índice umidade é classificado como presença ou ausência de umidade, sendo locais com rios e lagos classificados como presença.

Tabela 1: Classes dos índices usados para a classificação de *landforms*

| Variáveis | Classes | Limiar inferior | Limiar superior |
|----------------------|---------|-----------------|-----------------|
| Inclinação do relevo | 1 | -1 | 2 |
| Inclinação do relevo | 2 | 2 | 6 |
| Inclinação do relevo | 3 | 6 | 24 |
| Inclinação do relevo | 4 | 24 | 35 |
| Inclinação do relevo | 5 | 35 | 90 |
| TPI | 1 | -Inf | -15 |
| TPI | 2 | -15 | -1 |
| TPI | 3 | -1 | 30 |
| TPI | 4 | 30 | 975 |
| Aspecto | 2 | 0 | 90 |
| Aspecto | 1 | 90 | 270 |
| Aspecto | 2 | 270 | 360 |
| Índice de Umidade | 0 | -Inf | 30000 |
| Índice de Umidade | 1 | 3000 | Inf |

* Combinando as variáveis e classificando as *landforms*

A partir das classificações de todas as variáveis, geramos um código representativo das combinações de classificações das localidades. A classe do índices de umidade é multiplcado por 1000, orientação do relevo por 100, TPI por 10 e inclinação do relevo por 1. Dessa forma, podemos representar as classes dos índices de uma localidade por um único número. Por exemplo, o código 11 representa áreas de baixa inclinação do relevo e uma posição do relevo mais alta que o entorno, sendo portanto um topo de montanha (*summit*). No entanto, alguns códigos tiveram que ser inspecionados visualmente para classificar alguns tipos de *landforms*, como *sideslopes*, *valleys* e *toeslopes* (Tabela 2).

Tabela 2: Combinações entre as variáveis para classificar as formas de relevo

| Valores da Combinação | Código para Landforms |
|-----------------------|-----------------------|
| 10 | 11 |
| 11 | 11 |
| 12 | 11 |

| Valores da Combinação | Código para Landforms |
|-----------------------|-----------------------|
| 13 | 13 |
| 14 | 11 |
| 15 | 5 |
| 20 | 21 |
| 21 | 21 |
| 22 | 22 |
| 23 | 24 |
| 24 | 24 |
| 25 | 5 |
| 31 | 30 |
| 32 | 32 |
| 33 | 24 |
| 34 | 24 |
| 35 | 5 |
| 40 | 32 |
| 41 | 32 |
| 42 | 32 |
| 43 | 43 |
| 44 | 3 |
| 45 | 5 |
| 51 | 51 |
| 111 | 11 |
| 112 | 11 |
| 113 | 13 |
| 114 | 3 |
| 115 | 5 |
| 121 | 21 |
| 122 | 22 |
| 123 | 23 |
| 124 | 3 |
| 125 | 5 |
| 131 | 30 |
| 132 | 32 |
| 133 | 23 |
| 134 | 3 |
| 135 | 5 |
| 141 | 32 |
| 142 | 32 |
| 143 | 43 |
| 144 | 3 |
| 145 | 5 |

| Valores da Combinação | Código para Landforms |
|-----------------------|-----------------------|
| 151 | 51 |
| 211 | 11 |
| 212 | 11 |
| 213 | 13 |
| 214 | 4 |
| 215 | 5 |
| 221 | 21 |
| 222 | 22 |
| 223 | 24 |
| 224 | 4 |
| 225 | 5 |
| 231 | 30 |
| 232 | 32 |
| 233 | 24 |
| 234 | 4 |
| 235 | 5 |
| 241 | 32 |
| 242 | 32 |
| 243 | 44 |
| 244 | 4 |
| 245 | 5 |
| 251 | 51 |
| 1000 | 39 |

A classificação final de landforms se encontra na Tabela 3.

