

DA CICATRIZ
SOCIOECOLÓGICA À
INFRAESTRUTURA
REGENERATIVA:
FRAMEWORK DE ESTRADA-
PARQUE PARA RODOVIAS
AMAZÔNICAS

FROM SOCIO-ECOLOGICAL SCAR TO REGENERATIVE INFRASTRUCTURE: A
PARK-ROAD FRAMEWORK FOR AMAZONIAN HIGHWAYS

Engenharias, Ciências Sociais Aplicadas • 19/03/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/773901648](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/773901648)

Thiago Rodrigues Gonçalves Caetano¹

Marc Marie Luc Philippe Jacquinet²

Antônio Willian Flores de Melo³

RESUMO

Rodovias implantadas em florestas tropicais úmidas têm operado como vetores de fragmentação ecológica, disfunção hidrológica, instabilidade geomorfológica e intensificação de pressões territoriais cumulativas. Na Amazônia, esse padrão evidencia a insuficiência de abordagens centradas exclusivamente na mitigação de impactos. Diante desse contexto, o artigo propõe um framework de Estrada-Parque Regenerativa como alternativa ao modelo rodoviário convencional, tomando como referência analítica o corredor da BR-364/AC, no trecho entre Manoel Urbano e Feijó. Metodologicamente, o estudo articula revisão crítica integrativa da literatura, construção teórico-conceitual do framework, aplicação territorial ao corredor selecionado e simulação prospectiva comparativa de cenários. A proposta parte do reconhecimento da rodovia como cicatriz socioecológica e avança para uma concepção integrada de infraestrutura orientada pela engenharia ecológica, pela infraestrutura verde-azul e pela requalificação funcional da paisagem. O framework articula conectividade ecológica, drenagem naturalizada, bioengenharia de taludes, restauração ripária, soluções de baixo impacto para a seção viária e acupuntura territorial para priorização de pontos críticos. As simulações prospectivas indicam que a configuração regenerativa tende a superar soluções mitigatórias convencionais ao ampliar a conectividade ecológica, reduzir vulnerabilidades hidrogeomorfológicas e melhorar o desempenho socioambiental do corredor. Conclui-se que a Estrada-Parque Regenerativa constitui alternativa tecnicamente consistente e territorialmente adaptável para o redesenho de rodovias amazônicas.

Palavras-chave: Infraestrutura regenerativa. Ecologia de estradas. Conectividade ecológica. Drenagem naturalizada. Rodovias amazônicas.

ABSTRACT

Highways built in humid tropical forests have frequently operated as drivers of ecological fragmentation, hydrological disruption, geomorphological instability, and the intensification of cumulative territorial pressures. In the Amazon, this pattern reveals the limitations of approaches centered exclusively on impact mitigation. In this context, the article proposes a Regenerative Park-Road framework as an alternative to the conventional highway model, using the BR-364 corridor in Acre, Brazil—specifically the stretch between Manoel Urbano and Feijó—as the analytical reference. Methodologically, the study combines an integrative critical literature review, the theoretical-conceptual development of the framework, its territorial application to the selected corridor, and a comparative prospective scenario simulation. The proposal begins by recognizing highways as socio-ecological scars and advances toward an integrated conception of infrastructure guided by ecological engineering, blue-green infrastructure, and landscape functional requalification. The framework integrates ecological connectivity measures, nature-based drainage systems, slope bioengineering, riparian restoration, low-impact road cross-section solutions, and a territorial acupuncture strategy aimed at prioritizing critical points capable of generating systemic gains. Prospective simulations indicate that the regenerative configuration tends to outperform conventional mitigation-based solutions by enhancing ecological connectivity, reducing hydro-geomorphological vulnerabilities, and improving the corridor's overall socio-environmental performance. The results suggest that the Regenerative Park-Road approach represents a technically consistent and territorially adaptable alternative for redesigning Amazonian highways.

Keywords: Regenerative infrastructure. Road ecology. Ecological connectivity. Nature-based drainage. Amazonian highways.

1. INTRODUÇÃO

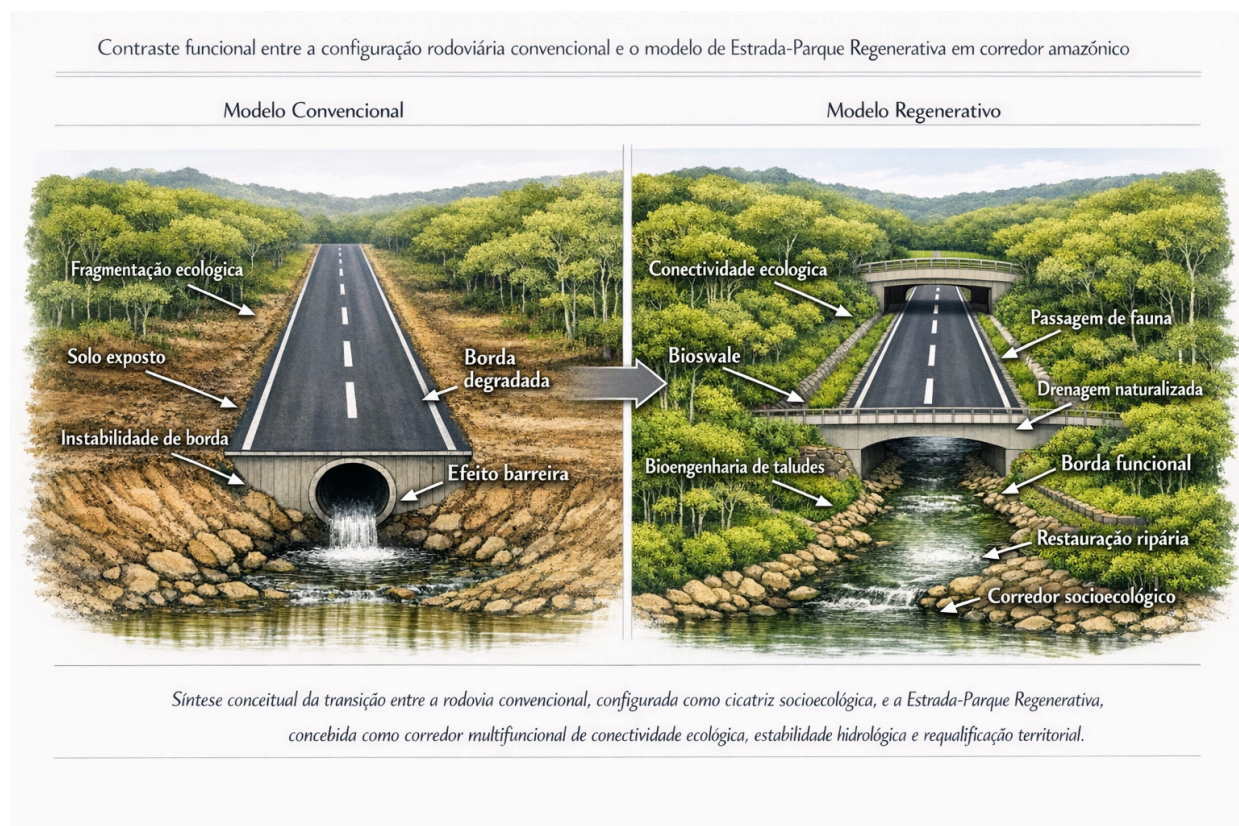
A expansão da infraestrutura rodoviária em florestas tropicais tem produzido efeitos que ultrapassam amplamente a faixa física de implantação da via. Em escala global, estudos recentes demonstram que a infraestrutura de transporte está associada à redução da cobertura florestal, da altura do dossel e da produtividade primária líquida, bem como ao aumento da fragmentação da paisagem, com efeitos particularmente intensos no Sul Global (ZHOU et al., 2026). Em regiões tropicais, essa constatação assume gravidade adicional, porque a rodovia não opera apenas como eixo de circulação, mas como dispositivo de reorganização territorial, induzindo acessibilidade, abertura de frentes de ocupação, ruptura de fluxos hidrológicos e ampliação de pressões ecológicas secundárias sobre áreas antes relativamente contínuas. Nessas condições, a estrada deixa de ser compreendida como simples obra linear de mobilidade e passa a atuar como vetor de transformação socioecológica de larga escala.

Na Amazônia, esse processo é particularmente sensível, pois a infraestrutura se insere em um sistema territorial submetido a perturbações compostas e a crescentes riscos de instabilidade ecológica. Flores et al. (2024) demonstram que a floresta amazônica está cada vez mais exposta à interação entre aquecimento, secas extremas, desmatamento e fogo, de modo que parcelas significativas do bioma podem aproximar-se de transições críticas nas próximas décadas. Em sentido convergente, Lapola et al. (2023) evidenciam que a degradação florestal amazônica, impulsionada

por fogo, efeitos de borda, exploração madeireira e secas extremas, já alcança magnitude comparável à do próprio desmatamento em termos de perda de funcionalidade ecológica e emissões associadas. Nesse contexto, a rodovia não pode mais ser tratada como infraestrutura neutra de integração regional. Ela precisa ser analisada como componente ativo da produção de vulnerabilidades territoriais, capaz de intensificar processos de fragmentação, desorganização hidrológica, instabilidade geomorfológica e amplificação de pressões antrópicas sobre a paisagem.

É nesse quadro que a noção de cicatriz socioecológica adquire relevância analítica. A expressão permite compreender a rodovia como inscrição territorial persistente, produzida pela interação entre supressão vegetal, ruptura de conectividade, alteração de drenagens, desestabilização de interfaces geomorfológicas, expansão da acessibilidade e propagação de impactos para além da plataforma da via. A ideia de cicatriz não remete, portanto, a um dano pontual e localizável, mas a um processo cumulativo, espacialmente expansivo e temporalmente duradouro. Em vez de limitar-se ao momento construtivo ou à perda direta da faixa de domínio, a análise passa a considerar os efeitos prolongados da infraestrutura sobre o funcionamento ecológico da paisagem e sobre a reorganização do território que a circunda. Essa leitura é particularmente pertinente para a Amazônia, onde a infraestrutura rodoviária frequentemente atua como elemento de indução territorial em sistemas de elevada sensibilidade biofísica. A Figura 1 sintetiza visualmente esse contraste entre a lógica da rodovia convencional, associada à produção de cicatrizes socioecológicas, e a alternativa regenerativa que orienta a proposta desenvolvida neste artigo.

Figura 1. Contraste conceitual entre rodovia convencional e Estrada-Parque Regenerativa em corredores amazônicos.



Fonte: Elaboração própria (2026).

O problema central é que o paradigma predominante de resposta a esses impactos continua sendo, em grande medida, mitigatório. Medidas como controle de erosão, revegetação pontual, bacias de contenção e passagens de fauna representam avanços importantes em relação à engenharia estritamente cinza e indiferente à dimensão ambiental. Todavia, quando permanecem subordinadas a uma lógica de projeto essencialmente linear, corretiva e setorial, tais medidas tendem a operar como anexos ambientais de uma infraestrutura cuja racionalidade de base segue inalterada. A literatura recente em infraestrutura verde-azul e soluções baseadas na natureza tem enfatizado justamente esse limite: benefícios ecológicos, hidrológicos e territoriais só alcançam maior efetividade quando são concebidos de modo intencional e integrados ao núcleo da arquitetura infraestrutural, e não tratados como efeitos colaterais

desejáveis de ajustes periféricos (COOK et al., 2024; PERRELET et al., 2024; AGHIMIEN et al., 2024).

É nesse ponto que emerge a lacuna científica que orienta este artigo. Embora exista ampla produção sobre ecologia de estradas, conectividade da paisagem, infraestrutura verde-azul e soluções baseadas na natureza, ainda são escassas as formulações que integrem esses repertórios em um framework coerente de infraestrutura regenerativa aplicado a rodovias amazônicas. Em particular, falta ao debate uma modelagem que articule, em uma mesma estrutura analítica e operacional, a reconexão ecológica do corredor, a reconfiguração hidrológica da estrada, a estabilização ecotécnica das interfaces sensíveis, a modulação da seção viária e a priorização espacial de intervenções críticas em paisagens tropicais úmidas. Há, portanto, uma lacuna entre o reconhecimento dos limites do modelo convencional e a proposição de uma alternativa infraestrutural integrada, territorialmente sensível e tecnicamente aplicável.

Diante dessa lacuna, o artigo tem por objetivo propor um framework de Estrada-Parque Regenerativa para rodovias amazônicas, capaz de integrar mobilidade, biodiversidade, água, estabilidade físico-territorial e resiliência socioambiental em uma arquitetura coerente de requalificação do corredor. O recorte empírico adotado é o trecho da BR-364/AC entre Manoel Urbano e Feijó, escolhido como referência analítica em razão de sua relevância logística, de sua criticidade socioecológica e de sua aptidão para demonstrar a aplicabilidade territorial do modelo. A hipótese central do estudo é que a superação do paradigma rodoviário convencional, em florestas tropicais, requer mais do que mitigação incremental: exige uma reespecificação da infraestrutura como corredor socioecológico

multifuncional, orientado por princípios de compatibilidade ecológica, reintegração hidrológica, estabilização ecotécnica, conectividade funcional e priorização espacial estratégica.

Metodologicamente, o estudo articula quatro movimentos complementares. O primeiro consiste em uma revisão crítica e integrativa da literatura sobre ecologia de estradas, infraestrutura verde-azul, soluções baseadas na natureza, bioengenharia, conectividade da paisagem e pensamento regenerativo. O segundo corresponde à construção teórico-conceitual do framework da Estrada-Parque Regenerativa, com definição de princípios estruturantes e de seus componentes operacionais. O terceiro envolve a aplicação analítica do modelo ao corredor da BR-364/AC entre Manoel Urbano e Feijó. O quarto desenvolve uma simulação prospectiva comparativa entre três cenários — tendencial, mitigatório e regenerativo — com o objetivo de examinar o desempenho relativo de diferentes racionalidades de intervenção sobre o corredor.

A contribuição do artigo é dupla. No plano teórico, ele aproxima campos que frequentemente permanecem dissociados na literatura, convertendo categorias da ecologia de estradas, da infraestrutura verde-azul e da regeneração territorial em uma linguagem projetual aplicável à engenharia viária em florestas tropicais. No plano aplicado, oferece um modelo capaz de orientar o redesenho de rodovias amazônicas por meio da articulação entre passagens de fauna e dispositivos de conectividade, drenagem naturalizada com bioswales e retenção distribuída, bioengenharia de taludes, restauração ripária, seção viária de baixo impacto e acupuntura territorial. Ao fazê-lo, o estudo procura demonstrar que a rodovia pode deixar de operar exclusivamente como vetor de fragmentação

e passar a integrar uma lógica de recomposição funcional da paisagem.

A estrutura do artigo está organizada da seguinte forma. A Seção 2 apresenta os fundamentos teóricos do problema, discutindo a passagem da mitigação à regeneração, a ecologia de estradas em florestas tropicais, a infraestrutura verde-azul e a noção de infraestrutura regenerativa aplicada a paisagens degradadas. A Seção 3 explicita o percurso metodológico, incluindo o delineamento da pesquisa, a estratégia de construção do framework, o recorte espacial adotado, a tradução do modelo em componentes operacionais e a lógica de simulação comparativa de cenários. A Seção 4 reúne os resultados e a discussão, apresentando o framework da Estrada-Parque Regenerativa, sua aplicação ao corredor BR-364/AC, a simulação prospectiva dos três cenários e a discussão integrada de suas contribuições, limites e implicações. Por fim, a Seção 5 sintetiza as conclusões do estudo e explicita o significado mais amplo da proposta para a engenharia viária amazônica e para o debate contemporâneo sobre infraestrutura, biodiversidade, clima e justiça territorial.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA INFRAESTRUTURA REGENERATIVA EM RODOVIAS AMAZÔNICAS

2.1. Da Mitigação à Regeneração: Mudança de Paradigma na Engenharia Viária Amazônica

A agenda contemporânea de sustentabilidade aplicada à infraestrutura tem sido marcada por uma tensão conceitual e prática entre dois horizontes distintos de intervenção. O primeiro, mais consolidado, é o da mitigação, orientado à redução,

compensação ou contenção de impactos negativos produzidos por empreendimentos sobre o meio físico, biótico e social. O segundo, mais recente e ainda em consolidação, é o da regeneração, que desloca o foco da simples diminuição de danos para a recomposição de funções ecológicas, a ampliação da resiliência territorial e a reorganização da relação entre infraestrutura e paisagem. Em termos analíticos, a diferença entre ambos não é apenas de intensidade, mas de racionalidade. Enquanto a mitigação tende a operar sobre efeitos adversos de uma infraestrutura concebida segundo lógica predominantemente linear e setorial, a regeneração exige que a própria infraestrutura seja redesenhada a partir dos processos ecológicos, hidrológicos e territoriais com os quais interage. Essa inflexão ganha relevância adicional diante de evidências recentes de que a infraestrutura de transporte, em escala global, associa-se à redução da cobertura florestal, da altura do dossel e da produtividade primária líquida, bem como ao aumento da fragmentação, com efeitos particularmente intensos no Sul Global, o que reforça a inadequação de respostas meramente periféricas em contextos ecologicamente sensíveis (AGHIMIEN et al., 2024; FOLKARD-TAPP et al., 2025; ZHOU et al., 2026).

No campo rodoviário, o paradigma mitigatório teve papel historicamente relevante ao internalizar exigências ambientais mínimas no planejamento, licenciamento e operação de obras lineares. Medidas como passagens de fauna, revegetação de taludes, bacias de contenção, controle de erosão e recuperação de áreas degradadas representaram avanços inequívocos em relação à engenharia estritamente cinza, fundada quase exclusivamente em critérios geométricos, hidráulicos e operacionais. Ainda assim, a literatura recente em infraestrutura verde, ecologia de estradas e soluções baseadas na natureza tem mostrado que tais medidas

frequentemente permanecem subordinadas a uma lógica corretiva, sendo incorporadas como acessórios ambientais de uma solução viária previamente definida. Perrelet et al. (2024), ao discutirem infraestrutura verde-azul, observam que objetivos ecológicos e objetivos de engenharia continuam, em muitos casos, tratados de forma dissociada, o que reduz a multifuncionalidade e limita ganhos de biodiversidade e resiliência. Em sentido convergente, Cook et al. (2024) sustentam que sistemas verdes só alcançam desempenho elevado quando sua multifuncionalidade é intencionalmente concebida ao longo do planejamento, projeto e construção, e não presumida como externalidade benéfica espontânea. Aghimien et al. (2024), por sua vez, assinalam que soluções baseadas na natureza no ambiente construído só adquirem potencial transformador quando deixam de ser tratadas como adereços paisagísticos e passam a compor o núcleo das estratégias de adaptação climática, gestão da água e redução de riscos.

Essa limitação torna-se particularmente grave na Amazônia. Em biomas tropicais úmidos, a estrada não representa apenas uma superfície impermeável ou um corte linear na paisagem; ela altera regimes de drenagem, intensifica efeitos de borda, amplia a acessibilidade a áreas antes mais contínuas, induz ocupação secundária e reforça trajetórias de degradação ecológica territorialmente expansivas. Zhou et al. (2026) demonstram que a infraestrutura de transporte se associa, em larga escala, a perdas relevantes de cobertura florestal, redução da estrutura da vegetação e aumento da fragmentação. Flores et al. (2024), por sua vez, mostram que a Amazônia vem se aproximando de limiares críticos em razão da interação entre desmatamento, fogo, secas extremas e aquecimento. Em paralelo, Lapola et al. (2023) evidenciam que a degradação florestal amazônica já alcança aproximadamente 2,5

milhões de km² e pode gerar emissões de carbono de magnitude comparável às associadas ao próprio desmatamento. Nesse contexto, uma estratégia centrada apenas na mitigação de impactos localizados revela-se insuficiente, porque o problema não se reduz ao dano pontual da obra, mas à incompatibilidade estrutural entre o modelo rodoviário convencional e a dinâmica socioecológica da floresta tropical úmida (ZHOU et al., 2026; FLORES et al., 2024; LAPOLA et al., 2023).

A crítica ao paradigma mitigatório, contudo, não deve ser confundida com a recusa das medidas de mitigação em si. O ponto central é outro: em corredores amazônicos, tais medidas deixam de ser satisfatórias quando permanecem encapsuladas em uma lógica de compensação marginal, incapaz de reorganizar o metabolismo ecológico da infraestrutura. A transição paradigmática proposta neste artigo implica reconhecer que a sustentabilidade rodoviária, em floresta tropical, não depende apenas de “fazer menos mal”, mas de produzir compatibilidade funcional entre mobilidade, biodiversidade, água, solo, microclima e uso do território. Nessa chave, a infraestrutura regenerativa não substitui simplesmente o repertório mitigatório; ela o reinsere em uma arquitetura mais ampla, na qual cada dispositivo precisa ser avaliado por sua contribuição à conectividade ecológica, à estabilidade hidrogeomorfológica, à resiliência climática e à qualidade territorial do corredor. Em vez de somar medidas dispersas a um traçado pré-concebido, passa-se a exigir que o próprio critério de desempenho da infraestrutura seja redefinido em bases socioecológicas.

Esse reposicionamento dialoga diretamente com o avanço das soluções baseadas na natureza, mas também exige ir além de leituras simplificadas do conceito. Aghimien et al. (2024) mostram

que tais soluções vêm ganhando centralidade no debate sobre ambiente construído por sua capacidade de integrar adaptação climática, gestão da água, regulação térmica, controle de riscos e provisão de serviços ecossistêmicos. Todavia, Folkard-Tapp et al. (2025) alertam que o uso excessivamente amplo do termo pode obscurecer diferenças importantes entre iniciativas apenas “verdes” e estratégias efetivamente aptas a integrar natureza e clima em bases sistêmicas. Essa advertência é especialmente valiosa para o caso amazônico. Em rodovias tropicais, não basta inserir elementos vegetados ou estruturas de drenagem naturalizada de forma dispersa; é necessário que a lógica de projeto parta da funcionalidade ecológica do território e da necessidade de recompor processos degradados pela própria presença da infraestrutura. A regeneração, portanto, não se confunde com embelezamento paisagístico, compensação vegetacional ou reforço pontual de drenagem: ela exige reespecificação do sistema infraestrutural como um todo (AGHIMIEN et al., 2024; FOLKARD-TAPP et al., 2025).

É justamente por isso que a ecologia de estradas e a engenharia ecológica precisam ser aproximadas de forma mais robusta. Boyle et al. (2021) demonstraram que a combinação entre cercamento direcionador e estruturas de travessia pode reduzir mortalidade viária e promover conectividade em nível populacional, evidenciando que a efetividade desses dispositivos depende de desenho, localização e integração com padrões reais de deslocamento da fauna. Littlefield et al. (2025) aprofundam essa leitura ao sustentar que passagens de fauna também devem ser pensadas como instrumentos de adaptação climática, capazes de sustentar deslocamentos de espécies, acesso a recursos e continuidade ecológica em paisagens submetidas a mudanças ambientais aceleradas. Em paralelo, Perrelet et al. (2024) assinalam

que a infraestrutura verde-azul alcança melhor desempenho quando a biodiversidade é tratada como dimensão funcional do sistema, e não como benefício colateral. A implicação para a engenharia viária amazônica é clara: conectividade ecológica, drenagem naturalizada, bioengenharia de taludes, restauração ripária e modulação microclimática de borda não constituem módulos independentes, mas partes de uma mesma lógica regenerativa, orientada à recomposição funcional da paisagem (BOYLE et al., 2021; LITTLEFIELD et al., 2025; PERRELET et al., 2024).

No componente hidrológico, essa mudança de paradigma é igualmente decisiva. Quon e Jiang (2023), ao revisarem a implementação de fontes hídricas não tradicionais, observam que soluções dessa natureza exigem processos decisórios sensíveis ao contexto, ao risco, à escala e à multifuncionalidade. Em estudo de modelagem, Lu et al. (2024) demonstraram que bioswales podem reduzir escoamento superficial e contribuir para adaptação climática quando corretamente dimensionados e inseridos em estratégias espaciais coerentes. Transferida para o universo amazônico, essa literatura sugere que o problema da rodovia não se restringe à drenagem insuficiente, mas à ruptura de relações hidrológicas mais amplas entre plataforma viária, microdrenagens, encostas, planícies de inundação e vegetação ripária. A abordagem regenerativa, por consequência, não busca apenas evacuar a água da estrada com maior rapidez; ela procura reinserir a infraestrutura em um regime hidrológico mais compatível com o funcionamento da paisagem, reduzindo erosão, assoreamento, concentração artificial de fluxo e instabilidade de taludes (QUON; JIANG, 2023; LU et al., 2024).

Desse modo, a passagem da mitigação à regeneração representa, em sentido estrito, uma mudança de objeto. A rodovia deixa de ser

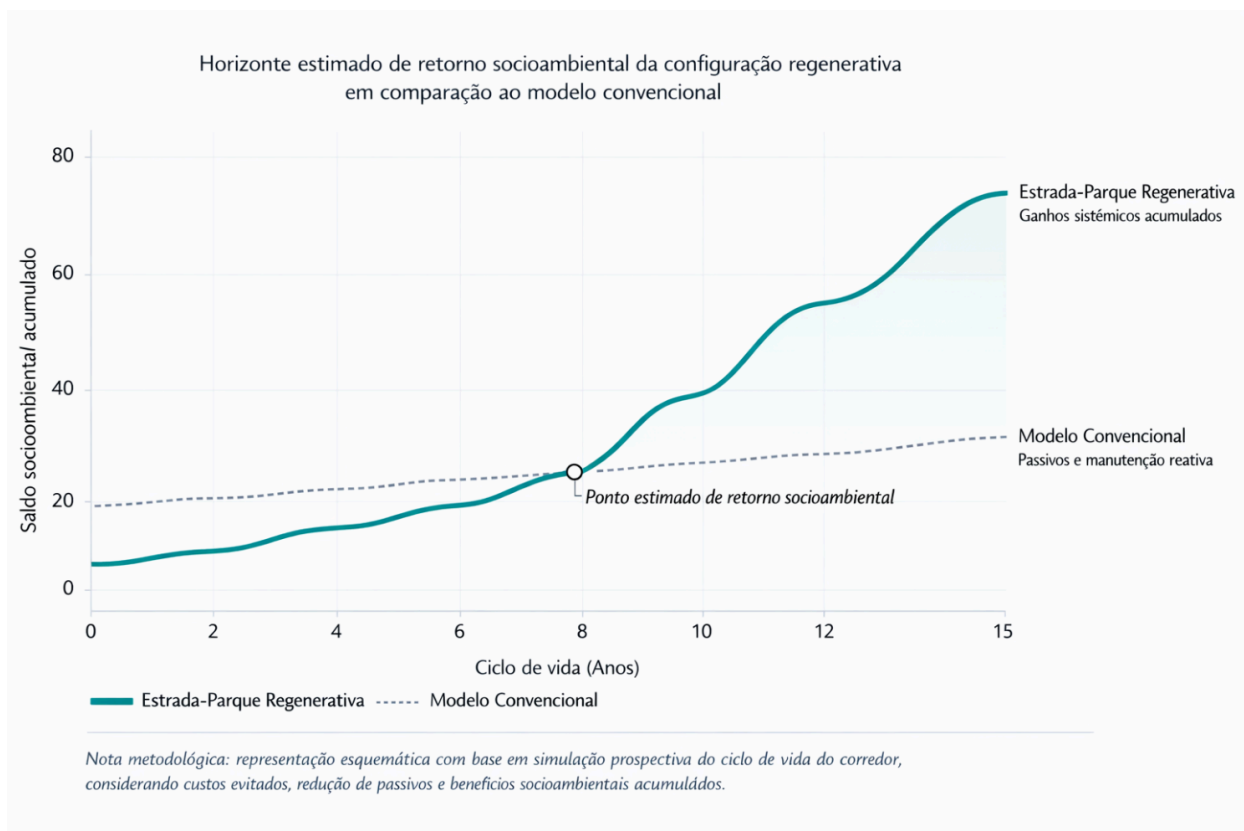
tratada como ativo linear isolado, ao qual se agregam medidas ambientais externas, e passa a ser compreendida como corredor socioecológico cujo desempenho depende da integração entre engenharia, ecologia e território. Essa inflexão é coerente com a ideia de multifuncionalidade intencional formulada por Cook et al. (2024), segundo a qual sistemas verdes e azuis só alcançam elevado desempenho quando são concebidos para produzir simultaneamente resultados hidrológicos, ecológicos, climáticos e territoriais. Também se alinha ao argumento de Perrelet et al. (2024), para quem infraestrutura verde-azul de alto desempenho requer integração entre objetivos de biodiversidade e objetivos de engenharia, e ao de Aghimien et al. (2024), para quem o ambiente construído precisa incorporar soluções baseadas na natureza de forma estrutural, e não residual. Sob esse prisma, a transição paradigmática não consiste em meramente “ambientalizar” a rodovia, mas em redefinir sua legitimidade funcional à luz da resiliência socioecológica do corredor (COOK et al., 2024; PERRELET et al., 2024; AGHIMIEN et al., 2024).

No caso amazônico, isso significa que o redesenho da infraestrutura rodoviária deve ser orientado por quatro exigências complementares. A primeira é a recomposição da conectividade ecológica, mediante estruturas de travessia e dispositivos que reduzam o efeito barreira e a mortalidade de fauna (BOYLE et al., 2021; LITTLEFIELD et al., 2025). A segunda é a reconfiguração hidrológica da via, com drenagem naturalizada, estruturas de retenção e reconexão de fluxos de água em escala de corredor (QUON; JIANG, 2023; LU et al., 2024). A terceira é a estabilização ecotécnica do contato entre estrada e relevo, por meio de bioengenharia de taludes e soluções de menor impacto geomorfológico, em articulação com objetivos de biodiversidade e

funcionalidade sistêmica (PERRELET et al., 2024). A quarta é a reconstrução da relação entre estrada e paisagem, de modo que a infraestrutura deixe de aprofundar a fragmentação e passe a atuar como suporte de resiliência territorial em um bioma sob perturbações compostas e aproximação de limiares críticos (FLORES et al., 2024; LAPOLA et al., 2023).

É a partir desse enquadramento que o conceito de Estrada-Parque Regenerativa adquire densidade analítica. Ele não se resume a uma estrada “mais verde”, nem a um corredor cênico acrescido de medidas de conservação. Trata-se, antes, de uma formulação que procura reposicionar a rodovia como infraestrutura territorial compatível com biodiversidade, água, clima e qualidade ecológica da paisagem. Sua originalidade reside em tratar a regeneração não como efeito espontâneo de revegetação, compensação ou paisagismo ambiental, mas como resultado de um framework de projeto capaz de articular engenharia ecológica, infraestrutura verde-azul e priorização territorial estratégica. Em termos esquemáticos, essa inflexão pode ser sintetizada como uma transição da infraestrutura extrativa para a infraestrutura regenerativa, da mitigação para a regeneração e da lógica linear para a multifuncionalidade territorial, conforme ilustrado na Figura 2. A próxima seção aprofunda essa mudança de racionalidade a partir da ecologia de estradas, da conectividade da paisagem e dos efeitos de fragmentação em florestas tropicais.

Figura 2. Transição paradigmática da rodovia convencional para a Estrada-Parque Regenerativa: da mitigação à regeneração socioecológica.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Nota: A figura sintetiza a passagem de uma racionalidade infraestrutural extrativa, linear e centrada na mitigação de impactos para uma racionalidade regenerativa, multifuncional e orientada pela integração entre mobilidade, conectividade ecológica, reconfiguração hidrológica e resiliência territorial.

2.2. Ecologia de Estradas, Conectividade da Paisagem e Efeitos de Fragmentação em Florestas Tropicais

A ecologia de estradas consolidou-se, nas últimas décadas, como campo estratégico para compreender de que modo infraestruturas lineares alteram a estrutura, a funcionalidade e a resiliência das paisagens. Seu objeto não se limita à mortalidade de fauna por atropelamento ou à supressão vegetal diretamente associada à faixa de domínio; ao contrário, envolve a análise integrada dos efeitos de barreira, da fragmentação de habitats, da reorganização de fluxos ecológicos, da modificação microclimática de borda e da ampliação da acessibilidade humana sobre áreas ecologicamente sensíveis. Essa compreensão foi progressivamente estruturada por contribuições clássicas que mostraram que os efeitos ecológicos das

estradas extrapolam em muito a superfície pavimentada, alcançando comunidades terrestres e aquáticas, padrões de uso do habitat e processos ecológicos em múltiplas escalas (FORMAN; ALEXANDER, 1998; TROMBULAK; FRISSELL, 2000; COFFIN, 2007). Em florestas tropicais, tais efeitos tendem a ser mais severos porque a elevada conectividade estrutural e funcional desses sistemas constitui condição central para a manutenção da biodiversidade, da ciclagem hidrológica, da estabilidade climática local e regional e da regeneração ecológica de longo prazo. Nessa perspectiva, a estrada não pode ser compreendida apenas como obra linear implantada sobre a paisagem, mas como vetor de reconfiguração espacial com capacidade de alterar profundamente a lógica ecológica do território (ZHOU et al., 2026; ZHENG et al., 2025).

