

**MODELAGEM
COMPUTACIONAL DA
CONECTIVIDADE
ECOLÓGICA EM PAISAGEM
FRAGMENTADA:
CORREDORES POTENCIAIS
E CENÁRIOS DE
RESTAURAÇÃO EM
ALAGOINHAS, BAHIA**

COMPUTATIONAL MODELING OF ECOLOGICAL CONNECTIVITY IN A
FRAGMENTED LANDSCAPE: POTENTIAL CORRIDORS AND RESTORATION
SCENARIOS IN ALAGOINHAS, BAHIA

Ciências Exatas e da Terra • 27/09/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/790385234](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/790385234)

Matheus Bahia Silva¹

Matheus Ganem de Almeida Couto Lima²

David Bacelar Costa Seabra³

João Gabriel da Silva Figueirêdo⁴

José Roberto de Araújo Fontoura⁵

Erivelton Nonato de Santana⁶

RESUMO

A fragmentação de habitats altera a configuração espacial da paisagem e pode reduzir as possibilidades de conexão entre remanescentes naturais. Este estudo desenvolve e aplica uma abordagem computacional para analisar a conectividade ecológica potencial em paisagem fragmentada, integrando dados geoespaciais abertos, análise multicritério pelo Analytic Hierarchy Process (AHP), superfície de resistência, teoria dos grafos, caminhos de menor custo, rotas alternativas e métricas de conectividade. O fluxo foi inicialmente verificado em uma paisagem sintética e, posteriormente, aplicado a uma paisagem real no município de Alagoinhas, Bahia, com dados de uso e cobertura da terra do MapBiomas, Coleção 10.1, referentes a 2024. A aplicação real selecionou oito fragmentos e registrou 22 trajetórias, sendo dez rotas principais e doze alternativas. Nos cenários simulados de restauração, o Índice Integral de Conectividade aumentou de 0,33160 para 0,34392 e 0,36464, enquanto a Probabilidade de Conexão passou de 0,43807 para 0,46783 e 0,50433. Os resultados indicam que intervenções espacialmente direcionadas podem produzir alterações mensuráveis na conectividade potencial estimada e demonstram a transferibilidade computacional do fluxo para dados territoriais observados. Os corredores calculados devem ser interpretados como hipóteses espaciais de conectividade, pois a pesquisa não realiza validação biológica espécie-específica.

Palavras-chave: Conectividade ecológica; Corredores ecológicos; Resistência da paisagem; Modelagem por grafos; Restauração ecológica.

ABSTRACT

Habitat fragmentation changes the spatial configuration of landscapes and may reduce connection opportunities among

natural remnants. This study develops and applies a computational approach to analyze potential ecological connectivity in a fragmented landscape by integrating open geospatial data, multicriteria analysis through the Analytic Hierarchy Process (AHP), resistance surfaces, graph theory, least-cost paths, alternative routes, and connectivity metrics. The workflow was first verified in a synthetic landscape and subsequently applied to a real landscape in the municipality of Alagoinhas, Bahia, Brazil, using 2024 land-use and land-cover data from MapBiomas Collection 10.1. The real-world application selected eight fragments and recorded 22 trajectories, comprising ten main routes and twelve alternatives. Under simulated restoration scenarios, the Integral Index of Connectivity increased from 0.33160 to 0.34392 and 0.36464, while the Probability of Connectivity increased from 0.43807 to 0.46783 and 0.50433. The results indicate that spatially targeted interventions can produce measurable changes in estimated potential connectivity and demonstrate the computational transferability of the workflow to observed territorial data. The modeled corridors should be interpreted as spatial connectivity hypotheses because the study does not provide species-specific biological validation.

Keywords: Ecological connectivity; Ecological corridors; Landscape resistance; Graph modeling; Ecological restoration.

1. INTRODUÇÃO

A fragmentação dos habitats naturais constitui um processo associado à perda de biodiversidade e à alteração da dinâmica ecológica das paisagens. A transformação do uso e cobertura da terra pode subdividir áreas anteriormente contínuas em remanescentes menores e espacialmente separados, modificando a quantidade de habitat e sua configuração. Perda de habitat e

fragmentação, embora frequentemente associadas, não devem ser tratadas como processos equivalentes, pois a primeira corresponde à redução da área total disponível e a segunda envolve a subdivisão e a reorganização espacial dos remanescentes (Fahrig, 2003). Em paisagens transformadas, a disposição das manchas e as características da matriz passam a influenciar as possibilidades de deslocamento entre áreas ambientalmente adequadas.

A conectividade da paisagem representa o grau em que a estrutura espacial facilita ou impede o movimento entre manchas de recursos (Taylor et al., 1993). Sua interpretação envolve tanto características estruturais quanto a resposta dos organismos à paisagem. Assim, a distância geométrica entre dois fragmentos não é suficiente para caracterizar a conexão potencial, pois áreas urbanizadas, sistemas viários, usos agropecuários, corpos d'água e coberturas vegetadas podem apresentar diferentes níveis de permeabilidade. A análise dessa heterogeneidade é particularmente relevante em paisagens da Mata Atlântica, nas quais remanescentes naturais coexistem com usos antrópicos intensivos.