Tabela 3: Códigos das formas de relevo obtidas após classificação das variáveis

| Códigos | Nomes |
|---------|----------------------|
| 3 | Cool Steep Slope |
| 4 | Warms Steep Slope |
| 5 | Cliff |
| 11 | Summit/Ridgetop |
| 13 | Slope Crest |
| 21 | Flat Hilltop |
| 22 | Gentle Slope Hilltop |
| 23 | Cool Sideslope |
| 24 | Warm Sideslope |
| 30 | Dry Flats |
| 32 | Valley/Toeslope |

| Códigos | Nomes |
|---------|----------------|
| 39 | Moist Flats |
| 43 | Cool Footslope |
| 44 | Warm Sideslope |

* Gerando a variedade de *landforms*

A variedade de *landforms* foi calculada como quantidade de tipos de *landforms* dentro de um *kernel* circular da célula focal. O tamanho do raio do kernel foi definido calculando a variedade em diferentes raios (2, 5, 7, 10, 15, 20 células) e calculando o ganho de variedade a cada aumento de raio. O raio escolhido foi aquele em que o seu subsequente não adicionou variedade.

Desta forma, o raio representa o nível de resolução da paisagem que captura o máximo de variedade de *landforms*. Assim, o raio escolhido foi de 5 células de raio (450 m) para todo o Brasil. Por fim, calculamos os valores de Z para cada pixel (Z_{pixel}) ao subtrair o valor da média (μ) e dividindo o resultado pelo desvio padrão (σ), como mostrado na fórmula a seguir:

$$Z_{pixel} = \frac{X_{pixel} - \mu}{\sigma}$$

Os cálculos de Z foram feitos dentro de cada classificação de **regiões eco-geológicas** usando médias e desvios padrão dentro de cada uma das classes.

Amplitude altitudinal

A amplitude altitudinal representa a variação da elevação em uma região, independente do número de *landforms*, controlando a relação entre ambas já que elas são correlacionadas entre si. A amplitude altitudinal foi calculada como a diferença entre os valores máximos e mínimos de elevação, dentro de um *kernel* circular de 450 m, a partir dos dados do DEM do MERIT (Yamazaki et al. 2017). fizemos então uma Regressão Linear Simples (*Ordinary Linear Regression*) entre os **valores de amplitude altitudinal** e a **variedade *landforms*** e obtivemos os valores dos resíduos dessa análise para diminuir a correlação entre as duas variáveis.

Por fim, os valores da variação desses resíduos da correlação entre a amplitude e a variedade da forma de relevo, para cada pixel (Z_{pixel}), podem ser calculados ao subtrair o valor da média (μ) e dividir o resultado pelo desvio padrão (σ), como mostrado na fórmula a seguir:

$$Z_{pixel} = \frac{X_{pixel} - \mu}{\sigma}$$

Dessa forma, temos uma imagem que mostra a variação, em relação à média, dos valores dos resíduos da amplitude altitudinal dentro de cada uma das categorias de regiões eco-geológicas.

Índice de áreas úmidas

Para calcular o índice de áreas úmidas, utilizamos os dados disponibilizados na base de dados *Global Wetlands Database* (Gumbricht et al. 2017), que é uma base de dados que fornece informação e inventário de áreas úmidas no mundo. Os dados são obtidos através de imagens de satélite, amostragens aéreas e relatórios publicados. Como áreas úmidas ocorrem em diversas configurações e distribuições no espaço, nós avaliamos a densidade e o número de áreas úmidas em escala local (450 metros) e escala regional (1170 metros). A **densidade de áreas úmidas** foi calculada como a média do número de *pixels* de áreas úmidas, dentro de um *kernel* de escala regional (1170 m) e um kernel em escala local (450 m). Já a **contagem em escala local** foi calculada como uma contagem de *pixels* dentro de um *kernel* circular em escala regional (1170 metros). A contagem vai representar o número de áreas úmidas ao redor do *pixel* focal, mostrando regiões de maiores quantidades de áreas úmidas, mas em baixa densidade.

Essas 3 camadas vão auxiliar na identificação de regiões de diversidade da paisagem que apresentem valores baixos para formas de relevo e amplitude de elevação, mas que tenham um acúmulo de áreas úmidas que poderiam amenizar localmente o efeito das mudanças climáticas (Anderson et al. 2016).