A literatura recente reforça esse diagnóstico em escala global e pantropical. Zhou et al. (2026), ao avaliarem os impactos multidimensionais da infraestrutura de transporte sobre florestas, demonstraram que a proximidade de rodovias está associada à redução da cobertura florestal, da altura do dossel e da produtividade primária líquida, bem como ao aumento da fragmentação, com efeitos particularmente intensos no Sul Global. Já Zheng et al. (2025), em análise de alta resolução sobre florestas tropicais entre 2001 e 2020, concluíram que redes rodoviárias em expansão continuam a funcionar como catalisadoras potentes de perda florestal, sobretudo em regiões nas quais a abertura de vias multiplica acessos secundários, estimula a conversão do uso da terra e enfraquece a integridade do mosaico florestal. Esses resultados são particularmente relevantes porque afastam leituras ainda tributárias da ideia de que os impactos viários se restringiriam a faixas estreitas de influência. O que se observa, em realidade, é uma propagação espacial dos efeitos da estrada, cuja intensidade depende da

interação entre traçado, densidade de acessos, contexto fundiário, capacidade de governança e sensibilidade ecológica do sistema.

A fragmentação constitui uma das expressões mais críticas desse processo. Em termos ecológicos, fragmentar não significa apenas dividir fisicamente uma mancha de habitat; significa reduzir continuidade, ampliar isolamento, aumentar a proporção de borda, comprometer deslocamentos, alterar interações bióticas e redistribuir riscos ecológicos no espaço. Em florestas tropicais, onde muitos organismos dependem de grandes áreas contínuas, gradientes microclimáticos relativamente estáveis e conectividade funcional entre manchas, a fragmentação induzida por rodovias pode desencadear efeitos em cascata sobre composição de espécies, fluxo gênico, padrões de forrageamento, dispersão de sementes e persistência populacional. Embora a literatura reconheça que os efeitos da fragmentação não são uniformes entre táxons, escalas e contextos, há consenso robusto de que, quando combinada à perda de habitat e à expansão de usos antrópicos, ela tende a ampliar a vulnerabilidade ecológica e a reduzir a capacidade adaptativa da paisagem (ZHOU et al., 2026; LAPOLA et al., 2023).

No caso tropical, a fragmentação associada à malha viária apresenta uma dimensão adicional: ela raramente atua de forma isolada. Em vez disso, costuma interagir com desmatamento progressivo, fogo, extração seletiva, ocupação irregular, abertura de ramais e conversão agropecuária. Essa combinação torna o efeito rodoviário mais complexo do que a simples presença de uma barreira física. Lapola et al. (2023) demonstram que a degradação florestal amazônica decorre de múltiplos vetores interdependentes, entre os quais a fragmentação e a ampliação da acessibilidade ocupam lugar central. Flores et al. (2024), por sua vez, indicam que redes viárias figuram

entre os elementos capazes de sinalizar áreas suscetíveis a transições críticas no sistema amazônico, precisamente porque funcionam como facilitadoras de pressões adicionais sobre a floresta. Assim, a estrada não apenas fragmenta: ela abre o sistema a novos agentes de degradação, converte bordas em zonas de instabilidade ecológica e contribui para a territorialização cumulativa do risco.

Esse ponto é decisivo para a discussão da conectividade da paisagem. Em ecologia, conectividade não se reduz à continuidade visual da cobertura vegetal; trata-se da capacidade de organismos, fluxos ecológicos e processos biofísicos se deslocarem ou se manterem funcionalmente articulados no espaço. Por essa razão, uma paisagem pode aparentar continuidade estrutural e, ainda assim, apresentar desconexão funcional para determinados grupos de espécies ou processos ecológicos. Essa distinção entre conectividade estrutural e funcional foi amplamente desenvolvida na literatura sobre corredores e fragmentação, que mostrou a importância de ligações espaciais efetivas para a persistência de populações e para a redução de riscos associados ao isolamento ecológico (BENNETT, 2003; HANSKI, 2005). Rodovias agravam esse problema ao atuarem simultaneamente como barreiras físicas, fontes de perturbação sonora e luminosa, focos de mortalidade e vetores de simplificação ecológica em suas bordas. A consequência é que a conectividade deve ser tratada não como atributo abstrato da paisagem, mas como variável concreta de desempenho ecológico do corredor. Sob essa ótica, a mera presença de manchas florestais remanescentes ao longo de uma rodovia não basta para assegurar funcionalidade se a infraestrutura continuar interrompendo deslocamentos, concentrando mortalidade e degradando interfaces ecológicas sensíveis (BOYLE et al., 2021; LITTLEFIELD et al., 2025).

A literatura sobre travessias de fauna oferece evidência empírica particularmente relevante nesse sentido. Boyle et al. (2021), ao avaliarem medidas mitigatórias em nível populacional, demonstraram que a combinação entre cercamento direcionador e estruturas de travessia pode reduzir mortalidade viária e promover conectividade efetiva, evidenciando que o desempenho ecológico de uma rodovia depende do desenho sistêmico das intervenções, e não da inserção pontual e desconectada de dispositivos. Littlefield et al. (2025) aprofundam essa discussão ao sustentar que passagens de fauna não devem ser vistas apenas como instrumentos de mitigação local, mas também como ferramentas de adaptação climática, capazes de sustentar movimentos de espécies em paisagens sob transformação ambiental acelerada. Essa leitura amplia o horizonte analítico da ecologia de estradas: a conectividade deixa de ser apenas questão de conservação estática e passa a integrar estratégias de resiliência ecológica diante de mudanças climáticas, perturbações cumulativas e deslocamentos futuros de distribuição de espécies.

Em florestas tropicais, essa abordagem é ainda mais importante porque a conectividade funcional depende não apenas da existência de corredores mais amplos, mas também da qualidade ecológica das interfaces entre infraestrutura e matriz florestal. Bordas induzidas por estradas alteram umidade, temperatura, incidência de vento, composição florística e suscetibilidade ao fogo, produzindo ambientes ecologicamente distintos dos núcleos florestais internos. Quando tais bordas se multiplicam em paisagens já pressionadas, a fragmentação passa a operar também por degradação qualitativa, e não apenas por divisão espacial. Nessa chave, a ecologia de estradas aproxima-se diretamente da discussão sobre degradação florestal amazônica desenvolvida por Lapola et al. (2023), segundo a qual a

perda de funcionalidade ecológica pode ocorrer mesmo sem corte raso integral, em razão da interação entre fogo, borda, seca e perturbações antrópicas recorrentes. A rodovia, portanto, não apenas separa manchas; ela pode deteriorar progressivamente as condições ecológicas dos remanescentes que permanecem conectados apenas de forma aparente.

Outro aspecto decisivo diz respeito à escala. O efeito de uma estrada sobre a conectividade da paisagem não pode ser adequadamente compreendido apenas no ponto de travessia ou no segmento imediato da obra. Zheng et al. (2025) demonstram que os impactos rodoviários sobre florestas tropicais apresentam distribuição espacial ampla e acumulativa, razão pela qual a análise de corredores deve incorporar múltiplas escalas: a da seção viária, a da paisagem adjacente e a do sistema territorial mais amplo. Isso é particularmente relevante para a Amazônia, onde a abertura de uma via principal frequentemente desencadeia redes secundárias formais e informais, alterando a geometria da fragmentação e produzindo efeitos não lineares. Por essa razão, o estudo da conectividade em rodovias amazônicas não pode limitar-se ao eixo pavimentado; ele deve considerar o corredor ampliado de influência, incluindo áreas de expansão fundiária, zonas de drenagem, remanescentes florestais estratégicos e interfaces entre floresta, assentamentos e áreas de uso agropecuário.

Essa compreensão multiescalar possui implicações diretas para a formulação de infraestrutura regenerativa. Se a fragmentação é produzida tanto pela barreira física quanto pela desarticulação funcional da paisagem, o enfrentamento do problema exige mais do que mitigação pontual de atropelamentos ou recomposição paisagística superficial. Exige, antes, um redesenho do corredor

rodoviário orientado pela conectividade ecológica como princípio estruturante. Isso implica identificar áreas prioritárias de travessia, preservar e restaurar manchas-chave, reconectar drenagens e matas ripárias, reduzir efeitos de borda e tratar a rodovia como componente de um sistema socioecológico mais amplo. A ecologia de estradas, quando lida à luz das especificidades tropicais, conduz necessariamente a uma crítica do modelo viário convencional e prepara o terreno para formulações mais ambiciosas, como a Estrada-Parque Regenerativa.

Com isso, a conectividade da paisagem deixa de ser variável acessória e passa a constituir critério central de legitimidade ecológica da infraestrutura. Em florestas tropicais, uma rodovia somente pode ser considerada compatível com a sustentabilidade territorial se for capaz de reduzir seu efeito barreira, limitar sua contribuição para a fragmentação, preservar fluxos ecológicos críticos e evitar que a acessibilidade por ela criada se traduza em espiral continuada de degradação. A ecologia de estradas mostra, portanto, que a sustentabilidade viária não se mede apenas pela estabilidade do pavimento ou pela fluidez do tráfego, mas pela capacidade da infraestrutura de coexistir com a funcionalidade ecológica da paisagem que atravessa. É precisamente essa inflexão analítica que justifica, no presente artigo, a passagem do paradigma rodoviário mitigatório para um framework regenerativo ancorado em conectividade, integração territorial e recomposição funcional do corredor amazônico. Sob tal perspectiva, a conectividade ecológica deixa de ser apenas um atributo desejável do ambiente e passa a constituir um requisito de projeto, cuja tradução técnico-operacional será aprofundada na seção seguinte, dedicada aos dispositivos de passagem de fauna e à estruturação do corredor regenerativo.

2.3. Infraestrutura Verde-azul e Soluções Baseadas na Natureza Aplicadas a Corredores Viários

A incorporação da infraestrutura verde-azul ao debate sobre sustentabilidade da infraestrutura representa uma inflexão importante no modo de conceber a relação entre obra, paisagem e processos ecológicos. Em vez de tratar água, vegetação, solo e biodiversidade como variáveis externas a serem simplesmente controladas, contidas ou compensadas, essa abordagem parte da premissa de que componentes ecológicos e componentes engenheirados podem — e devem — ser articulados em sistemas multifuncionais capazes de produzir, simultaneamente, benefícios hidrológicos, climáticos, ecológicos e territoriais. Perrelet et al. (2024) observam que a infraestrutura verde-azul combina elementos seminaturais e construídos para oferecer manejo de águas pluviais, purificação da água, mitigação térmica e provisão de habitat, mas advertem que, em muitos projetos, os objetivos de engenharia continuam prevalecendo sobre os objetivos ecológicos. Essa observação é central para o presente artigo, porque revela que o simples uso de componentes vegetados não basta para caracterizar uma infraestrutura efetivamente transformadora; é necessário que a lógica ecológica participe do núcleo do projeto e da definição do desempenho esperado.

Essa constatação conduz a uma distinção conceitual decisiva entre ambientalização superficial da infraestrutura e integração ecológica estrutural. No primeiro caso, elementos verdes são acrescentados ao sistema como compensações periféricas, frequentemente sem alterar a racionalidade dominante de projeto. No segundo, vegetação, água, conectividade ecológica e funcionalidade hidrológica passam a organizar a própria arquitetura do corredor.

Cook et al. (2024), ao discutirem a noção de multifuncionalidade intencional, argumentam que a entrega simultânea de múltiplos benefícios depende de integração deliberada entre escalas, funções e objetivos, e não da simples sobreposição casual de dispositivos. Em chave complementar, Perrelet et al. (2024) sustentam que a infraestrutura verde-azul só alcança maior efetividade quando é projetada “para e com a biodiversidade”, isto é, quando as exigências ecológicas deixam de ser tratadas como efeitos colaterais desejáveis e passam a constituir critérios centrais de desenho. Para corredores viários tropicais, essa distinção é decisiva: não se trata apenas de arborizar bordas ou inserir dispositivos drenantes, mas de redefinir a infraestrutura como sistema socioecológico multifuncional.

No campo das soluções baseadas na natureza, a literatura recente também tem insistido na necessidade de maior rigor conceitual. Aghimien et al. (2024) mostram que essas soluções vêm sendo crescentemente mobilizadas no ambiente construído em razão de sua capacidade de integrar adaptação climática, regulação hídrica, controle de riscos, provisão de serviços ecossistêmicos e benefícios sociais. Contudo, Folkard-Tapp et al. (2025) alertam que o uso excessivamente abrangente do conceito pode gerar diluição analítica, obscurecendo diferenças substantivas entre intervenções pontuais, naturalizações parciais e estratégias realmente integradas entre natureza e clima. Nessa linha, os autores defendem uma abordagem mais abrangente de ação integrada natureza-clima, justamente para evitar que o conceito seja reduzido a rótulo legitimador de soluções verdes fragmentárias. Para o caso das rodovias amazônicas, essa advertência é especialmente útil: a adoção de bioswales, revegetação funcional ou passagens de fauna só se torna efetivamente transformadora quando tais dispositivos são articulados em uma lógica sistêmica de requalificação do

corredor, e não quando figuram como soluções isoladas de baixa capacidade reorganizadora.

A dimensão hidrológica é uma das frentes em que a infraestrutura verde-azul demonstra maior potencial de contribuição para corredores viários. Estudos recentes evidenciam que dispositivos como bioswales, jardins de chuva, áreas de retenção, pavimentos permeáveis e faixas vegetadas podem reduzir escoamento superficial, amortecer picos de cheia, melhorar a qualidade da água e ampliar a resiliência frente a eventos extremos. Lu et al. (2024) demonstraram, por modelagem, que bioswales podem exercer papel relevante na redução de escoamento e na adaptação climática, desde que dimensionados em consonância com o contexto local e inseridos em arranjos espaciais coerentes. De forma convergente, Zhou et al. (2024), ao examinarem soluções baseadas na natureza para gestão de risco de inundação, mostram que o potencial de “ganhos conjuntos” entre benefícios sociais e ecológicos depende de abordagem socioecológica integrada, e não da simples adoção pontual de soluções verdes. Embora muitos desses estudos se concentrem em contextos urbanos, suas implicações metodológicas são altamente transferíveis para rodovias implantadas em floresta tropical, nas quais a ruptura de microdrenagens, a concentração artificial de fluxos e a desconexão entre plataforma viária e paisagem figuram entre os principais mecanismos de instabilidade física e degradação ambiental.

Além do componente hídrico, a infraestrutura verde-azul possui relevância decisiva para a conectividade ecológica e para a recomposição funcional da paisagem. Molné et al. (2023), ao proporem uma estrutura multiescalar de priorização para planejamento de infraestrutura verde-azul voltada à biodiversidade,

demonstram que a efetividade desses sistemas depende de leitura espacial capaz de considerar conectividade, localização estratégica e potencial de geração de benefícios em escala de paisagem. Croeser et al. (2024), por sua vez, evidenciam que a localização direcionada de infraestrutura verde pode ampliar conectividade para espécies nativas e aumentar benefícios ecológicos em nível paisagístico. Embora ambos os estudos incidam sobre contextos urbanos e periurbanos, a lição teórica que deles se extrai é diretamente aplicável a corredores viários: a infraestrutura verde-azul não deve ser implantada de modo homogêneo ou decorativo, mas orientada por prioridades ecológicas, nós críticos e padrões espaciais de conectividade. Em termos amazônicos, isso reforça a ideia de que a estrada regenerativa precisa atuar por meio de intervenções territorialmente seletivas, conectando fragmentos, drenagens, matas ripárias e pontos de travessia de fauna em um sistema coerente.

A aproximação entre soluções baseadas na natureza e infraestrutura de transporte vem ganhando densidade também no debate específico sobre resiliência climática. Webber, Mei e Samaras (2025), ao discutirem soluções baseadas na natureza para infraestrutura de transporte em ambientes fluviais, sustentam que tais soluções podem oferecer instrumentos relevantes para gestão de risco climático, mas destacam a necessidade de reduzir a distância entre o repertório técnico disponível e sua incorporação efetiva na prática infraestrutural. Blackwood, Jowett e Webb (2022), em revisão sobre adaptação climática em infraestrutura ferroviária, já haviam mostrado que várias soluções baseadas na natureza testadas em outros contextos podem ser transferidas para sistemas lineares de transporte, desde que adaptadas às exigências funcionais do ativo. Esses trabalhos são particularmente importantes porque

demonstram que o desafio contemporâneo não reside apenas na existência de soluções, mas na tradução institucional, técnica e operacional dessas soluções para infraestruturas historicamente concebidas sob lógica predominantemente cinza. Para rodovias amazônicas, isso significa que a transição para uma infraestrutura ecologicamente compatível exige, ao mesmo tempo, repertório técnico e mudança de racionalidade projetual.

Essa transição, contudo, não pode ser feita por mera transposição de modelos urbanos, periurbanos ou temperados. Em florestas tropicais úmidas, a infraestrutura verde-azul deve responder a condições biofísicas muito particulares: elevada pluviosidade, forte variabilidade sazonal, sensibilidade de encostas e taludes, presença de drenagens difusas, importância estratégica das zonas ripárias para a estabilidade ecológica e risco de propagação de degradação a partir de bordas artificializadas. Por essa razão, a aplicação de soluções baseadas na natureza a corredores viários amazônicos demanda leitura territorial situada, capaz de integrar hidrologia, geomorfologia, biodiversidade e padrões de uso da terra. O que se propõe, portanto, não é a importação acrítica de um repertório “verde”, mas sua reinterpretação em chave tropical, de modo que bioswales, revegetação funcional, dispositivos de retenção, reconexão ripária e estruturas de conectividade passem a constituir componentes de uma infraestrutura ecologicamente compatível com o funcionamento da floresta. Essa exigência é coerente com a crítica de Folkard-Tapp et al. (2025), segundo a qual a efetividade das soluções baseadas na natureza depende de sua inserção em agendas integradas, contextualmente informadas e funcionalmente articuladas.

Sob essa chave, a infraestrutura verde-azul e as soluções baseadas na natureza oferecem ao campo rodoviário algo mais profundo do que um conjunto de técnicas: oferecem uma gramática alternativa de projeto. Em vez de uma via impermeável, rigidamente drenada e protegida por contenções predominantemente cinzas, passa a ser possível conceber corredores capazes de infiltrar, reter, desacelerar, reconectar, sombrear, estabilizar e restaurar. Em vez de tratar o território adjacente como espaço residual de proteção, essa abordagem passa a ver as margens da estrada, as zonas ripárias, os taludes e os pontos de travessia como componentes ativos do desempenho socioecológico do sistema. É precisamente essa mudança que torna a infraestrutura verde-azul fundamental para o framework de Estrada-Parque Regenerativa: ela fornece os meios técnicos e conceituais para converter a crítica à rodovia convencional em proposição concreta de requalificação territorial.

Todavia, embora a infraestrutura verde-azul e as soluções baseadas na natureza ampliem significativamente a capacidade de integração entre engenharia, hidrologia, biodiversidade e território, elas ainda não esgotam o problema teórico colocado por corredores viários implantados em paisagens degradadas ou em processo de degradação. Para que esses elementos deixem de operar como repertório técnico setorial e passem a constituir uma estratégia efetiva de recomposição funcional do corredor, é necessário reuni-los em formulação mais ampla, capaz de articular projeto, restauração ecológica, reorganização territorial e desempenho sistêmico. É precisamente esse passo adicional que será desenvolvido na subseção seguinte, dedicada à infraestrutura regenerativa e à requalificação territorial de paisagens degradadas.

2.4. Infraestrutura Regenerativa e Requalificação Territorial de Paisagens Degradadas

A noção de infraestrutura regenerativa emerge como resposta crítica à insuficiência dos paradigmas convencionais de planejamento, projeto e gestão de obras em territórios ecologicamente sensíveis. Se a infraestrutura tradicional foi historicamente concebida para maximizar eficiência funcional, conectividade logística e controle físico do espaço, a perspectiva regenerativa desloca o centro do debate para a capacidade de a intervenção reconstruir funções ecológicas, reduzir vulnerabilidades cumulativas e ampliar a resiliência do território atravessado. Não se trata, portanto, de mera sofisticação da infraestrutura sustentável em sentido genérico, tampouco de simples agregação de dispositivos ambientais a um projeto previamente definido. A regeneração supõe mudança mais profunda: a infraestrutura deixa de ser pensada apenas como suporte material de circulação e passa a ser concebida como componente ativo de recomposição territorial, capaz de restabelecer relações funcionais entre paisagem, água, biodiversidade, solo, clima e uso humano do espaço (FOLKARD-TAPP et al., 2025; COOK et al., 2024).

Essa inflexão adquire especial relevância em paisagens degradadas, nas quais a perda de integridade ecológica já não pode ser compreendida apenas como déficit ambiental pontual, mas como ruptura sistêmica de processos. Em contextos desse tipo, a simples mitigação de impactos novos não responde ao passivo acumulado nem reverte trajetórias regressivas já instaladas. A literatura recente sobre abordagens regenerativas tem insistido precisamente nesse deslocamento: mais do que sustentar níveis mínimos de funcionamento, trata-se de restaurar capacidade adaptativa,

recompor relações ecológicas e produzir novas trajetórias de vitalidade territorial (REED et al., 2021). No caso amazônico, essa leitura ganha força adicional diante da evidência de que o bioma se encontra crescentemente submetido a pressões compostas, derivadas da interação entre desmatamento, fogo, secas extremas, fragmentação e degradação florestal (FLORES et al., 2024; LAPOLA et al., 2023). Nessa moldura, a infraestrutura regenerativa assume função estratégica porque permite articular intervenção técnica e reparação funcional, tratando a obra não como evento isolado, mas como oportunidade de reorganização do metabolismo territorial.

A ideia de requalificação territorial decorre precisamente dessa ampliação de escopo. Requalificar não significa apenas melhorar o padrão físico da infraestrutura, mas redefinir o modo como ela se insere no território e participa da produção de seus efeitos. Em paisagens degradadas, a infraestrutura pode aprofundar disfunções preexistentes — intensificando erosão, concentrando escoamento, ampliando acessibilidade predatória, reforçando fragmentação e desorganizando interfaces ecológicas — ou pode ser redesenhada para atuar em sentido inverso, como dispositivo de reconexão ecológica, recomposição hidrológica e reorganização funcional do corredor. Essa segunda possibilidade exige abandonar a visão da obra como objeto autônomo e adotar abordagem relacional, na qual o desempenho da infraestrutura passa a ser avaliado por sua interação com a matriz territorial. Nessa chave, a regeneração não é atributo retórico, estético ou discursivo, mas critério de projeto, desempenho e governança: importa saber se a intervenção reduz o efeito barreira, recompõe fluxos hidrológicos, estabiliza interfaces frágeis, melhora a conectividade funcional e amplia a capacidade adaptativa do território.

Esse argumento dialoga diretamente com o avanço das soluções baseadas na natureza, mas vai além delas ao insistir que a regeneração deve ser pensada em escala de sistema. Aghimien et al. (2024) sustentam que as soluções baseadas na natureza possuem potencial para transformar o ambiente construído ao integrar adaptação climática, manejo da água, redução de riscos e provisão de serviços ecossistêmicos. No entanto, Folkard-Tapp et al. (2025) advertem que a simples proliferação do vocabulário das nature-based solutions não garante integração efetiva entre natureza e clima, nem assegura profundidade transformadora. Em outras palavras, uma infraestrutura pode incorporar soluções verdes e, ainda assim, permanecer presa a uma racionalidade mitigatória, corretiva ou compensatória. A infraestrutura regenerativa, por sua vez, exige que tais soluções sejam articuladas em lógica de recomposição territorial, de modo que água, vegetação, solo, conectividade e estabilidade física sejam tratados como dimensões constitutivas do desempenho infraestrutural, e não como camadas adicionais de “ambientalização” do projeto.

No campo da infraestrutura verde-azul, essa exigência já aparece de forma relativamente madura. Cook et al. (2024) mostram que a multifuncionalidade intencional depende de integração deliberada entre funções ecológicas, hidrológicas e territoriais, ao passo que Perrelet et al. (2024) defendem que sistemas de infraestrutura verde-azul devem ser projetados “para e com a biodiversidade”. Essas formulações têm implicações diretas para o conceito de requalificação territorial. Em paisagens degradadas, não basta inserir vegetação ou dispositivos drenantes de forma pontual; é necessário construir arranjos espaciais capazes de reconectar habitats, reduzir externalidades hidrológicas, recuperar zonas ripárias, estabilizar taludes e melhorar o desempenho ecológico do conjunto. A

regeneração, nesse aspecto, não equivale à soma de técnicas ambientalizadas, mas à produção de nova coerência funcional entre infraestrutura e paisagem, em escala de corredor.

Em rodovias implantadas em florestas tropicais, esse desafio assume complexidade ainda maior. A degradação induzida por estradas não decorre apenas do corte linear da vegetação, mas da abertura de bordas, da ruptura de drenagens, da reorganização da acessibilidade, da indução de usos secundários da terra e da multiplicação de efeitos indiretos no corredor ampliado de influência. Zhou et al. (2026) demonstram que os impactos da infraestrutura de transporte sobre florestas se distribuem espacialmente de forma ampla, comprometendo cobertura, estrutura e conectividade. Zheng et al. (2025), por sua vez, mostram que a expansão da malha rodoviária continua associada ao avanço da perda florestal tropical no século XXI. À luz dessa evidência, a requalificação territorial de rodovias amazônicas não pode restringir-se à plataforma da via; ela deve abranger interfaces ecológicas, drenagens associadas, bordas florestais, áreas ripárias e nós espaciais nos quais a infraestrutura concentra disfunções e irradia degradação.

É justamente nesse ponto que o conceito de paisagem degradada precisa ser compreendido em chave operacional. Em vez de designar apenas áreas desmatadas ou visualmente alteradas, o termo deve incluir territórios cuja funcionalidade ecológica se encontra comprometida por perturbações acumulativas, ainda que a cobertura vegetal remanescente permaneça parcialmente presente. Lapola et al. (2023) mostram que a degradação amazônica envolve processos como fogo de sub-bosque, efeitos de borda, exploração seletiva e secas extremas, capazes de reduzir

funcionalidade ecossistêmica sem necessariamente eliminar, de imediato, a cobertura florestal. Essa leitura é essencial para a infraestrutura regenerativa porque amplia o horizonte da requalificação: o objetivo deixa de ser apenas remediar passivos visíveis e passa a incluir a restauração de processos ecológicos enfraquecidos ou interrompidos. Em termos rodoviários, isso significa trabalhar com conectividade funcional, reconstituição hidrológica, modulação microclimática de borda e estabilidade ecotécnica como partes integrantes da intervenção.

A requalificação territorial também exige seletividade espacial. Nem toda porção do corredor demanda o mesmo tipo ou a mesma intensidade de intervenção; ao contrário, o desempenho regenerativo tende a depender da identificação de pontos críticos nos quais ações localizadas podem produzir ganhos sistêmicos desproporcionais. Essa lógica aproxima-se do que, neste artigo, será desenvolvido como acupuntura territorial: uma estratégia de priorização espacial voltada a áreas de travessia de fauna, rupturas de drenagem, taludes instáveis, bordas críticas e zonas ripárias degradadas. A literatura sobre infraestrutura verde-azul e conectividade sugere precisamente que o impacto positivo dessas soluções cresce quando sua localização responde a padrões ecológicos e hidrológicos da paisagem, e não a critérios uniformes, genéricos ou meramente paisagísticos (MOLNÉ et al., 2023; CROESER et al., 2024). Desse modo, a regeneração não se confunde com dispersão homogênea de dispositivos, mas com reorganização estratégica do corredor a partir de seus nós de maior vulnerabilidade e de maior potencial de recomposição funcional.

Sob essa perspectiva, a infraestrutura regenerativa aproxima-se de uma abordagem territorialmente inteligente da engenharia. Trata-se

de substituir a racionalidade linear, que busca impor estabilidade ao território por meio de simplificação física, por uma racionalidade adaptativa, que reconhece a complexidade biofísica da paisagem e procura operar em consonância com ela. Em contextos amazônicos, isso implica compreender que drenagens difusas, encostas frágeis, áreas ripárias, rotas de fauna e mosaicos de uso da terra não são obstáculos externos ao projeto, mas parte constitutiva de sua própria viabilidade ecológica e territorial. A infraestrutura torna-se, assim, meio de reorganizar relações entre mobilidade e paisagem, e não apenas instrumento de transposição física do território. Essa inflexão desloca o foco da mera estabilidade da obra para a qualidade sistêmica da relação entre a obra e o espaço que ela reestrutura.

No âmbito deste artigo, a noção de Estrada-Parque Regenerativa inscreve-se exatamente nessa tradição emergente. Seu diferencial não está em propor uma estrada cênica ou uma via marginalmente ambientalizada, mas em formular um framework capaz de tratar a rodovia como corredor socioecológico sujeito a requalificação territorial. A regeneração, nesse contexto, significa reduzir o efeito barreira, recompor conectividade, restabelecer funções hidrológicas, estabilizar interfaces geomorfológicas e reinscrever a infraestrutura em uma lógica de compatibilidade com biodiversidade, clima e qualidade territorial. Com isso, conclui-se o percurso teórico deste capítulo: da crítica ao paradigma mitigatório, passando pela ecologia de estradas e pela gramática da infraestrutura verde-azul, chega-se à formulação de uma infraestrutura rodoviária concebida como agente de recomposição funcional da paisagem. É a partir dessa base conceitual que a seção seguinte avança do plano teórico para o plano metodológico, explicitando o delineamento da pesquisa e os procedimentos de construção do framework da Estrada-Parque Regenerativa.

3. METODOLOGIA

A consistência de uma proposta de infraestrutura regenerativa aplicada a rodovias amazônicas depende não apenas da robustez do arcabouço teórico que a sustenta, mas também da clareza do percurso metodológico por meio do qual esse arcabouço é traduzido em modelo analítico, componentes operacionais e cenários de aplicação. Neste artigo, a metodologia foi concebida para responder a uma exigência dupla. De um lado, era necessário construir uma base conceitual suficientemente rigorosa para evitar que a noção de regeneração se convertesse em formulação vaga, meramente normativa ou retórica. De outro, era indispensável conferir à proposta um nível de aplicabilidade que permitisse avaliar sua pertinência diante das condições concretas de um corredor rodoviário amazônico. Por essa razão, o desenho metodológico adotado articula revisão crítica da literatura, construção de framework, aplicação territorial e análise prospectiva comparativa.

A lógica metodológica do estudo parte do reconhecimento de que o objeto investigado — a transição da rodovia convencional para uma Estrada-Parque Regenerativa — não pode ser adequadamente tratado por desenho experimental clássico nem por simples descrição empírica fragmentada. Trata-se de problema situado na interface entre ecologia de estradas, infraestrutura verde-azul, engenharia ecológica e planejamento territorial, cujo enfrentamento requer abordagem integradora, orientada não apenas à explicação do problema, mas também à formulação de alternativa infraestrutural conceitualmente coerente e tecnicamente plausível. Nessa perspectiva, a metodologia não se limita a registrar fenômenos; ela opera como procedimento de síntese, tradução e modelagem, destinado a reunir contribuições dispersas da literatura

e reorganizá-las em um sistema propositivo aplicável ao corredor analisado.

Com esse objetivo, a seção metodológica estrutura-se em cinco eixos complementares. O primeiro delimita o delineamento da pesquisa e a natureza do estudo. O segundo explicita a estratégia teórico-conceitual de construção do framework. O terceiro justifica o recorte espacial adotado, centrado no trecho da BR-364/AC entre Manoel Urbano e Feijó. O quarto descreve o procedimento de tradução do modelo em componentes operacionais de projeto. O quinto apresenta a lógica da simulação comparativa de cenários, por meio da qual se avalia, em chave prospectiva, o desempenho relativo do modelo regenerativo em comparação aos cenários tendencial e mitigatório. A articulação entre esses cinco eixos visa assegurar coerência entre problema, hipótese, objetivo, base teórica e resultados esperados do estudo.

3.1. Delineamento da Pesquisa e Natureza do Estudo

O presente artigo caracteriza-se como pesquisa qualitativa, de natureza aplicada, com delineamento teórico-conceitual e analítico-propositivo, orientada à formulação de um framework de Estrada-Parque Regenerativa para rodovias amazônicas. Seu propósito não é testar hipótese causal em ambiente controlado, nem produzir generalização estatística a partir de amostragem probabilística, mas construir, fundamentar e aplicar uma arquitetura conceitual capaz de responder a problema infraestrutural complexo, situado na interface entre engenharia viária, ecologia da paisagem, hidrologia e planejamento territorial. Nessa condição, o estudo aproxima-se da tradição de pesquisas qualitativas orientadas à interpretação, integração de referenciais e produção de modelos analíticos

aplicáveis a contextos reais, especialmente quando o fenômeno investigado envolve elevada complexidade socioecológica e múltiplas escalas de interação (CRESWELL; CRESWELL, 2018; JABAREEN, 2009).

Do ponto de vista de sua finalidade, trata-se de pesquisa aplicada porque busca produzir conhecimento com capacidade de orientar intervenção sobre problema territorial concreto, e não apenas ampliar o debate teórico em nível abstrato. A escolha do corredor da BR-364/AC entre Manoel Urbano e Feijó como referência analítica confere ao estudo um vínculo direto com condições empíricas específicas da Amazônia Sul-Occidental, permitindo que a formulação do framework seja tensionada por exigências reais de conectividade ecológica, reconfiguração hidrológica, estabilidade geomorfológica e resiliência territorial. Ao mesmo tempo, o artigo preserva ambição teórica mais ampla, na medida em que o caso analisado é mobilizado não como exemplar isolado, mas como plataforma de demonstração metodológica para formulação transferível, ainda que contextualizável, de infraestrutura regenerativa aplicada a rodovias em florestas tropicais.