As superfícies de resistência oferecem uma forma de representar quantitativamente essa heterogeneidade. Nessa abordagem, a paisagem é convertida em uma malha raster na qual cada célula recebe um custo relativo de travessia. Entretanto, a resistência não constitui uma propriedade universal de determinada classe da paisagem: sua parametrização depende das premissas ecológicas, das fontes de dados e do organismo ou processo considerado (Zeller; McGarigal; Whiteley, 2012). A análise multicritério pode auxiliar a tornar explícita essa construção, e o Analytic Hierarchy Process (AHP) permite derivar pesos relativos a partir de comparações pareadas e avaliar a consistência matemática dos julgamentos (Saaty, 1980).

Uma vez construída a superfície de resistência, a conectividade pode ser analisada por meio de grafos e algoritmos de caminhos mínimos. A teoria dos grafos permite representar manchas de habitat como nós e suas relações como arestas (Urban; Keitt, 2001), enquanto o caminho de menor custo identifica trajetórias que minimizam a resistência acumulada (Dijkstra, 1959; Adriaensen et al., 2003). A obtenção de rotas alternativas amplia a leitura da rede ao evidenciar redundância e regiões de convergência. Métricas como o Índice Integral de Conectividade (IIC) e a Probabilidade de Conexão (PC) complementam a análise cartográfica ao permitir comparações quantitativas entre configurações submetidas à mesma parametrização (Pascual-Hortal; Saura, 2006; Saura; Pascual-Hortal, 2007).

Embora os componentes utilizados possuam bases científicas consolidadas, permanece relevante integrá-los em fluxos computacionais transparentes e reproduzíveis capazes de operar tanto em ambientes controlados quanto sobre dados territoriais observados. A questão que orienta esta pesquisa é em que medida uma abordagem baseada em dados geoespaciais abertos, superfícies de resistência e teoria dos grafos pode identificar padrões potenciais de conectividade e avaliar alterações decorrentes de cenários simulados de restauração em paisagens fragmentadas. A hipótese adotada é que a integração desses componentes permite representar espacialmente a conectividade potencial, identificar caminhos principais e alternativos e mensurar alterações relativas entre cenários, mesmo sem atribuir às rotas a condição de conectividade funcional comprovada.

Diante desse problema, o objetivo deste estudo é desenvolver e aplicar um fluxo computacional reproduzível para investigar a

conectividade ecológica potencial em paisagens fragmentadas, integrando análise multicritério, superfície de resistência, grafos, caminhos de menor custo, rotas alternativas e métricas de conectividade. A arquitetura é verificada inicialmente em uma paisagem sintética e, em seguida, aplicada a uma paisagem real no município de Alagoinhas, Bahia, permitindo examinar sua transferibilidade operacional e comparar cenários simulados de restauração. A proposta justifica-se pela possibilidade de reunir dados abertos e ferramentas de código livre em um procedimento auditável, adaptável e capaz de apoiar diagnósticos espaciais preliminares de conectividade.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Fragmentação, Conectividade e Corredores Ecológicos

A ecologia da paisagem investiga as relações entre a organização espacial do território e os processos ecológicos. Forman e Godron (1986) sistematizam a paisagem a partir de manchas, corredores e matriz, elementos cuja composição e configuração influenciam a forma como o habitat se distribui no espaço. A fragmentação modifica essa organização ao subdividir áreas contínuas e alterar tamanho, forma, isolamento e disposição dos remanescentes. Haddad et al. (2015) demonstram que os efeitos da fragmentação podem persistir por longos períodos e afetar diferentes componentes dos ecossistemas.

A conectividade amplia essa leitura ao considerar as possibilidades de movimento entre manchas. Taylor et al. (1993) a definem a partir do grau em que a paisagem facilita ou impede o deslocamento entre manchas de recursos. Essa formulação sustenta a distinção

entre conectividade estrutural, relacionada às características físicas da paisagem, e conectividade funcional, dependente da resposta dos organismos. Por essa razão, a presente pesquisa adota o conceito de conectividade potencial: os caminhos calculados representam trajetórias relativamente mais favoráveis segundo a resistência modelada, não registros de deslocamento observado.

Os corredores ecológicos podem favorecer a conexão entre áreas de habitat espacialmente separadas. Turner, Gardner e O'Neill (2001) discutem os corredores como elementos capazes de manter conexões em paisagens fragmentadas, enquanto Beier e Noss (1998) destacam que sua efetividade deve ser analisada em função das espécies e dos processos envolvidos. Assim, um corredor modelado computacionalmente deve ser entendido como uma hipótese espacial a ser posteriormente confrontada com evidências biológicas.

2.2. Resistência da Paisagem e Caminhos de Menor Custo

Uma superfície de resistência representa o território como uma matriz de custos relativos de deslocamento. Valores menores indicam condições consideradas mais permeáveis, enquanto valores maiores representam maior restrição potencial. Zeller, McGarigal e Whiteley (2012) mostram que a definição desses valores pode ser baseada em diferentes fontes, incluindo opinião especializada, ocorrência, trajetórias e informação genética. A diversidade de estratégias reforça a necessidade de explicitar os parâmetros utilizados e de evitar a interpretação dos custos como medidas universais.

