

Metodologia resumida

A metodologia proposta para identificar os sítios resilientes às mudanças climáticas (Anderson et al. 2014, 2016a, Anderson et al. 2016b, e Anderson et al. 2023) envolve o mapeamento da **heterogeneidade da paisagem** e da **conectividade local**, que são as camadas que irão compor a **resiliência da paisagem** ((fig_fluxograma?). Os sítios com maior resiliência, possuem alto potencial de abrigar a biodiversidade em um cenário de mudanças climáticas e estão conectados entre si (Anderson et al. 2014), permitindo a movimentação da biodiversidade entre diferentes microclimas nesses locais.

Heterogeneidade da paisagem

A heterogeneidade da paisagem está relacionada à variedade de microclimas em um determinado local. A análise de heterogeneidade da paisagem resume informações relacionadas a: (a) variedade de formas de relevo, (b) amplitude altitudinal, (c) índice de áreas úmidas e (d) riqueza de solos.

(a) Variedade de formas de relevo

A variedade de formas de relevo (*landforms*) diz respeito à variedade de feições topográficas gerados pela topografia. Sua avaliação é baseada em um modelo de *landforms*, derivado de um modelo digital de elevação (DEM) com resolução de 90 m, que classifica a superfície em diversas categorias, como por exemplo:

- precipícios e áreas íngremes (*cliff* e *steep slope*)
- topos de montanha e divisores de águas (*summit/ridge-top*)
- vertentes norte e sul, que determinam se uma vertente é quente ou fria, especialmente em latitudes maiores, (*warm/cool side slope*)
- colinas (*flat hill top* e *gentle slope hilltop*)
- áreas planas de terras baixas (*dry flat*), entre outros.

A classificação de formas de relevo é baseada em índices de **inclinação do relevo**, **orientação da vertente**, **posição topográfica** e **acúmulo de umidade** (*slope, aspect, land position* e *moisture accumulation*), que correspondem aos locais com diferenças em umidade, radiação e deposição. A variedade de formas de relevo é calculada como a quantidade de formas de relevo dentro de uma área circular, de 450 m de raio, no entorno de cada célula de 90 m.

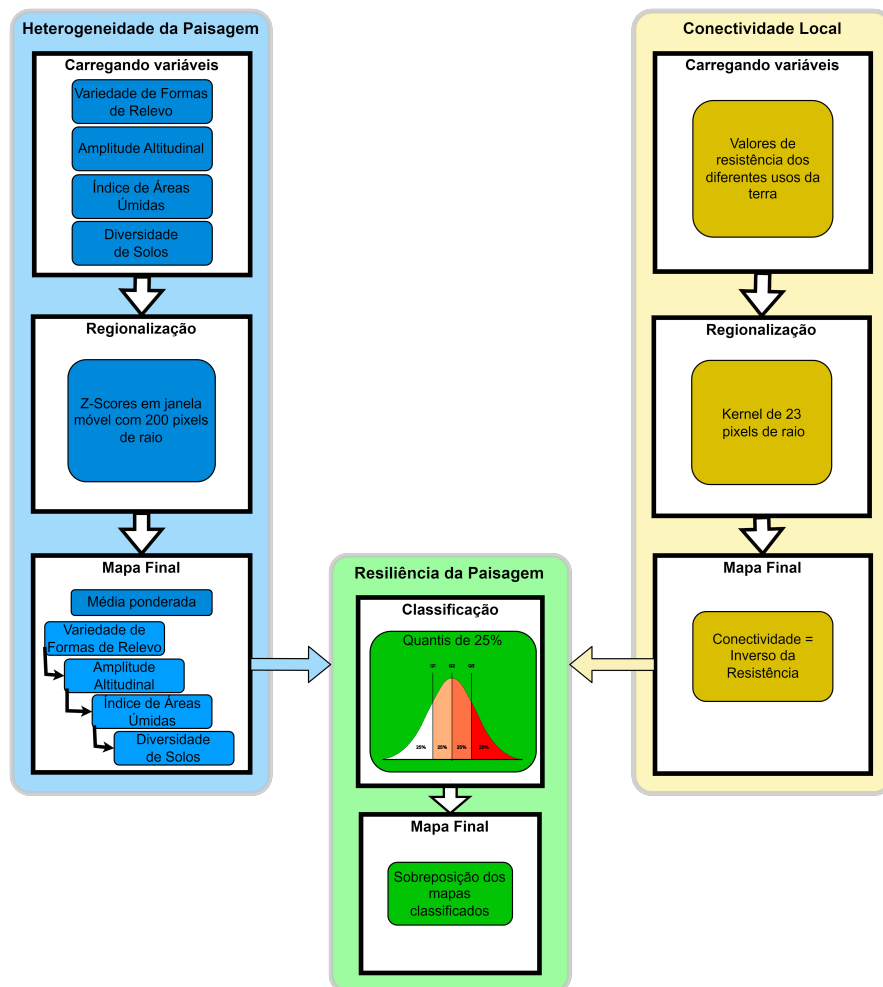


Figura 1: Fluxograma da análise de resiliência da paisagem, que inclui as camadas de heterogeneidade da paisagem e de conectividade local.