Quanto ao seu delineamento, o estudo combina três dimensões metodológicas principais. A primeira é exploratória, porque investiga criticamente um campo ainda em consolidação — o da regeneração aplicada à infraestrutura rodoviária — e procura delimitar com maior precisão seus conceitos, distinções e possibilidades operacionais. A segunda é explicativa, porque busca demonstrar por que o paradigma mitigatório convencional se revela insuficiente em corredores amazônicos submetidos a fragmentação, desconexão hidrológica e degradação cumulativa. A terceira é propositiva, porque não se limita ao diagnóstico da inadequação do modelo

vigente, avançando para a construção de um framework capaz de orientar desenho, priorização espacial e reorganização funcional do corredor. Essas três dimensões não se sucedem de forma estanque; ao contrário, articulam-se de modo progressivo, de tal forma que a exploração conceitual sustenta a explicação do problema e ambas convergem para a proposição do modelo.

A natureza teórico-conceitual do estudo decorre do fato de que sua contribuição central reside na construção de um framework, e não na mensuração isolada de variáveis independentes e dependentes em sentido estrito. A literatura metodológica tem reconhecido que a elaboração de frameworks conceituais exige procedimento de síntese analítica capaz de identificar categorias centrais, estabelecer relações entre elas e organizá-las em estrutura coerente de interpretação e ação (JABAREEN, 2009). No presente artigo, esse esforço de construção conceitual incide sobre contribuições oriundas da ecologia de estradas, da infraestrutura verde-azul, das soluções baseadas na natureza, da bioengenharia, da conectividade da paisagem e do pensamento regenerativo. A opção por esse desenho metodológico justifica-se porque o problema examinado não pode ser adequadamente resolvido por um único campo disciplinar. Sua natureza é intrinsecamente transversal, exigindo operação de integração entre repertórios teóricos e técnicos tradicionalmente tratados de forma segmentada.

Além de teórico-conceitual, o estudo possui também caráter analítico-aplicado, uma vez que o framework construído não permanece em plano exclusivamente abstrato, sendo traduzido em componentes operacionais e aplicado a corredor territorial específico. Essa transição do plano conceitual para o plano aplicado é elemento metodologicamente central do artigo. O objetivo não é

apenas definir o que seria, em tese, uma infraestrutura regenerativa, mas demonstrar como essa noção pode ser operacionalizada em contexto real de rodovia amazônica. A adoção do trecho Manoel Urbano–Feijó como caso de referência confere densidade a esse movimento, pois permite verificar a aderência do modelo a condições empíricas concretas de fragilidade hidrogeomorfológica, fragmentação ecológica, pressão territorial e sensibilidade ripária.

Sob o prisma da estratégia de investigação, o estudo aproxima-se de um estudo de caso instrumental, na medida em que o corredor BR-364/AC é mobilizado não apenas por sua singularidade regional, mas por sua capacidade de iluminar a formulação de uma proposta mais ampla de requalificação rodoviária em florestas tropicais. O caso, portanto, não é o fim em si mesmo; ele funciona como meio analítico para testar a coerência interna do framework, explicitar seus princípios, examinar seus componentes e discutir seu desempenho prospectivo. Essa opção metodológica é particularmente adequada quando se pretende compreender fenômeno complexo em profundidade e, simultaneamente, utilizar o caso como base para elaboração de proposição conceitual mais geral, porém sensível ao contexto (YIN, 2018).

Também importa destacar que a pesquisa adota uma lógica de integração entre teoria e aplicação, e não uma separação rígida entre referencial teórico, método e resultado. Isso significa que o percurso metodológico do artigo foi desenhado para permitir que a teoria acumulada nas seções anteriores seja progressivamente vertida em critérios de modelagem e decisão. Assim, os fundamentos desenvolvidos no capítulo 2 não cumprem função meramente expositiva: eles constituem a base a partir da qual se selecionam os princípios estruturantes do framework, se definem os

componentes físicos e ecológicos do corredor regenerativo e se organizam os cenários prospectivos de análise. A metodologia, nesse contexto, não aparece como apêndice formal do texto, mas como dispositivo de coerência interna entre crítica do modelo convencional, construção da alternativa regenerativa e sua aplicação territorial.

Por último, o delineamento adotado assume que a validade do estudo não repousa em pretensão de universalização mecânica, mas em três critérios complementares: coerência conceitual, plausibilidade técnico-territorial e capacidade de transferência analítica. A coerência conceitual decorre da articulação rigorosa entre as categorias mobilizadas. A plausibilidade técnico-territorial decorre da aplicação do framework a corredor real, marcado por problemas concretos de conectividade, drenagem, estabilidade e pressão socioecológica. A capacidade de transferência analítica, por sua vez, decorre do fato de que o modelo proposto, embora construído a partir da BR-364/AC, organiza princípios e componentes que podem orientar adaptações futuras em outros corredores rodoviários amazônicos ou tropicais, desde que respeitadas suas especificidades biofísicas, institucionais e territoriais. É sobre essa base que as subseções seguintes explicitam a estratégia de construção do framework, o recorte espacial adotado, o procedimento de tradução em componentes operacionais e a lógica de simulação comparativa dos cenários.

3.2. Estratégia Teórico-conceitual de Construção do Framework

A construção do framework da Estrada-Parque Regenerativa foi orientada por uma estratégia teórico-conceitual integrativa, voltada a reunir, sistematizar e articular contribuições dispersas de

diferentes campos de conhecimento relevantes para a requalificação rodoviária em florestas tropicais. Em vez de partir de modelo previamente estabilizado na literatura, o estudo assumiu que o problema investigado — a transição de uma rodovia convencional, linear e mitigatória para uma infraestrutura regenerativa, multifuncional e territorialmente adaptativa — exigia operação de síntese entre repertórios analíticos tradicionalmente tratados de forma segmentada. Por essa razão, o framework não foi concebido como mera transposição de uma teoria única, mas como resultado de um procedimento de integração conceitual entre ecologia de estradas, conectividade da paisagem, infraestrutura verde-azul, soluções baseadas na natureza, bioengenharia, reconfiguração hidrológica e planejamento territorial orientado à resiliência.

Do ponto de vista metodológico, essa estratégia aproxima-se da lógica de construção de frameworks conceituais descrita por Jabareen (2009), segundo a qual o desenvolvimento de um modelo analítico exige identificar conceitos centrais, examinar suas relações, depurar sobreposições semânticas e reorganizar as categorias em estrutura coerente de interpretação e ação. No presente artigo, esse procedimento foi adaptado às exigências de um objeto territorialmente complexo e tecnicamente aplicado. Em vez de apenas classificar conceitos, buscou-se identificar quais categorias possuíam maior poder explicativo para compreender a inadequação do paradigma rodoviário convencional e, simultaneamente, maior capacidade operativa para sustentar a formulação de uma alternativa regenerativa. A elaboração do framework resultou, assim, de movimento duplo: de um lado, depuração crítica do estado da arte; de outro, tradução seletiva de categorias teóricas em princípios estruturantes e componentes de projeto.

A base desse processo foi uma revisão crítica e integrativa da literatura científica recente, com ênfase em artigos revisados por pares que tratam dos impactos da infraestrutura de transporte sobre florestas, dos efeitos de fragmentação e desconectividade ecológica, da infraestrutura verde-azul, das soluções baseadas na natureza, da bioengenharia de taludes, da restauração ripária, da adaptação climática e da multifuncionalidade infraestrutural. A revisão não teve caráter meramente descritivo nem exaustivamente inventarial; ela foi orientada por problema. Isso significa que os estudos mobilizados foram lidos a partir de pergunta central: quais categorias conceituais e operacionais são indispensáveis para reconceber uma rodovia amazônica como corredor socioecológico regenerativo? Essa orientação permitiu distinguir, no interior do vasto campo da sustentabilidade infraestrutural, os elementos efetivamente relevantes para a construção do modelo proposto, evitando tanto a acumulação indiscriminada de referências quanto a simplificação excessiva do debate.

A estratégia integrativa adotada implicou reconhecer que as categorias mobilizadas pertencem a tradições disciplinares distintas e nem sempre convergem espontaneamente entre si. A ecologia de estradas, por exemplo, oferece instrumentos robustos para compreender fragmentação, efeito barreira, mortalidade de fauna e conectividade funcional, mas nem sempre se projeta diretamente em critérios de desenho viário. A infraestrutura verde-azul e as soluções baseadas na natureza, por sua vez, fornecem repertório importante para manejo hídrico, multifuncionalidade e integração entre engenharia e ecologia, mas frequentemente aparecem ancoradas em contextos urbanos ou periurbanos. A bioengenharia e a estabilização ecotécnica trazem contribuições relevantes para o tratamento de taludes, margens e interfaces geomorfológicas,

embora nem sempre sejam discutidas em articulação explícita com conectividade da paisagem e requalificação territorial. O pensamento regenerativo, portanto, amplia o horizonte normativo do debate, mas requer mediação metodológica para não permanecer em nível excessivamente abstrato. O framework foi construído justamente para operar essa mediação, reorganizando tais campos em arquitetura analítica comum.

A integração conceitual foi conduzida em três movimentos sucessivos. O primeiro foi o de identificação de categorias nucleares, isto é, conceitos cuja recorrência e relevância explicativa na literatura indicavam centralidade para o problema estudado. Entre essas categorias, destacaram-se: conectividade ecológica, efeito barreira, multifuncionalidade intencional, infraestrutura verde-azul, soluções baseadas na natureza, reintegração hidrológica, estabilização ecotécnica, restauração ripária, resiliência territorial e priorização espacial estratégica. O segundo movimento consistiu em examinar as relações entre essas categorias, buscando compreender não apenas seus significados isolados, mas sua capacidade de formar sistema coerente. Foi nesse estágio que se tornou claro que conceitos como conectividade, hidrologia, bioengenharia e multifuncionalidade não poderiam ser tratados como blocos independentes, mas como dimensões interdependentes do desempenho regenerativo da infraestrutura. O terceiro movimento consistiu em traduzir essa matriz relacional em estrutura propositiva, organizada sob a forma de princípios estruturantes e componentes operacionais do corredor regenerativo.

Esse procedimento permitiu distinguir entre dois níveis de construção do framework. O primeiro é o nível normativo-estruturante, no qual são definidos os princípios que orientam a

racionalidade do modelo, tais como compatibilidade ecológica, multifuncionalidade intencional, conectividade como variável central de projeto, reintegração hidrológica, estabilização ecotécnica, priorização espacial estratégica e resiliência territorial. O segundo é o nível operacional-projetual, no qual tais princípios são desdobrados em componentes concretos de intervenção, como passagens de fauna, drenagem naturalizada, bioswales, restauração ripária, bioengenharia de taludes, seção viária de baixo impacto e acupuntura territorial. Essa distinção metodológica é central para o artigo, porque impede que o framework seja confundido com simples catálogo de técnicas. Antes de ser repertório de soluções, ele é uma estrutura de inteligibilidade e decisão, a partir da qual as soluções são selecionadas, articuladas e espacialmente posicionadas.

Outro aspecto importante da estratégia teórico-conceitual foi a preocupação com a sensibilidade contextual do modelo. Embora o framework aspire a certa transferibilidade analítica, ele não foi concebido como matriz universalista aplicável de forma indiferenciada a qualquer infraestrutura linear. Ao contrário, sua construção tomou como referência empírica e interpretativa as especificidades de rodovias implantadas em florestas tropicais úmidas, especialmente na Amazônia. Isso significa que categorias como drenagem naturalizada, zonas ripárias, conectividade funcional, bordas florestais, acessibilidade indutora de degradação e vulnerabilidade hidrogeomorfológica não foram incorporadas apenas por seu valor teórico abstrato, mas por sua relevância concreta em corredores amazônicos. A estratégia metodológica, portanto, combinou abstração conceitual e ancoragem territorial, de modo que o framework pudesse ser suficientemente geral para

orientar reflexão analítica e suficientemente situado para manter aderência ao caso estudado.

Essa preocupação contextual também orientou a exclusão deliberada de temas que, embora correlatos, pertencem a outro eixo analítico da pesquisa mais ampla da qual este artigo deriva. Em particular, o framework aqui desenvolvido foi construído de modo a não depender conceitualmente do ISRAM nem a avançar sobre o campo específico da governança policêntrica, do sandbox regulatório e do blended finance, reservados a manuscritos próprios. Tal delimitação foi metodologicamente importante para assegurar autonomia epistemológica deste artigo. O foco permaneceu restrito à formulação de um modelo infraestrutural regenerativo, centrado na relação entre desenho viário, funcionalidade ecológica, hidrologia, estabilidade física e requalificação territorial.

Assim, a estratégia teórico-conceitual adotada permitiu construir um framework com três atributos metodológicos centrais. O primeiro é a coerência interna, resultante da articulação consistente entre as categorias selecionadas. O segundo é a capacidade de tradução operativa, uma vez que os princípios formulados podem ser desdobrados em dispositivos e arranjos concretos de projeto. O terceiro é a plausibilidade territorial, decorrente da aderência do modelo às condições biofísicas e socioecológicas de um corredor amazônico real. É com base nesses atributos que, nas subseções seguintes, o framework será territorialmente ancorado no trecho da BR-364/AC entre Manoel Urbano e Feijó e, posteriormente, traduzido em componentes operacionais de intervenção e em cenários prospectivos comparativos.

3.3. Recorte Espacial e Justificativa Analítica do Corredor BR-364/AC

A definição do recorte espacial constitui etapa metodológica central deste estudo, uma vez que a consistência de um framework de infraestrutura regenerativa depende de sua confrontação com condições territoriais concretas, suficientemente complexas para tensionar sua coerência interna e sua capacidade de aplicação. Para esse fim, adotou-se como referência analítica o trecho da BR-364/AC entre Manoel Urbano e Feijó, na Amazônia Sul-Occidental. A escolha desse segmento não decorre de conveniência meramente descritiva nem de disponibilidade casual de informações, mas de sua capacidade de reunir, de forma particularmente expressiva, atributos considerados decisivos para a modelagem de uma Estrada-Parque Regenerativa: representatividade infraestrutural, criticidade socioecológica, complexidade hidrogeomorfológica e potencial de testabilidade aplicada.

Do ponto de vista regional, o corredor insere-se em área estratégica da rede de circulação acreana e amazônica, articulando funções logísticas, mobilidade intermunicipal e integração territorial. Essa relevância é metodologicamente importante porque impede que a proposta regenerativa seja interpretada como solução destinada a trechos marginais, cênicos ou de baixa funcionalidade econômica. Ao contrário, a escolha de um segmento de reconhecida importância viária permite testar o framework sob condições em que a infraestrutura precisa conciliar, de forma explícita, demandas de circulação e exigências de compatibilidade ecológica. A opção pelo trecho Manoel Urbano–Feijó, portanto, reforça o argumento central do artigo de que a regeneração não constitui alternativa residual ou ornamental, mas possibilidade de reconfiguração

qualificada de corredores logisticamente relevantes em floresta tropical.

A pertinência do recorte também decorre de sua criticidade socioecológica. O trecho selecionado se insere em corredor onde a rodovia não atua apenas como suporte físico de deslocamento, mas como vetor de reorganização espacial, fragmentação ecológica e ampliação de acessibilidade sobre paisagens sensíveis. Como discutido nos capítulos anteriores, os efeitos das estradas em florestas tropicais extrapolam a faixa de domínio e se distribuem por zona ampliada de influência, em interação com remanescentes florestais, drenagens, bordas, usos laterais do solo e dinâmicas de ocupação. No caso do segmento Manoel Urbano–Feijó, essa lógica se expressa de forma particularmente nítida, tornando o corredor adequado para examinar como a infraestrutura convencional intensifica disfunções ecológicas e territoriais e, ao mesmo tempo, para testar uma proposta de requalificação orientada à conectividade, à reintegração hidrológica e à estabilidade socioecológica do sistema.

Outro elemento decisivo da escolha é a complexidade biofísica e hidrogeomorfológica do trecho. Em corredores rodoviários amazônicos, a interação entre pluviosidade elevada, variação sazonal, múltiplas microdrenagens, sensibilidade de taludes, interfaces ripárias e fragilidade de solos torna a estrada particularmente dependente da qualidade do manejo da água e da adequação da geometria ao relevo. Isso significa que erros de drenagem, descargas concentradas, cortes inadequados e soluções rigidamente cinzas tendem a produzir efeitos mais severos do que em contextos menos úmidos ou menos ecologicamente integrados. O trecho analisado apresenta precisamente esse tipo de condição, o

que o torna especialmente pertinente para testar categorias centrais do framework, como drenagem naturalizada, bioengenharia de taludes, restauração ripária e reconfiguração hidrológica do corredor. Em termos metodológicos, trata-se de um caso no qual a compatibilidade entre infraestrutura e paisagem não é atributo acessório, mas condição crítica de desempenho territorial.

A escolha do corredor também se justifica por sua aptidão para leitura funcional em escala ampliada, aspecto fundamental para a abordagem adotada no artigo. O recorte não foi concebido como simples faixa geométrica adjacente à via, definida por buffer uniforme e abstrato, mas como unidade territorial cuja relevância analítica decorre da interação entre a rodovia, as drenagens, os remanescentes florestais, as áreas ripárias, os pontos de descontinuidade ecológica e as zonas de pressão antrópica lateral. Essa opção metodológica é coerente com a crítica formulada ao paradigma viário convencional, segundo o qual a estrada seria objeto linear relativamente autônomo em relação ao território. Ao contrário, o presente estudo parte da compreensão de que o corredor rodoviário deve ser interpretado como sistema socioecológico ampliado, no qual a plataforma viária, suas interfaces e sua paisagem de influência formam conjunto funcionalmente articulado.

Nessa ótica, o trecho Manoel Urbano–Feijó opera como caso instrumental para a construção do modelo. Sua importância não reside apenas no fato de ser segmento regionalmente relevante da BR-364, mas em reunir um conjunto suficientemente denso de tensões entre mobilidade, biodiversidade, hidrologia, estabilidade física e pressão territorial. O caso permite, assim, confrontar o framework com situações típicas de rodovias implantadas em

floresta tropical úmida: múltiplos cruzamentos entre estrada e drenagens, presença de zonas ripárias sensíveis, potencial de efeito barreira à fauna, vulnerabilidade de bordas, instabilidade hidrogeomorfológica e expansão de impactos para além da pista. Em termos metodológicos, trata-se de um recorte capaz de explicitar, com nitidez, tanto as limitações do paradigma rodoviário convencional quanto a pertinência de uma alternativa regenerativa organizada em torno de princípios, dispositivos e priorização espacial.

A justificativa analítica do recorte está vinculada, ainda, à sua condição de testabilidade aplicada. Um framework teórico só adquire consistência metodológica quando pode ser traduzido em componentes operacionais verificáveis em contexto concreto. O trecho selecionado oferece precisamente essa possibilidade, porque permite desdobrar os princípios do modelo em elementos territorialmente reconhecíveis, como áreas críticas de travessia de fauna, pontos de ruptura de drenagem, setores vulneráveis a erosão e instabilidade, interfaces ripárias degradadas e segmentos nos quais a rodovia concentra ou irradia processos de degradação lateral. Isso torna o corredor particularmente adequado para a etapa seguinte do estudo, que consiste em traduzir o framework em componentes operacionais de projeto, espacialmente orientados e funcionalmente articulados.

Além disso, a escolha do corredor responde a uma exigência metodológica de transferibilidade analítica. Embora o estudo não pretenda generalizar mecanicamente seus resultados para toda a Amazônia, o trecho Manoel Urbano–Feijó apresenta condições suficientemente representativas de um tipo mais amplo de problema infraestrutural tropical: rodovias implantadas em

paisagens ecologicamente sensíveis, submetidas a múltiplas pressões, nas quais a lógica convencional da obra linear se mostra insuficiente para lidar com conectividade, hidrologia, estabilidade e resiliência territorial. Assim, o caso oferece base empírica robusta para formulação de princípios e componentes que podem, com as devidas adaptações contextuais, orientar análises futuras em outros corredores amazônicos ou tropicais.

Portanto, a seleção do trecho BR-364/AC entre Manoel Urbano e Feijó atende a quatro critérios metodológicos fundamentais. Primeiro, relevância funcional, por se tratar de corredor logisticamente importante. Segundo, criticidade socioecológica, dada a presença de pressões acumulativas e vulnerabilidades territoriais. Terceiro, complexidade biofísica, que tensiona diretamente as categorias centrais do framework. Quarto, aptidão para testabilidade e transferência analítica, pois o caso permite confrontar a proposta com condições reais e, ao mesmo tempo, extrair elementos metodologicamente úteis para outros contextos. É a partir dessa base que a subseção seguinte explicita como o framework foi traduzido em componentes operacionais de projeto e intervenção territorial.

3.4. Procedimento de Tradução do Framework em Componentes Operacionais

A etapa de tradução do framework em componentes operacionais corresponde ao momento em que a arquitetura teórico-conceitual construída nas seções anteriores é convertida em estrutura aplicável de intervenção territorial. Metodologicamente, essa passagem é central para o estudo, porque é ela que confere densidade prática à proposta de Estrada-Parque Regenerativa. Sem esse movimento de

conversão, o framework permaneceria em nível predominantemente normativo; com ele, torna-se possível organizar o modelo em elementos de projeto, dispositivos de requalificação e critérios de priorização espacial compatíveis com as condições de um corredor rodoviário amazônico. O procedimento adotado, portanto, não consistiu em justapor soluções conhecidas sob novo vocabulário, mas em estabelecer uma correspondência sistemática entre princípios estruturantes, funções socioecológicas do corredor e componentes técnicos capazes de materializá-las.

Esse procedimento foi conduzido a partir de uma lógica de tradução funcional, e não de mera analogia formal. Isso significa que cada princípio do framework foi interrogado a partir da seguinte questão metodológica: que tipo de componente infraestrutural, ecológico ou territorial é capaz de operacionalizar, em termos concretos, a função regenerativa por ele enunciada? Assim, o princípio da compatibilidade ecológica foi traduzido em componentes voltados à redução do efeito barreira e à recomposição de fluxos ecológicos; o princípio da reintegração hidrológica do corredor foi convertido em soluções de drenagem naturalizada, retenção, infiltração e reconexão de fluxos; o princípio da estabilização ecotécnica foi desdobrado em arranjos de bioengenharia de taludes, restauração ripária e dissipação hidráulica de menor impacto; o princípio da multifuncionalidade intencional orientou a seleção de elementos capazes de exercer simultaneamente funções hidrológicas, ecológicas e geomorfológicas; e o princípio da priorização espacial estratégica conduziu à formulação de uma lógica de acupuntura territorial, voltada à identificação de nós críticos de intervenção. O framework, nesse aspecto, foi construído como matriz de correspondências entre problema, função e componente.

A tradução operacional também exigiu distinguir entre níveis diferentes de materialização do modelo. Nem todos os elementos do framework possuem a mesma natureza metodológica. Alguns operam como componentes físicos diretamente observáveis ou projetáveis, como passagens de fauna, bioswales, faixas ripárias restauradas, taludes estabilizados por bioengenharia e seções viárias de menor impacto. Outros atuam como componentes espaciais ou estratégicos, menos vinculados a um artefato construtivo específico e mais relacionados ao modo como a intervenção é distribuída no corredor, como é o caso da acupuntura territorial e da priorização de trechos críticos. Houve, portanto, uma distinção metodológica entre componentes infraestruturais, componentes ecotécnicos e componentes territoriais de priorização. Essa distinção foi importante para evitar que o framework fosse reduzido a catálogo de obras físicas, quando, na realidade, ele articula dispositivos, arranjos espaciais e critérios de decisão.

Outro aspecto central do procedimento foi a adoção de uma lógica de interdependência entre componentes, e não de modularidade isolada. No modelo proposto, nenhum componente foi definido como solução autônoma ou universalmente suficiente. Ao contrário, a tradução do framework partiu da premissa de que o desempenho regenerativo do corredor decorre justamente da articulação entre elementos distintos. Passagens de fauna, por exemplo, só são plenamente coerentes com o modelo quando posicionadas em consonância com conectividade da paisagem, cercamentos direcionadores, vegetação-guia e, em muitos casos, estruturas hidráulicas associadas. De modo semelhante, bioswales, microestruturas de retenção e drenagem naturalizada adquirem maior eficácia quando integrados à restauração ripária, à estabilidade de taludes e à redução do efeito de borda. A seção viária

de baixo impacto, por sua vez, não foi tratada como simples redução geométrica da estrada, mas como matriz espacial que possibilita acomodar, sem contradição funcional, os demais componentes do modelo. Em termos metodológicos, isso significa que o framework foi traduzido como sistema integrado de componentes mutuamente condicionantes.

A construção dos componentes operacionais também foi orientada por uma lógica de aderência territorial. A tradução entre princípio e componente não ocorreu em abstrato, mas a partir da pergunta sobre quais dispositivos e arranjos seriam plausíveis em um corredor rodoviário amazônico de floresta tropical úmida, sujeito a elevada pluviosidade, múltiplas microdrenagens, sensibilidade geomorfológica, presença de zonas ripárias estratégicas e fragmentação ecológica cumulativa. Essa preocupação impediu tanto a simples importação de soluções derivadas de contextos urbanos ou temperados quanto a formulação de repertório excessivamente genérico. O procedimento metodológico buscou, assim, selecionar componentes dotados de plausibilidade biogeográfica, coerência hidrológica e compatibilidade com a lógica de paisagem do corredor estudado. A tradução operacional do framework foi, portanto, simultaneamente conceitual e situada.

Além disso, o procedimento adotado envolveu uma organização hierárquica dos componentes segundo sua função predominante no sistema. Em termos analíticos, os componentes foram agrupados em cinco grandes núcleos operacionais. O primeiro corresponde à conectividade ecológica, reunindo dispositivos voltados à travessia da fauna e à redução do efeito barreira. O segundo refere-se à reconfiguração hidrológica, abrangendo drenagem naturalizada, bioswales, retenção distribuída e reconexão de fluxos de água. O

terceiro envolve a estabilização ecotécnica, incorporando bioengenharia de taludes, revegetação funcional, proteção de margens e restauração ripária. O quarto diz respeito à modulação da seção viária e da interface estrada-paisagem, por meio de soluções de baixo impacto e controle do footprint infraestrutural. O quinto corresponde à priorização espacial estratégica, pela qual o corredor é reorganizado segundo a identificação de pontos críticos e áreas de maior alavancagem regenerativa. Essa estrutura hierárquica foi metodologicamente importante porque permitiu ordenar o framework sem perder sua natureza sistêmica.

A tradução em componentes operacionais também foi orientada por critério de multifuncionalidade verificável. Um componente só foi incorporado ao framework quando demonstrou capacidade de responder, ao menos potencialmente, a mais de uma exigência do corredor. Isso permitiu excluir soluções excessivamente setoriais ou de baixa densidade funcional e privilegiar elementos capazes de produzir efeitos simultâneos sobre água, solo, vegetação, conectividade e estabilidade territorial. Esse filtro metodológico é coerente com a própria lógica do artigo: o objetivo não é propor uma estrada “com mais dispositivos”, mas uma infraestrutura cujo desempenho resulte da integração deliberada entre funções tradicionalmente separadas. Em razão disso, a tradução do framework operou por seleção de componentes de alto valor sinérgico, e não por acumulação quantitativa de técnicas ambientalizadas.

Em arremate, a conversão do framework em componentes operacionais foi concebida para permitir, na etapa seguinte do estudo, sua aplicação territorial ao trecho Manoel Urbano–Feijó e sua leitura comparativa em cenários prospectivos. Isso significa que os

componentes não foram definidos apenas por sua coerência conceitual, mas também por sua capacidade de serem especializados, articulados e avaliados em termos de contribuição ao desempenho socioecológico do corredor. A tradução metodológica foi deliberadamente orientada para a operacionalização futura do modelo em contexto concreto. O resultado desse processo é uma arquitetura de intervenção composta por elementos técnicos, ecológicos e territoriais passíveis de integração em um corredor regenerativo, cuja descrição detalhada será desenvolvida na seção de resultados e discussão.

À luz desse encadeamento, o procedimento de tradução do framework em componentes operacionais pode ser sintetizado como um processo de quatro etapas articuladas: identificação de princípios estruturantes, conversão funcional desses princípios em categorias de intervenção, organização hierárquica dos componentes segundo núcleos operacionais e preparação de sua aplicação territorial em corredor amazônico real. Essa sequência assegura que o framework proposto não permaneça em nível abstrato nem se converta em repertório desordenado de soluções, mas assuma a forma de uma arquitetura metodologicamente coerente de requalificação rodoviária. É sobre essa base que a subseção seguinte apresenta a estratégia de simulação comparativa de cenários, por meio da qual se busca avaliar, em chave prospectiva, o desempenho relativo do modelo regenerativo em comparação às configurações tendencial e mitigatória.

3.5. Estratégia de Simulação Comparativa de Cenários

A etapa final do desenho metodológico consistiu na definição de uma estratégia de simulação comparativa de cenários, concebida

para avaliar, em chave prospectiva, o desempenho relativo de diferentes racionalidades de intervenção sobre o corredor rodoviário analisado. A opção por esse procedimento decorre da própria natureza do problema investigado. Como o objetivo do artigo não é apenas descrever o quadro de inadequação da rodovia convencional, mas demonstrar a plausibilidade e a superioridade relativa de um modelo regenerativo, tornou-se necessário construir uma base comparativa que permitisse examinar, de forma sistemática, como distintas configurações infraestruturais tendem a repercutir sobre conectividade ecológica, funcionalidade hidrológica, estabilidade físico-territorial e qualidade socioambiental do corredor ao longo do tempo.

A simulação foi estruturada como exercício qualitativo, analítico e prospectivo, e não como modelagem determinística de previsão numérica exata. Isso significa que sua função metodológica não é antecipar quantitativamente o comportamento futuro do corredor com pretensão de precisão paramétrica, mas organizar, com base em evidência teórica e plausibilidade territorial, uma comparação racional entre alternativas de intervenção. Em estudos voltados à formulação de frameworks e à avaliação de estratégias territoriais complexas, esse tipo de simulação comparativa possui papel relevante porque permite explicitar consequências prováveis de diferentes arranjos projetuais mesmo quando não se dispõe, no escopo do artigo, de modelagem matemática completa de todas as variáveis envolvidas. A validade do procedimento repousa, portanto, na coerência entre os cenários definidos, os critérios analíticos mobilizados e a base conceitual que sustenta sua interpretação.

Foram definidos três cenários contrastivos. O primeiro é o cenário tendencial, que representa a permanência do paradigma rodoviário

convencional, com manutenção da lógica predominantemente linear, corretiva e setorial de intervenção. Nesse cenário, a infraestrutura permanece orientada prioritariamente por critérios operacionais clássicos, sem reorganização substancial de sua relação com a conectividade ecológica, a hidrologia do corredor e a requalificação territorial das interfaces degradadas. O segundo é o cenário mitigatório, no qual se admitem avanços incrementais por meio da incorporação de medidas ambientais pontuais, porém ainda subordinadas à racionalidade convencional do projeto. Nesse caso, dispositivos de mitigação são inseridos para reduzir impactos específicos, mas sem alteração estrutural da lógica infraestrutural dominante. O terceiro é o cenário regenerativo, no qual os princípios estruturantes do framework proposto são articulados em arquitetura integrada de intervenção, voltada à recomposição funcional da paisagem, à redução do efeito barreira, à reintegração hidrológica, à estabilização ecotécnica e à priorização territorial de pontos críticos.

A comparação entre esses cenários foi organizada a partir de um conjunto de dimensões analíticas de desempenho, selecionadas por sua capacidade de sintetizar os núcleos centrais do problema investigado. A primeira dimensão é a conectividade ecológica, compreendida como capacidade do corredor de manter ou recompor fluxos de fauna, continuidade funcional da paisagem e redução do efeito barreira. A segunda é a funcionalidade hidrológica, entendida como aptidão da infraestrutura para operar em maior consonância com as dinâmicas de drenagem, infiltração, retenção e dissipação de energia da paisagem tropical úmida. A terceira corresponde à estabilidade hidrogeomorfológica e ecotécnica, relacionada à redução de erosão, controle de sedimentos, proteção de taludes, estabilidade de interfaces e menor propagação de instabilidades físicas. A quarta é a qualidade socioecológica do

corredor, na qual se articulam aspectos de resiliência territorial, redução de passivos, compatibilidade com zonas ripárias, menor intensificação de bordas degradadas e maior integração entre infraestrutura e paisagem. A quinta dimensão refere-se ao horizonte de retorno socioambiental do investimento, entendido como a capacidade de cada cenário produzir ganhos cumulativos de longo prazo, em vez de apenas respostas imediatas e defensivas à degradação instalada.