O caminho de menor custo, ou Least-Cost Path, busca a trajetória cujo custo acumulado é mínimo. Adriaensen et al. (2003) discutem sua aplicação como modelo funcional de paisagem. Diferentemente da distância euclidiana, essa abordagem incorpora as condições das células atravessadas e pode selecionar uma trajetória espacialmente mais longa quando ela apresenta menor resistência acumulada. A inclusão de rotas alternativas permite examinar redundância espacial e reconhecer setores nos quais diferentes soluções convergem.

A teoria dos circuitos constitui uma abordagem complementar, capaz de considerar múltiplos caminhos simultaneamente (McRae et al., 2008). No presente estudo, entretanto, ela é utilizada apenas como referência conceitual para múltiplos caminhos e gargalos. O modelo não implementa integralmente o Circuitscape; as áreas de recorrência derivam das rotas calculadas pelo próprio fluxo e não representam densidade de corrente elétrica.

2.3. AHP, Grafos e Métricas de Conectividade

O AHP estrutura problemas multicritério por comparações par a par e produz pesos relativos para os critérios analisados (Saaty, 1980). Além da ponderação, o método permite verificar a consistência matemática da matriz de julgamentos. Na modelagem da conectividade, essa característica torna explícita a contribuição relativa de variáveis ambientais originalmente expressas em escalas distintas, embora a consistência matemática não corresponda, por si só, à validação ecológica dos pesos.

A teoria dos grafos fornece uma estrutura matemática para representar fragmentos como nós e conexões como arestas. Urban e

Keitt (2001) demonstram a utilidade dessa perspectiva na análise da conectividade de paisagens. Sobre a rede resultante, algoritmos de caminho mínimo, como o de Dijkstra (1959), permitem calcular trajetórias ponderadas pelo custo.

As métricas IIC e PC sintetizam aspectos da disponibilidade de habitat e das relações entre manchas. Pascual-Hortal e Saura (2006) desenvolveram o IIC no contexto de índices baseados em grafos, e Saura e Pascual-Hortal (2007) apresentaram a PC. No modelo analisado, essas métricas são empregadas principalmente para comparar cenários calculados com a mesma estrutura e os mesmos parâmetros, evitando classificações absolutas de conectividade sem referência empírica específica.

3. METODOLOGIA

3.1. Delineamento, Área de Estudo e Dados

A pesquisa possui natureza aplicada, abordagem quantitativa e caráter computacional. O fluxo integra leitura e padronização dos dados, derivação de critérios ambientais, ponderação pelo AHP, construção da superfície de resistência, identificação de fragmentos, seleção de pares, cálculo de caminhos de menor custo, geração de rotas alternativas, análise de recorrência, cálculo de IIC e PC, simulação de restauração e exportação dos produtos. O desenvolvimento ocorreu em duas condições complementares: uma paisagem sintética, utilizada para verificação lógica e computacional, e uma aplicação real, destinada a examinar a transferibilidade operacional da arquitetura.

A aplicação real foi realizada em um recorte do município de Alagoinhas, Bahia, inserido no contexto regional da Mata Atlântica. A

principal base foi o MapBiomas, Coleção 10.1, ano de 2024, em estrutura raster com resolução espacial de 30 m. Os dados foram processados no sistema SIRGAS 2000 / UTM zona 24S, EPSG:31984. Os códigos do MapBiomas foram tratados como classes temáticas e posteriormente reclassificados em valores de resistência. A escolha de dados abertos e de ferramentas de código livre busca favorecer a rastreabilidade e a reprodução do procedimento.

3.2. Construção e Ponderação da Superfície de Resistência

A superfície final integra quatro critérios normalizados entre zero e um: uso e cobertura da terra, declividade, distância à água e pressão antrópica. O uso e cobertura foi reclassificado em resistência-base entre 1 e 100. A declividade pode ser derivada de um Modelo Digital de Elevação; quando esse dado não é fornecido, o critério permanece neutro. A distância à água é calculada a partir das classes aquáticas do raster, enquanto a pressão antrópica resulta de reclassificação específica seguida de suavização espacial. Os valores empregados constituem hipóteses paramétricas generalistas, pois não houve calibração com dados espécie-específicos.

Os quatro critérios foram ponderados pelo AHP. A pressão antrópica recebeu peso 0,4673, o uso e cobertura da terra 0,2772, a distância à água 0,1601 e a declividade 0,0954. A matriz apresentou autovalor máximo aproximado de 4,031 e razão de consistência de aproximadamente 0,0115, abaixo do limite de 0,10 adotado no método (Saaty, 1980). A superfície final foi obtida por combinação linear ponderada e convertida para uma escala de resistência entre 1 e 100.