(b) Amplitude altitudinal

A amplitude altitudinal é determinada a partir do DEM, calculando a amplitude em uma área circular, de 450 m de raio, no entorno de cada célula de 90 m. A amplitude altitudinal considerada no estudo corresponde ao componente não correlacionado com a diversidade de formas de relevo (os resíduos de uma regressão linear simples - *Ordinary Linear Squares*).

(c) Índice de áreas úmidas

Para áreas planas, nas quais a variedade de formas de relevo e a amplitude altitudinal não permitem discriminar a variação microclimática, a densidade e quantidade de áreas úmidas captura a variação microclimática.

A densidade e quantidade de áreas úmidas são resumidas no índice de áreas úmidas, que é obtido pela média das densidade de áreas úmidas dentro de áreas circulares de 450 m de raio (escala local) e 1170 m de raio (escala regional), em cada célula de 90 m. Essa densidade é combinada com a quantidade de áreas úmidas (*wetland patchiness*) em área circular de 1170 m de raio, formando o índice de áreas úmidas.

(d) Riqueza de solos

Por fim, em locais com baixa variação de formas de relevo, amplitude de elevação e presença de áreas úmidas, a riqueza de solo é usada para identificar variações na paisagem que possam sustentar a variação da biodiversidade.

Combinando as variáveis para gerar a heterogeneidade da paisagem

A combinação dos índices de variedade de formas de relevo, amplitude altitudinal, índice de áreas úmidas e riqueza de solos gera a **heterogeneidade da paisagem**. Esse índice pondera a variedade de formas de relevo com peso maior, sendo ela o dobro do peso das demais variáveis.

Conectividade local

A conectividade local representa o grau de permeabilidade da paisagem (ou reciprocamente o grau de resistência) em torno de cada célula avaliada. A partir de um mapa de uso e cobertura do solo, incluindo a presença de infraestruturas energéticas e de transporte, foram atribuídos pesos de resistência de movimento para cada categoria de uso do solo, nos quais áreas naturais apresentam o valor mínimo, e áreas com intervenção antrópica intensa (áreas urbanas), o valor máximo.

As categorias principais de componentes da paisagem foram definidas como:

- áreas naturais (florestas, banhados, campos, etc.);
- áreas agrícolas ou modificadas (incluindo áreas improdutivas não-naturais);
- áreas urbanizadas (de baixa ou alta intensidade).

A conectividade local é a média ponderada das resistências dentro uma vizinhança quadrada de aproximadamente 2070 m, tendo os pesos um decaimento linear pela distância da célula focal.

Padronização dos dados (*Z-scores*)

Antes de calcularmos a resiliência da paisagem, as variáveis variedade de formas de relevo, amplitude de elevação, índice de áreas úmidas, riqueza de solos e conectividade local são convertidas para valores de *Z* (*Z-scores*), assumindo as médias e desvios padrões dentro de janelas móveis de 200 pixels de raio. Isso garante a inclusão de condições físicas e ambientais distintas e permite capturar variações locais na composição da biota associada. Posteriormente, os valores de *Z* são combinados em heterogeneidade da paisagem.

Conectividade: análise de circuitos

Calculamos a conectividade baseada em teoria de circuitos (McRae 2006) utilizando a implementação de Omniscape para Julia (Landau et al. 2021, Hall et al. 2021).

Como base para estas análises, utilizamos:

- o raster de resistência utilizado como base para a conectividade local;
- um raio da área de interesse de 210 pixels (~19km);
- agrupamentos de 21 pixels de interesse para a janela móvel (~1.9km).

O raio da área de interesse é o raio de busca ou tamanho da janela móvel circular. O tamanho da janela foi equivalente ao utilizado no cálculo dos *Z scores* (200 pixels), o valor é levemente diferente devido à limitação do tamanho do bloco central da janela ser um número ímpar de pixels (agrupamento de 21) e segundo Landau et al. (2021) esse valor não deve ultrapassar 10% do raio.

Consideramos o uso de *kernel* sobre a superfície de resistência como entrada para o Omniscape, entretanto, os resultados da análise com *kernel* diluíram muito corredores e passagens menores, por conta da natureza de suavização da superfície de resistência pelo *kernel*. Dessa maneira, ao utilizar a resistência sem *kernel* como entrada, preservamos estruturas espaciais menores, mas importantes para a conectividade da paisagem.