A seleção dessas dimensões não foi arbitrária. Ela decorre diretamente da estrutura conceitual desenvolvida no artigo e da forma como os problemas do corredor foram identificados ao longo das seções teóricas e metodológicas. Em outras palavras, a simulação não compara cenários segundo critérios externos ao framework; ao contrário, ela utiliza como base de comparação exatamente as variáveis que, no argumento do artigo, definem a legitimidade ecológica e territorial de uma infraestrutura rodoviária em floresta tropical. Isso assegura coerência interna ao procedimento, pois a mesma matriz analítica que orienta a construção do modelo orienta também a avaliação prospectiva de seu desempenho relativo.

Do ponto de vista operacional, a simulação comparativa foi concebida como matriz interpretativa de contrastes, na qual cada cenário é analisado segundo sua tendência de intensificar, reduzir ou reverter trajetórias de degradação em cada uma das dimensões selecionadas. A lógica empregada não é binária, mas relacional. O interesse do estudo não está em afirmar que determinado cenário elimina integralmente todos os problemas do corredor, mas em verificar qual deles apresenta maior capacidade de reorganizar o sistema em direção à compatibilidade ecológica e à resiliência

territorial. Essa abordagem é especialmente adequada para problemas socioecológicos complexos, nos quais os efeitos das intervenções não se distribuem de forma linear nem podem ser capturados por um único indicador sintético no escopo do artigo.

A construção dos cenários também observou um critério de plausibilidade infraestrutural e territorial. Isso significa que os três cenários foram delineados não como abstrações extremas e descoladas da realidade, mas como configurações verossímeis à luz do histórico da rodovia amazônica e das possibilidades reais de intervenção sobre o corredor. O cenário tendencial corresponde à continuidade da racionalidade hegemônica já observada em diversos trechos rodoviários amazônicos. O cenário mitigatório representa situação igualmente plausível, na qual medidas ambientais são incorporadas sem reconfiguração sistêmica da infraestrutura. Já o cenário regenerativo, embora mais exigente em termos de integração conceitual e projetual, foi construído de modo a permanecer tecnicamente plausível, a partir da articulação dos componentes operacionais definidos no framework. Essa preocupação é metodologicamente importante porque impede que a comparação se transforme em contraposição artificial entre um cenário realista e outro idealizado de forma irrealizável.

Outro aspecto central da estratégia adotada é sua temporalidade prospectiva. A comparação não se limita ao desempenho imediato de cada cenário após a implantação de medidas, mas procura considerar suas tendências de comportamento ao longo do tempo. Essa escolha decorre do reconhecimento de que, em corredores amazônicos, muitos efeitos da infraestrutura não se manifestam apenas no momento da obra, mas se acumulam progressivamente por meio da propagação de bordas, concentração de fluxos erosivos,

desconexão ecológica, ampliação de acessibilidade e degradação funcional da paisagem. Pelo mesmo motivo, os benefícios de uma abordagem regenerativa também não se esgotam no curto prazo: eles tendem a se tornar mais visíveis à medida que a conectividade é recomposta, as interfaces se estabilizam, a vegetação funcional se estabelece e os processos hidrológicos passam a operar em regime mais compatível com o território. A simulação, portanto, foi desenhada para captar não apenas estados comparativos, mas trajetórias diferenciais de desempenho.

Essa perspectiva temporal é particularmente relevante para a interpretação do retorno socioambiental do investimento, uma vez que o modelo regenerativo pode demandar, em certos componentes, maior complexidade inicial de planejamento e implantação, mas tende a produzir benefícios acumulativos de médio e longo prazo em redução de passivos, maior estabilidade, melhor integração ecológica e menor recorrência de soluções corretivas defensivas. Em contraste, o cenário convencional pode apresentar aparente simplicidade operacional inicial, mas tende a reproduzir custos ecológicos e territoriais cumulativos, frequentemente transferidos para fases posteriores de manutenção, correção e contenção de danos. Já o cenário mitigatório situa-se em posição intermediária, apresentando ganhos incrementais localizados, porém com limitações estruturais para alterar a trajetória geral do corredor. A simulação comparativa foi concebida precisamente para evidenciar essas diferenças de comportamento ao longo do horizonte prospectivo.

Por fim, importa destacar que a estratégia de simulação comparativa não substitui avaliações futuras mais aprofundadas, quantitativas ou multimetodológicas. Sua função, no escopo deste

artigo, é outra: oferecer um instrumento metodológico de demonstração argumentativa e consistência analítica, capaz de confrontar o framework proposto com alternativas infraestruturais concorrentes e explicitar por que a lógica regenerativa apresenta maior potência de requalificação territorial em corredores amazônicos. Em termos metodológicos, trata-se de etapa de fechamento do desenho da pesquisa, pois ela conecta o percurso inteiro do estudo — da crítica ao paradigma convencional, passando pela construção do framework e sua tradução operacional, até a avaliação prospectiva de seu desempenho relativo.

Desse modo, a simulação comparativa de cenários constitui o elo metodológico entre formulação e demonstração. Ela não apenas organiza a leitura dos resultados, mas também explicita o critério pelo qual o modelo regenerativo será confrontado com as racionalidades tendencial e mitigatória. É com base nessa estratégia que a seção seguinte passa a apresentar os resultados e a discussão, começando pela exposição do framework da Estrada-Parque Regenerativa e de seus componentes estruturantes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo devem ser compreendidos à luz de sua natureza metodológica e de seu objetivo científico. Não se trata, aqui, de mensurações isoladas ou de verificação experimental de uma hipótese em ambiente controlado, mas da construção, aplicação e avaliação analítica de um modelo infraestrutural regenerativo voltado a corredores rodoviários amazônicos. Nessa perspectiva, os resultados correspondem, simultaneamente, à formulação do framework da Estrada-Parque Regenerativa, à sua tradução em componentes operacionais de projeto, à sua leitura

aplicada ao trecho da BR-364/AC entre Manoel Urbano e Feijó e à comparação prospectiva de seu desempenho relativo em face dos cenários tendencial e mitigatório. Em razão disso, a discussão não aparece em seção apartada e posterior, mas se integra à apresentação dos achados, uma vez que o próprio valor científico da proposta depende de interpretação articulada entre conceito, território e desempenho esperado.

Essa opção é coerente com a natureza do problema investigado. Em temas que envolvem ecologia de estradas, infraestrutura verde-azul, engenharia ecológica e requalificação territorial, os resultados mais relevantes frequentemente não assumem a forma de um dado singular ou de uma relação causal simples, mas de uma arquitetura analítica capaz de reorganizar o entendimento do objeto e orientar novas práticas de projeto e gestão. É precisamente esse o caso do presente artigo. O principal resultado obtido foi a formulação de um framework que reconcebe a rodovia amazônica não como ativo linear autônomo, cujo desempenho se mede apenas por fluidez, durabilidade e segurança operacional, mas como corredor socioecológico multifuncional, cujo valor depende da integração entre mobilidade, conectividade ecológica, funcionalidade hidrológica, estabilidade ecotécnica e resiliência territorial. Esse resultado possui natureza simultaneamente teórica e aplicada: teórica, porque reorganiza categorias dispersas em estrutura coerente; aplicada, porque essa estrutura é passível de tradução em componentes concretos de intervenção sobre um corredor real.

Os resultados apresentados nesta seção decorrem diretamente do percurso metodológico antes descrito. A revisão crítica e integrativa da literatura permitiu identificar categorias centrais e relações de interdependência entre elas; a construção teórico-conceitual do

framework converteu tais categorias em princípios estruturantes; o recorte do corredor Manoel Urbano–Feijó forneceu base territorial para a ancoragem aplicada do modelo; o procedimento de tradução funcional permitiu transformar princípios em componentes operacionais; e a simulação comparativa de cenários criou as condições analíticas para avaliar a superioridade relativa da racionalidade regenerativa. A seção 4, portanto, deve ser lida como o momento em que esse conjunto de operações se torna visível em forma de proposição infraestrutural, aplicação espacial e interpretação crítica de desempenho.

Para fins expositivos e analíticos, os resultados foram organizados em quatro blocos complementares. O primeiro apresenta o framework da Estrada-Parque Regenerativa e seus componentes estruturantes. O segundo traduz esse framework ao corredor BR-364/AC entre Manoel Urbano e Feijó, discutindo sua aderência territorial e funcional. O terceiro desenvolve a simulação de cenários e o desempenho prospectivo do modelo. O quarto reúne a discussão integrada de suas contribuições teóricas, potencial de replicabilidade e implicações para planejamento territorial, clima e conservação da biodiversidade. Essa organização não representa mera escolha formal; ela responde à própria lógica interna do artigo, segundo a qual a consistência do modelo depende de sua capacidade de articular, em sequência coerente, formulação conceitual, aplicação territorial e demonstração comparativa.

4.1. Framework da Estrada-parque Regenerativa

O primeiro resultado substantivo do estudo consiste na formulação do framework da Estrada-Parque Regenerativa como arquitetura integrada de requalificação de rodovias amazônicas. Tal framework

foi concebido para responder a um problema central identificado ao longo das seções anteriores: a inadequação estrutural do paradigma rodoviário convencional em contextos de floresta tropical úmida, nos quais a infraestrutura linear tende a produzir fragmentação ecológica, desconexão hidrológica, instabilidade geomorfológica e amplificação de pressões territoriais cumulativas (ZHOU et al., 2026; FLORES et al., 2024; LAPOLA et al., 2023). O modelo proposto não pretende apenas corrigir impactos isolados, mas reorganizar a lógica de projeto e desempenho da infraestrutura de modo a torná-la compatível com processos ecológicos, hídricos e territoriais essenciais à funcionalidade da paisagem.

Em termos analíticos, o framework pode ser compreendido como uma estrutura de mediação entre crítica e projeto. Ele emerge do diagnóstico segundo o qual a mitigação convencional, embora importante, revela-se insuficiente quando permanece subordinada a uma racionalidade linear, setorial e defensiva, incapaz de recompor funções degradadas ou de impedir a propagação territorial dos efeitos da rodovia. O passo dado pelo presente artigo consiste em converter essa crítica em proposição sistemática. Em vez de tratar conectividade, drenagem, bioengenharia, restauração ripária e modulação da seção viária como soluções dispersas, o framework as reúne em uma matriz integrada de intervenção, orientada por princípios estruturantes e organizada em componentes mutuamente condicionantes. Seu diferencial, portanto, não reside na novidade absoluta de cada técnica individualmente considerada, mas na forma como elas são rearticuladas sob uma racionalidade regenerativa, territorialmente situada e orientada à recomposição funcional do corredor.

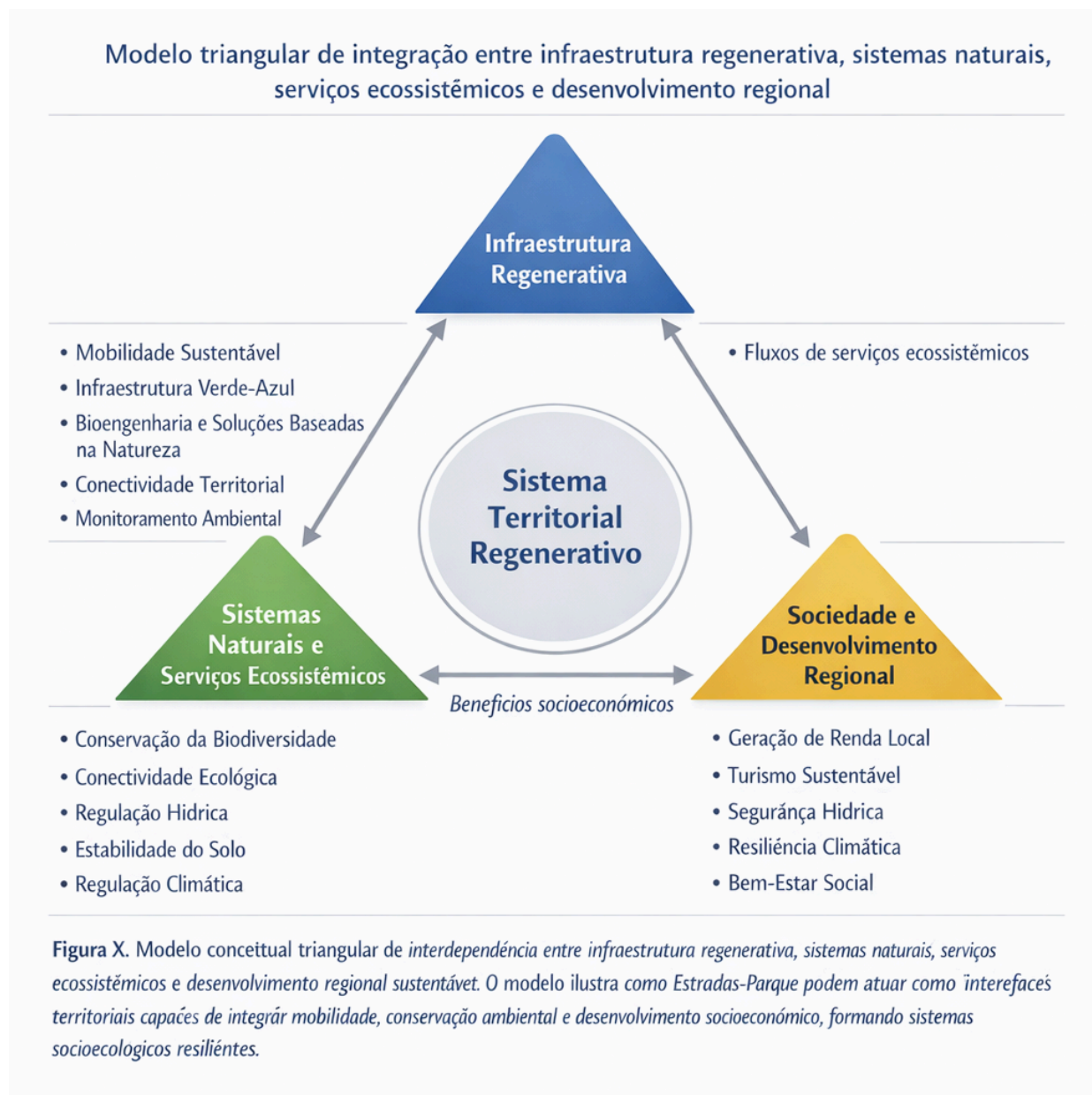
Sob esse prisma, o framework proposto afasta-se de três reducionismos frequentes. O primeiro é o tecnicismo corretivo, que trata a dimensão ecológica da estrada como conjunto de adições periféricas à engenharia dominante. O segundo é o ambientalismo genérico, que multiplica vocabulários de sustentabilidade sem convertê-los em critérios robustos de projeto, espacialização e desempenho. O terceiro é a idealização paisagística, que confunde regeneração com embelezamento verde ou com simples naturalização estética da infraestrutura. A Estrada-Parque Regenerativa, tal como formulada neste estudo, não se limita a “verdejar” a rodovia, tampouco a reduzir pontualmente seus danos: ela procura reposicioná-la como infraestrutura territorial capaz de diminuir o efeito barreira, restabelecer fluxos hidrológicos, estabilizar interfaces sensíveis, reforçar a conectividade funcional da paisagem e ampliar a resiliência do corredor em contexto amazônico.

Do ponto de vista formal, o framework organiza-se em dois níveis intimamente articulados. O primeiro é o nível normativo-estruturante, composto pelos princípios que definem a racionalidade do modelo e estabelecem quais funções devem ser priorizadas. O segundo é o nível operacional-projetual, no qual esses princípios se desdobram em componentes concretos de intervenção sobre o corredor. A força do modelo reside precisamente na relação entre esses dois planos. Se os princípios permanecessem sem tradução material, o framework correria o risco de permanecer abstrato; se os componentes aparecessem sem base normativa e relacional, o resultado seria apenas um catálogo fragmentado de soluções. A Estrada-Parque Regenerativa busca superar essa dicotomia ao construir uma ponte metodologicamente explícita entre fundamento conceitual e capacidade operativa.

É nessa perspectiva que o framework pode ser interpretado como um modelo conceitual de sistema territorial regenerativo, no qual infraestrutura, sistemas naturais e desenvolvimento regional deixam de operar como esferas separadas e passam a ser compreendidos como dimensões de um mesmo arranjo funcional. A rodovia não aparece mais como eixo técnico indiferente ao território, mas como interface ativa entre mobilidade e paisagem, cuja legitimidade depende de seu desempenho ecológico, hidrológico e socioespacial. A síntese desse entendimento encontra expressão esquemática na Figura 3, que representa o sistema territorial regenerativo como resultado da interação entre infraestrutura regenerativa, sistemas naturais e serviços ecossistêmicos, e sociedade e desenvolvimento regional. A figura não substitui a argumentação do texto, mas a condensa visualmente em termos de inteligibilidade sistêmica.

A apresentação do framework, contudo, exige mais do que sua definição geral. É necessário explicitar quais princípios lhe conferem coerência interna e quais componentes lhe dão materialidade infraestrutural. Por essa razão, as subseções seguintes detalham, em sequência, os elementos constitutivos do modelo: princípios estruturantes, conectividade ecológica e dispositivos de passagem de fauna, drenagem naturalizada e reconfiguração hidrológica, bioengenharia de taludes e restauração ripária, seção viária de baixo impacto e acupuntura territorial. A exposição progressiva desses elementos permitirá demonstrar que o framework da Estrada-Parque Regenerativa não é simples formulação aspiracional, mas arquitetura de requalificação territorial dotada de consistência teórica, coerência técnica e aplicabilidade contextual em corredores rodoviários amazônicos.

Figura 3. Modelo conceitual do sistema territorial regenerativo: interação entre infraestrutura regenerativa, sistemas naturais e desenvolvimento regional no contexto da Estrada-Parque Regenerativa.



Fonte: Elaboração própria (2026).

4.1.1. Princípios Estruturantes do Modelo Regenerativo

A formulação da Estrada-Parque Regenerativa baseia-se em um conjunto de princípios estruturantes que orientam a reorganização da infraestrutura rodoviária como sistema socioecológico multifuncional. Esses princípios constituem a espinha dorsal

conceitual do framework e definem a racionalidade que orienta a tradução do modelo em componentes operacionais de intervenção territorial. Diferentemente de diretrizes meramente normativas ou de recomendações genéricas de sustentabilidade, tais princípios operam como critérios estruturais de projeto, capazes de reorganizar a relação entre mobilidade, paisagem, hidrologia, biodiversidade e desenvolvimento territorial em corredores implantados em florestas tropicais.

O primeiro princípio corresponde à compatibilidade ecológica da infraestrutura. Rodovias convencionais foram historicamente concebidas como elementos lineares relativamente autônomos em relação ao território atravessado, priorizando eficiência logística e estabilidade física da plataforma viária. Em ambientes tropicais altamente conectados, contudo, essa lógica tende a produzir fragmentação de habitats, ruptura de fluxos ecológicos e amplificação de processos de degradação nas zonas de borda (FORMAN; ALEXANDER, 1998; ZHOU et al., 2026). O princípio da compatibilidade ecológica propõe inverter essa racionalidade ao reconhecer que a infraestrutura deve ser projetada em consonância com a dinâmica da paisagem, de modo a reduzir o efeito barreira, permitir a circulação da fauna e preservar a continuidade funcional dos ecossistemas. Sob essa perspectiva, a rodovia deixa de operar como elemento de separação e passa a ser concebida como interface permeável entre mobilidade e biodiversidade.

O segundo princípio é o da multifuncionalidade intencional da infraestrutura. Em contraste com o paradigma setorial clássico — no qual cada componente da rodovia desempenha função única e isolada —, a abordagem regenerativa busca articular múltiplas funções em um mesmo arranjo infraestrutural. Elementos como

sistemas de drenagem naturalizada, revegetação funcional e estabilização ecotécnica de taludes podem simultaneamente reduzir escoamento superficial, melhorar qualidade da água, aumentar conectividade ecológica e fortalecer estabilidade geomorfológica do corredor (COOK et al., 2024; PERRELET et al., 2024). A multifuncionalidade, nesse contexto, não constitui resultado casual da presença de elementos verdes, mas produto de desenho deliberado que integra funções hidrológicas, ecológicas e territoriais em uma mesma solução.

O terceiro princípio refere-se à reintegração hidrológica do corredor viário. Estradas implantadas em ambientes tropicais frequentemente alteram padrões naturais de drenagem ao concentrar fluxos de água, interromper microdrenagens e acelerar processos erosivos. Essa ruptura hidrológica tende a desencadear instabilidades físicas persistentes e degradação progressiva da paisagem adjacente. A Estrada-Parque Regenerativa propõe tratar a água não como elemento a ser rapidamente evacuado da plataforma viária, mas como componente estrutural do sistema territorial. Isso implica adotar estratégias de drenagem naturalizada, retenção distribuída e infiltração gradual, capazes de restabelecer maior compatibilidade entre a infraestrutura e os ciclos hidrológicos locais (LU et al., 2024; ZHOU et al., 2024).

O quarto princípio corresponde à estabilização ecotécnica das interfaces estrada-paisagem. Taludes, cortes e aterros constituem zonas particularmente sensíveis em rodovias amazônicas, onde a combinação de solos frágeis, elevada pluviosidade e remoção da cobertura vegetal favorece processos erosivos e instabilidades geomorfológicas. Em vez de recorrer exclusivamente a soluções rígidas de engenharia cinza, o modelo regenerativo propõe a adoção

de técnicas de bioengenharia e revegetação funcional capazes de estabilizar essas interfaces por meio da interação entre processos biológicos e mecânicos. A literatura recente demonstra que soluções baseadas em vegetação estrutural podem aumentar resistência do solo, dissipar energia hidráulica e promover maior estabilidade de longo prazo em encostas e margens (AGHIMIEN et al., 2024).

O quinto princípio diz respeito à priorização espacial estratégica das intervenções, conceito que neste artigo é desenvolvido sob a noção de acupuntura territorial. Em corredores extensos e heterogêneos, a regeneração não depende da aplicação uniforme de soluções ao longo de toda a rodovia, mas da identificação de pontos críticos nos quais intervenções localizadas podem produzir efeitos sistêmicos mais amplos. Tais pontos incluem travessias naturais de fauna, zonas ripárias degradadas, rupturas de drenagem e segmentos particularmente vulneráveis à erosão ou à fragmentação ecológica. Estudos recentes sobre infraestrutura verde e conectividade indicam que intervenções estrategicamente localizadas podem gerar ganhos desproporcionais de funcionalidade ecológica e hidrológica em escala de paisagem (MOLNÉ et al., 2023; CROESER et al., 2024).

Por último, o modelo incorpora o princípio da resiliência territorial e regeneração socioecológica, que amplia o escopo da infraestrutura para além da mitigação de impactos imediatos. Em vez de limitar-se a reduzir danos, a Estrada-Parque Regenerativa busca contribuir para a recomposição funcional da paisagem e para a ampliação da capacidade adaptativa do território frente a pressões ambientais cumulativas. Essa perspectiva é particularmente relevante na Amazônia contemporânea, onde interações entre desmatamento, fogo, fragmentação e eventos climáticos extremos vêm produzindo vulnerabilidades crescentes no sistema florestal (FLORES et al., 2024;

LAPOLA et al., 2023). A infraestrutura regenerativa, nesse contexto, passa a ser concebida como instrumento de reorganização territorial capaz de contribuir para a estabilidade ecológica, climática e socioeconômica do corredor.

Em conjunto, esses princípios estruturantes definem a lógica que sustenta o framework da Estrada-Parque Regenerativa. Eles funcionam como matriz orientadora da tradução do modelo em componentes operacionais, garantindo que cada dispositivo de intervenção — seja ele hidrológico, ecológico ou geomorfológico — permaneça alinhado a uma racionalidade sistêmica de requalificação territorial. A subseção seguinte aprofunda esse desdobramento ao examinar um dos elementos mais críticos do modelo regenerativo: a conectividade ecológica e os dispositivos de passagem de fauna, cuja função central é reduzir o efeito barreira das rodovias e restabelecer fluxos ecológicos essenciais ao funcionamento da paisagem amazônica.

4.1.2. Conectividade Ecológica e Dispositivos de Passagem de Fauna

A conectividade ecológica constitui um dos pilares centrais da proposta de Estrada-Parque Regenerativa, especialmente em contextos de florestas tropicais onde a integridade da paisagem depende da manutenção de fluxos biológicos entre diferentes fragmentos de habitat. Rodovias implantadas em ambientes florestais tendem a produzir efeito barreira, fragmentando habitats e interferindo nos padrões naturais de deslocamento da fauna. Esse fenômeno pode resultar em redução da diversidade genética, isolamento populacional e aumento da mortalidade por atropelamentos, comprometendo a funcionalidade ecológica do

território atravessado (VAN DER REE; SMITH; GRILO, 2015; LAURANCE et al., 2014). Em regiões amazônicas, onde a biodiversidade é particularmente elevada e as espécies frequentemente dependem de grandes áreas contínuas de floresta, a mitigação desse efeito torna-se elemento indispensável para qualquer abordagem infraestrutural comprometida com a sustentabilidade ecológica.

A literatura científica recente tem demonstrado que dispositivos de passagem de fauna, quando adequadamente projetados e posicionados, podem reduzir significativamente a fragmentação induzida por rodovias. Estruturas como passagens inferiores, passagens superiores vegetadas, galerias adaptadas e corredores ripários restaurados funcionam como pontos de reconexão ecológica, permitindo que diferentes espécies atravessem a infraestrutura com menor risco (VAN DER REE; JAARSMA; VAN DER GRIFT, 2011). No entanto, a eficácia desses dispositivos depende de fatores como localização estratégica, adequação às características das espécies-alvo e integração com elementos da paisagem adjacente. Estudos indicam que passagens de fauna apresentam maior eficiência quando associadas a cercamentos direcionadores, cobertura vegetal adequada e manutenção da continuidade estrutural do habitat (GAGNÉ et al., 2023).

No contexto da Estrada-Parque Regenerativa, a conectividade ecológica não é tratada como intervenção pontual, mas como estrutura organizadora do corredor socioecológico. Em vez de implantar dispositivos isolados ao longo da rodovia, o modelo propõe identificar zonas prioritárias de travessia com base na análise da paisagem, incluindo proximidade de cursos d'água, presença de fragmentos florestais conectáveis, rotas conhecidas de fauna e áreas de elevada integridade ecológica. Essa abordagem permite que as

passagens de fauna sejam posicionadas em locais onde a reconexão ecológica produz maiores benefícios sistêmicos, contribuindo para restabelecer fluxos biológicos interrompidos pela infraestrutura.

Além das passagens específicas, o framework regenerativo também incorpora estratégias complementares de reconfiguração da paisagem marginal à rodovia. Faixas vegetadas, restauração de bordas florestais e manutenção de corredores ripários desempenham papel crucial na orientação do deslocamento da fauna e na redução da exposição aos veículos. A presença de vegetação estruturalmente complexa ao longo do corredor pode funcionar como elemento de orientação para diferentes espécies, aumentando a probabilidade de utilização das passagens e diminuindo a incidência de atropelamentos (CLEVENGER; HUIJSER, 2011). Em ambientes tropicais, onde muitas espécies apresentam hábitos arborícolas ou semi-arborícolas, a conectividade vertical da vegetação também assume importância relevante.

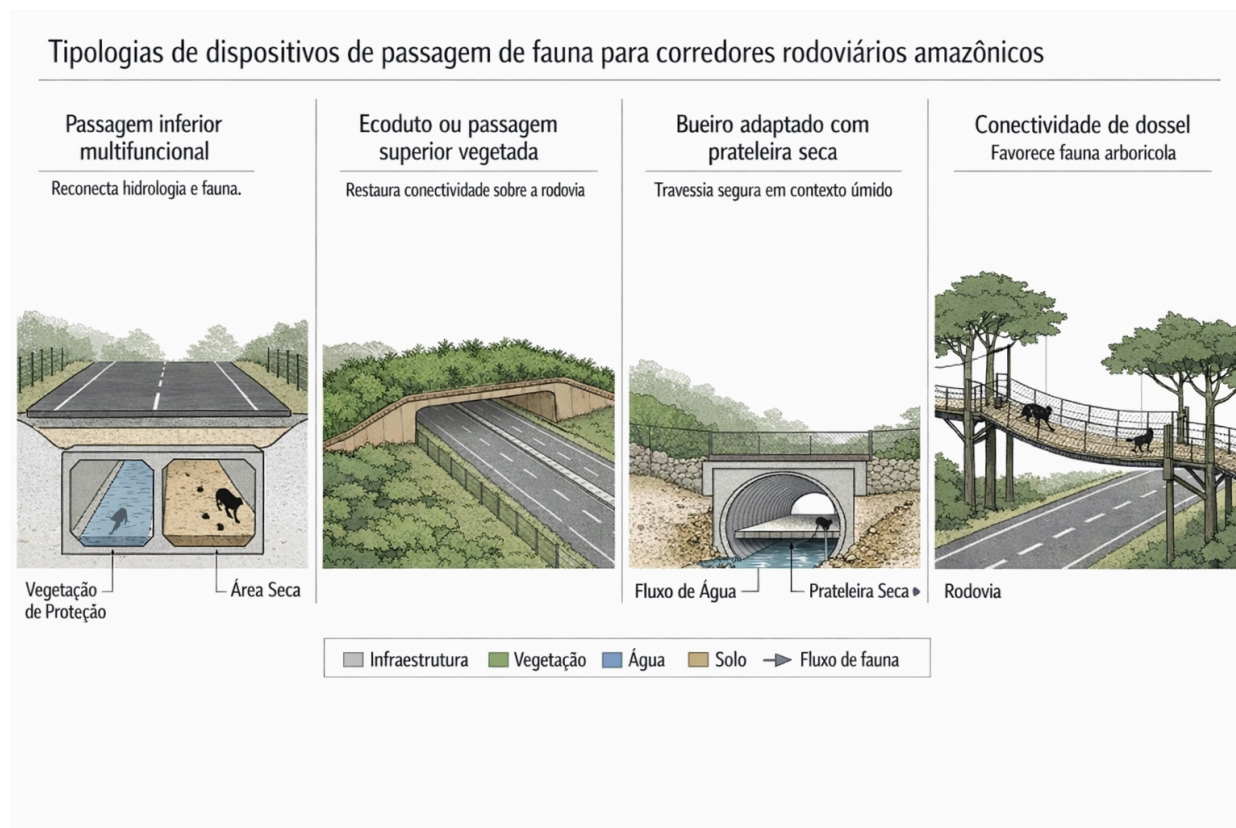
Outro aspecto essencial diz respeito à integração entre conectividade ecológica e dinâmica hidrológica da paisagem. Muitas passagens naturais de fauna coincidem com cursos d'água ou áreas ripárias, que funcionam como corredores ecológicos naturais. A preservação e restauração dessas estruturas aumenta a eficácia das passagens de fauna e contribui para manter processos ecológicos essenciais, como dispersão de sementes e deslocamento de espécies aquáticas e semi-aquáticas. Dessa forma, a conectividade ecológica passa a ser concebida não apenas como solução de mitigação, mas como componente integrante da reorganização funcional do território.

Essa concepção é particularmente relevante na Amazônia, onde a rede hidrográfica desempenha papel estruturante na organização da paisagem. Pequenos igarapés e drenagens difusas frequentemente funcionam como rotas naturais de deslocamento para diversas espécies, e sua interrupção por infraestruturas lineares pode gerar impactos desproporcionais sobre a biodiversidade. A integração entre dispositivos de travessia de fauna e sistemas de drenagem naturalizada, discutidos nas subseções seguintes, constitui portanto estratégia essencial para restaurar a conectividade ecológica do corredor rodoviário.

A Figura 4 apresenta um modelo conceitual dessa abordagem, ilustrando como diferentes dispositivos de passagem de fauna e elementos de conectividade paisagística podem ser integrados ao longo do corredor viário. O esquema destaca a articulação entre passagens inferiores adaptadas, cobertura vegetal funcional e continuidade ecológica da paisagem, evidenciando a lógica sistêmica que orienta o framework regenerativo.

Ao incorporar dispositivos de travessia de fauna e estratégias de reconexão paisagística, a Estrada-Parque Regenerativa busca reduzir significativamente o efeito barreira das rodovias amazônicas. Mais do que mitigar impactos pontuais, a proposta procura restabelecer a continuidade funcional da paisagem, reconhecendo que a mobilidade humana e a mobilidade ecológica precisam coexistir em sistemas territoriais complexos. Essa integração constitui elemento essencial para transformar a infraestrutura rodoviária de agente de fragmentação em instrumento de requalificação ecológica do território, reforçando a compatibilidade entre mobilidade regional e conservação da biodiversidade.

Figura 4. Modelo conceitual de conectividade ecológica aplicada ao corredor rodoviário, com integração entre passagens de fauna, continuidade da vegetação e reconexão da paisagem ao longo da Estrada-Parque Regenerativa.



Fonte: Elaboração própria (2026).