Tabela 1. Pesos dos critérios ambientais utilizados no AHP

Critério	Peso
Uso e cobertura da terra	0,2772
Declividade	0,0954
Distância à água	0,1601
Pressão antrópica	0,4673

Fonte: *Elaboração própria com base nas saídas e parâmetros do modelo (2026).*

3.3. Fragmentos, Conexões e Rotas Alternativas

Foram selecionados fragmentos com no mínimo 25 pixels, aproximadamente 2,25 ha, utilizando conectividade de oito vizinhos. A execução considerou no máximo oito fragmentos e dez pares, priorizando os maiores fragmentos e pares espacialmente próximos. As conexões foram calculadas em oito direções sobre a superfície de resistência. Para cada par, o modelo obteve uma rota principal e, quando possível, até duas alternativas.

As rotas alternativas foram geradas por penalização iterativa da superfície, com fator 1,70 e largura de três pixels ao redor da solução anterior. Essa estratégia não corresponde a um algoritmo formal de k-caminhos em grafo explícito; constitui um procedimento exploratório para reduzir a coincidência integral entre trajetórias. Os gargalos foram inferidos a partir das condições e da recorrência observadas nas rotas calculadas e, portanto, não equivalem a mapas de densidade de corrente produzidos por modelos integrais de circuitos.

3.4. Métricas e Cenários de Restauração

O IIC e a PC foram utilizados como métricas comparativas de conectividade. O limiar do IIC correspondeu a 1,25 vez a mediana dos custos atuais e o parâmetro da PC foi definido por $\alpha = \ln(2)$ dividido pela mediana dos custos atuais. Como a implementação utiliza simplificações baseadas nos fragmentos selecionados e nos custos das rotas principais, os índices são tratados como adaptações inspiradas nas formulações de Pascual-Hortal e Saura (2006) e Saura e Pascual-Hortal (2007), com ênfase na comparação interna entre cenários.

Foram simulados três estados: condição atual, cenário denominado cinco anos e cenário denominado dez anos. A restauração foi aplicada em faixas de quatro pixels ao redor das rotas principais. No cenário de cinco anos, a resistência das células transitáveis da faixa foi reduzida em 20%; no de dez anos, em 40%, mantendo resistência mínima igual a 1. Após cada intervenção, as rotas e as métricas foram recalculadas com os mesmos parâmetros. As denominações temporais funcionam como rótulos para intensidades progressivas de intervenção e não como previsões determinísticas de recuperação da vegetação.

Tabela 2. Síntese dos principais parâmetros da execução

Parâmetro	Valor
CRS	EPSG:31984 - SIRGAS 2000 / UTM 24S
Resolução espacial	30 m
Fragmento mínimo	25 pixels (~2,25 ha)
Máximo de fragmentos	8
Máximo de pares	10

Rotas por par	Até 3
Penalidade das alternativas	1,70
Largura da penalização	3 pixels
Largura da restauração	4 pixels
Redução no cenário de 5 anos	20%
Redução no cenário de 10 anos	40%

Fonte: *Elaboração própria com base nas saídas e parâmetros do modelo (2026).*

3.5. Implementação Computacional

O modelo foi implementado em Python. NumPy foi utilizado nas operações matriciais e numéricas; SciPy em filtragem, distância euclidiana e processamento espacial; scikit-image na identificação de componentes e em operações relacionadas ao cálculo de caminhos; Rasterio na leitura, reprojeção e manipulação raster; GeoPandas em estruturas vetoriais; Pandas na organização dos resultados; Matplotlib na produção cartográfica; e openpyxl na geração de planilhas. A integração dessas ferramentas permitiu automatizar o fluxo desde a entrada cartográfica até a exportação de mapas e tabelas, mantendo os parâmetros documentados e passíveis de revisão (Van der Walt et al., 2014).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Estrutura da Paisagem e Superfície de Resistência