O *output* do Omniscape são três arquivos de conectividade relacionados:

- `flow_current` é o fluxo que aconteceria sem levar em conta a camada de resistência. Ele leva em conta a configuração espacial da paisagem (estreitos, barras) e dos pixels de baixa resistência de origem. Nem todo pixel é *source* pixel, mas a corrente que entra em cada pixel de baixa resistência entra sem resistência. Flow current é usado como um “modelo nulo” de conectividade.
- `cummulative_current` é a corrente acumulada, levando em conta a configuração espacial e os valores de resistência.
- `normalized_current` equivale a $\frac{cumulative_current}{flow_current}$ e controla o efeito da configuração espacial do cálculo de conectividade.

Resiliência da paisagem: combinando heterogeneidade da paisagem e conectividade local

Finalmente, a **resiliência da paisagem** é calculada pela sobreposição dos mapas de heterogeneidade da paisagem e conectividade local baseada no histograma de distribuição dos valores dessas métricas. Dessa forma, podemos criar um mapa bivariado da resiliência da paisagem, que tem como objetivo mostrar as áreas onde os resultados das duas métricas se sobrepõem ou divergem ((`fig_resilience?`)). Com base na escala de cor que escolhemos e destacando regiões que merecem atenção especial em termos de conservação e manejo, são identificadas áreas onde a heterogeneidade da paisagem e a conectividade local são mais importantes para a resiliência da paisagem.

- Anderson, M. G., M. Clark, A. P. Olivero, A. R. Barnett, K. R. Hall, M. W. Cornett, M. Ahlring, 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. 2016a. [Resilient Sites for Terrestrial Conservation in Eastern North America](#). *Conservation Biology* 28:959–970.
- Anderson, M., A. Barnett, M. Clark, J. Prince, S. A. Olivero, e B. Vickery. 2016b. *Resilient and Connected Landscapes for Terrestrial Conservation*.
- Hall, K. R., R. Anantharaman, V. A. Landau, M. Clark, B. G. Dickson, A. Jones, J. Platt, A. Edelman, e V. B. Shah. 2021. [Circuitscape in Julia: Empowering Dynamic Approaches to Connectivity Assessment](#). *Land* 10:301.
- Landau, V., V. Shah, R. Anantharaman, e K. Hall. 2021. [Omniscape.jl: Software to compute omnidirectional landscape connectivity](#). *Journal of Open Source Software* 6:2829.
- McRae, B. H. 2006. Isolation by resistance. *Evolution* 60:1551–1561.

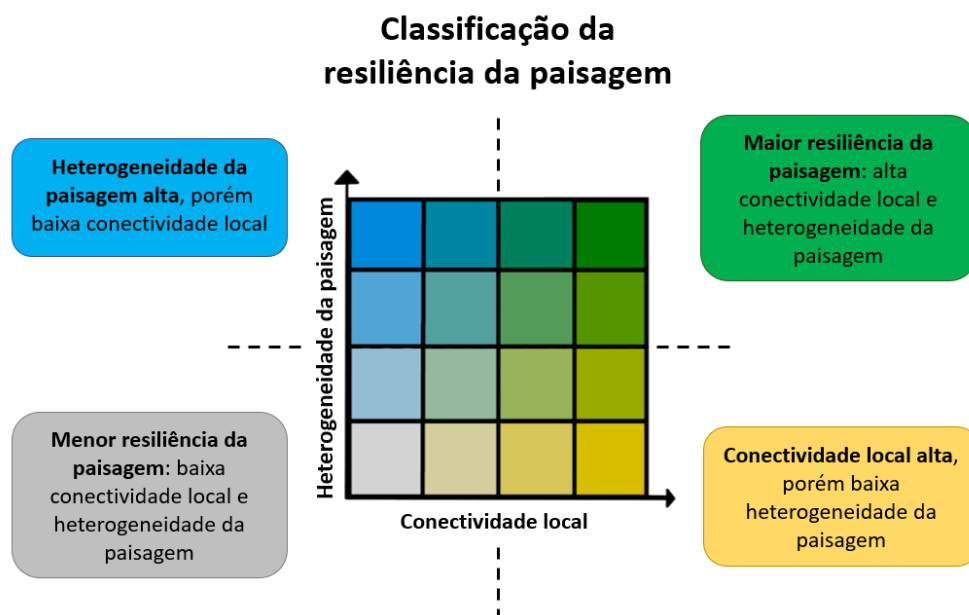


Figura 2: Definição das classes de resiliência da paisagem, baseada na distribuição de pixels nas imagens originais de heterogeneidade da paisagem e conectividade local.