4.1.3. Drenagem Naturalizada, Bioswales e Reconfiguração Hidrológica do Corredor

A reorganização hidrológica constitui um dos elementos estruturantes da Estrada-Parque Regenerativa, especialmente em ambientes tropicais úmidos onde a dinâmica da água exerce papel decisivo na estabilidade ecológica e geomorfológica da paisagem. Em rodovias convencionais, os sistemas de drenagem são tradicionalmente concebidos para remover rapidamente a água da plataforma viária, canalizando o escoamento superficial por meio de valetas rígidas, bueiros e dispositivos de descarga concentrada. Embora essa lógica seja eficaz para proteger a estrutura do

pavimento no curto prazo, ela frequentemente produz efeitos adversos no território adjacente, como erosão concentrada, ruptura de microdrenagens naturais, assoreamento de corpos hídricos e intensificação de processos de instabilidade em taludes e encostas. Em regiões amazônicas, onde a pluviosidade anual é elevada e os solos apresentam elevada sensibilidade à erosão, esses efeitos podem amplificar significativamente os impactos ambientais associados à infraestrutura rodoviária.

A literatura recente sobre infraestrutura verde-azul e soluções baseadas na natureza tem demonstrado que sistemas de drenagem naturalizada podem oferecer alternativas mais compatíveis com os processos hidrológicos da paisagem. Dispositivos como bioswales, valas vegetadas, jardins de chuva, bacias de retenção distribuída e faixas de infiltração permitem reduzir a velocidade do escoamento, promover infiltração gradual da água e aumentar a capacidade de retenção hídrica do sistema (LU et al., 2024; ZHOU et al., 2024). Em vez de simplesmente evacuar a água da plataforma viária, essas soluções procuram reintegrar o ciclo hidrológico ao funcionamento do território, aproximando o comportamento da infraestrutura das dinâmicas naturais da paisagem.

No contexto da Estrada-Parque Regenerativa, a drenagem naturalizada é concebida como componente sistêmico do corredor socioecológico, e não apenas como solução técnica localizada. A proposta envolve a reconfiguração do conjunto de dispositivos de drenagem de forma a favorecer processos de infiltração, retenção e desaceleração do escoamento ao longo da margem da rodovia. Bioswales vegetados, por exemplo, podem ser implantados paralelamente à via para interceptar o escoamento superficial e permitir que a água infiltre gradualmente no solo, reduzindo a

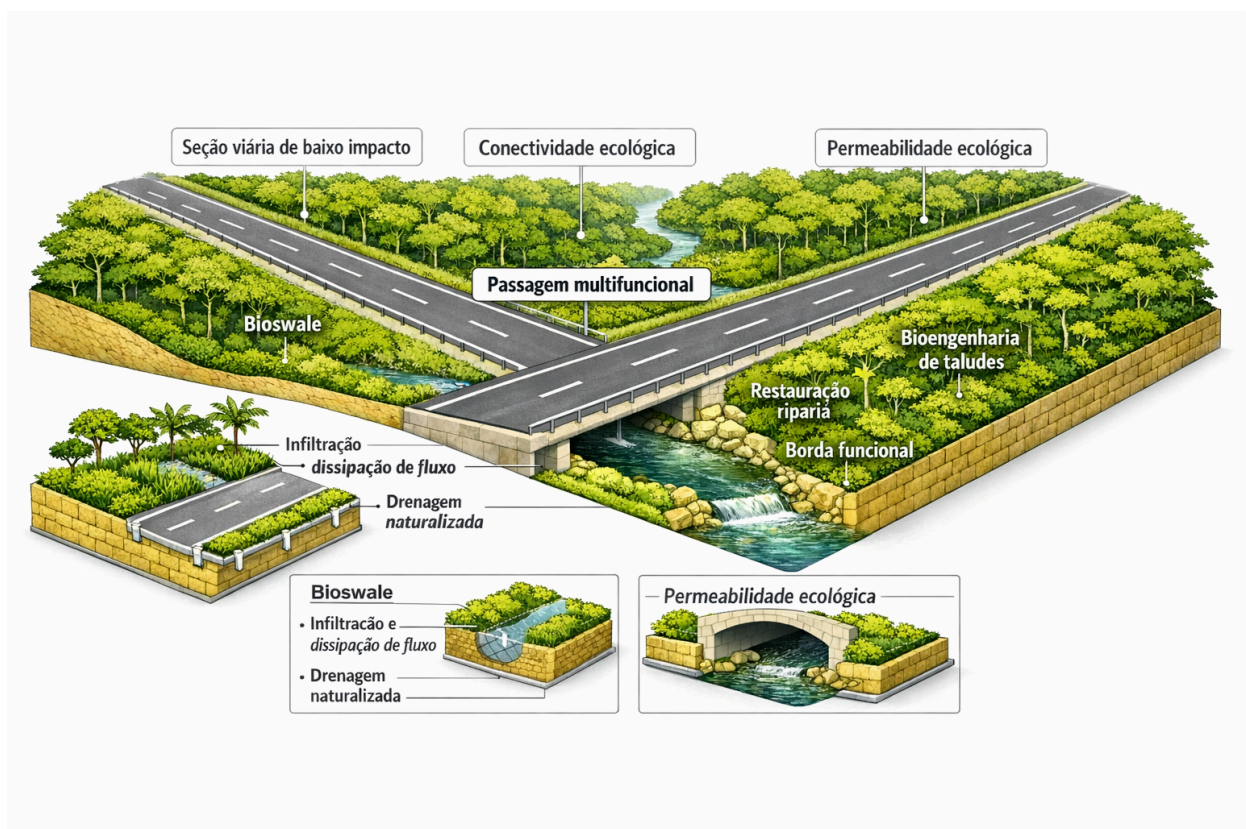
pressão hidráulica sobre os sistemas de descarga. Além de contribuir para a gestão hídrica, esses dispositivos também funcionam como corredores vegetados que favorecem a conectividade ecológica e a estabilização das bordas da infraestrutura.

Outro aspecto fundamental da drenagem naturalizada refere-se à reconexão das microdrenagens naturais interceptadas pela rodovia. Em muitos corredores viários amazônicos, pequenos cursos d'água são canalizados ou desviados por dispositivos hidráulicos convencionais que não reproduzem adequadamente o regime hidrológico original. A abordagem regenerativa busca restaurar essas conexões por meio da adaptação de bueiros e galerias para permitir maior continuidade hidrológica e ecológica. Quando associadas à restauração de zonas ripárias e à revegetação das margens da estrada, essas intervenções contribuem para reduzir processos erosivos e melhorar a qualidade da água nos corpos hídricos adjacentes.

A reconfiguração hidrológica também possui implicações relevantes para a resiliência climática da infraestrutura. Eventos extremos de precipitação, cuja frequência tende a aumentar em diferentes regiões tropicais em decorrência das mudanças climáticas, podem gerar sobrecarga nos sistemas de drenagem convencionais. Ao promover maior capacidade de retenção e infiltração, os sistemas naturalizados ajudam a amortecer picos de escoamento e a reduzir riscos de erosão e falhas estruturais da rodovia. Dessa forma, a drenagem naturalizada não apenas melhora o desempenho ambiental do corredor, mas também contribui para aumentar a robustez e a durabilidade da infraestrutura.

A Figura 5 ilustra o princípio de funcionamento dessa abordagem, apresentando um modelo conceitual de drenagem naturalizada aplicada ao corredor da Estrada-Parque Regenerativa. O esquema evidencia a articulação entre bioswales vegetados, faixas de infiltração e reconexão de microdrenagens naturais, destacando a forma como esses elementos podem ser integrados à seção viária para restaurar a compatibilidade entre infraestrutura e dinâmica hidrológica da paisagem.

Figura 5. Modelo conceitual de drenagem naturalizada no corredor rodoviário, ilustrando a integração entre bioswales vegetados, infiltração distribuída e reconexão de microdrenagens na Estrada-Parque Regenerativa.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Ao substituir a lógica de rápida evacuação da água por um sistema de retenção e infiltração distribuída, a Estrada-Parque Regenerativa redefine a relação entre infraestrutura e hidrologia do território. Em

vez de tratar a água como elemento externo a ser eliminado da plataforma viária, o modelo passa a incorporá-la como componente essencial do desempenho socioecológico do corredor. Essa mudança de paradigma permite reduzir processos de degradação ambiental, aumentar a estabilidade geomorfológica da infraestrutura e reforçar a compatibilidade entre mobilidade rodoviária e funcionamento ecológico da paisagem amazônica.

4.1.4. Bioengenharia de Taludes, Restauração Ripária e Estabilização Ecotécnica

A estabilização de taludes e interfaces geomorfológicas em rodovias amazônicas constitui um dos pontos mais críticos do desempenho infraestrutural, porque é justamente nessas transições entre plataforma viária, relevo, drenagem e cobertura vegetal que se concentram parte expressiva dos processos de erosão, instabilidade física, exportação de sedimentos e degradação ecológica do corredor. Em sua formulação convencional, a resposta da engenharia tende a privilegiar soluções rígidas, fortemente artificializadas e orientadas pela contenção imediata do solo, como revestimentos minerais, canalizações duras e estruturas de suporte predominantemente cinzas. Embora tais soluções possam ser necessárias em determinadas circunstâncias, sua aplicação isolada frequentemente produz efeitos colaterais relevantes em florestas tropicais úmidas: ampliação da rigidez hidráulica, perda de capacidade de infiltração, simplificação ecológica das interfaces, aumento do contraste entre a via e a paisagem adjacente e criação de novas discontinuidades no corredor. O modelo regenerativo proposto neste artigo parte de premissa distinta: a estabilização precisa ser simultaneamente técnica e ecológica, isto é, deve assegurar segurança física sem dissociar a infraestrutura dos

processos biofísicos que sustentam sua durabilidade e sua compatibilidade territorial no longo prazo.

É nesse contexto que a bioengenharia de solos e águas assume papel estruturante no framework da Estrada-Parque Regenerativa. Em sentido estrito, a bioengenharia combina materiais vivos, elementos inertes e princípios ecológicos para controlar erosão, aumentar coesão do solo, dissipar energia hidráulica e favorecer sucessão vegetal, substituindo ou complementando soluções exclusivamente minerais. A literatura recente tem reforçado a robustez dessa abordagem. Lann et al. (2024), ao revisarem os efeitos hidromecânicos da vegetação na estabilidade de taludes, demonstram que a cobertura vegetal reduz erosão por interceptação da chuva, diminui a energia cinética do impacto das gotas, favorece infiltração em determinadas condições e, sobretudo, aumenta a coesão aparente do solo por meio do reforço radicular. O estudo evidencia ainda que arquitetura das raízes, composição da cobertura vegetal e combinação entre espécies herbáceas, arbustivas e lenhosas influenciam decisivamente o desempenho estabilizador. Para o caso rodoviário amazônico, essa constatação é particularmente relevante, porque indica que a vegetação não deve ser tratada como acabamento paisagístico do talude, mas como componente geotécnico funcional do sistema de estabilização.

Essa compreensão é aprofundada por Uzielli et al. (2025), que compararam soluções convencionais, soluções de bioengenharia e soluções combinadas para estabilização de encostas. Os autores concluem que intervenções híbridas, nas quais elementos cinzas e verdes atuam em sinergia, tendem a oferecer melhor equilíbrio entre segurança e sustentabilidade, especialmente porque podem garantir estabilidade adequada no curto prazo e incremento

progressivo de resistência à medida que os componentes biológicos se estabelecem. Essa evidência é metodologicamente importante para o framework da Estrada-Parque Regenerativa. O modelo não pressupõe abandono dogmático da engenharia convencional; ao contrário, reconhece que, em determinados trechos, a maior robustez decorre justamente de soluções ecotécnicas combinadas, nas quais o papel da vegetação e da bioengenharia é maximizado sem dispensar apoios estruturais quando indispensáveis. Em florestas tropicais, onde chuvas intensas, variações de umidade e alta suscetibilidade erosiva podem comprometer soluções unicamente vegetadas em fases iniciais, a articulação entre suporte físico e desenvolvimento ecológico tende a ser mais realista e tecnicamente prudente.

No plano operativo do framework, isso significa que a bioengenharia de taludes deve ser concebida segundo três funções complementares. A primeira é a função mecânica, associada ao incremento da resistência do solo por enraizamento, à redução de desprendimento superficial e à contenção progressiva de movimentos rasos. A segunda é a função hidrológica, ligada à interceptação da chuva, à dissipação de fluxo superficial, à evapotranspiração e à redução de concentração erosiva. A terceira é a função ecológica, relacionada à criação de substrato para sucessão vegetal, integração da infraestrutura com a paisagem adjacente, redução de contraste de borda e apoio à conectividade funcional em escala local. Esse triplo papel distingue a estabilização ecotécnica da contenção convencional, porque o sucesso deixa de ser aferido apenas pela ausência de ruptura e passa a incluir recuperação de processos ecológicos, melhoria da interface estrada-paisagem e contribuição à estabilidade sistêmica do corredor.

A experiência empírica recente no Brasil reforça a pertinência dessa abordagem. Sousa et al. (2025), ao avaliarem intervenções de bioengenharia em margens erosivas de reservatórios, verificaram que estruturas combinadas com vegetação foram capazes de controlar erosão, reter sedimentos e favorecer o desenvolvimento vegetal ao longo do tempo, funcionando como barreiras vivas de dissipação de energia. Embora o estudo tenha sido realizado em contexto de reservatório hidrelétrico, seus resultados são particularmente úteis para o presente artigo porque mostram, em ambiente brasileiro, que técnicas de bioengenharia dependem da adequada seleção de espécies, do suporte inicial de estruturas inertes e do monitoramento do desenvolvimento vegetal. Em termos de transposição conceitual, isso reforça que, em rodovias amazônicas, taludes, ombreiras e interfaces hidráulicas podem ser tratados como superfícies vivas de estabilização, e não apenas como faces inertes a serem artificialmente protegidas contra a dinâmica natural.

A estabilização ecotécnica, contudo, não se limita aos taludes. Ela se estende às zonas ripárias, cuja degradação constitui um dos principais mecanismos de amplificação de vulnerabilidade em corredores rodoviários tropicais. Faixas marginais de cursos d'água exercem funções críticas de filtragem, proteção de margens, regulação térmica, conectividade biológica, retenção de sedimentos e modulação hidrológica. Quando a estrada corta, comprime ou degrada esses espaços, não apenas aumenta a instabilidade local, mas enfraquece um dos principais sistemas naturais de amortecimento ecológico da paisagem. Por isso, a restauração ripária não pode ser tratada, no modelo regenerativo, como compensação secundária ou medida periférica. Ela integra o próprio núcleo da requalificação do corredor, pois permite recompor

proteção hídrica, reduzir exportação de sedimentos, melhorar conectividade linear e reforçar a estabilidade das interfaces entre via e drenagem.

A literatura sobre restauração ecológica fornece base sólida para essa diretriz. Procknow et al. (2023), ao avaliarem a restauração de floresta ripária por nucleação após dez anos de implantação, demonstraram que a estratégia foi eficaz para acelerar trajetória sucessional, aumentar riqueza, abundância, cobertura de dossel e indicadores ecológicos em comparação a abordagens passivas. O aspecto mais relevante desse estudo, para os propósitos do presente artigo, é que ele evidencia duas questões decisivas: primeiro, a restauração ripária requer desenho ecológico ativo quando se pretende acelerar recomposição funcional; segundo, sua efetividade depende de monitoramento por indicadores e não apenas da execução inicial da intervenção. Em rodovias amazônicas, isso significa que recompôr zonas ripárias ao longo do corredor exige abordagem estratégica, capaz de combinar plantio direcionado, facilitação ecológica, proteção de margens e acompanhamento da evolução sucessional.

Essa perspectiva ganha ainda mais força quando se considera a escala temporal da restauração em florestas tropicais degradadas. Axelsson et al. (2024), ao sistematizarem 25 anos de restauração operacional em Sabah, Bornéu, destacam que programas de reabilitação florestal em larga escala só geram benefícios robustos quando combinam infraestrutura mínima, experimentação adaptativa, diferenciação de técnicas segundo nível de degradação e monitoramento de longo prazo. Embora o estudo não trate especificamente de corredores rodoviários, ele oferece lição metodológica fundamental para a lógica da Estrada-Parque

Regenerativa: a recomposição ecológica de paisagens tropicais degradadas não resulta de uma única ação pontual, mas de arranjos escalonados, adaptativos e persistentes no tempo. Dito de outro modo, restaurar interfaces ripárias e encostas associadas à rodovia exige visão processual, e não mera execução de obras vegetadas de curta duração.

À luz dessa literatura, a estabilização ecotécnica pode ser definida, no âmbito deste artigo, como a combinação entre bioengenharia de taludes, restauração ripária e manejo hidrológico de borda orientada a recompor simultaneamente segurança física e funcionalidade ecológica. Seu diferencial está em recusar a separação rígida entre “obra de estabilidade” e “medida ambiental”. No paradigma convencional, a primeira tende a receber prioridade orçamentária, normativa e técnica, enquanto a segunda aparece como adição acessória. No framework regenerativo, essa hierarquia é superada. A estabilidade da estrada passa a depender da recomposição de vegetação funcional, do controle de erosão por sistemas vivos, da dissipação distribuída de energia hidráulica e da proteção de margens e taludes como superfícies biofisicamente ativas. A ecotécnica, assim, não é apêndice verde da geotecnia, mas sua expansão em direção a uma racionalidade infraestrutural mais sofisticada e territorialmente sensível.

Esse deslocamento tem consequências diretas para o desenho do corredor. Em vez de taludes nus ou revestidos apenas para impedir desprendimento imediato, o modelo privilegia superfícies capazes de sustentar cobertura viva, raízes estabilizadoras e controle biológico da erosão. Em vez de margens ripárias tratadas apenas como restrição legal, elas passam a ser concebidas como infraestrutura ecológica linear do próprio sistema viário. Em vez de

obras isoladas de contenção, busca-se compor arranjos em que drenagem naturalizada, estabilização vegetal, dissipação hidráulica e restauração ciliar se reforçam mutuamente. É precisamente nesse ponto que a bioengenharia se articula com a subseção anterior: água, solo, vegetação e relevo deixam de ser tratados separadamente e passam a integrar uma mesma matriz de desempenho regenerativo.

Em termos operacionais, isso implica selecionar técnicas e espécies conforme função desejada, grau de instabilidade, posição no relevo, proximidade de drenagens, intensidade do escoamento e potencial sucessional do local. Também implica reconhecer que nem todos os trechos exigem o mesmo grau de intervenção: em alguns casos, estruturas leves com revegetação funcional serão suficientes; em outros, será necessária combinação com elementos de suporte, proteção inicial ou reconfiguração geométrica. Essa seletividade, coerente com a lógica de acupuntura territorial, evita tanto o uso indiscriminado de soluções cinzas quanto a idealização de respostas exclusivamente vegetadas onde elas não oferecem segurança adequada.

A integração entre bioengenharia de taludes e restauração ripária amplia o potencial do corredor para além da mera estabilidade local. Ao reduzir exportação de sedimentos, proteger cursos d'água, aumentar cobertura viva, suavizar bordas e melhorar conectividade linear, a estabilização ecotécnica contribui para qualificar o desempenho socioecológico de toda a estrada. Em uma floresta tropical sujeita a chuvas intensas, altas taxas de crescimento vegetal e forte sensibilidade de interfaces geomorfológicas, esse componente do framework é decisivo para demonstrar que a regeneração não se produz apenas em grandes estruturas

emblemáticas, mas sobretudo na recomposição inteligente dos pontos onde a infraestrutura historicamente mais agride o território.

É sobre essa base que a subseção seguinte examina a seção viária de baixo impacto e a compatibilização entre mobilidade e integridade ecológica, aprofundando a forma como a geometria e a organização física da estrada podem ser redesenhadas para reduzir sua pegada territorial e ampliar sua compatibilidade com a paisagem amazônica.

4.1.5. Seção Viária de Baixo Impacto e Compatibilização Entre Mobilidade e Integridade Ecológica

A geometria e a organização física da seção viária constituem elementos centrais para compreender a relação entre infraestrutura rodoviária e paisagem. Em grande parte das rodovias implantadas em regiões tropicais, a seção transversal da via é concebida segundo parâmetros padronizados, orientados predominantemente por critérios de capacidade de tráfego, segurança operacional e estabilidade estrutural. Embora tais critérios sejam fundamentais para o funcionamento do sistema de transporte, sua aplicação uniforme em ambientes ecologicamente sensíveis pode resultar em ampliação desnecessária da pegada territorial da infraestrutura, intensificação de processos erosivos, supressão extensiva de vegetação e ampliação do efeito de borda sobre os ecossistemas adjacentes. Assim, a Estrada-Parque Regenerativa propõe repensar a seção viária como elemento adaptativo e sensível ao contexto territorial, capaz de equilibrar demandas de mobilidade com a necessidade de preservar integridade ecológica e estabilidade ambiental do corredor.

O conceito de seção viária de baixo impacto parte da premissa de que a dimensão física da estrada não deve ser definida exclusivamente por padrões genéricos de engenharia, mas por uma leitura contextualizada das condições biofísicas, ecológicas e territoriais do ambiente em que a infraestrutura se insere. Em corredores amazônicos, onde a vegetação desempenha papel crucial na regulação climática, na estabilidade do solo e na manutenção da biodiversidade, a redução do footprint infraestrutural pode contribuir significativamente para diminuir efeitos de fragmentação e degradação ambiental. Assim, a seção viária regenerativa busca otimizar a largura da plataforma, reorganizar áreas de acostamento e taludes, e incorporar faixas vegetadas que funcionem simultaneamente como elementos de proteção ambiental e dispositivos de transição ecológica entre a via e a floresta adjacente.

Essa abordagem encontra respaldo em estudos recentes sobre infraestrutura de transporte sustentável, que destacam a importância de integrar critérios ecológicos ao desenho físico das rodovias. Pesquisas indicam que a redução da largura efetiva da estrada, combinada com a manutenção de vegetação funcional nas margens, pode reduzir a intensidade do efeito de borda, diminuir a incidência de atropelamentos e melhorar a conectividade ecológica local (LAURANCE et al., 2014; VAN DER REE et al., 2023). Além disso, superfícies permeáveis e áreas vegetadas ao longo da seção viária contribuem para o manejo natural da água e para a dissipação de energia hidráulica, reforçando a estabilidade hidrológica discutida nas subseções anteriores.

Outro aspecto importante da seção viária regenerativa é a integração entre infraestrutura e paisagem. Em vez de estabelecer

uma ruptura abrupta entre a rodovia e o ambiente natural, o modelo propõe transições graduais que reduzam o contraste ecológico e favoreçam a continuidade estrutural da vegetação. Faixas vegetadas, bermas ecológicas e taludes revegetados funcionam como zonas de amortecimento capazes de atenuar impactos físicos e ecológicos da infraestrutura. Essas áreas também podem servir como corredores microecológicos para pequenos vertebrados, invertebrados e espécies vegetais, ampliando a conectividade funcional do sistema.

A compatibilização entre mobilidade e integridade ecológica exige, ainda, atenção especial ao controle da velocidade e ao desenho geométrico da via. Estudos de ecologia de estradas demonstram que a velocidade dos veículos está diretamente associada à probabilidade de atropelamento de fauna e à severidade dos impactos sobre os ecossistemas adjacentes. Nesse sentido, a Estrada-Parque Regenerativa propõe incorporar elementos de modulação de velocidade e sinalização ecológica em trechos sensíveis, especialmente próximos a áreas de travessia de fauna e zonas ripárias. Medidas como curvas suavemente controladas, sinalização específica e dispositivos de redução de velocidade podem contribuir para reduzir riscos sem comprometer a funcionalidade do corredor.

Outro componente relevante refere-se à integração entre seção viária e infraestrutura verde-azul. A presença de bioswales, faixas vegetadas filtrantes e dispositivos de retenção distribuída ao longo da margem da estrada permite que a própria geometria da via funcione como parte do sistema de manejo hídrico e ecológico do corredor. Dessa forma, a seção viária deixa de ser apenas suporte físico do tráfego e passa a atuar como elemento organizador de fluxos hidrológicos e ecológicos na paisagem.

No contexto amazônico, a adoção de seções viárias de baixo impacto também possui implicações sociais e territoriais. Ao reduzir a extensão de áreas desmatadas associadas à infraestrutura e preservar maior continuidade florestal nas margens, o modelo contribui para minimizar processos de ocupação desordenada, abertura de acessos secundários e expansão de atividades predatórias. Assim, a organização física da estrada passa a influenciar não apenas a estabilidade ambiental do corredor, mas também as dinâmicas socioeconômicas que se desenvolvem ao seu redor.

Portanto, a seção viária de baixo impacto representa um componente essencial do framework da Estrada-Parque Regenerativa. Ela materializa, no plano geométrico e construtivo, a integração entre mobilidade e sustentabilidade territorial, demonstrando que o desenho físico da infraestrutura pode ser ajustado para reduzir impactos ambientais e fortalecer a compatibilidade entre transporte e conservação da biodiversidade. A subseção seguinte avança nesse processo ao examinar a acupuntura territorial e a priorização espacial de intervenções críticas, estratégia fundamental para direcionar esforços de regeneração em pontos estratégicos do corredor.

4.1.6. Acupuntura Territorial e Priorização Espacial de Intervenções Críticas

A noção de acupuntura territorial constitui um dos elementos mais inovadores do framework da Estrada-Parque Regenerativa, pois introduz no planejamento infraestrutural a ideia de que intervenções pontuais, quando estrategicamente posicionadas, podem produzir efeitos sistêmicos amplificados sobre a

funcionalidade socioecológica do corredor. Em contraste com abordagens convencionais que buscam uniformizar soluções ao longo de toda a extensão da rodovia, a lógica da acupuntura territorial reconhece que os processos de degradação associados à infraestrutura tendem a se concentrar em nós críticos da paisagem, onde interagem fatores hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos e territoriais. Nesses pontos, pequenas intervenções tecnicamente bem desenhadas podem desencadear melhorias desproporcionais na conectividade ecológica, na estabilidade hidrológica e na resiliência territorial do sistema.

O conceito inspira-se na ideia, amplamente discutida no planejamento urbano e na ecologia da paisagem, de que a reorganização territorial pode ser induzida por intervenções seletivas em pontos de maior sensibilidade sistêmica. Em corredores rodoviários amazônicos, essa sensibilidade costuma manifestar-se em áreas onde a estrada intercepta drenagens naturais, fragmenta habitats críticos, atravessa zonas ripárias, corta encostas instáveis ou induz processos de ocupação e degradação ao longo de suas margens. Nessas situações, a simples repetição de soluções padronizadas raramente produz resultados satisfatórios, pois ignora as especificidades biofísicas e territoriais que definem o comportamento do sistema. A acupuntura territorial, ao contrário, parte do princípio de que cada ponto crítico do corredor exige leitura específica e resposta projetual diferenciada.

Essa abordagem encontra respaldo na literatura recente sobre infraestrutura verde-azul e planejamento ecológico, que tem enfatizado a importância da priorização espacial para maximizar benefícios ambientais e sociais. Molné et al. (2023), por exemplo, demonstram que a eficácia de intervenções verdes depende

fortemente de sua localização em pontos estratégicos da paisagem, onde podem reconectar fragmentos ecológicos e restabelecer fluxos funcionais. De maneira semelhante, Croeser et al. (2024) mostram que a implantação direcionada de infraestrutura verde pode ampliar significativamente a conectividade ecológica e a provisão de serviços ecossistêmicos quando orientada por critérios espaciais robustos. Essas evidências sugerem que a eficácia das soluções regenerativas não reside apenas na natureza das técnicas empregadas, mas sobretudo na inteligência territorial que orienta sua localização.

No âmbito da Estrada-Parque Regenerativa, a acupuntura territorial opera como mecanismo de priorização estratégica de intervenções. Em vez de distribuir uniformemente recursos e dispositivos ao longo de todo o corredor, o modelo busca identificar trechos onde a infraestrutura concentra ou amplifica processos de degradação. Esses trechos podem incluir travessias frequentes de fauna, pontos de ruptura hidrológica, taludes sujeitos a instabilidade erosiva, interfaces degradadas entre estrada e floresta, ou ainda zonas onde a rodovia induz pressão antrópica lateral. Uma vez identificados, esses pontos tornam-se alvos prioritários de intervenções integradas que combinam dispositivos de conectividade ecológica, soluções hidrológicas naturalizadas, estabilização ecotécnica e recomposição vegetal.

Essa lógica de priorização apresenta vantagens importantes do ponto de vista técnico e operacional. Primeiramente, permite concentrar esforços e recursos em locais de maior impacto potencial, aumentando a eficiência ecológica e territorial das intervenções. Em segundo lugar, facilita a implementação gradual do modelo regenerativo, uma vez que os pontos críticos podem ser

tratados de forma escalonada conforme disponibilidade institucional, técnica e financeira. Em terceiro lugar, contribui para tornar o processo de planejamento mais adaptativo, permitindo ajustes progressivos à medida que novas informações territoriais são incorporadas.

Outro aspecto relevante da acupuntura territorial é sua capacidade de integrar diferentes escalas de análise. Enquanto algumas intervenções respondem a problemas locais — como estabilização de um talude específico ou adaptação de uma galeria para travessia de fauna —, outras possuem efeitos que se propagam por áreas mais amplas da paisagem, como a restauração de um corredor ripário ou a reconexão de fragmentos florestais. A estratégia regenerativa procura articular essas escalas, reconhecendo que intervenções pontuais podem contribuir para reorganizar processos ecológicos em nível regional quando inseridas em rede coerente de dispositivos e soluções.

Em termos metodológicos, a identificação dos pontos de acupuntura territorial baseia-se na análise integrada de variáveis biofísicas, ecológicas e territoriais. Entre essas variáveis destacam-se a presença de fragmentos florestais conectáveis, a proximidade de cursos d'água, a ocorrência de zonas de erosão ou instabilidade geomorfológica, a intensidade do tráfego e os padrões de deslocamento da fauna. A leitura dessas informações permite construir uma cartografia de vulnerabilidades e oportunidades regenerativas, orientando o posicionamento dos componentes do framework ao longo do corredor.

Além de seus benefícios ecológicos e infraestruturais, a acupuntura territorial também contribui para a governança adaptativa da

infraestrutura. Ao reconhecer que os sistemas territoriais são dinâmicos e sujeitos a mudanças climáticas, ecológicas e socioeconômicas, o modelo favorece intervenções flexíveis e ajustáveis ao longo do tempo. Isso é particularmente importante na Amazônia, onde eventos extremos, alterações no uso da terra e mudanças no regime hidrológico podem modificar rapidamente as condições do corredor. A priorização espacial permite que novas intervenções sejam incorporadas conforme a evolução do sistema, mantendo o caráter regenerativo do modelo.

Sob essa perspectiva, a acupuntura territorial não deve ser compreendida apenas como técnica de planejamento, mas como princípio organizador da estratégia regenerativa. Ela sintetiza a ideia de que a transformação de uma rodovia convencional em uma Estrada-Parque não depende de intervenções homogêneas e massivas, mas da capacidade de identificar pontos-chave onde a infraestrutura pode ser redesenhada para restaurar conectividade, estabilidade e funcionalidade ecológica da paisagem.

Assim, a integração entre conectividade ecológica, drenagem naturalizada, bioengenharia de taludes, seção viária de baixo impacto e acupuntura territorial forma o núcleo operacional do framework da Estrada-Parque Regenerativa. Em conjunto, esses elementos demonstram que a regeneração da infraestrutura rodoviária amazônica não é apenas uma questão de mitigação ambiental, mas de reorganização sistêmica da relação entre mobilidade, ecologia e território. As seções seguintes avançam para a aplicação desse framework ao corredor da BR-364/AC, examinando como seus componentes podem ser traduzidos em estratégias concretas de requalificação territorial no trecho entre Manoel Urbano e Feijó.

4.2. Aplicação do Framework Ao Corredor BR-364/AC

A etapa seguinte da análise consiste na tradução territorial do framework da Estrada-Parque Regenerativa ao corredor da BR-364/AC, especificamente ao trecho compreendido entre os municípios de Manoel Urbano e Feijó. A aplicação do modelo em um corredor real constitui passo fundamental para demonstrar a consistência operativa da proposta, pois permite avaliar de que maneira os princípios estruturantes e os componentes técnicos discutidos nas subseções anteriores podem ser articulados em contexto territorial concreto. Nessa perspectiva aplicada, o objetivo desta seção não é apresentar um projeto executivo detalhado da rodovia, mas examinar a aderência do framework às condições biofísicas, ecológicas e socioespaciais do corredor, evidenciando sua plausibilidade técnica e sua capacidade de orientar processos de requalificação infraestrutural em ambientes amazônicos.

A escolha do trecho Manoel Urbano–Feijó, conforme discutido na seção metodológica, baseou-se em sua representatividade para o debate sobre infraestrutura e conservação na Amazônia. O segmento integra um dos eixos rodoviários mais importantes do estado do Acre e desempenha papel estratégico na articulação territorial entre diferentes municípios e regiões produtivas. Ao mesmo tempo, o corredor atravessa paisagens florestais sensíveis, caracterizadas por elevada biodiversidade, presença de drenagens naturais e mosaicos complexos de cobertura vegetal e uso do solo. Essa combinação entre relevância logística e fragilidade socioecológica torna o trecho particularmente adequado para examinar os desafios e as oportunidades associados à implementação de uma infraestrutura regenerativa.