Para calcular os **valores finais de áreas úmidas**, é necessário juntar as informações das camadas de **densidade local**, **densidade regional** e a **contagem em escala local**. Começamos calculando valores padronizados para cada uma delas (Z_{local} , $Z_{regional}$ e $Z_{contagem}$, respectivamente) ao subtrair os valores de pixels (X_{pixel}) pela média (μ) e dividirmos o resultado pelo desvio padrão (σ) dentro das diferentes categorias de **regiões eco-geológicas**, como na fórmula:

$$Z_{pixel} = \frac{X_{pixel} - \mu}{\sigma}$$

Com o Z calculado para as 3 camadas, podemos calcular os valores de áreas úmidas (Z_{midas}) ao fazermos uma média dos valores para as camadas de densidade local, densidade regional e contagem.

Primeiro calculamos a média entre as imagens de valores de áreas úmidas em escala local (Z_{local}) e regional ($Z_{regional}$), atribuindo mais peso para os valores da densidade local:

$$Z_{densidade} = \frac{(Z_{local} \times 2) + Z_{regional}}{3}$$

Ao compararmos esse resultado com a camada de contagem regional, podemos identificar os locais onde os valores para densidade ($Z_{densidade}$) são menores que os valores de contagem ($Z_{contagem}$) e calculamos a média para esses pixels, novamente dando mais peso ao valores de densidade:

$$Z_{midas} = \frac{(Z_{densidade} \times 3) + Z_{contagem}}{4}$$

Ao final de todas as operações, temos uma única camada com valores que representam a variação em relação à média dos valores de densidade e contagem de pixels de áreas úmidas referentes às regiões eco-geológicas.

Diversidade de solo

A diversidade de solo foi calculada como a distribuição do número de classes de solo, dentro de um *kernel* de 1350 m. Ela foi usada para indicar áreas com grande concentração dos diferentes tipos de solo que vão afetar diretamente na diversidade de espécies no ambiente. Para calcular o raster de diversidade do solo usamos a classificação oficial dos solos brasileiros, disponibilizada pelo [Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística \(IBGE\)](#).

Como a classificação do IBGE foi disponibilizada em formato de *shapefile*, começamos a análise separando cada uma das 108 classes de solo do Brasil e calculamos um raster de presença e ausência do tipo de solo. Ao final do processo podemos somar os diferentes mapas de presença para obter os mapas de diversidade do solo, onde os maiores valores de cada pixel mostram áreas com concentração de diferentes tipos de solo.

Por fim, calculamos os valores de Z para cada pixel (Z_{pixel}) ao subtrair o valor da média (μ) e dividindo o resultado pelo desvio padrão (σ), como mostrado na fórmula a seguir:

$$Z_{pixel} = \frac{X_{pixel} - \mu}{\sigma}$$

Os cálculos de Z foram feitos dentro de cada classificação de regiões eco-geológicas usando as médias e desvios padrão dentro de cada uma das classes.

Diversidade da paisagem

A diversidade da paisagem é calculada pela média dos maiores valores de Z entre **variedades de landforms** ($Z_{diversidade}$), **amplitude de elevação** (Z_{elevao}), **índice de áreas úmidas** (Z_{midas}) e **diversidade de solo** (Z_{solos}). Começamos assumindo que a diversidade da paisagem seja igual a variedade de *landforms* nos locais onde os valores de amplitude de elevação sejam maiores que a variedade de *landforms* a diversidade da paisagem é calculada como a média entre os valores de Z das duas camadas, com maior peso dado para a camada de variedade de landforms, conforme a fórmula a seguir.

$$Z_{diversidade} = \frac{(Z_{landforms} \times 2) + Z_{elevao}}{3}$$

Depois comparamos os valores desse Z com a camada do índice de áreas úmidas e nas áreas onde esses valores sejam maiores substituímos pelo valor do índice de áreas úmidas. Portanto em regiões onde os valores de áreas úmidas são maiores eles substituem os valores de Z nesses *pixels*.

Na localidades onde a diversidade de solo é maior que a diversidade da paisagem, os valores são substituídos pela média ponderada das variáveis naquela localidade. Nas localidades onde a diversidade do solo for maior que a diversidade da paisagem calculada até aqui, vamos substituir os valores pela média ponderada entre todas as outras camadas, dependendo de quais camadas apresentam maiores valores.

