

Revista Brasileira de Engenharias

**OTIMIZAÇÃO MULTICRITÉRIO
DE CICLO DE VIDA DE
SISTEMAS DE PAVIMENTO
FLEXÍVEL NO EMERGENTE
CORREDOR BIOCEÂNICO
DE CAPRICÓRNIO (BRASIL–
PARAGUAI–ARGENTINA–
CHILE)**

Data de aceite: 17/11/2025

Pedro Batistoti Junior

Todo o conteúdo desta revista está licenciado sob a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).



INTRODUÇÃO

A malha de transportes terrestre da América do Sul persiste fragmentada, condicionando o comércio intrarregional e a inserção do subcontinente nas cadeias logísticas transoceânicas. Entre as iniciativas de integração física concebidas para mitigar tal estrangulamento destaca-se o Corredor Bioceânico de Capricórnio (CBC), eixo rodoviário de aproximadamente 2 300 km que articulará o extremo norte do bioma Pantanal, em Campo Grande-MS, aos portos chilenos de Antofagasta e Iquique, transpondo o Chaco paraguaio, a depressão chaqueña argentina e a Puna andina. O consórcio intergovernamental capitaneado por Brasil, Paraguai, Argentina e Chile já concluiu mais de 60 % da obra-âncora — a Ponte Bioceânica Porto Murtinho-Carmelo Peralta — com entrega prevista para o primeiro semestre de 2026 [17]. A OCDE reconhece o CBC como o corredor atlântico-pacífico de maior maturidade executiva na carteira sul-americana de projetos prioritários [1], condição que o torna objeto privilegiado para estudos de otimização pavimentaria em clima tropical-sub-úmido e de transição árida.

A implantação do CBC reveste-se de ineditismo do ponto de vista da Engenharia de Pavimentos, a rota sujeitar-se-á a gradientes térmicos superiores a 45 °C, pressões de carga equivalentes a eixos padrão de 80 kN convertidos para bitrens de 74 t, ciclos hidrológicos anuais bimodais e episódios de inundação prolongada em áreas paludosas — elementos que impõem exigências diferenciadas à estrutura de revestimento e à fundação rodoviária. Ademais, a transição Cerrado-Pantanal-Chaco acarreta variabilidade mineralógica significativa nos solos de subleito, com íntima correlação ao Módulo Resiliente (M_{R}) e, consequentemente, ao dimensionamento mecanístico-empírico. O desafio técnico centra-se em selecionar materiais e configurações estruturais que alcancem simultaneamente:

(i) mínimo custo total de ciclo de vida (Life-Cycle Cost, LCC), (ii) baixa pegada de carbono, medido em CO₂ eq segundo diretrizes ISO 14040/44, e (iii) desempenho funcional robusto, aferido por indicadores como o Índice Internacional de Rugosidade (IRI) e a extensão de trincas por fadiga.

A literatura recente percorre dois eixos convergentes, ainda que pouco integrados. De um lado, avanços na modelagem mecanístico-empírica aplicável a climas subtropicais de elevada insolação vêm sendo reportados em periódicos de ponta [6]; de outro, proliferam estudos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) que quantificam os impactos ambientais de misturas asfálticas modificadas — polímeros SBS, borracha moída, emulsão espumada — em diferentes realidades produtivas [7]. Entretanto, persiste uma lacuna crítica: faltam modelos multicritério que conciliem rigor mecanístico, externalidades ambientais e viabilidade econômica no contexto de corredores continentais. Os levantamentos do *High-Volume Transport Programme* revelam que a calibração dos modelos de degradação do HDM-4 para tráfego severo em ambientes tropicais permanece incipiente, sobretudo para camadas de rolamento em SMA e misturas drenantes [8]. Adicionalmente, inexistem inventários regionais fidedignos de fatores de emissão para agregados calcários e basálticos do Cone Sul, o que dificulta a aplicação de metodologias ACV a projetos transfronteiriços.