Do ponto de vista biofísico, o corredor insere-se em ambiente de floresta tropical úmida, marcado por elevada pluviosidade anual, solos frequentemente suscetíveis à erosão e densa rede hidrográfica composta por igarapés, áreas alagáveis e zonas ripárias. Essas características condicionam fortemente o comportamento da infraestrutura rodoviária, influenciando processos de drenagem, estabilidade de taludes e conectividade ecológica da paisagem. Em sistemas naturais como esse, pequenas alterações na dinâmica hidrológica ou na estrutura da vegetação podem desencadear efeitos cumulativos significativos sobre a estabilidade territorial. A aplicação do framework regenerativo busca justamente enfrentar esse desafio, propondo soluções capazes de operar em maior consonância com os processos naturais do corredor.

No plano ecológico, o trecho apresenta condições particularmente relevantes para a análise da conectividade da paisagem. A presença de remanescentes florestais extensos, associados a cursos d'água e áreas de vegetação ripária, cria uma rede natural de corredores ecológicos que desempenham papel crucial na movimentação de fauna e na manutenção de processos ecossistêmicos. Entretanto, a presença da rodovia introduz descontinuidades físicas e comportamentais que podem comprometer esses fluxos. Estudos sobre ecologia de estradas indicam que infraestruturas lineares em ambientes florestais tendem a atuar como barreiras ecológicas, alterando padrões de deslocamento da fauna e aumentando mortalidade por atropelamento (VAN DER REE; SMITH; GRILO, 2015; ZHOU et al., 2026). A aplicação do modelo regenerativo nesse contexto busca reduzir tais efeitos por meio da integração entre dispositivos de passagem de fauna, restauração de zonas ripárias e organização estratégica da seção viária.

A dimensão hidrológica também desempenha papel decisivo na interpretação do corredor. A BR-364 intercepta numerosas microdrenagens que, em condições naturais, contribuem para regular fluxos de água e sedimentos ao longo da paisagem. Quando essas drenagens são interrompidas ou artificialmente concentradas pela infraestrutura rodoviária, podem surgir processos de erosão, instabilidade geomorfológica e assoreamento de corpos hídricos. A aplicação do framework regenerativo implica reconfigurar essa relação por meio da introdução de sistemas de drenagem naturalizada, capazes de reduzir a energia do escoamento e restabelecer maior compatibilidade entre estrada e regime hidrológico local. Bioswales, dispositivos de retenção distribuída e revegetação funcional das margens da via constituem elementos-chave nesse processo.

Outro aspecto relevante para a aplicação do modelo refere-se às interfaces entre infraestrutura e território, especialmente nas zonas de borda florestal. Rodovias amazônicas frequentemente desencadeiam processos de ocupação lateral e abertura de acessos secundários, intensificando pressões sobre a vegetação e alterando padrões de uso da terra. Ao reorganizar a seção viária e introduzir faixas vegetadas de transição ecológica, a Estrada-Parque Regenerativa busca reduzir esses efeitos, fortalecendo a integração entre a via e a paisagem. Essa estratégia não apenas contribui para preservar a integridade ambiental do corredor, mas também pode favorecer formas mais sustentáveis de desenvolvimento territorial.

Do ponto de vista metodológico, a aplicação do framework ao corredor BR-364/AC foi orientada por três etapas analíticas complementares. A primeira consistiu na leitura territorial integrada do trecho, identificando características biofísicas, padrões de

drenagem, fragmentos florestais e potenciais zonas de conectividade ecológica. A segunda envolveu a identificação de pontos críticos de intervenção, correspondentes a locais onde a infraestrutura concentra processos de degradação ou onde intervenções regenerativas podem produzir efeitos sistêmicos relevantes. A terceira etapa consistiu na tradução dos componentes do framework em estratégias territoriais de intervenção, combinando dispositivos de conectividade ecológica, drenagem naturalizada, estabilização ecotécnica e reorganização da seção viária.

Essa abordagem permitiu examinar de que maneira o modelo regenerativo pode ser operacionalizado no corredor estudado, demonstrando que seus princípios não se limitam a formulações conceituais abstratas, mas possuem potencial de aplicação concreta em contextos amazônicos. Ao articular engenharia ecológica, planejamento territorial e infraestrutura de transporte, o framework propõe uma nova forma de conceber rodovias em ambientes florestais: não como estruturas isoladas da paisagem, mas como sistemas socioecológicos capazes de integrar mobilidade, conservação e desenvolvimento regional.

As subseções seguintes aprofundam essa análise ao examinar, de forma mais detalhada, as características territoriais do trecho Manoel Urbano–Feijó e a forma como os componentes do framework podem ser traduzidos em intervenções operacionais ao longo do corredor.

4.2.1. Caracterização Territorial e Funcional do Trecho Manoel Urbano–feijó

A caracterização territorial do trecho da BR-364 compreendido entre os municípios de Manoel Urbano e Feijó, no estado do Acre, constitui etapa fundamental para a aplicação do framework da Estrada-Parque Regenerativa. A compreensão integrada das condições biofísicas, ecológicas e socioespaciais do corredor permite identificar tanto os fatores estruturais que condicionam o comportamento da infraestrutura quanto as oportunidades de intervenção regenerativa ao longo do território atravessado. Em sistemas socioecológicos complexos como os da Amazônia, a análise territorial assume papel decisivo porque a infraestrutura rodoviária não atua apenas como elemento de circulação, mas como vetor de reorganização da paisagem e dos padrões de uso da terra (LAURANCE et al., 2014; ZHENG et al., 2025).

Do ponto de vista geográfico, o segmento Manoel Urbano–Feijó insere-se na região centro-oriental do estado do Acre, conectando áreas da bacia do rio Purus a regiões da bacia do rio Juruá. A rodovia constitui um dos principais eixos estruturadores da mobilidade regional, desempenhando papel estratégico na articulação entre municípios, cadeias produtivas locais e redes logísticas estaduais. Sua função territorial transcende, portanto, a simples ligação entre localidades, configurando-se como infraestrutura de integração regional que viabiliza fluxos econômicos, circulação de pessoas e acesso a serviços públicos em uma região caracterizada por elevada dispersão espacial das populações.

Sob o ponto de vista ambiental, o corredor atravessa paisagens dominadas por florestas tropicais úmidas, com elevada diversidade biológica e complexidade estrutural. A região abriga mosaicos de cobertura vegetal que incluem florestas densas, formações secundárias, áreas de várzea e sistemas ripários associados a uma

rede hidrográfica densa e capilarizada. Esses elementos configuram uma paisagem fortemente estruturada por processos hidrológicos e ecológicos, nos quais cursos d'água, igarapés e zonas alagáveis desempenham papel central na manutenção da conectividade da vegetação e na dinâmica de dispersão de espécies (FLORES et al., 2024; LAPOLA et al., 2023). Nesse contexto, qualquer intervenção infraestrutural que altere significativamente a dinâmica da água ou a continuidade da vegetação pode desencadear efeitos cumulativos sobre a estabilidade ecológica do território.

A presença da rodovia introduz, entretanto, processos de fragmentação da paisagem, alterando padrões de conectividade entre fragmentos florestais e interferindo nos fluxos naturais da fauna. Infraestruturas lineares tendem a produzir zonas de borda artificializadas, nas quais a estrutura da vegetação, a incidência de luz, a temperatura e a umidade diferem das condições internas da floresta. Esses efeitos de borda podem alterar significativamente o funcionamento ecológico da paisagem, favorecendo processos de degradação gradual e modificando a composição de espécies (LAURANCE et al., 2014). Em regiões amazônicas, onde muitas espécies dependem de grandes áreas contínuas de habitat, a fragmentação induzida por rodovias representa desafio relevante para a conservação da biodiversidade.

Outro elemento central na caracterização territorial do corredor refere-se à dinâmica hidrológica da região. O trecho Manoel Urbano–Feijó intercepta múltiplas microdrenagens associadas à bacia do rio Envira e de seus afluentes, além de diversos igarapés e áreas de drenagem difusa típicas de ambientes florestais tropicais. Esses sistemas desempenham papel fundamental na regulação do escoamento superficial, na manutenção da umidade do solo e na

conectividade ecológica entre diferentes unidades da paisagem. Quando interceptados por infraestrutura rodoviária convencional, tais sistemas podem sofrer alterações significativas, resultando em concentração artificial de fluxos hídricos, processos erosivos e degradação de zonas ripárias.

Além das dimensões ecológicas e hidrológicas, a análise territorial do corredor deve considerar também aspectos socioeconômicos e de ocupação da terra. A BR-364 funciona como eixo de acessibilidade regional, influenciando padrões de uso do solo e favorecendo a expansão de atividades agropecuárias, assentamentos humanos e sistemas produtivos locais. Embora tais processos possam gerar oportunidades econômicas para as populações da região, também podem intensificar pressões sobre a cobertura florestal e ampliar processos de fragmentação territorial. Estudos sobre infraestrutura e desmatamento na Amazônia demonstram que rodovias frequentemente atuam como vetores de transformação do uso da terra, ampliando a acessibilidade a áreas anteriormente pouco conectadas (BARBER et al., 2014; ZHENG et al., 2025).

Nesse contexto, a aplicação do framework da Estrada-Parque Regenerativa ao trecho Manoel Urbano–Feijó parte do reconhecimento de que a rodovia opera como corredor socioecológico, no qual interagem processos de mobilidade, dinâmica territorial e funcionamento ecológico da paisagem. Em vez de tratar a infraestrutura apenas como elemento técnico isolado, o modelo propõe reinterpretar o corredor como sistema territorial complexo, no qual intervenções regenerativas podem contribuir para reorganizar relações entre transporte, biodiversidade e desenvolvimento regional.

A caracterização territorial apresentada nesta subseção fornece, portanto, a base analítica necessária para a etapa seguinte do estudo. A partir dessa leitura integrada do corredor, torna-se possível examinar como os princípios e componentes do framework regenerativo podem ser traduzidos em estratégias operacionais de intervenção, capazes de reduzir processos de degradação, restaurar conectividade ecológica e aumentar a resiliência socioambiental da infraestrutura rodoviária. Essas estratégias são discutidas na subseção seguinte, que apresenta a tradução do framework em componentes operacionais aplicáveis ao corredor da BR-364 no Acre.

4.2.2. Tradução do Framework em Componentes Operacionais de Projeto

A operacionalização do framework da Estrada-Parque Regenerativa no corredor da BR-364/AC exige a tradução dos princípios conceituais discutidos nas seções anteriores em componentes técnicos de projeto capazes de orientar intervenções concretas no território. Essa etapa constitui momento decisivo da proposta, pois demonstra de que maneira conceitos como conectividade ecológica, drenagem naturalizada, estabilização ecotécnica e acupuntura territorial podem ser convertidos em soluções infraestruturais aplicáveis ao corredor estudado. Em outras palavras, trata-se de transformar um arcabouço teórico em instrumentos operacionais de engenharia ecológica e planejamento territorial, capazes de orientar processos de requalificação da infraestrutura rodoviária amazônica.

A tradução do framework em componentes operacionais parte do reconhecimento de que rodovias implantadas em florestas tropicais

constituem sistemas lineares complexos, nos quais diferentes processos biofísicos e territoriais interagem ao longo do traçado. Nesses contextos, intervenções regenerativas não podem ser concebidas como soluções isoladas, mas como arranjos integrados de dispositivos e estratégias distribuídas ao longo do corredor. A aplicação do modelo regenerativo envolve, portanto, a articulação de múltiplos elementos técnicos que operam simultaneamente sobre conectividade ecológica, hidrologia, estabilidade geomorfológica e relação entre infraestrutura e paisagem.

Um primeiro conjunto de componentes refere-se aos dispositivos de conectividade ecológica, destinados a reduzir o efeito barreira da rodovia sobre a fauna e restabelecer fluxos biológicos entre fragmentos florestais. A implantação de passagens de fauna — inferiores, superiores ou adaptadas a estruturas hidráulicas existentes — deve ser orientada por análise espacial da paisagem, considerando proximidade de corpos d'água, corredores naturais de vegetação e padrões conhecidos de deslocamento de espécies. Essas estruturas podem ser complementadas por cercamentos direcionadores e por revegetação funcional das margens da via, criando gradientes ecológicos que aumentam a probabilidade de utilização das passagens pelos animais (VAN DER REE; SMITH; GRILO, 2015).

Outro conjunto fundamental de componentes operacionais está associado à reconfiguração hidrológica do corredor, por meio da implantação de sistemas de drenagem naturalizada. Em vez de canalizar rapidamente o escoamento superficial para pontos de descarga concentrada, a proposta regenerativa incorpora dispositivos capazes de promover retenção, infiltração e desaceleração da água ao longo da infraestrutura. Bioswales

vegetados, valas de infiltração, bacias de retenção distribuída e zonas vegetadas de amortecimento hidráulico podem ser integrados à seção viária para reduzir processos erosivos e restabelecer maior compatibilidade entre a estrada e a dinâmica hidrológica da paisagem (LU et al., 2024). Esses sistemas não apenas melhoram o desempenho ambiental da infraestrutura, mas também contribuem para aumentar sua resiliência frente a eventos extremos de precipitação.

A estabilização ecotécnica de taludes e margens da rodovia constitui outro componente essencial do framework operacional. Em ambientes tropicais úmidos, taludes resultantes de cortes e aterros frequentemente apresentam elevada suscetibilidade a processos erosivos e deslizamentos superficiais. A aplicação de técnicas de bioengenharia — como revegetação estrutural, uso de biomantas, implantação de sistemas radiculares estabilizadores e reconformação geomorfológica de taludes — permite reduzir a vulnerabilidade desses setores da infraestrutura, ao mesmo tempo em que contribui para restaurar funções ecológicas da vegetação marginal. Estudos recentes indicam que abordagens baseadas em bioengenharia podem oferecer soluções eficazes e ambientalmente compatíveis para estabilização de taludes em ambientes tropicais (STOKES et al., 2014).

A reorganização da seção viária e das interfaces entre infraestrutura e paisagem constitui outro elemento central na tradução operacional do modelo regenerativo. A incorporação de faixas vegetadas de transição ecológica entre a rodovia e a floresta adjacente pode contribuir para reduzir efeitos de borda, aumentar a infiltração hídrica e criar microhabitats que favorecem a biodiversidade local. Essas faixas funcionam como zonas de

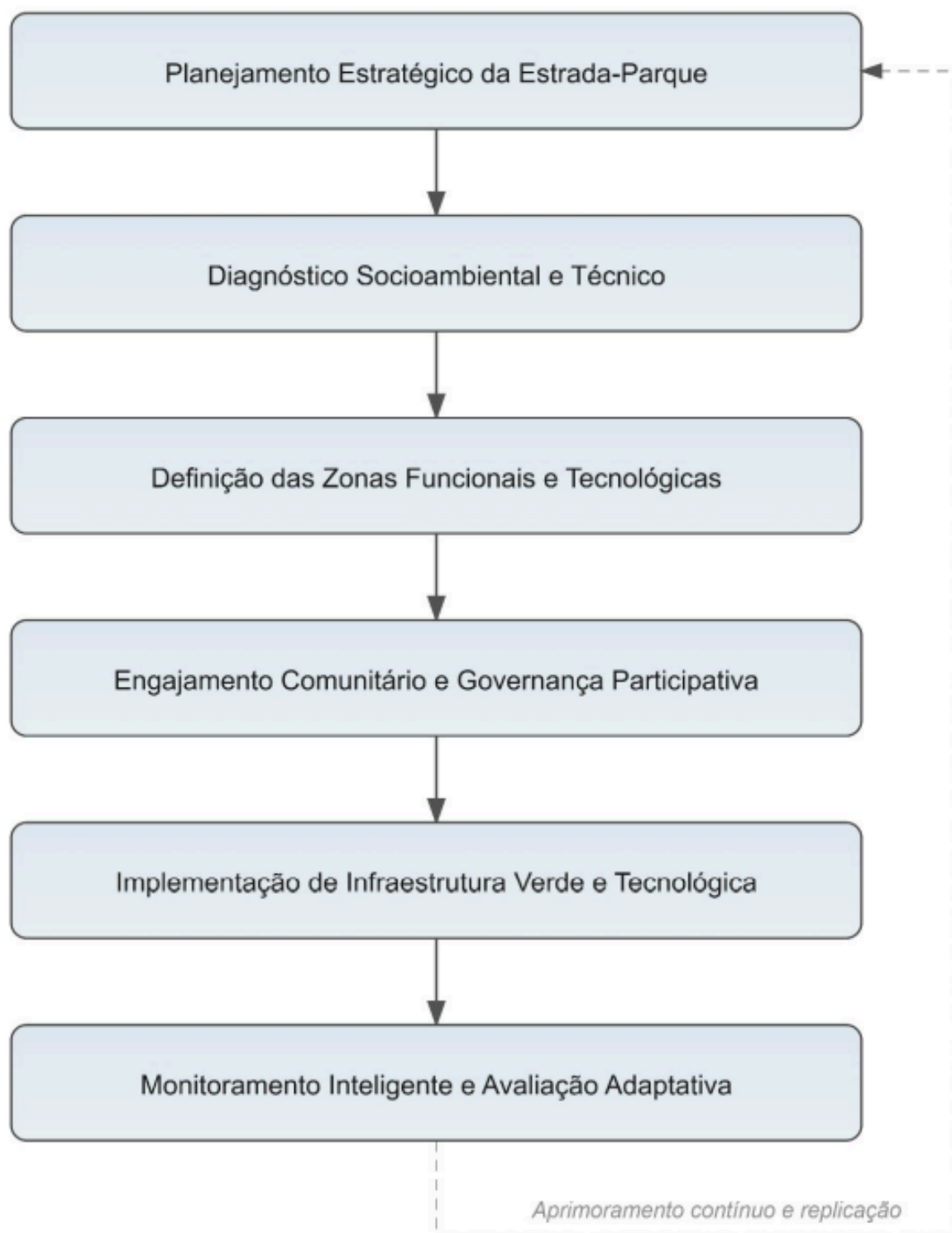
amortecimento ecológico, capazes de suavizar o contraste entre o ambiente artificial da infraestrutura e o ecossistema florestal circundante. Em corredores amazônicos, onde a abertura de bordas pode desencadear processos de degradação progressiva da vegetação, essa estratégia assume relevância particular.

A aplicação desses componentes técnicos não ocorre de forma homogênea ao longo do corredor, mas segue a lógica de priorização espacial discutida no princípio da acupuntura territorial. A identificação de pontos críticos — como travessias de fauna, áreas de instabilidade geomorfológica, rupturas de drenagem e interfaces degradadas entre estrada e floresta — permite concentrar intervenções regenerativas em locais de maior potencial de impacto sistêmico. Essa abordagem aumenta a eficiência ecológica e econômica das intervenções, permitindo que melhorias localizadas contribuam para reorganizar processos ambientais em escala mais ampla da paisagem.

A Figura 6 sintetiza essa tradução do framework em componentes operacionais aplicáveis ao corredor rodoviário. O esquema apresenta a integração entre diferentes dispositivos regenerativos — incluindo passagens de fauna, sistemas de drenagem naturalizada, estabilização ecotécnica e zonas vegetadas de transição — ilustrando como esses elementos podem ser organizados ao longo da seção da estrada para produzir ganhos simultâneos em conectividade ecológica, estabilidade hidrológica e resiliência territorial.

Figura 6. Tradução do framework da Estrada-Parque Regenerativa em componentes operacionais de projeto, integrando conectividade

ecológica, drenagem naturalizada, estabilização ecotécnica e reorganização da seção viária no corredor da BR-364/AC.



Nota: Framework de Planejamento e Implementação de Estradas-Parque. Estrutura de Governança para Infraestrutura Regenerativa.

Fonte: Elaboração própria (2026).

A operacionalização do modelo regenerativo no corredor Manoel Urbano–Feijó demonstra que a transformação de uma rodovia

convencional em Estrada-Parque não depende de soluções tecnológicas complexas ou de investimentos extraordinários, mas da reorganização estratégica do projeto infraestrutural à luz de princípios ecológicos e territoriais. Ao integrar diferentes dispositivos regenerativos em um sistema coerente de intervenção, o framework oferece caminho concreto para reduzir impactos ambientais, aumentar a resiliência da infraestrutura e promover maior compatibilidade entre mobilidade regional e conservação da biodiversidade amazônica.

4.2.3. Integração Entre Engenharia Ecológica, Paisagem e Desempenho Socioambiental

A aplicação do framework da Estrada-Parque Regenerativa no corredor da BR-364/AC evidencia que a transformação da infraestrutura rodoviária em instrumento de requalificação territorial depende da integração entre engenharia, paisagem e processos ecológicos. Em sistemas territoriais complexos como os da Amazônia, a infraestrutura não pode ser concebida apenas como solução técnica para a mobilidade, mas deve ser interpretada como elemento estruturador de relações socioecológicas que influenciam o funcionamento da paisagem em múltiplas escalas. A integração entre engenharia ecológica e planejamento territorial constitui, portanto, condição essencial para que a rodovia deixe de operar como vetor de fragmentação e passe a atuar como infraestrutura compatível com a dinâmica ecológica do território.

Nesse contexto, a engenharia ecológica desempenha papel central ao fornecer instrumentos técnicos capazes de reconciliar desempenho infraestrutural e funcionamento ambiental. Diferentemente das abordagens convencionais de mitigação, que

frequentemente tratam impactos ambientais como externalidades a serem compensadas após a implantação da obra, a engenharia ecológica propõe integrar processos naturais ao próprio desenho da infraestrutura (MITSCH; JØRGENSEN, 2003). Essa perspectiva permite que elementos como vegetação, solo, hidrologia e conectividade ecológica sejam incorporados ao projeto como componentes ativos do sistema infraestrutural, contribuindo simultaneamente para estabilidade física, desempenho ambiental e resiliência territorial.

A integração entre infraestrutura e paisagem também exige considerar a dimensão espacial da funcionalidade ecológica. A paisagem amazônica caracteriza-se por forte heterogeneidade ambiental, na qual cursos d'água, fragmentos florestais, áreas ripárias e mosaicos de uso da terra formam redes interdependentes de processos ecológicos. Quando uma rodovia atravessa esse sistema, ela introduz uma descontinuidade que pode alterar fluxos hidrológicos, padrões de dispersão de espécies e interações ecológicas entre diferentes unidades da paisagem. O framework regenerativo procura responder a esse desafio ao reorganizar a infraestrutura de forma a reduzir o efeito barreira e restabelecer conexões funcionais entre os elementos do território.

Nesse sentido, a integração entre engenharia ecológica e paisagem não se limita à adoção de dispositivos técnicos isolados, mas envolve a construção de uma arquitetura infraestrutural sensível à estrutura ecológica do território. Passagens de fauna, drenagem naturalizada, revegetação funcional de bordas e estabilização ecotécnica de taludes constituem componentes de um sistema integrado que opera simultaneamente sobre diferentes dimensões do corredor. A conectividade ecológica, por exemplo, não depende apenas da

existência de estruturas de travessia, mas também da continuidade da vegetação e da manutenção de corredores naturais ao longo da paisagem. Da mesma forma, a eficácia dos sistemas de drenagem naturalizada está diretamente relacionada à preservação de zonas ripárias e à capacidade de infiltração dos solos adjacentes.

Outro aspecto relevante refere-se ao desempenho socioambiental da infraestrutura, entendido como a capacidade do sistema rodoviário de gerar benefícios simultâneos para mobilidade, conservação ambiental e desenvolvimento regional. A abordagem regenerativa parte do princípio de que a infraestrutura pode produzir ganhos múltiplos quando concebida em consonância com os processos naturais do território. Em vez de representar apenas um vetor de transformação ambiental, a rodovia passa a atuar como elemento capaz de melhorar a estabilidade ecológica da paisagem, reduzir riscos hidrológicos e ampliar a resiliência territorial frente a mudanças climáticas e pressões antrópicas.

Essa perspectiva está alinhada com debates recentes sobre infraestrutura sustentável e soluções baseadas na natureza, que destacam a importância de integrar benefícios ambientais, sociais e econômicos no planejamento de obras públicas (AGHIMIEN et al., 2024; FOLKARD-TAPP et al., 2025). Ao incorporar dispositivos de engenharia ecológica e estratégias de requalificação paisagística, a Estrada-Parque Regenerativa busca produzir ganhos que transcendem o desempenho puramente funcional da infraestrutura. Entre esses ganhos destacam-se a redução de processos erosivos, a melhoria da qualidade da água, o aumento da conectividade ecológica e a valorização paisagística do corredor.

Além disso, a integração entre engenharia ecológica e paisagem contribui para fortalecer a resiliência socioecológica da região. Em sistemas florestais tropicais sujeitos a eventos climáticos extremos e pressões antrópicas crescentes, infraestruturas projetadas em consonância com processos naturais tendem a apresentar maior capacidade de adaptação e menor vulnerabilidade a falhas estruturais. Sistemas de drenagem naturalizada, por exemplo, podem amortecer picos de escoamento associados a chuvas intensas, enquanto a revegetação funcional de taludes contribui para estabilizar solos e reduzir riscos de erosão.

Sob essa perspectiva, o corredor da BR-364/AC pode ser reinterpretado não apenas como eixo logístico regional, mas como laboratório territorial para a experimentação de infraestruturas regenerativas em ambientes tropicais. A aplicação do framework proposto demonstra que é possível articular mobilidade e conservação da biodiversidade por meio de soluções infraestruturais que operam em sinergia com a paisagem. Essa abordagem representa avanço importante em relação aos modelos tradicionais de planejamento rodoviário, que frequentemente tratam o território apenas como suporte físico para a implantação da obra.

A integração entre engenharia ecológica, paisagem e desempenho socioambiental consolida, assim, a base operacional da Estrada-Parque Regenerativa no corredor estudado. Ao demonstrar a viabilidade técnica dessa abordagem, a aplicação do framework ao trecho Manoel Urbano–Feijó evidencia que a infraestrutura rodoviária amazônica pode ser redesenhada para desempenhar papel ativo na recomposição funcional do território, conciliando mobilidade regional, estabilidade ecológica e desenvolvimento territorial sustentável. A seção seguinte aprofunda essa análise por

meio da simulação de cenários prospectivos, avaliando os diferentes trajetos possíveis para o futuro do corredor rodoviário à luz do modelo regenerativo proposto.

4.3. Simulação de Cenários e Desempenho Prospectivo da Estrada-parque Regenerativa

A avaliação da pertinência de um modelo infraestrutural regenerativo para rodovias amazônicas não pode limitar-se à sua coerência conceitual nem à sua plausibilidade técnico-operacional. Para que a proposta adquira densidade analítica e poder demonstrativo, é necessário examinar como diferentes racionalidades de intervenção tendem a repercutir, ao longo do tempo, sobre a conectividade ecológica, a funcionalidade hidrológica, a estabilidade físico-territorial e a qualidade socioambiental do corredor. É precisamente esse o papel desta seção: desenvolver uma leitura prospectiva comparativa capaz de explicitar as diferenças de desempenho entre três configurações infraestruturais distintas — o cenário tendencial, o cenário mitigatório e o cenário regenerativo — aplicadas ao trecho da BR-364/AC entre Manoel Urbano e Feijó.

A simulação aqui desenvolvida não pretende produzir previsão determinística nem atribuir valores numéricos fechados a fenômenos cuja evolução depende de múltiplas variáveis biofísicas, institucionais e territoriais. Seu propósito é outro: construir uma matriz analítico-comparativa de trajetórias prováveis, baseada na literatura científica mobilizada ao longo do artigo, nas características do corredor estudado e na lógica interna do framework da Estrada-Parque Regenerativa. Trata-se de examinar como diferentes formas de conceber e manejar a infraestrutura tendem a intensificar, conter

ou reverter processos de degradação territorial ao longo do tempo. A força do exercício reside, portanto, em sua capacidade de explicitar contrastes estruturais entre racionalidades infraestruturais concorrentes, e não em simular numericamente, com pretensão exata, cada variável do sistema.

Essa abordagem é metodologicamente coerente com a natureza do estudo. Como o artigo opera na interface entre formulação conceitual, tradução operacional e aplicação territorial, a simulação prospectiva funciona como ponte entre a proposição do framework e a demonstração de sua superioridade relativa. A comparação entre cenários permite mostrar que a rodovia convencional, a rodovia mitigada e a Estrada-Parque Regenerativa não diferem apenas em intensidade de intervenção, mas sobretudo em trajetórias de desempenho. Enquanto o modelo tendencial tende a reproduzir e ampliar passivos ecológicos e hidrológicos, o mitigatório pode produzir ganhos incrementais, porém estruturalmente limitados, e o regenerativo se orienta à recomposição funcional do corredor, com efeitos potencialmente acumulativos de médio e longo prazo.

A construção dessa leitura prospectiva baseia-se em cinco dimensões centrais de análise, já definidas metodologicamente: conectividade ecológica, funcionalidade hidrológica, estabilidade hidrogeomorfológica e ecotécnica, qualidade socioecológica do corredor e retorno socioambiental do investimento. Essas dimensões foram selecionadas porque sintetizam, de forma consistente, os núcleos do problema investigado e os critérios de legitimidade ecológica e territorial de uma infraestrutura rodoviária em floresta tropical. Assim, a simulação não opera com parâmetros externos ou arbitrários, mas com as mesmas variáveis que

estruturaram a crítica ao paradigma convencional e fundamentaram a construção do framework regenerativo.

No caso específico do trecho Manoel Urbano–Feijó, a análise prospectiva assume relevância adicional porque o corredor reúne condições particularmente sensíveis à comparação entre racionalidades infraestruturais. A combinação entre floresta tropical úmida, rede hidrográfica densa, presença de zonas ripárias, vulnerabilidade geomorfológica, pressão territorial lateral e importância logística regional faz com que os efeitos da estrada se distribuam de forma ampla e cumulativa. Em contextos dessa natureza, pequenas diferenças no desenho e na gestão da infraestrutura tendem a produzir trajetórias bastante distintas de degradação, contenção ou regeneração. Isso torna o corredor especialmente adequado para demonstrar que a qualidade de uma rodovia amazônica não se mede apenas por sua capacidade de manter fluxo veicular, mas também por sua aptidão para coexistir com os processos ecológicos e hidrológicos que sustentam a funcionalidade da paisagem.

A seção está organizada em quatro subseções complementares. A primeira examina o cenário tendencial, correspondente à permanência do modelo rodoviário convencional. A segunda trata do cenário mitigatório, no qual são incorporadas medidas ambientais pontuais sem reconfiguração substancial da racionalidade infraestrutural dominante. A terceira desenvolve o cenário regenerativo, no qual os princípios e componentes do framework são articulados em arquitetura integrada de intervenção territorial. A quarta discute o retorno socioambiental do investimento e o horizonte de viabilidade de cada configuração, destacando o caráter cumulativo dos ganhos esperados no modelo

regenerativo. Com isso, a simulação deixa de ser mero exercício ilustrativo e passa a funcionar como demonstração analítica do argumento central do artigo: em corredores amazônicos, a passagem da mitigação à regeneração representa não apenas ajuste técnico, mas mudança substantiva de paradigma infraestrutural.

4.3.1. Cenário Tendencial: Permanência do Modelo Convencional

O cenário tendencial corresponde à manutenção da racionalidade rodoviária convencional, isto é, à continuidade de um padrão de infraestrutura orientado predominantemente por critérios de fluidez operacional, estabilidade imediata da plataforma e resposta corretiva a problemas localizados, sem reconfiguração substantiva da relação entre a estrada e a paisagem que ela atravessa. Nesse cenário, a rodovia permanece concebida como artefato linear relativamente autônomo em relação ao território, e os efeitos ecológicos, hidrológicos e geomorfológicos por ela produzidos continuam a ser tratados como externalidades secundárias, enfrentadas de modo fragmentado e reativo. Em termos prospectivos, trata-se do cenário mais próximo da trajetória histórica observada em grande parte das rodovias amazônicas, nas quais a expansão da mobilidade e da conectividade logística não foi acompanhada por incorporação estrutural de critérios de compatibilidade ecológica, reintegração hidrológica e resiliência territorial.

Sob o prisma da conectividade ecológica, a permanência do modelo convencional tende a conservar e, em certos casos, aprofundar o efeito barreira da rodovia sobre a paisagem. A ausência de dispositivos de travessia sistematicamente integrados ao corredor,

associada à persistência de bordas abruptas, faixas laterais simplificadas e elevada exposição da fauna ao tráfego, favorece a continuidade de processos de fragmentação funcional e mortalidade por atropelamento. Em contextos de floresta tropical úmida, nos quais a conectividade depende não apenas da presença de cobertura vegetal, mas da permeabilidade efetiva da paisagem para espécies com diferentes requisitos ecológicos, esse padrão tende a produzir redução de fluxos biológicos, maior isolamento entre remanescentes e progressiva simplificação da estrutura ecológica do corredor. A paisagem pode, inclusive, preservar aparência de continuidade em certos trechos, mas permanecer funcionalmente desconectada para diferentes grupos de fauna e para processos ecológicos que dependem de travessia segura e recorrente.

Do ponto de vista da funcionalidade hidrológica, o cenário tendencial mantém a lógica de rápida evacuação da água da plataforma, priorizando a proteção imediata do pavimento e da terraplenagem por meio de dispositivos convencionais de drenagem. Embora essa racionalidade possa oferecer ganhos operacionais de curto prazo em determinados segmentos, ela tende a reproduzir os mecanismos clássicos de artificialização hidrológica do corredor: concentração de escoamento, aceleração de fluxos, interrupção de microdrenagens naturais, erosão em saídas de bueiros e assoreamento de corpos hídricos adjacentes. Em paisagens amazônicas, onde a estabilidade do sistema depende de infiltração difusa, conectividade entre encostas e baixios, preservação de zonas ripárias e dissipação gradual da energia hidráulica, essa persistência da drenagem convencional tende a ampliar incompatibilidades entre infraestrutura e território. Em vez de acomodar a água, o corredor continua a expulsá-la de forma

abrupta, transferindo para o entorno parte expressiva dos custos físicos e ecológicos da obra.