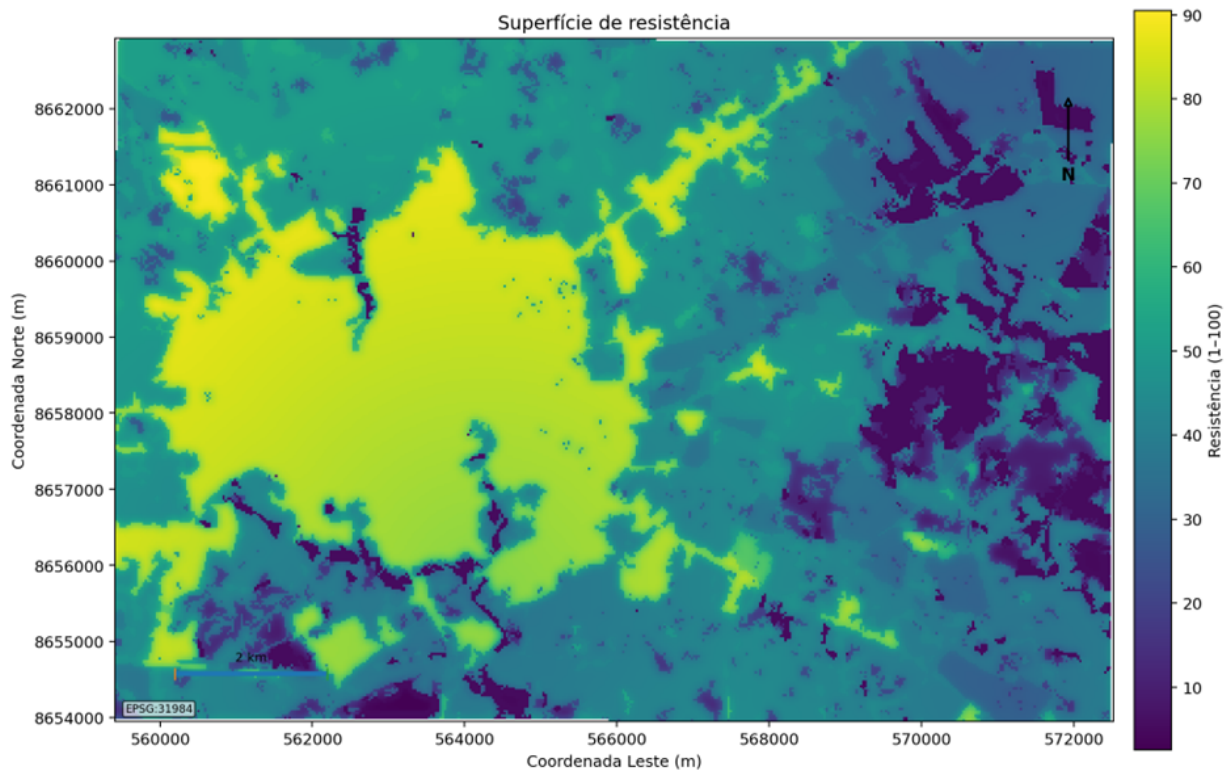
A etapa sintética confirmou a integração operacional entre resistência, fragmentos, grafos, caminhos e métricas em ambiente

controlado. Concluída essa verificação, o mesmo encadeamento metodológico foi aplicado à paisagem real sem alteração da lógica central. A execução em Alagoinhas submeteu o modelo a padrões espaciais irregulares, bordas complexas, manchas de diferentes dimensões e forte contraste entre usos da terra.

Na aplicação real foram selecionados oito fragmentos, com áreas de 1.788, 1.418, 987, 586, 386, 313, 281 e 245 pixels. Os quatro maiores concentraram-se predominantemente no setor leste, enquanto a porção centro-oeste apresentou extensa área urbanizada. Essa configuração resultou em matriz descontínua e espacialmente heterogênea, condicionando as conexões posteriores.

A superfície de resistência apresentou forte contraste entre o centro-oeste e o setor leste. A mancha urbanizada concentrou valores elevados de resistência, enquanto setores a leste, nordeste e sudeste apresentaram valores menores intercalados por zonas intermediárias. O padrão é coerente com a lógica de superfícies de resistência discutida por Zeller, McGarigal e Whiteley (2012), nas quais a matriz é representada como gradiente de custos e não como classificação binária. A resolução de 30 m, contudo, limita a representação de elementos espaciais inferiores à dimensão da célula.

Figura 1. Superfície de resistência da paisagem analisada.



Fonte: MapBiomas - Coleção 10.1 (2024) | Elaboração própria a partir de dados MapBiomas

Fonte: Elaboração própria (2026), a partir de dados do MapBiomas - Coleção 10.1 (2024).