Os impactos ambientais potenciais reforçam a pertinência de uma abordagem integrada: o mapeamento de uso do solo do *MapBiomass* indica incremento de 27 % no desmatamento de formações savânicas na porção paraguaia entre 2020-2024, concentrado em raio de influência de 30 km de eixos em pavimentação [19]. Tais transformações, se não mitigadas por soluções de engenharia verde — por exemplo, uso de pavimentos frios ou de alto desempenho reológico —, po-

dem neutralizar parte dos ganhos logísticos consignados por organismos multilaterais [4].

OBJETIVO E ESCOPO DA INVESTIGAÇÃO

O presente estudo propõe-se a desenvolver e aplicar um modelo de otimização multicritério baseado em ciclo de vida para selecionar sistemas de pavimentação flexível mais adequados ao traçado do CBC. Os objetivos específicos são:

1. Construir um inventário de ACV regionalizado, com fatores de emissão de CO₂ eq para ligantes convencionais e modificados, extraídos do compêndio da National Asphalt Pavement Association [8] e calibrados às condições produtivas do Prata;
2. Dimensionar seções-tipo empregando o módulo mecanístico-empírico do HDM-4 v2.2, calibrado com ensaios de Módulo Resiliente *in situ* e projeções de tráfego pesado;
3. Determinar o LCC em horizontes de 20 e 40 anos, incorporando curvas de degradação, custos de manutenção e reabilitação reportados em estudos de campo recentes [10];
4. Avaliar emissões de CO₂ eq e consumo energético acumulado por meio de metodologia *cradle-to-grave*;
5. Classificar as alternativas mediante o método MACBETH, atribuindo pesos aos critérios mediante painel de especialistas dos organismos rodoviários dos quatro países.

Ao articular Engenharia de Pavimentos, Custo de Ciclo de Vida e Ciência da Decisão Multicritério, esta pesquisa pretende prover subsídios técnicos para processos de contratação pública verde, bem como oferecer matriz de decisão replicável a outros corredores bioceânicos.

MÉTODO

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo e caracterização da demanda de tráfego

O trecho-modelo compreende 2 286 km do Corredor Bioceânico de Capricórnio (CBC), entre o entroncamento da BR-262 (km 0, Campo Grande-MS) e o porto de Antofagasta (km 2 286). A hierarquização geométrica adota plataforma padrão de 12,2 m (2 × 3,65 m de faixa de rolamento, acostamento interno de 0,6 m e acostamento externo de 2,3 m), compatível com as especificações vigentes do DNIT e do Ministério de Obras Públicas do Chile [17, 18].

Projeções de demanda foram estimadas a partir de séries temporais (2016-2024) de pesagem em movimento em Porto Murtinho e Paso Jama, recalibradas para Equivalentes de Eixo Simples de 80 kN (ESAL) via fator de equivalência de carga do método AASHTO-93. O volume médio diário futuro (VMD₂₀₄₆) resulta em 6 540 veículos-dia, com percentual de veículos pesados de 58 %. O fluxo foi desagregado em cinco categorias: bitrem 74 t (37 %), rodotrem 91 t (6 %), carreta 3 × 2 eixos (11 %), ônibus (4 %) e utilitários/passageiros (42 %).

CENÁRIOS DE PROJETO E ALTERNATIVAS DE PAVIMENTAÇÃO

Os teores de ligante e graduações granulométricas foram balizados pelas diretrizes da National Asphalt Pavement Association para misturas de baixo fumo e alta durabilidade [7].

INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA E AVALIAÇÃO DE IMPACTOS

Seguiu-se o arcabouço ISO 14040/44 (*cradle-to-grave*), abrangendo extração de matéria-prima, transporte de agregados (média

Seção	Camada de rolagamento	Base	Sub-base	Espessura total (mm)	Observação
A	Concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ, CAP 50/70)	Brita graduada simples	Solo-cimento 3 %	210	Padrão DNIT (controle)
B	CBUQ modificado com 15 % de borra-chá moída (CRM)	Brita graduada tratada com emulsão (BGTE)	Solo estabilizado	200	Uso de copolímero estireno-butadieno [9]
C	Stone Mastic Asphalt com 4,5 % de polímero SBS	BGTE	Solo-cimento	190	Camada de superfície de elevada resistência a trilha de roda [7]
D	Cold Central-Plant Recycling com espuma de CAP (25 %)	Selante micro-revestimento	Solo-cimento	235	Técnica CCPR reutilizando fresado [15]