Essa lógica repercute diretamente sobre a estabilidade hidrogeomorfológica e ecotécnica do trecho. No cenário tendencial, taludes, cortes, aterros e interfaces entre estrada e relevo seguem sendo tratados prioritariamente por medidas rígidas de contenção ou por manutenção corretiva de processos erosivos já instalados. A ausência de integração entre drenagem, revegetação funcional, dissipação hidráulica distribuída e proteção ripária favorece a recorrência de instabilidades localizadas, exportação de sedimentos e degradação progressiva de superfícies sensíveis do corredor. A infraestrutura permanece dependente de um ciclo de deterioração e correção, no qual a cada manifestação de falha física corresponde nova resposta pontual, sem alteração das causas sistêmicas que produzem o problema. Em horizonte prospectivo, isso tende a manter elevada vulnerabilidade do corredor a eventos extremos de precipitação, variações sazonais intensas e degradação gradual das interfaces geomorfológicas.

No plano da qualidade socioecológica do corredor, a permanência do modelo convencional também revela limitações estruturais. A rodovia segue operando como vetor de reorganização territorial sem mecanismos suficientes de contenção de seus efeitos laterais, o que favorece ampliação de bordas degradadas, aumento da acessibilidade predatória, pressão sobre remanescentes florestais e persistência de discontinuidades entre infraestrutura e paisagem. Em vez de funcionar como elemento capaz de melhorar a qualidade ecológica do território atravessado, a estrada tende a continuar irradiando disfunções: simplifica interfaces, expõe zonas ripárias, fragiliza taludes, amplia contrastes microclimáticos e contribui para

a territorialização cumulativa do risco. Em contexto amazônico, no qual pressões como desmatamento, fogo, fragmentação e secas se reforçam mutuamente, esse padrão tende a ampliar vulnerabilidades já existentes, em vez de contribuir para sua contenção.

A análise prospectiva do cenário tendencial torna-se ainda mais crítica quando se considera o retorno socioambiental do investimento. À primeira vista, a manutenção do paradigma convencional pode parecer menos onerosa, sobretudo por apoiar-se em repertório técnico consolidado, padronização de soluções e menor complexidade imediata de planejamento. Contudo, essa aparente vantagem inicial tende a ser compensada negativamente pela reprodução contínua de passivos ecológicos, custos recorrentes de manutenção corretiva, necessidade de novas contenções e intensificação de impactos territoriais cujos efeitos se acumulam ao longo do tempo. O cenário tendencial pode apresentar menor exigência de integração no curto prazo, mas tende a produzir maior custo socioambiental acumulado e menor capacidade de resiliência do corredor no médio e longo prazo. Sua lógica é defensiva e reativa: responde a falhas após sua manifestação, sem reorganizar o sistema que as produz.

Em consequência, o cenário tendencial representa a continuidade de uma trajetória infraestrutural em que a rodovia permanece centrada em desempenho operacional imediato, sem internalização efetiva das exigências ecológicas e territoriais que caracterizam corredores amazônicos. Sua principal limitação não está apenas na insuficiência de medidas ambientais, mas na própria permanência de uma racionalidade que separa mobilidade, água, biodiversidade e paisagem em compartimentos analíticos e operacionais distintos. É

justamente essa limitação estrutural que abre espaço para o cenário seguinte, no qual se introduzem medidas mitigatórias pontuais capazes de reduzir parte dos impactos observados, ainda que sem reconfiguração sistêmica da lógica viária dominante.

4.3.2. Cenário Mitigatório: Ganhos Incrementais e Limites Estruturais

O cenário mitigatório representa uma inflexão parcial em relação à trajetória tendencial, na medida em que incorpora medidas ambientais destinadas a reduzir impactos específicos da rodovia sobre o meio físico e biótico, sem, contudo, alterar de forma substantiva a racionalidade infraestrutural dominante. Nesse arranjo, a estrada permanece orientada prioritariamente por critérios convencionais de projeto, operação e manutenção, mas passa a incorporar dispositivos corretivos ou compensatórios, como passagens de fauna pontuais, revegetação localizada de taludes, recuperação de áreas degradadas, estruturas hidráulicas de proteção e medidas de controle de erosão. Em termos prospectivos, trata-se de um cenário plausível e amplamente reconhecível na prática infraestrutural contemporânea: há ganho ambiental em comparação ao modelo estritamente convencional, porém esse ganho permanece incremental e periférico, uma vez que as medidas adotadas não reorganizam a lógica estrutural do corredor.

Sob a ótica da conectividade ecológica, o cenário mitigatório tende a apresentar melhora relativa em relação ao cenário tendencial, sobretudo quando incorpora dispositivos de travessia de fauna, cercamentos direcionadores e alguma proteção de áreas ripárias e remanescentes próximos à via. Tais medidas podem reduzir atropelamentos em pontos específicos e favorecer travessias

localizadas, sobretudo para grupos faunísticos cujos padrões de deslocamento estejam minimamente contemplados pelo desenho das estruturas. Contudo, como essas soluções não derivam de uma reorganização sistêmica da paisagem, mas de inserções pontuais sobre um traçado e uma seção viária já definidos, sua capacidade de recompor conectividade em escala de corredor permanece limitada. Em outras palavras, há redução de parte do dano, mas não superação do efeito barreira como princípio estruturante do modelo. A conectividade continua a ser tratada como problema localizado a ser mitigado, e não como variável central de legitimidade ecológica da infraestrutura.

No plano da funcionalidade hidrológica, os ganhos mitigatórios também tendem a ocorrer de forma pontual e reativa. Medidas como bacias de contenção, dissipadores de energia, reforço de saídas de bueiros, revegetação de valetas e obras corretivas em trechos erosivos podem reduzir parcialmente a intensidade de falhas físicas e diminuir a exposição imediata da infraestrutura a eventos críticos. Em alguns segmentos, essas soluções podem inclusive melhorar o controle do escoamento e mitigar processos erosivos já instalados. No entanto, o sistema permanece estruturado pela lógica da rápida evacuação da água da plataforma, e não pela reintegração hidrológica do corredor. Assim, a mitigação tende a atuar sobre sintomas mais visíveis da artificialização do escoamento, sem reconfigurar as relações entre estrada, microdrenagens, planícies de inundação, zonas ripárias e dissipação natural da energia hidráulica. O resultado é um corredor que apresenta menos falhas agudas em pontos corrigidos, mas que continua operando segundo um metabolismo hídrico estruturalmente incompatível com a paisagem tropical úmida.

Essa limitação se reflete diretamente na estabilidade hidromorfológica e ecotécnica do cenário. A introdução de revegetação localizada, proteção de margens e contenções mais bem ajustadas pode reduzir a frequência ou a intensidade de processos erosivos em pontos críticos, sobretudo onde há intervenção direta sobre taludes, bordas e saídas de drenagem. Em determinados casos, isso pode produzir melhora visível na estabilidade local do corredor e diminuir custos imediatos de manutenção corretiva. Entretanto, a ausência de articulação entre drenagem naturalizada, bioengenharia, reconexão ripária e modulação da seção viária faz com que essas melhorias permaneçam compartimentadas. Em vez de constituir sistema de estabilização ecotécnica, a mitigação opera por remediação localizada de falhas pontuais. Como consequência, a vulnerabilidade global do corredor continua elevada, e a infraestrutura permanece dependente de ciclos recorrentes de correção, especialmente em contexto amazônico sujeito a elevada pluviosidade, sazonalidade intensa e perturbações acumulativas.

Quanto à qualidade socioecológica do corredor, o cenário mitigatório também se situa em posição intermediária. A presença de medidas ambientais pontuais tende a reduzir parte da visibilidade imediata dos impactos e pode melhorar certos segmentos da interface estrada-paisagem, sobretudo quando associada à recuperação de áreas degradadas, à proteção de APPs ou à revegetação marginal. Ainda assim, a estrada continua organizada como obra linear cuja relação com o território permanece predominantemente extrativa: a acessibilidade lateral gerada pela via segue pouco regulada pela lógica do projeto, os efeitos de borda não são enfrentados em chave sistêmica, e a paisagem adjacente continua sendo tratada como área de suporte

ou amortecimento da infraestrutura, e não como componente constitutivo de seu desempenho. Em contextos amazônicos, onde a propagação de impactos para além da plataforma se dá por abertura de acessos, fragmentação, fogo, pressão fundiária e degradação de interfaces, esse limite é particularmente relevante. A mitigação melhora o corredor, mas não o reconcebe.

Essa natureza intermediária do cenário aparece com nitidez quando se considera o retorno socioambiental do investimento. Em comparação ao modelo tendencial, a incorporação de medidas mitigatórias tende a produzir ganhos ambientais e físicos relativamente rápidos em pontos de alta criticidade, com redução de parte dos passivos mais visíveis e menor intensidade de certas falhas. Isso lhe confere vantagem operacional e política em muitos contextos, pois a mitigação costuma ser mais facilmente incorporável ao repertório institucional existente e exige menor deslocamento de paradigma projetual. Contudo, seu retorno de longo prazo permanece limitado por razões estruturais. Como as medidas adotadas não reorganizam a lógica do sistema, parte significativa dos custos ecológicos e físicos continua a ser reproduzida ao longo do tempo, ainda que em intensidade reduzida. Em vez de trajetória de recomposição funcional, o corredor passa a operar em regime de contenção parcial de danos. O investimento produz ganhos incrementais, mas não altera a direção fundamental do processo.

Em termos comparativos, o cenário mitigatório, o cenário mitigatório representa avanço importante em relação à permanência do modelo convencional, mas continua limitado pela permanência de uma racionalidade corretiva e setorial. Sua principal virtude está em demonstrar que a estrada pode causar menos dano

quando se incorporam medidas ambientais de melhor qualidade. Sua principal limitação, por outro lado, é mostrar que causar menos dano não equivale, necessariamente, a reorganizar o corredor em bases ecologicamente compatíveis e territorialmente resilientes. É precisamente nesse ponto que o cenário regenerativo se distingue: ele não se limita a reduzir impactos pontuais, mas procura reconfigurar a própria relação entre infraestrutura, paisagem e processos ecológicos, deslocando o foco da contenção de danos para a recomposição funcional do sistema.

4.3.3. Cenário Regenerativo: Reversão de Trajetórias de Degradação e Desempenho Sistêmico

O cenário regenerativo representa a inflexão mais profunda entre as alternativas comparadas, porque não se limita a reduzir impactos específicos da rodovia nem a qualificar pontualmente o repertório mitigatório existente. Seu traço distintivo reside na reorganização da lógica infraestrutural do corredor, deslocando o eixo de decisão do controle setorial de externalidades para a recomposição funcional da paisagem. Nesse arranjo, a estrada deixa de operar como artefato linear cuja legitimidade se esgota na fluidez do tráfego e na estabilidade imediata da plataforma e passa a ser concebida como corredor socioecológico multifuncional, cujo desempenho depende da integração entre conectividade ecológica, funcionalidade hidrológica, estabilização ecotécnica, modulação da seção viária e priorização espacial estratégica. Em termos prospectivos, esse cenário não significa ausência de impactos, mas mudança de trajetória: em vez de reproduzir ou apenas conter processos de degradação, a infraestrutura passa a atuar como suporte de recomposição territorial.

Sob a perspectiva da conectividade ecológica, o cenário regenerativo apresenta a maior capacidade de reversão das tendências de fragmentação induzidas pela rodovia. Isso ocorre porque a conectividade deixa de ser tratada como problema pontual, restrito a travessias isoladas, e passa a orientar o próprio desenho do corredor. Passagens de fauna, estruturas inferiores multifuncionais, reconexão de corredores ripários, vegetação-guia, cercamentos direcionadores e proteção de interfaces críticas deixam de funcionar como apêndices ambientais e passam a integrar uma arquitetura coerente de permeabilidade ecológica. O resultado esperado não é apenas a redução de atropelamentos em pontos específicos, mas a ampliação da atravessabilidade funcional da paisagem, com manutenção de fluxos biológicos em escala de corredor. Em florestas tropicais, onde a persistência populacional de muitas espécies depende de continuidade funcional entre manchas, tal mudança representa ganho qualitativo decisivo: a rodovia deixa de ser predominantemente barreira e passa a operar, ao menos em setores estratégicos, como interface permeável entre mobilidade humana e mobilidade ecológica.

Na dimensão da funcionalidade hidrológica, o cenário regenerativo também produz mudança substantiva de comportamento. Em vez de manter a água sob lógica de rápida expulsão da plataforma, o modelo reorganiza o corredor a partir de princípios de retenção distribuída, infiltração, desaceleração do escoamento, dissipação de energia e reconexão de fluxos interrompidos. Bioswales, faixas filtrantes, estruturas de retenção, dissipadores naturalizados e reconexão de microdrenagens deixam de ser dispositivos isolados para compor uma gramática hidrológica alternativa, mais compatível com o funcionamento da paisagem tropical úmida. Em termos prospectivos, isso tende a reduzir a concentração artificial de

fluxo, diminuir exportação de sedimentos, melhorar qualidade hídrica e ampliar a resiliência do corredor frente a eventos extremos. O ganho central, porém, não está apenas em “melhorar a drenagem”, mas em alterar a relação entre estrada e água: a infraestrutura deixa de violentar o regime hidrológico local e passa a operar em maior consonância com ele.

Essa transformação repercute diretamente sobre a estabilidade hidrogeomorfológica e ecotécnica do trecho. No cenário regenerativo, taludes, cortes, aterros e interfaces com drenagens são tratados por meio de arranjos que combinam bioengenharia, revegetação funcional, dissipação hidráulica distribuída, proteção ripária e, quando necessário, suportes estruturais articulados a componentes vivos. Em consequência, a estabilidade deixa de depender exclusivamente de respostas rígidas e corretivas e passa a ser construída como propriedade emergente da interação entre solo, vegetação, água e relevo. Isso não elimina integralmente a necessidade de manutenção nem impede a ocorrência de eventos críticos em contexto amazônico; contudo, altera substantivamente o regime de vulnerabilidade do corredor. Em vez de sucessão cíclica entre falha e correção, passa a haver tendência de fortalecimento progressivo das interfaces, à medida que a vegetação se estabelece, os fluxos se redistribuem de forma menos agressiva e os pontos críticos são tratados por lógica ecotécnica integrada. O desempenho geomorfológico, nesse caso, deixa de ser apenas defesa da obra e passa a integrar a recomposição da paisagem.

No plano da qualidade socioecológica do corredor, o cenário regenerativo é o único dos três que efetivamente altera a direção do processo territorial. A estrada não permanece como vetor passivo de acessibilidade predatória nem como simples eixo que transfere

custos ecológicos ao entorno. Ao incorporar conectividade, reconfiguração hídrica, restauração ripária, seção viária de menor impacto e acupuntura territorial, a infraestrutura passa a reduzir parte das condições que favorecem propagação lateral da degradação. Bordas deixam de ser tratadas como resíduos do projeto e passam a ser manejadas como interfaces ecologicamente sensíveis; zonas ripárias deixam de ser apenas restrições normativas e passam a funcionar como eixos estruturantes de estabilidade e conectividade; áreas críticas deixam de ser corrigidas apenas após a manifestação do dano e passam a ser priorizadas como nós de recomposição funcional. Em consequência, o corredor tende a apresentar melhoria não apenas ambiental, mas também territorial: reduz-se a disjunção entre engenharia e paisagem, e a estrada passa a produzir compatibilidades em vez de apenas administrar incompatibilidades.

O aspecto mais relevante desse cenário, contudo, está em seu desempenho sistêmico. Ao contrário dos cenários tendencial e mitigatório, nos quais os componentes da infraestrutura operam de forma relativamente compartimentada, o modelo regenerativo baseia-se em interdependência deliberada entre funções. A passagem de fauna pode compartilhar estrutura com a drenagem; a faixa ripária restaurada protege a água, melhora conectividade e reforça estabilidade de margens; a drenagem naturalizada reduz erosão, qualifica bordas e favorece vegetação funcional; a seção viária de baixo impacto amplia a capacidade de acomodar tais componentes sem intensificar artificialização espacial; a acupuntura territorial permite concentrar esforços em pontos nos quais múltiplas vulnerabilidades convergem. O resultado dessa arquitetura não é mera soma de benefícios setoriais, mas produção de sinergias socioecológicas. Em termos prospectivos, isso significa

que ganhos em uma dimensão tendem a reforçar ganhos em outras, produzindo efeito de realimentação positiva que não se observa nos cenários anteriores.

Esse comportamento sistêmico é especialmente importante em contexto amazônico, marcado por pressões compostas e riscos cumulativos. Em um bioma sujeito à interação entre desmatamento, fogo, fragmentação, secas extremas e degradação florestal, soluções infraestruturais setoriais tendem a ser absorvidas pela própria complexidade do sistema sem alterar sua trajetória geral. O cenário regenerativo diferencia-se precisamente por responder a essa complexidade com uma lógica também sistêmica. Em vez de enfrentar atropelamentos sem tratar bordas, ou erosão sem tratar conectividade, ou drenagem sem tratar paisagem, o modelo opera por integração entre vulnerabilidades e funções. Isso lhe confere maior capacidade adaptativa e maior potencial de produzir estabilidade territorial em horizonte ampliado. A estrada deixa de ser apenas objeto resistente e passa a integrar um sistema mais apto a absorver perturbações sem colapso funcional.

Também sob o prisma da resiliência climática, o cenário regenerativo apresenta vantagem clara. Em um contexto de intensificação de extremos hidrológicos, maior inflamabilidade de bordas e crescente necessidade de deslocamento adaptativo da fauna, a infraestrutura convencional tende a amplificar vulnerabilidades, e a mitigatória tende apenas a moderá-las. Já o corredor regenerativo incorpora adaptação como parte de sua própria racionalidade. Estruturas de conectividade tornam-se instrumentos de mobilidade ecológica em paisagens em transformação; drenagem naturalizada amplia capacidade de amortecimento frente a chuvas intensas; restauração ripária e

revegetação funcional reduzem exposição de bordas e ajudam a moderar microclima local; a priorização espacial permite responder com maior precisão a setores mais suscetíveis a falhas ou propagação de danos. Em síntese, o cenário regenerativo não foi concebido apenas para “funcionar melhor” em condições atuais, mas para aumentar a capacidade do corredor de permanecer funcional em condições futuras mais instáveis.

Por fim, é no horizonte de longo prazo que o cenário regenerativo revela sua diferença mais robusta. Enquanto o cenário tendencial reproduz custos cumulativos e o mitigatório oferece ganhos localizados, porém limitados estruturalmente, o regenerativo tende a produzir retornos socioambientais acumulativos. Parte desses retornos decorre de menor recorrência de falhas físicas, menor necessidade de correções sucessivas em pontos reiteradamente instáveis e melhor integração entre componentes do corredor. Outra parte decorre de ganhos territoriais mais amplos: melhoria da qualidade ecológica das interfaces, maior conectividade da paisagem, redução de passivos hidrológicos e fortalecimento da compatibilidade entre mobilidade regional e conservação. Em termos prospectivos, isso significa que o modelo regenerativo não apenas reduz a velocidade da degradação; ele cria condições para sua inflexão e, em determinados setores, para a reversão de trajetórias regressivas.

Tomado em conjunto, o cenário regenerativo representa a única das três configurações analisadas em que a infraestrutura rodoviária passa a operar como agente de recomposição funcional do corredor, e não apenas como fonte de impactos a serem contidos. Sua superioridade relativa não decorre de idealização abstrata, mas da capacidade de articular, em arquitetura coerente, os princípios e

componentes discutidos ao longo do artigo. É justamente essa capacidade de produzir desempenho sistêmico e trajetória territorial distinta que permitirá, na subseção seguinte, discutir de forma mais precisa o retorno socioambiental do investimento e o horizonte de viabilidade da Estrada-Parque Regenerativa.

4.3.4. Retorno Socioambiental do Investimento e Horizonte de Viabilidade

A comparação prospectiva entre os três cenários evidencia que a discussão sobre a viabilidade de uma Estrada-Parque Regenerativa não pode ser reduzida ao custo inicial de implantação nem ao repertório tradicional de análise econômica de obras lineares. Em corredores amazônicos, onde os impactos da infraestrutura se distribuem por múltiplas dimensões ecológicas, hidrológicas, geomorfológicas e territoriais, a avaliação da viabilidade precisa incorporar o retorno socioambiental do investimento como categoria analítica central. Isso significa reconhecer que a qualidade de uma intervenção rodoviária não se mede apenas pela capacidade de manter a fluidez do tráfego ou de reduzir custos imediatos de construção, mas também pela sua aptidão para evitar passivos futuros, diminuir recorrência de falhas, reduzir degradação da paisagem e ampliar a resiliência do território ao longo do tempo.

No cenário tendencial, o investimento inicial pode aparentar maior simplicidade operacional e menor complexidade projetual, sobretudo porque se apoia em tipologias já consolidadas, rotinas técnicas padronizadas e menor exigência de integração entre disciplinas. Contudo, essa vantagem inicial é apenas aparente quando o corredor é analisado em horizonte mais amplo. A permanência da lógica convencional tende a reproduzir um ciclo de

custos cumulativos, tanto físicos quanto socioambientais: maior frequência de erosão e instabilidade em interfaces sensíveis, necessidade recorrente de correções localizadas, degradação progressiva de drenagens e zonas ripárias, ampliação do efeito barreira e maior transferência de impactos ao entorno. O modelo convencional tende a externalizar parte expressiva de seus custos reais, deslocando-os para o tempo futuro, para a paisagem adjacente e para a própria necessidade de manutenção corretiva permanente. O que parece financeiramente mais simples no curto prazo tende a mostrar-se estruturalmente mais oneroso quando considerado o ciclo de vida do corredor.

O cenário mitigatório produz melhora relativa nesse quadro ao incorporar medidas capazes de reduzir parte dos danos mais visíveis e frequentes. Em certos segmentos, a introdução de revegetação, contenções melhor qualificadas, dispositivos de travessia de fauna e obras corretivas de drenagem pode gerar redução de custos de manutenção e diminuição de passivos localizados. Há, portanto, retorno incremental relevante, sobretudo porque a mitigação reduz a intensidade de algumas falhas recorrentes e melhora pontualmente a relação entre a via e o território. Ainda assim, esses ganhos permanecem limitados por uma contradição de fundo: como a lógica infraestrutural dominante não é alterada, a estrutura do problema continua em operação. O corredor passa a funcionar “com menos dano”, mas não em nova racionalidade. Em consequência, o retorno socioambiental da mitigação tende a estabilizar-se em patamar intermediário, produzindo benefícios localizados, porém insuficientes para alterar a trajetória global de degradação e vulnerabilidade.

É no cenário regenerativo que o retorno socioambiental do investimento assume natureza qualitativamente distinta. Isso ocorre porque os recursos mobilizados deixam de atuar apenas sobre sintomas e passam a incidir sobre a própria organização funcional do corredor. Ao integrar conectividade ecológica, drenagem naturalizada, bioengenharia de taludes, restauração ripária, modulação da seção viária e acupuntura territorial, a Estrada-Parque Regenerativa tende a gerar benefícios que não se esgotam no ponto da intervenção, mas se irradiam para o sistema como um todo. Parte desse retorno decorre da redução de passivos físicos: menor concentração erosiva, maior estabilidade de interfaces, menor exportação de sedimentos, menor recorrência de correções pontuais e maior compatibilidade hidráulica entre estrada e paisagem. Outra parte decorre de ganhos ecológicos e territoriais: recomposição de conectividade funcional, melhoria de zonas ripárias, redução do efeito barreira, qualificação da borda florestal e maior resiliência do corredor frente a perturbações compostas. O diferencial do modelo, portanto, não está apenas em produzir benefícios adicionais, mas em produzir benefícios cumulativos e sinérgicos.

Essa natureza acumulativa é central para compreender o horizonte de viabilidade da proposta. Em soluções regenerativas, especialmente em paisagens tropicais, parte dos ganhos não se manifesta integralmente no curto prazo. A revegetação funcional requer tempo para estabelecimento; a estabilização ecotécnica tende a se fortalecer à medida que os componentes vivos se consolidam; a restauração ripária amplia seu desempenho com a evolução sucessional; a conectividade ecológica melhora progressivamente conforme as interfaces entre dispositivos, vegetação e paisagem passam a operar de forma mais integrada. Isso significa que o retorno do investimento deve ser lido menos

como resposta imediata e mais como trajetória de qualificação progressiva do corredor. Em contraste com soluções defensivas, cujo desempenho tende a decair ou a exigir reforços recorrentes, o modelo regenerativo possui potencial de fortalecimento ao longo do tempo, desde que acompanhado por manutenção ecológica, monitoramento adaptativo e gestão territorial coerente.

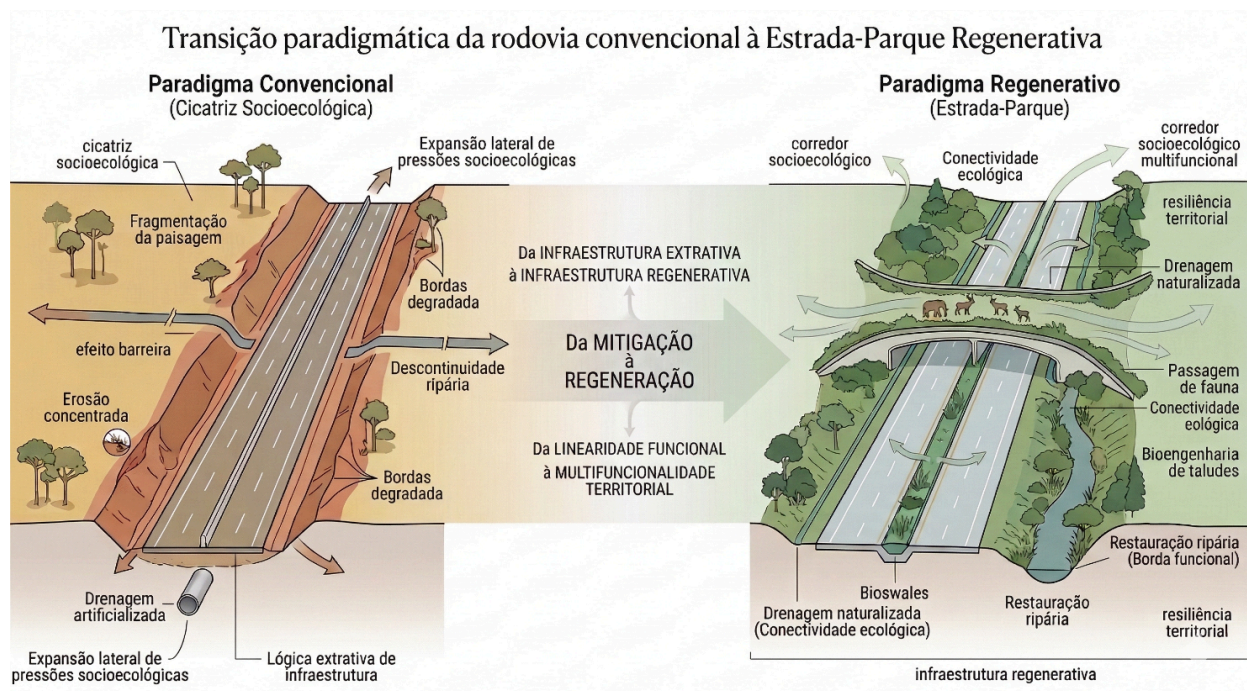
Sob o ponto de vista econômico ampliado, esse horizonte sugere que a viabilidade da Estrada-Parque Regenerativa deve ser aferida em chave de ciclo de vida socioecológico da infraestrutura, e não apenas por comparação de custo inicial entre alternativas. Quando considerados os custos evitados com manutenção corretiva recorrente, os passivos associados à degradação hidrológica, os impactos da erosão e do assoreamento, a perda de funcionalidade ecológica do entorno e a maior vulnerabilidade a eventos extremos, o cenário regenerativo tende a apresentar racionalidade mais robusta de médio e longo prazo. Isso não significa afirmar que todo componente regenerativo seja, desde o início, menos oneroso do que a solução convencional. Significa, isto sim, que a combinação entre custo inicial, durabilidade territorial, redução de passivos e benefícios sistêmicos torna o modelo progressivamente mais vantajoso à medida que se amplia o horizonte de análise.

Esse argumento é particularmente forte em contextos amazônicos, onde a incompatibilidade entre infraestrutura e paisagem costuma produzir custos difusos, persistentes e de difícil reversão. Em ambientes sujeitos a fortes pressões hidrológicas, fragilidade geomorfológica, efeitos de borda, fragmentação ecológica e risco de propagação lateral da degradação, cada falha de projeto ou cada solução excessivamente rígida tende a desencadear cadeias de custo que ultrapassam a seção da via e alcançam o território

adjacente. Nessa moldura, investir em infraestrutura regenerativa não significa apenas “gastar mais com ambiente”, mas reduzir a produção futura de vulnerabilidades e aumentar a capacidade adaptativa do corredor. O retorno socioambiental, portanto, não deve ser compreendido como benefício acessório ou intangível, mas como parte constitutiva da própria racionalidade da obra.

A Figura 7 sintetiza essa leitura ao representar, em horizonte temporal ampliado, a diferença de trajetória entre o modelo rodoviário convencional e a Estrada-Parque Regenerativa. O esquema evidencia que, embora o cenário regenerativo possa demandar maior complexidade inicial de concepção e implantação, sua curva de desempenho tende a superar progressivamente a do modelo convencional à medida que os benefícios ecológicos, hidrológicos, territoriais e de estabilidade física se acumulam. Já o cenário convencional, embora possa parecer mais simples no curto prazo, tende a apresentar perda relativa de desempenho em razão da recorrência de passivos e da amplificação de custos associados à degradação do corredor.

Figura 7. Horizonte de retorno socioambiental e desempenho prospectivo da Estrada-Parque Regenerativa em comparação ao modelo rodoviário convencional.



Fonte: Elaboração própria (2026).

No conjunto dos achados, a análise comparativa sugere que a viabilidade da Estrada-Parque Regenerativa não deve ser julgada exclusivamente pelo critério do menor custo inicial, mas pelo seu potencial de produzir estabilidade territorial, redução de passivos, resiliência socioecológica e retorno cumulativo de longo prazo. É justamente essa mudança de horizonte — do custo imediato para o desempenho socioambiental do ciclo de vida — que distingue a racionalidade regenerativa da mitigatória e da convencional. Com isso, conclui-se a etapa de simulação prospectiva do artigo, abrindo caminho para a discussão integrada de suas contribuições teóricas, limites de replicabilidade e implicações para planejamento territorial, clima e conservação da biodiversidade.

4.4. Discussão Integrada

Os resultados apresentados nas seções anteriores permitem afirmar que a principal contribuição deste artigo não reside apenas na proposição de novos dispositivos técnicos para rodovias amazônicas, mas na formulação de uma nova racionalidade infraestrutural para

corredores implantados em florestas tropicais. A Estrada-Parque Regenerativa, tal como construída neste estudo, não corresponde à simples soma de passagens de fauna, bioswales, revegetação funcional, contenções ecotécnicas e ajustes geométricos da seção viária. Seu significado é mais profundo: trata-se de um modelo que reorganiza a relação entre infraestrutura, paisagem e território, deslocando o foco da contenção marginal de danos para a recomposição funcional do corredor. Nessa perspectiva, a discussão aqui desenvolvida parte da premissa de que a relevância do framework só pode ser adequadamente compreendida quando se examina sua capacidade de articular, em uma mesma arquitetura analítica e projetual, conectividade ecológica, funcionalidade hidrológica, estabilidade físico-territorial e resiliência socioambiental.

Essa constatação é especialmente importante porque o debate sobre sustentabilidade da infraestrutura, em muitos contextos, ainda permanece preso a uma tensão não resolvida entre dois níveis de resposta. De um lado, acumulam-se evidências robustas de que rodovias implantadas em ambientes sensíveis fragmentam habitats, alteram regimes hidrológicos, intensificam efeitos de borda e irradiam pressões territoriais para além da plataforma viária. De outro, grande parte das respostas institucionais e projetuais continua operando de forma corretiva, setorial e incremental, por meio da inserção de medidas mitigatórias periféricas a um modelo cuja racionalidade de base permanece inalterada. O presente artigo situa-se precisamente nesse intervalo crítico entre diagnóstico e transformação: ele parte do reconhecimento dos limites estruturais do paradigma convencional e busca demonstrar que a superação desses limites exige mais do que qualificação pontual da mitigação; exige reespecificação da própria infraestrutura como sistema socioecológico multifuncional.