4.2. Corredores, Rotas Alternativas e Gargalos

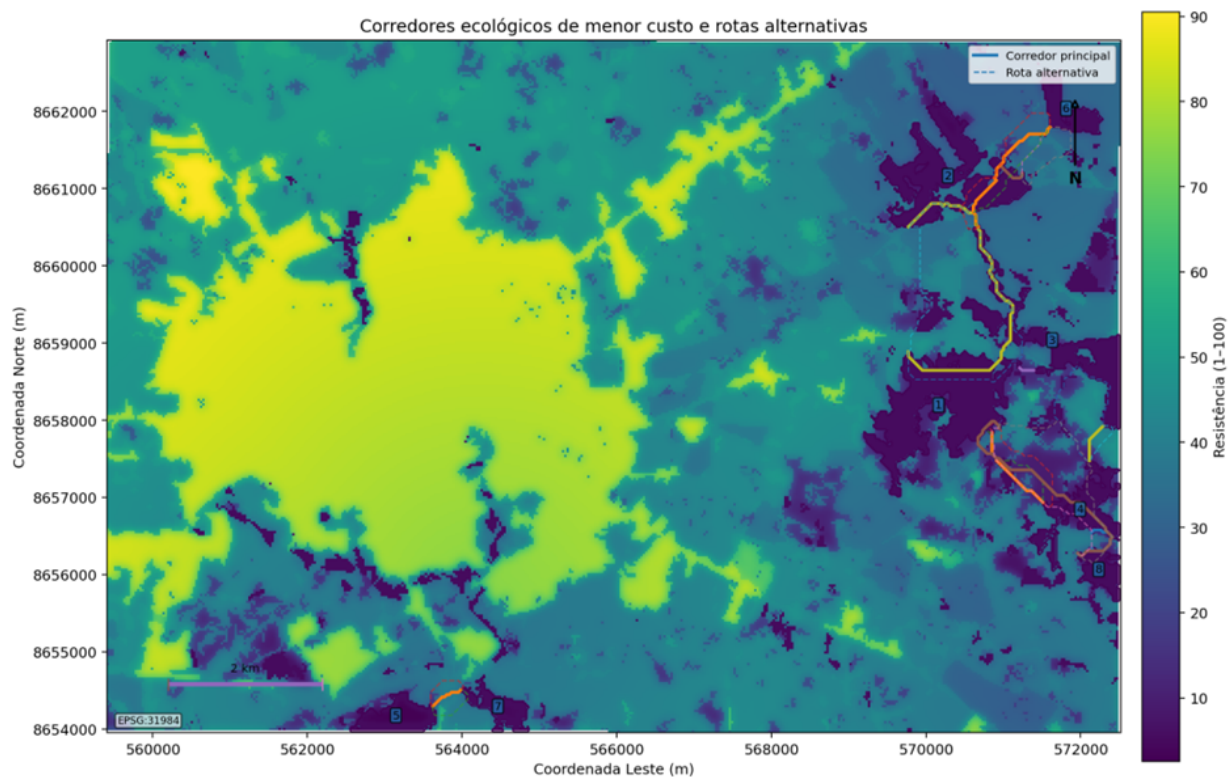
Com base na superfície de resistência, foram calculadas dez conexões principais entre os pares 4-8, 5-7, 1-3, 2-6, 3-4, 1-4, 2-3, 1-2, 1-8 e 3-6. Para seis pares foram registradas duas alternativas adicionais, totalizando 22 trajetórias: dez principais e doze alternativas. A maior concentração espacial ocorreu no setor leste, acompanhando a distribuição dos fragmentos.

Entre as rotas principais, o menor custo acumulado ocorreu na conexão 1-3, com 122,74 unidades de custo, seguida por 2-3, com 177,74, e 4-8, com 193,40. A ligação 1-2 apresentou o maior custo principal, 1.093,23. A diferença confirma que a proximidade espacial não determina isoladamente a conectividade quando a resistência da matriz é incorporada, princípio compatível com a aplicação de caminhos de menor custo descrita por Adriaensen et al. (2003).

As alternativas evidenciaram graus distintos de redundância. No par 2-6, o custo aumentou de 674,52 na rota principal para 912,82 e 1.130,83; no par 1-2, passou de 1.093,23 para 1.576,11 e 1.655,38. Portanto, redundância geométrica não implica equivalência de custo. Essa leitura complementa a discussão de corredores de Beier e Noss (1998), pois diferentes trajetórias potenciais podem oferecer condições muito distintas.

Os gargalos foram úteis como triagem de trechos potencialmente sensíveis, mas o corredor 1-2 revelou uma limitação operacional: seu limiar coincidiu com a resistência mínima, fazendo com que grande número de células fosse classificado. Esse comportamento demonstra que a saída não deve ser interpretada isoladamente como prioridade ecológica. Além disso, diferentemente da teoria dos circuitos de McRae et al. (2008), os valores aqui obtidos derivam da recorrência e das condições das rotas calculadas, não de corrente elétrica.

Figura 2. Corredores ecológicos de menor custo e rotas alternativas na paisagem analisada.



Fonte: MapBiomas - Coleção 10.1 (2024) | Elaboração própria a partir de dados MapBiomas

Fonte: Elaboração própria (2026), a partir de dados do MapBiomas - Coleção 10.1 (2024).

Tabela 3. Custos acumulados das conexões registradas na aplicação real

Par de fragmentos	Rota principal	Rota 2	Rota 3
4-8	193,40	-	-
5-7	455,91	-	-
1-3	122,74	-	-
2-6	674,52	912,82	1.130,83
3-4	482,61	641,31	808,94
1-4	474,98	640,70	924,93
2-3	177,74	-	-
1-2	1.093,23	1.576,11	1.655,38
1-8	834,36	1.071,58	1.355,56

3-6	908,83	1.335,44	1.562,29
-----	--------	----------	----------

Fonte: *Elaboração própria com base nas saídas e parâmetros do modelo (2026).*

4.3. Métricas de Conectividade e Cenários de Restauração

No cenário atual, o IIC apresentou valor de 0,33160 e a PC de 0,43807. Após a redução de 20% da resistência nas faixas de restauração, os valores aumentaram para 0,34392 e 0,46783. No cenário de redução de 40%, alcançaram 0,36464 e 0,50433. Em relação à condição atual, o ganho relativo foi de 3,71% e 9,96% para o IIC e de 6,79% e 15,12% para a PC.