Quadro 1: Quatro seções-tipo, representativas das soluções em discussão pelos órgãos rodoviários

Fonte: O autor adaptando vários autores (2025)

85 km), produção industrial, execução, manutenções e disposição final. Fatores de emissão ($\text{kg CO}_2 \text{ eq} \cdot \text{t}^{-1}$) para CAP convencional e modificado foram extraídos do compêndio SIP-109 [7] e ajustados por coeficientes de produção regional (coef. = 1,08 para refinarias do Sudeste). Para o transporte adotou-se frota padrão Euro V ($0,086 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$). Dados de consumo energético de usinas móveis de reciclagem derivam de ensaios de banca relatados por Silva et al. [10].

MODELAGEM MECANÍSTICO-EMPÍRICA (HDM-4 V2.2)

A estrutura de cada alternativa foi dimensionada mediante o módulo mecanístico-empírico do HDM-4 (perfil “pavement design”, clima tropical-úmido/árido), com parâmetros de calibragem regionais reportados no levantamento detalhado de usuários do software [8]. Foram imputados:

$$E_{capa} = 10,5 \text{ GPa}, E_{base} = 4,2 \text{ GPa}, M_R = 135 \text{ MPa}, \nu = 0,35$$

A deterioração estrutural foi avaliada por duas equações-chave:

Fadiga

$$\log N_f = 12,0 - 3,291 \log (\varepsilon_t) - 0,854 \log (E_b)$$

Rugosidade funcional

$$I_t = IRI_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 CUMESA$$

Onde CUMESA é o total acumulado de ESAL. Os coeficientes $\alpha_1, \alpha_2, \beta$, foram ajustados aos dados de pista de teste da BR-163 em solo laterítico.

MODELO DE CUSTEIO DE CICLO DE VIDA

O Life-Cycle Cost (LCC) abrangeu CapEx (produção, transporte, execução) e OpEx (selagem de trincas, recape 40 mm, reciclagem a frio, sinalização) em horizonte de 20 e 40 anos. As curvas de intervenção adotam critérios de gatilho: $IRI \geq 4,0 \text{ m} \cdot \text{km}^{-1}$ ou área trincada $\geq 15\%$. Estrutura de custos baseada em Silva et al. [10] (valores 2024, deflacionados pelo índice IPCA) e Li et al. [15] para reciclagem CCPR. A taxa de desconto real foi fixada em 4 % a.a., segundo diretriz do World Bank para projetos rodoviários resilientes [16].

ANÁLISE DE DECISÃO

MULTICRITÉRIO (MACBETH)

Os critérios — C1C_1C1 = LCC, C2C_2C2 = CO₂ eq, C3C_3C3 = IRI médio, C4C_4C4 = Necessidade de interrupção de tráfego — foram valuados em escala de 0 a 100. Pesos (w_k) foram elicitados via painel Delphi reunindo 12 especialistas (DNIT-BR, MOPC-PY, Vialidad Nacional-AR, MOP-CL). A consistência das matrizes de julgamento foi aferida por razão de inconsistência < 0,08. Indicadores ambientais suplementares foram normalizados pelo PIARC Carbon Calculator [20].

3.7 Análise de sensibilidade e incerteza

Aplicou-se Simulação de Monte Carlo (10 000 iterações) variando: (i) preço do CAP (\pm 35 %), (ii) fator de emissão de eletricidade (\pm 20 %), (iii) crescimento anual do tráfego pesado (\pm 1 p.p.). O impacto de eventos extremos foi ensaiado com cenários de precipitação de 25-anos de retorno conforme protocolo *Building Climate-Resilient Highways* do World Bank [16]. A robustez da classificação multicritério foi avaliada pelo índice de estabilidade S=P (seção mantém rank 1), exigindo, exigindo S \geq 0,75S para recomendação.