A discussão integrada dos resultados mostra que essa reespecificação se torna plausível quando os diferentes componentes do corredor deixam de ser tratados como compartimentos técnicos autônomos e passam a ser lidos como dimensões interdependentes de um mesmo desempenho territorial. A conectividade ecológica não pode ser efetivamente restabelecida se a paisagem adjacente continuar hidrológicamente rompida e ecologicamente degradada; a drenagem naturalizada não alcança pleno desempenho se a seção viária, os taludes e as zonas ripárias permanecerem organizados segundo lógica rigidamente cinza; a bioengenharia de taludes perde potência quando dissociada da revegetação funcional, da dissipação de energia hidráulica e da estabilidade das interfaces com a drenagem; e a priorização espacial deixa de gerar ganhos sistêmicos quando não está articulada a um conjunto coerente de princípios estruturantes. O que os resultados sugerem é que a regeneração não decorre da mera presença de componentes “ambientais”, mas da qualidade das relações que esses componentes estabelecem entre si ao longo do corredor.

Essa leitura permite compreender por que o framework da Estrada-Parque Regenerativa apresenta maior densidade analítica do que abordagens baseadas apenas na adoção isolada de soluções baseadas na natureza ou de infraestrutura verde-azul. Tais repertórios são indispensáveis e constituem parte importante do modelo, mas, isoladamente, não garantem mudança de paradigma. Uma rodovia pode incorporar vegetação, dispositivos hidráulicos mais brandos ou passagens de fauna e, ainda assim, permanecer subordinada a uma lógica de projeto que trata água, biodiversidade, solo e paisagem como variáveis externas a serem administradas. O avanço proposto neste estudo consiste justamente em reunir essas

soluções sob uma estrutura unificadora, na qual o desempenho da infraestrutura passa a ser avaliado pela sua capacidade de recompor funções degradadas e de reduzir a produção territorial de vulnerabilidades. A originalidade do framework, portanto, não está na novidade absoluta de cada técnica, mas na forma como elas são reinscritas em uma racionalidade regenerativa.

Os resultados também revelam que a aplicação do modelo ao trecho Manoel Urbano–Feijó da BR-364/AC possui valor que ultrapassa a demonstração localizada. O corredor analisado funciona como caso empírico particularmente expressivo porque reúne, de modo nítido, os principais mecanismos de incompatibilidade entre infraestrutura convencional e paisagem amazônica: fragmentação ecológica, desconexão hidrológica, vulnerabilidade geomorfológica, pressão territorial lateral e acúmulo de passivos socioambientais. Ao mostrar que esses problemas podem ser lidos e enfrentados por meio de um framework unificado, o estudo sugere que a rodovia amazônica não precisa ser pensada apenas como infraestrutura de circulação submetida a condicionantes ambientais, mas como interface territorial cuja própria legitimidade depende da qualidade de suas relações com a floresta, com a água, com a biodiversidade e com as dinâmicas humanas do entorno.

Outro aspecto relevante da discussão diz respeito à escala temporal do problema. Um dos limites do paradigma convencional, bem como de parte significativa das respostas mitigatórias, está em sua orientação preferencial para o curto prazo: protege-se o pavimento, corrige-se o processo erosivo já manifestado, reconstitui-se pontualmente o talude, implanta-se um dispositivo para responder a um impacto específico. O modelo regenerativo, ao contrário, introduz uma lógica de médio e longo prazo, na qual a infraestrutura

é avaliada por sua capacidade de produzir trajetórias mais favoráveis de estabilidade, conectividade e resiliência ao longo do tempo. Isso altera profundamente o modo de compreender a viabilidade da intervenção. Em vez de perguntar apenas quanto custa implantar determinado dispositivo, passa-se a perguntar que tipo de corredor está sendo produzido, quais passivos estão sendo evitados, que funções estão sendo recompostas e que horizonte territorial está sendo aberto pela obra.

É justamente essa mudança de horizonte que confere densidade à discussão integrada. O artigo demonstra que a transição para uma Estrada-Parque Regenerativa não deve ser interpretada como aperfeiçoamento cosmético ou como resposta ambiental acessória, mas como mudança substantiva de paradigma na engenharia viária em florestas tropicais. Ao deslocar o foco da simples redução de danos para a recomposição funcional do corredor, o framework proposto reposiciona a estrada no interior de uma lógica de cuidado territorial, na qual mobilidade, conservação e estabilidade socioecológica deixam de ser objetivos antagônicos e passam a constituir dimensões articuláveis de um mesmo projeto infraestrutural. É a partir dessa base que se tornam possíveis, nas subseções seguintes, discussões mais específicas sobre as contribuições teóricas do modelo, seu potencial de replicabilidade e adaptação contextual, e suas implicações para planejamento territorial, clima e conservação da biodiversidade.

4.4.1. Contribuições Teóricas do Framework para a Engenharia Viária em Florestas Tropicais

A primeira contribuição teórica relevante do framework da Estrada-Parque Regenerativa reside na sua capacidade de rearticular o

campo da engenharia viária com a ecologia da paisagem, superando uma separação histórica entre diagnóstico ambiental e decisão projetual. Durante décadas, a literatura científica sobre ecologia de estradas demonstrou com elevado grau de robustez os efeitos da infraestrutura rodoviária sobre fragmentação de habitats, conectividade da paisagem, mortalidade de fauna e reorganização de fluxos hidrológicos em ambientes florestais. Contudo, em muitos contextos, essas evidências permaneceram relativamente apartadas do núcleo do projeto infraestrutural, sendo mobilizadas principalmente em avaliações de impacto ou em etapas posteriores de mitigação. O framework proposto neste artigo procura superar essa dissociação ao transformar categorias analíticas da ecologia de estradas em princípios estruturantes de projeto, de modo que a conectividade ecológica, a funcionalidade hidrológica e a estabilidade da paisagem deixem de ser apenas variáveis de avaliação e passem a integrar o próprio processo de concepção da infraestrutura.

Uma segunda contribuição teórica consiste na integração entre infraestrutura verde-azul, soluções baseadas na natureza e pensamento regenerativo em uma arquitetura conceitual aplicada especificamente a rodovias em florestas tropicais. Embora esses repertórios já tenham sido amplamente discutidos em campos como planejamento urbano, gestão de águas pluviais e adaptação climática, sua aplicação ao domínio da engenharia rodoviária em contextos amazônicos ainda permanece incipiente. O presente estudo demonstra que esses instrumentos podem ser reorganizados em uma estrutura coerente de intervenção territorial, na qual dispositivos como bioswales, passagens de fauna, restauração ripária, revegetação funcional e bioengenharia de taludes deixam de operar como soluções isoladas e passam a

constituir componentes interdependentes de um sistema regenerativo. Essa integração conceitual amplia o alcance analítico desses repertórios e mostra que sua eficácia depende menos da adoção pontual de técnicas e mais da qualidade das relações funcionais estabelecidas entre elas ao longo do corredor.

A terceira contribuição do framework refere-se à redefinição da rodovia como corredor socioecológico multifuncional, e não como infraestrutura linear autônoma cuja legitimidade se esgota na fluidez do tráfego e na estabilidade da plataforma. Ao deslocar o foco da obra em si para o sistema territorial que ela reorganiza, o artigo propõe uma mudança de perspectiva que aproxima a engenharia viária do pensamento sistêmico da ecologia da paisagem. Nessa leitura, a estrada passa a ser interpretada como interface complexa entre mobilidade, hidrologia, biodiversidade, geomorfologia e uso da terra. Tal deslocamento possui implicações teóricas importantes, pois sugere que o desempenho infraestrutural em ambientes tropicais não pode ser adequadamente compreendido sem considerar a capacidade da obra de coexistir com os processos ecológicos que estruturam a paisagem. Nessa formulação, a legitimidade da rodovia deixa de ser avaliada apenas por critérios operacionais e passa a depender também de sua compatibilidade funcional com o território atravessado.

Uma quarta contribuição teórica emerge da incorporação da noção de acupuntura territorial como princípio organizador da intervenção regenerativa. A literatura sobre infraestrutura verde e planejamento ecológico já reconhece que os benefícios dessas soluções dependem fortemente de sua localização estratégica na paisagem. O framework desenvolvido neste artigo avança ao transformar essa intuição em componente estruturante da modelagem de

corredores rodoviários amazônicos. A acupuntura territorial propõe que intervenções regenerativas sejam priorizadas em pontos de maior sensibilidade socioecológica — como travessias de fauna, rupturas de drenagem, taludes instáveis, bordas críticas e zonas ripárias degradadas — nos quais ações localizadas podem produzir efeitos sistêmicos amplificados. Essa abordagem oferece alternativa analítica tanto à uniformização das soluções infraestruturais quanto à fragmentação das respostas corretivas, permitindo que a engenharia opere de forma territorialmente inteligente e ecologicamente orientada.

O framework também contribui para ampliar o debate sobre regeneração no campo da infraestrutura, conceito que, embora crescente na literatura contemporânea, ainda carece de tradução operacional consistente em projetos de engenharia de grande escala. O estudo demonstra que a regeneração não deve ser entendida apenas como intensificação da sustentabilidade ou como refinamento das práticas mitigatórias existentes. Ela implica mudança mais profunda de paradigma, na qual a infraestrutura deixa de ser concebida apenas como meio de transporte ou suporte físico de circulação e passa a ser interpretada como instrumento de recomposição funcional da paisagem. Nesse sentido, a Estrada-Parque Regenerativa oferece contribuição teórica relevante ao demonstrar que a regeneração infraestrutural pode ser operacionalizada por meio de princípios claros, componentes técnicos articulados e lógica territorial coerente, abrindo caminho para novas agendas de pesquisa e inovação na engenharia viária em ambientes tropicais.

Em síntese, as contribuições teóricas do framework proposto neste artigo situam-se na interseção entre ecologia de estradas,

engenharia ecológica, infraestrutura verde-azul e planejamento territorial regenerativo. Ao integrar esses campos em uma estrutura conceitual aplicada a rodovias amazônicas, o estudo propõe não apenas uma alternativa técnica à infraestrutura convencional, mas um novo modo de compreender o papel da engenharia viária na organização de paisagens socioecológicas complexas. Essa base conceitual estabelece o fundamento para discutir, na subseção seguinte, o potencial de replicabilidade do modelo, suas possibilidades de adaptação a diferentes contextos territoriais e os limites institucionais e metodológicos de sua implementação.

4.4.2. Potencial de Replicabilidade, Adaptação Contextual e Limites da Proposta

A proposição de um framework infraestrutural regenerativo para rodovias amazônicas suscita naturalmente a questão de sua replicabilidade e adaptabilidade a outros contextos territoriais. Embora o modelo tenha sido desenvolvido a partir da análise do trecho Manoel Urbano–Feijó da BR-364/AC, sua relevância científica não se restringe a esse corredor específico. O que se propõe no artigo não é um desenho padronizado de estrada a ser reproduzido mecanicamente em diferentes territórios, mas uma estrutura conceitual e metodológica capaz de orientar processos de requalificação infraestrutural em paisagens ecologicamente sensíveis. Nessa ótica, o potencial de replicação do framework reside menos na repetição literal de suas soluções e mais na transferibilidade de seus princípios estruturantes: conectividade ecológica, reintegração hidrológica, estabilização ecotécnica, modulação da seção viária e priorização espacial estratégica.

A replicabilidade do modelo torna-se particularmente relevante em regiões onde infraestruturas lineares atravessam sistemas ecológicos complexos e vulneráveis, como ocorre em grande parte da Amazônia e em diversos outros biomas tropicais. Em tais contextos, rodovias frequentemente operam como vetores de fragmentação da paisagem, reorganização hidrológica e intensificação de pressões territoriais. A adoção de uma abordagem regenerativa pode oferecer alternativa metodológica para enfrentar esses desafios, ao substituir a lógica de mitigação fragmentária por uma estratégia integrada de recomposição funcional do corredor. Assim, ainda que as soluções específicas devam ser adaptadas às condições biofísicas e institucionais de cada região, o arcabouço analítico apresentado neste artigo possui potencial para orientar projetos infraestruturais em diferentes paisagens tropicais caracterizadas por alta biodiversidade, densas redes hidrográficas e sensibilidade geomorfológica.

Entretanto, a replicação do framework exige reconhecer a importância da adaptação contextual. Cada corredor rodoviário apresenta combinações próprias de relevo, regime hidrológico, cobertura vegetal, padrões de uso da terra e dinâmica socioeconômica. Em determinados territórios, a prioridade regenerativa pode estar associada à reconexão de corredores ecológicos fragmentados; em outros, à reconfiguração de sistemas de drenagem artificializados ou à estabilização de taludes críticos em áreas suscetíveis à erosão. O framework não prescreve um conjunto rígido de intervenções, mas propõe uma lógica de leitura territorial capaz de identificar os pontos de maior sensibilidade socioecológica e de orientar respostas infraestruturais adequadas a essas condições. Essa flexibilidade constitui um dos principais atributos do modelo, pois permite que ele seja aplicado de maneira

diferenciada em diversos contextos, preservando ao mesmo tempo sua coerência conceitual.

Apesar desse potencial de adaptação, é necessário reconhecer também os limites metodológicos e institucionais da proposta. O primeiro limite diz respeito à disponibilidade de informações territoriais detalhadas. A aplicação efetiva do framework requer diagnóstico integrado da paisagem, incluindo dados sobre hidrologia, geomorfologia, conectividade ecológica, dinâmica de uso da terra e padrões de deslocamento da fauna. Em regiões onde essas informações são escassas ou fragmentadas, a implementação do modelo pode demandar etapas adicionais de levantamento e monitoramento ambiental, ampliando o tempo e a complexidade do processo de planejamento.

Um segundo limite refere-se à capacidade institucional e técnica necessária para a adoção de abordagens regenerativas no planejamento de infraestrutura. Sistemas administrativos historicamente orientados por padrões rígidos de engenharia e por critérios estritamente econômicos de curto prazo podem apresentar dificuldades em incorporar soluções baseadas em processos ecológicos e planejamento territorial integrado. A transição para modelos regenerativos requer, portanto, não apenas inovação técnica, mas também evolução institucional, incluindo revisão de normas de projeto, fortalecimento da cooperação interdisciplinar e incorporação de métricas de desempenho socioambiental nos processos decisórios.

Outro aspecto relevante diz respeito à viabilidade financeira e operacional das intervenções regenerativas. Embora muitas das soluções propostas — como revegetação funcional, bioengenharia

de taludes e drenagem naturalizada — não impliquem necessariamente custos iniciais elevados, sua implementação demanda planejamento integrado e visão de longo prazo. Em contextos onde o planejamento infraestrutural é fortemente condicionado por ciclos orçamentários curtos ou por pressões de rápida execução de obras, pode haver tendência de priorizar soluções convencionais aparentemente mais simples, mesmo quando estas geram custos socioambientais acumulativos ao longo do tempo. A adoção de uma lógica regenerativa exige, portanto, mudança de horizonte analítico, no qual a avaliação econômica considere não apenas o custo imediato da obra, mas também os passivos evitados e os benefícios territoriais de longo prazo.

Por fim, é importante reconhecer que a regeneração infraestrutural não constitui solução isolada para os desafios territoriais enfrentados pelas regiões amazônicas. Rodovias operam em interação com políticas de uso da terra, dinâmicas fundiárias, atividades econômicas e processos sociais que ultrapassam o domínio estrito da engenharia. Assim, a eficácia plena de uma Estrada-Parque Regenerativa depende de sua inserção em estratégias mais amplas de governança territorial, capazes de orientar a expansão do uso da terra, proteger áreas sensíveis e promover modelos de desenvolvimento regional compatíveis com a conservação da biodiversidade.

Consideradas essas condições, o framework proposto neste artigo apresenta elevado potencial de replicabilidade conceitual e metodológica para corredores rodoviários em ambientes tropicais, desde que aplicado com sensibilidade às especificidades biofísicas e institucionais de cada território. Ao mesmo tempo, sua implementação demanda condições institucionais, informacionais e

financeiras que permitam integrar engenharia, ecologia e planejamento territorial em um mesmo processo decisório. Reconhecer simultaneamente o potencial e os limites da proposta constitui passo essencial para avançar na construção de infraestruturas capazes de conciliar mobilidade regional, estabilidade ecológica e resiliência socioambiental em paisagens complexas como as da Amazônia.

4.4.3. Implicações para Planejamento Territorial, Clima e Conservação da Biodiversidade

A incorporação de princípios regenerativos no planejamento de infraestruturas lineares produz implicações que transcendem o campo estrito da engenharia viária, alcançando dimensões estruturais do planejamento territorial, da governança climática e da conservação da biodiversidade. Em regiões tropicais caracterizadas por elevada complexidade ecológica e intensa pressão sobre os recursos naturais, a infraestrutura de transporte desempenha papel decisivo na reorganização das dinâmicas territoriais. Estradas não apenas conectam localidades; elas redefinem acessibilidades, alteram fluxos econômicos, reorganizam padrões de ocupação e influenciam diretamente os processos de transformação da paisagem. Nesse contexto, a adoção de uma abordagem regenerativa implica reconhecer que o projeto infraestrutural constitui também um instrumento de política territorial, capaz de contribuir para a estabilização ou para a degradação de sistemas socioecológicos.

Do ponto de vista do planejamento territorial, a Estrada-Parque Regenerativa introduz uma lógica distinta de inserção da infraestrutura na paisagem. Em vez de conceber a rodovia como

eixo isolado cuja função se restringe à mobilidade regional, o framework proposto neste artigo a interpreta como corredor territorial estruturante, cuja configuração pode influenciar diretamente a integridade ecológica e a organização espacial das atividades humanas. Essa perspectiva aproxima a engenharia viária de abordagens contemporâneas do planejamento regional, nas quais infraestruturas são analisadas não apenas por seu desempenho operacional, mas também por sua capacidade de moldar padrões de uso da terra, conectividade ecológica e resiliência ambiental. Em territórios amazônicos, onde a expansão da malha rodoviária historicamente esteve associada a processos de desmatamento, fragmentação e ocupação desordenada, a reconfiguração da infraestrutura sob uma lógica regenerativa pode contribuir para reduzir externalidades negativas e orientar formas mais equilibradas de interação entre mobilidade e conservação.

As implicações climáticas dessa abordagem também são significativas. A literatura científica tem demonstrado que a degradação florestal tropical possui efeitos diretos sobre o ciclo do carbono, a regulação hidrológica e os regimes regionais de precipitação. Além disso, a perda de integridade dos ecossistemas e a transformação do uso da terra vêm sendo associadas à redução da biodiversidade local e à erosão de funções ecológicas essenciais, especialmente em paisagens submetidas a pressões antrópicas cumulativas (NEWBOLD et al., 2015; WATSON et al., 2018). Ao favorecer processos de fragmentação da cobertura florestal e intensificar a abertura de bordas ecológicas, infraestruturas rodoviárias convencionais podem amplificar vulnerabilidades climáticas e reduzir a capacidade adaptativa das paisagens. Em contraste, a adoção de princípios regenerativos — como reconexão de habitats, restauração ripária, drenagem naturalizada e

revegetação funcional — pode contribuir para fortalecer serviços ecossistêmicos associados à regulação climática, incluindo retenção de carbono, moderação microclimática e estabilidade hidrológica.

A dimensão da biodiversidade constitui outro eixo central das implicações territoriais do framework proposto. Estradas convencionais frequentemente operam como barreiras físicas e comportamentais ao deslocamento de espécies, fragmentando habitats e alterando padrões de movimentação da fauna. Esse fenômeno, amplamente documentado pela ecologia de estradas, pode comprometer fluxos genéticos, reduzir áreas funcionais de habitat e aumentar mortalidade associada a atropelamentos. Em um contexto global de aceleração das perdas de biodiversidade, a manutenção de conectividade e de paisagens funcionalmente articuladas tornou-se uma condição decisiva para evitar declínios populacionais e processos de extinção local ou regional (PIMM; JENKINS, 2017). A abordagem regenerativa busca enfrentar essas dinâmicas por meio da integração sistemática de dispositivos de conectividade ecológica, como passagens de fauna, revegetação funcional e restauração de corredores ripários.

Além disso, o enfoque regenerativo contribui para ampliar o horizonte da conservação ao incorporar a noção de paisagens funcionais, nas quais áreas produtivas, infraestruturas e fragmentos florestais passam a ser concebidos como partes interdependentes de um sistema territorial mais amplo. Em vez de tratar a conservação exclusivamente como proteção de áreas isoladas, essa abordagem enfatiza a importância da conectividade ecológica e da qualidade ambiental da matriz territorial que envolve as áreas naturais. Rodovias regenerativas, nesse contexto, podem desempenhar papel relevante ao atuar como interfaces capazes de

restaurar processos ecológicos em regiões já afetadas por fragmentação e degradação.

A adoção de um paradigma regenerativo no planejamento de infraestrutura também possui implicações para a governança ambiental e territorial. A implementação de corredores viários concebidos como sistemas socioecológicos requer articulação entre diferentes campos do conhecimento — engenharia, ecologia, planejamento territorial, hidrologia e gestão ambiental — bem como integração entre escalas de decisão institucional. Essa necessidade de cooperação interdisciplinar pode contribuir para fortalecer processos de planejamento mais integrados e orientados por evidências científicas, reduzindo a fragmentação tradicional entre políticas de transporte, conservação ambiental e desenvolvimento regional.

Em síntese, as implicações da Estrada-Parque Regenerativa para planejamento territorial, clima e biodiversidade revelam que a infraestrutura rodoviária pode desempenhar papel significativamente mais amplo do que aquele tradicionalmente atribuído a ela. Quando concebida sob uma lógica regenerativa, a rodovia deixa de ser apenas vetor potencial de degradação ambiental e passa a constituir instrumento de reorganização socioecológica da paisagem, capaz de contribuir para a estabilidade climática regional, para a conservação da biodiversidade e para a construção de territórios mais resilientes. Essa perspectiva reforça a importância de integrar princípios ecológicos e territoriais ao planejamento infraestrutural, abrindo caminho para novas agendas de pesquisa e inovação no campo da engenharia aplicada a ambientes tropicais complexos.

5. CONCLUSÃO

A análise desenvolvida ao longo deste artigo partiu de uma constatação amplamente reconhecida pela literatura científica contemporânea: infraestruturas rodoviárias implantadas em florestas tropicais constituem uma das principais forças estruturantes das transformações territoriais, influenciando processos de fragmentação da paisagem, reorganização hidrológica, perda de biodiversidade e expansão de dinâmicas econômicas que frequentemente ampliam pressões sobre os ecossistemas. No caso amazônico, essa relação entre infraestrutura e transformação territorial assume particular intensidade, uma vez que as estradas não apenas conectam localidades isoladas, mas também reorganizam padrões de acessibilidade, uso da terra e ocupação regional. Diante desse contexto, o artigo buscou avançar além da crítica ao modelo infraestrutural convencional, propondo um framework conceitual e técnico de Estrada-Parque Regenerativa orientado à requalificação socioecológica de corredores rodoviários em paisagens tropicais.

A construção desse framework baseou-se na integração de diferentes campos de conhecimento — incluindo ecologia de estradas, infraestrutura verde-azul, soluções baseadas na natureza e planejamento territorial regenerativo — com o objetivo de formular uma abordagem capaz de reconciliar mobilidade regional com integridade ecológica da paisagem. Em vez de compreender a rodovia apenas como plataforma física destinada ao fluxo de veículos, o modelo proposto a interpreta como corredor socioecológico multifuncional, cuja configuração espacial pode influenciar diretamente processos hidrológicos, conectividade ecológica, estabilidade geomorfológica e resiliência climática do

território atravessado. Essa mudança de perspectiva constitui uma das contribuições centrais do estudo, pois desloca o debate infraestrutural do plano exclusivamente técnico-operacional para uma abordagem sistêmica de interação entre engenharia, ecologia e território.

A aplicação conceitual do framework ao trecho Manoel Urbano–Feijó da BR-364/AC permitiu demonstrar como princípios regenerativos podem ser traduzidos em componentes operacionais de projeto, incluindo reconexão de drenagens naturais, implantação de dispositivos de conectividade para fauna, revegetação funcional de bordas, bioengenharia de taludes e modulação da seção viária com base em critérios ecológicos e territoriais. Ao articular essas soluções em lógica integrada, o estudo evidencia que a regeneração infraestrutural não depende da adoção isolada de técnicas ambientalizadas, mas da construção de um sistema coerente de intervenção territorial, capaz de reduzir disfunções acumulativas e restabelecer relações funcionais entre infraestrutura e paisagem.

Outro resultado relevante do trabalho reside na incorporação da noção de acupuntura territorial como estratégia de priorização espacial das intervenções regenerativas. Em vez de propor intervenções uniformemente distribuídas ao longo do corredor, o framework enfatiza a identificação de pontos críticos — como travessias de fauna, rupturas hidrológicas, taludes instáveis e zonas ripárias degradadas — nos quais ações localizadas podem gerar efeitos sistêmicos amplificados. Essa abordagem permite otimizar recursos técnicos e financeiros, ao mesmo tempo em que potencializa a capacidade da infraestrutura de produzir ganhos ecológicos e territoriais significativos.

As simulações conceituais de cenários desenvolvidas no estudo reforçam ainda a importância de uma mudança de paradigma no planejamento infraestrutural. Enquanto o cenário tendencial, associado à manutenção do modelo rodoviário convencional, tende a perpetuar processos cumulativos de degradação da paisagem, e o cenário mitigatório oferece apenas ganhos incrementais limitados, o cenário regenerativo demonstra potencial para promover trajetórias mais amplas de recomposição funcional do território. Isso ocorre porque o enfoque regenerativo não se restringe a evitar novos impactos, mas procura restaurar processos ecológicos enfraquecidos ou interrompidos, ampliando a resiliência socioambiental do corredor.

Do ponto de vista teórico, o artigo contribui para aproximar campos de conhecimento que historicamente evoluíram de forma relativamente paralela. Ao integrar conceitos da ecologia da paisagem, da engenharia ecológica e do planejamento territorial ao domínio da engenharia rodoviária, o estudo propõe uma nova gramática analítica para compreender o papel da infraestrutura em ambientes tropicais complexos. Essa abordagem permite reinterpretar a estrada não apenas como artefato técnico de mobilidade, mas como interface dinâmica entre sistemas naturais e processos sociais, capaz de influenciar profundamente a organização e o funcionamento das paisagens.

Entretanto, a implementação de abordagens regenerativas também enfrenta desafios importantes. A aplicação prática do modelo depende da disponibilidade de dados territoriais integrados, da capacidade institucional de incorporar soluções baseadas em processos ecológicos e da adoção de horizontes de planejamento que considerem benefícios socioambientais de longo prazo. Além

disso, é necessário reconhecer que a infraestrutura rodoviária opera em interação com dinâmicas econômicas, fundiárias e políticas que ultrapassam o domínio estrito da engenharia. Assim, a efetividade de corredores regenerativos depende de sua articulação com estratégias mais amplas de governança territorial e conservação ambiental.

Apesar desses desafios, os resultados do estudo indicam que a incorporação de princípios regenerativos no planejamento de infraestruturas lineares pode abrir novas perspectivas para conciliar mobilidade, conservação e desenvolvimento regional em paisagens tropicais. Ao demonstrar que a rodovia pode ser concebida como instrumento de recomposição socioecológica — e não apenas como vetor de transformação territorial — o artigo oferece base conceitual para futuras pesquisas e experiências práticas no campo da engenharia viária em ambientes florestais.

Em última instância, a Estrada-Parque Regenerativa propõe uma reinterpretação profunda do papel da infraestrutura na relação entre sociedade e natureza. Em vez de impor ao território uma lógica de simplificação física e controle mecânico, a abordagem regenerativa sugere que a engenharia pode operar em consonância com os processos ecológicos da paisagem, transformando a infraestrutura em elemento de reconexão, estabilidade e resiliência territorial. Nesse sentido, o framework apresentado não deve ser compreendido apenas como proposta técnica aplicada a um corredor específico da Amazônia, mas como contribuição para um debate mais amplo sobre o futuro das infraestruturas em um mundo marcado por desafios climáticos, perda acelerada de biodiversidade e crescente necessidade de harmonizar desenvolvimento humano e integridade dos sistemas naturais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGHIMIEN, D.; ADEBAYO, P.; OWOLABI, J. Nature-based solutions for sustainable built environments: integrating climate adaptation, ecosystem services and infrastructure resilience. *Journal of Cleaner Production*, v. 432, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139745>.

BLACKWOOD, L.; JOWETT, A.; WEBB, J. Nature-based solutions for climate adaptation in railway infrastructure: a systematic review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 103, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103171>.

BENNETT, A. F. Linkages in the landscape: the role of corridors and connectivity in wildlife conservation. Gland: IUCN, 2003.

COFFIN, A. W. From roadkill to road ecology: a review of the ecological effects of roads. *Journal of Transport Geography*, v. 15, n. 5, p. 396–406, 2007.

COOK, B. R. et al. Designing multifunctional green infrastructure for biodiversity, climate resilience and human wellbeing. *Nature Sustainability*, v. 7, p. 182–191, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01214-8>.

CROESER, T. et al. Strategic placement of green infrastructure to improve ecological connectivity in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, v. 242, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104901>.

FORMAN, R. T. T. Road ecology: science and solutions. Washington: Island Press, 2003.

FORMAN, R. T. T.; ALEXANDER, L. E. Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematics*, v. 29, p. 207–231, 1998.

FLORES, B. M. et al. Critical transitions in the Amazon forest system: implications for resilience and climate feedbacks. *Nature Climate Change*, v. 14, p. 312–319, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01877-4>.

FOLKARD-TAPP, H. et al. Integrating nature and climate action in infrastructure systems: beyond nature-based solutions. *Environmental Science & Policy*, v. 158, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103738>.

HANSKI, I. Landscape fragmentation, biodiversity loss and the societal response. *EMBO Reports*, v. 6, p. 388–392, 2005.

LAURANCE, W. F. et al. A global strategy for road building. *Nature*, v. 513, p. 229–232, 2014.

LAURANCE, W. F.; GOOSEM, M.; LAURANCE, S. G. W. Impacts of roads and linear clearings on tropical forests. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 24, n. 12, p. 659–669, 2009.

LAPOLA, D. M. et al. The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science*, v. 379, n. 6635, p. eabp8622, 2023. <https://doi.org/10.1126/science.abp8622>.

LU, Y. et al. Hydrological performance of bioswales for urban stormwater management under future climate scenarios. *Journal of Hydrology*, v. 631, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130812>.

MOLNÉ, J. et al. Multi-scale prioritization of blue–green infrastructure networks for biodiversity conservation. *Landscape Ecology*, v. 38, p. 2991–3008, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10980-023-01743-2>.

NEWBOLD, T. et al. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, v. 520, p. 45–50, 2015.

PERRELET, J. et al. Blue–green infrastructure and biodiversity: bridging engineering and ecological objectives. *Environmental Research Letters*, v. 19, 2024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad17ab>.

PIMM, S. L.; JENKINS, C. N. Extinctions and the practice of preventing them. *Nature*, v. 549, p. 27–30, 2017.

REED, J. et al. Reframing the concept of sustainability to regenerative development. *Sustainability Science*, v. 16, p. 883–898, 2021.

TROMBULAK, S. C.; FRISSELL, C. A. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conservation Biology*, v. 14, n. 1, p. 18–30, 2000.

VAN DER REE, R.; SMITH, D. J.; GRILO, C. (org.). *Handbook of road ecology*. Oxford: Wiley-Blackwell, 2015.

WEBBER, M.; MEI, Y.; SAMARAS, C. Nature-based solutions for climate-resilient transportation infrastructure in riverine environments. *Nature Sustainability*, v. 8, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01345-9>.

WATSON, J. E. M. et al. Protecting intact ecosystems is essential for sustaining biodiversity and climate stability. *Nature Ecology &*

Evolution, v. 2, p. 599–606, 2018.

ZHENG, H. et al. Global road expansion and tropical forest loss in the twenty-first century. *Nature Sustainability*, v. 8, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01302-6>.

ZHOU, Y. et al. Nature-based solutions for flood risk reduction: integrating ecological and social benefits. *Global Environmental Change*, v. 85, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2024.102872>.

ZHOU, Z. et al. Transport infrastructure expansion and forest fragmentation in tropical regions. *Science Advances*, v. 12, 2026. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adk1189>.

BENNETT, G.; MULONGOY, K. J. Review of experience with ecological networks, corridors and buffer zones. Montreal: Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2006.

FORMAN, R. T. T. Urban ecology principles: are urban ecological systems becoming more resilient? *Landscape Ecology*, v. 31, p. 1–5, 2016.

SETO, K. C.; GÜNERALP, B.; HUTYRA, L. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 109, p. 16083–16088, 2012.

¹ Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Acre (UFAC), Mestre em Processos Construtivos e Saneamento Urbano pela Universidade Federal do Pará (UFPA) e doutorando em Engenharia Civil (UFPA) e em Sustentabilidade e Desenvolvimento pela Universidade Aberta

de Portugal (UAb). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#).

² Doutor e pesquisador na área de sustentabilidade, inovação e desenvolvimento territorial, vinculado à Universidade Aberta de Portugal (UAb). Atua em estudos interdisciplinares sobre sustentabilidade, governança territorial, inovação socioecológica e transformação de sistemas socioeconômicos. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

³ Engenheiro Agrônomo pela Universidade Federal do Acre (UFAC), Mestre em Ecologia Aplicada pela Universidade de São Paulo (USP) e Doutor em Ciências de Florestas Tropicais pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)