O aumento monotônico dos dois indicadores demonstra que as alterações localizadas introduzidas na superfície produziram resposta mensurável na conectividade global estimada. A PC apresentou crescimento relativo superior ao IIC, o que indica maior sensibilidade da componente probabilística na formulação adotada. A interpretação mais defensável está na comparação interna entre cenários, pois os valores absolutos dependem dos parâmetros empregados e não devem ser classificados como baixos, médios ou altos sem referencial empírico específico (Pascual-Hortal; Saura, 2006; Saura; Pascual-Hortal, 2007).

As mudanças cartográficas permaneceram espacialmente localizadas porque a intervenção não foi aplicada a toda a paisagem. A estrutura geral dos mapas, portanto, continuou reconhecível, embora as métricas tenham registrado ganhos. Essa combinação mostra que alterações relativamente restritas podem produzir efeito acumulado sobre a rede modelada. Os cenários, contudo,

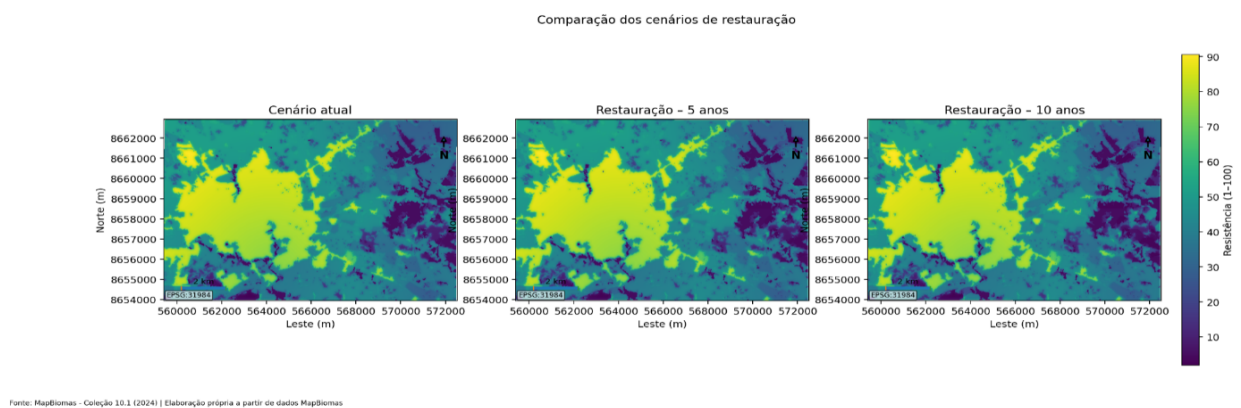
representam experimentos computacionais: as reduções de 20% e 40% não foram calibradas por séries temporais de restauração e não permitem afirmar que essas condições serão atingidas após cinco ou dez anos.

Tabela 4. Métricas de conectividade nos cenários simulados

Cenário	IIC	Variação IIC	PC	Variação PC
Atual	0,33160	-	0,43807	-
Restauração - 5 anos	0,34392	+3,71%	0,46783	+6,79%
Restauração - 10 anos	0,36464	+9,96%	0,50433	+15,12%

Fonte: *Elaboração própria com base nas saídas e parâmetros do modelo (2026).*

Figura 3. Comparação da superfície de resistência nos cenários atual, de restauração em 5 anos e de restauração em 10 anos.



Fonte: *Elaboração própria (2026), a partir dos dados do MapBiomas - Coleção 10.1 (2024) e das simulações realizadas pelo modelo.*

4.4. Transferibilidade, Limitações e Aplicabilidade

A execução do mesmo núcleo analítico no ambiente sintético e na paisagem real indica transferibilidade computacional e espacial do fluxo. Essa evidência, entretanto, não corresponde a validação ecológica. A conectividade funcional depende da resposta dos organismos à estrutura da paisagem (Taylor et al., 1993), e a estimativa de resistência pode variar de acordo com espécie, grupo funcional e fonte de dados (Zeller; McGarigal; Whiteley, 2012). Assim, os corredores calculados devem permanecer definidos como conectividade potencial.

A ausência de calibração espécie-específica constitui a principal limitação ecológica. Também introduzem incerteza os valores de resistência, os pesos do AHP, a resolução de 30 m, o tamanho mínimo dos fragmentos, a seleção de pares, o procedimento de rotas alternativas e os parâmetros dos cenários. A razão de consistência do AHP demonstra coerência interna dos julgamentos, mas não valida biologicamente os pesos. Da mesma forma, a identificação de gargalos depende do procedimento operacional adotado.

A contribuição do estudo concentra-se na integração de procedimentos consolidados em uma arquitetura computacional única, documentada e reparametrizável. O uso de dados geoespaciais abertos e ferramentas de código livre favorece auditoria e adaptação a outras áreas. Aplicações futuras podem incorporar telemetria, ocorrência, genética da paisagem, análises de sensibilidade, abordagens multiespécies e cenários temporais calibrados, ampliando a capacidade de inferência ecológica.

5. CONCLUSÃO

A abordagem computacional desenvolvida atende ao objetivo de integrar dados geoespaciais, análise multicritério, superfície de resistência, grafos, caminhos de menor custo, rotas alternativas e métricas de conectividade em um fluxo reproduzível. A aplicação em Alagoinhas demonstra que o núcleo analítico opera sobre uma paisagem territorial observada e identifica padrões de conectividade potencial condicionados pela heterogeneidade da matriz.