Se os valores da diversidade forem menores que os valores de *landforms*, amplitude de elevação, índice de áreas úmidas e diversidade de solo somamos todos os valores de *Z*, dobrando os valores de *landforms* e dividimos por 5.

$$Z_{diversidade} = \frac{(Z_{landforms} \times 2) + Z_{elevao} + Z_{midas} + Z_{solos}}{5}$$

Se os valores de diversidade forem menores que variedade de *landforms*, elevação e diversidade de solos, mas forem maiores que o índice de áreas úmidas somamos os valores das 3 camadas, dobrando os valores para *landforms* e dividimos por 4.

$$Z_{diversidade} = \frac{(Z_{landforms} \times 2) + Z_{elevao} + Z_{solos}}{4}$$

Se os valores de diversidade forem menos que *landforms*, índices de áreas úmidas e amplitude de elevação, somamos os valores das 3 camadas, dobrando os valores de *landforms* e dividimos por 4.

$$Z_{diversidade} = \frac{(Z_{landforms} \times 2) + Z_{elevao} + Z_{midas}}{4}$$

Se os valores de diversidade forem menores que variedade de *landforms* e diversidade de solo, somamos os valores das camadas, dobrando os valores de *landforms* e dividimos por 3.

$$Z_{diversidade} = \frac{(Z_{landforms} \times 2) + Z_{solos}}{3}$$

Agora os valores de diversidade de paisagem já contém toda a variação das camadas de *Z* que calculamos anteriormente, como temos uma grande variação dos valores fazemos um truncamento dos valores da diversidade maiores e menores que 95% da distribuição dos dados. Esse truncamento foi feito para suavizar a imagem final de diversidade e remover valores *outliers* que possam influenciar o cálculo da **Resiliência da Paisagem**. Para essa suavização, calculamos a distribuição dos dados e todo valor de *pixel* fora de 95% da distribuição foi substituído pelos valores de máximo e mínimo da distribuição.

Anderson, M. G., M. Clark, A. P. Olivero, A. R. Barnett, K. R. Hall, M. W. Cornett, M. Ahlering, M. Schindel, B. Unnasch, C. Schloss, e D. R. Cameron. 2023. [A Resilient and Connected Network of Sites to Sustain Biodiversity under a Changing Climate](#). Proceedings of the National Academy of Sciences 120:e2204434119.

Anderson, M. G., M. Clark, e A. O. Sheldon. 2014. [Estimating Climate Resilience for Conservation across Geophysical Settings](#). Conservation Biology 28:959–970.

- Anderson, M. G., M. Clark, e A. O. Sheldon. 2016. [Resilient Sites for Terrestrial Conservation in Eastern North America](#). *Conservation Biology* 28:959–970.
- Gorelick, N., M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, e R. Moore. 2017. [Google Earth Engine: Planetary-scale Geospatial Analysis for Everyone](#). *Remote Sensing of Environment*.
- Gumbricht, T., R. M. Román-Cuesta, L. V. Verchot, M. Herold, F. Wittmann, E. Householder, N. Herold, e D. Murdiyarso. 2017. [Tropical and Subtropical Wetlands Distribution Version 2](#).
- Project, M. 2020. Collection 7 of the Annual Series of Land Use and Land Cover Maps of Brazil. [projects/mapbiomas-workspace/public/collection7/mapbiomas_collection70_integration_v2](#).
- Theobald, D. M., D. Harrison-Atlas, W. B. Monahan, e C. M. Albano. 2015. [Ecologically-Relevant Maps of Landforms and Physiographic Diversity for Climate Adaptation Planning](#). *PLOS ONE* 10:e0143619.
- Yamazaki, D., D. Ikeshima, J. Sosa, P. D. Bates, G. H. Allen, e T. M. Pavelsky. 2019. [MERIT Hydro: A High-Resolution Global Hydrography Map Based on Latest Topography Dataset](#). *Water Resources Research* 55:5053–5073.
- Yamazaki, D., D. Ikeshima, R. Tawatari, T. Yamaguchi, F. O’Loughlin, J. C. Neal, C. C. Sampson, S. Kanae, e P. D. Bates. 2017. [A High-Accuracy Map of Global Terrain Elevations: Accurate Global Terrain Elevation Map](#). *Geophysical Research Letters* 44:5844–5853.