A questão de pesquisa é respondida ao se demonstrar que a integração entre dados abertos, resistência da paisagem e teoria dos grafos permite identificar trajetórias potenciais, examinar redundância espacial e mensurar alterações relativas decorrentes de intervenções simuladas. A hipótese é sustentada no âmbito computacional e espacial, mas não no sentido de validação funcional para espécies específicas.

Os cenários de restauração mostram que reduções espacialmente direcionadas da resistência modificam as métricas de conectividade estimadas. A principal contribuição prática está na possibilidade de utilizar a arquitetura como ferramenta de diagnóstico, comparação de cenários e identificação preliminar de regiões que merecem investigação mais detalhada. A aplicação em decisões de conservação requer conhecimento ecológico local e validação independente.

As limitações do estudo apontam diretamente para a continuidade da pesquisa. A calibração com dados biológicos e a análise de sensibilidade dos parâmetros constituem os avanços prioritários, seguidos por aplicações multiespécies e por cenários de restauração apoiados em informações temporais empíricas. Essas extensões

podem ampliar a robustez ecológica sem alterar o princípio central de transparência e reprodutibilidade do fluxo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADRIAENSEN, F. et al. The application of 'least-cost' modelling as a functional landscape model. *Landscape and Urban Planning*, v. 64, n. 4, p. 233–247, 2003. DOI: 10.1016/S0169-2046(02)00242-6.

BEIER, P.; NOSS, R. F. Do habitat corridors provide connectivity? *Conservation Biology*, v. 12, n. 6, p. 1241–1252, 1998. DOI: 10.1111/j.1523-1739.1998.98036.x.

DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, v. 1, p. 269–271, 1959. DOI: 10.1007/BF01386390.

FAHRIG, L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, v. 34, p. 487–515, 2003. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419.

FORMAN, R. T. T.; GODRON, M. *Landscape ecology*. New York: John Wiley & Sons, 1986.

HADDAD, N. M. et al. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, v. 1, n. 2, e1500052, 2015. DOI: 10.1126/sciadv.1500052.

MAPBIOMAS. Coleção 10.1 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. 2026. Dados de cobertura e uso da terra referentes ao ano de 2024. Disponível em: MapBiomas Brasil. Acesso em: 24 ago. 2026.

MCRAE, B. H.; DICKSON, B. G.; KEITT, T. H.; SHAH, V. B. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. *Ecology*, v. 89, n. 10, p. 2712–2724, 2008. DOI: 10.1890/07-1861.1.

PASCUAL-HORTAL, L.; SAURA, S. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation. *Landscape Ecology*, v. 21, n. 7, p. 959–967, 2006. DOI: 10.1007/s10980-006-0013-z.

SAATY, T. L. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. New York: McGraw-Hill, 1980.

SAURA, S.; PASCUAL-HORTAL, L. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: comparison with existing indices and application to a case study. *Landscape and Urban Planning*, v. 83, n. 2–3, p. 91–103, 2007. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2007.03.005.

TAYLOR, P. D.; FAHRIG, L.; HENEIN, K.; MERRIAM, G. Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos*, v. 68, n. 3, p. 571–573, 1993. DOI: 10.2307/3544927.

TURNER, M. G.; GARDNER, R. H.; O'NEILL, R. V. Landscape ecology in theory and practice: pattern and process. New York: Springer-Verlag, 2001. DOI: 10.1007/b97434.

URBAN, D.; KEITT, T. Landscape connectivity: a graph-theoretic perspective. *Ecology*, v. 82, n. 5, p. 1205–1218, 2001. DOI: 10.1890/0012-9658(2001)082[1205:LCAGTP]2.0.CO;2.

VAN DER WALT, S. et al. scikit-image: image processing in Python. PeerJ, v. 2, e453, 2014. DOI: 10.7717/peerj.453.

ZELLER, K. A.; MCGARIGAL, K.; WHITELEY, A. R. Estimating landscape resistance to movement: a review. Landscape Ecology, v. 27, n. 6, p. 777–797, 2012. DOI: 10.1007/s10980-012-9737-0.

¹ Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Simulação de Biosistemas (PPGMSB), Universidade do Estado da Bahia (UNEB), Campus II, Alagoinhas, Bahia.

² Graduado em Sistemas de Informação, Mestre em Modelagem e Simulação de Biosistemas (DCET II/UNEB).

³ Graduado em Sistemas de Informação, Mestre em Modelagem e Simulação de Biosistemas (DCET II/UNEB).

⁴ Graduado em Ciências Biológicas, Mestrando em Modelagem e Simulação de Biosistemas (DCET II/UNEB).

⁵ Professor Dr. e orientador no Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Simulação de Biosistemas (PPGMSB), Universidade do Estado da Bahia (UNEB).

⁶ Professor Dr. e coorientador no Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Simulação de Biosistemas (PPGMSB), Universidade do Estado da Bahia (UNEB).