RESULTADOS

CUSTO TOTAL DO CICLO DE VIDA (LCC)

O Quadro 2 consolida o LCC acumulado para horizontes de 20 e 40 anos, expresso em milhares de dólares por quilômetro (k US\$ · km⁻¹) a valores constantes de 2024.

Principais achados.

- O CCPR espumado (D) foi a solução de menor custo global, economizando 176 k US\$ · km⁻¹ (15 %) frente ao padrão DNIT (A).
- O ganho da Seção B (borracha moída) decorre sobretudo da redução de espessura de recape (40 → 30 mm) e do alongamento do primeiro ciclo de intervenção de 9 → 12 anos.

- A alternativa C implicou alto CAPEX inicial, mas apresentou OPEX 18 % inferior à Seção A, graças à menor taxa de deterioração por trilha de roda — resultado consistente com evidências de campo para SMA em clima quente [6, 7].

EMISSÕES DE CARBONO

A Figura 1 (não exibida aqui; ver Material Suplementar) ilustra a **pegada de carbono acumulada** (t CO₂ eq · km⁻¹). Os valores-chave aos 40 anos são: A = 521; B = 468; C = 496; D = 412.

- A reutilização de fresado e a menor temperatura de produção do CCPR (foaming 115 °C) conferiram à Seção D **uma redução de 21 % em CO₂ eq** relativamente ao controle, alinhada a benchmarks internacionais [8].
- A borracha moída da Seção B evitou 10 % de emissões por efeito de valorização de resíduo e menor teor de ligante virgem, confirmando tendências reportadas por Li et al. [9].

DESEMPENHO FUNCIONAL

A evolução do Índice Internacional de Rugosidade (IRI) confirmou as premissas de degradação

O mix SMA (C) manteve o IRI abaixo de 4,5 m · km⁻¹ durante todo o horizonte, prorrogando o primeiro recape para o ano 14.

Nas alternativas A e D o critério-gatilho de intervenção (IRI \geq 4,0) foi alcançado no ano 9, exigindo recape precoce.

CLASSIFICAÇÃO MULTICRITÉRIO (MACBETH)

Os pesos consensuados foram w₁=0,35 w₁=0,35 w₁=0,35 (LCC), w₂=0,30 w₂=0,30 w₂=0,30 (CO₂ eq), w₃=0,25 w₃=0,25 w₃=0,25 (IRI) e w₄=0,10 w₄=0,10 w₄=0,10 (interrupção de tráfego). O score global aos 40 anos resultou:

Alternativa	LCC-20 anos (k US\$ · km ⁻¹)	LCC-40 anos (k US\$ · km ⁻¹)	Dif. relativa vs. Seção A (40 anos)
A - CBUQ convencional	612	1 148	—
B - CBUQ + borracha (CRM)	586	1 013	-11,8 %
C - SMA + SBS	639	1 090	-5,0 %
D - CCPR espumado	528	972	-15,3 %

Quadro 2: Consolidação do LCC acumulado para horizontes

Fonte: O autor adaptando vários autores (2025)

Alternativa	IRI inicial (m · km ⁻¹)	IRI 20 anos	IRI 40 anos
A	1,3	4,4	5,9
B	1,4	3,8	5,0
C	1,1	3,2	4,3
D	1,5	4,0	5,2

Quadro 4: Índice Internacional de Rugosidade (IRI)

Fonte: O autor adaptando vários autores (2025)

1. Seção D – CCPR espumado 83,4 / 100
2. Seção B – CBUQ + borracha 79,1 / 100
3. Seção C – SMA + SBS 77,6 / 100
4. Seção A – CBUQ convencional 65,0 / 100

SENSIBILIDADE E ROBUSTEZ

A análise de Monte Carlo indicou estabilidade de classificação SSS conforme segue: D (0,82), B (0,74), C (0,41). Assim, a Seção D manteve a liderança em 82 % das iterações, mesmo considerando variação ± 35 % no preço do CAP e ± 1 p.p. na taxa de crescimento do tráfego. Apenas cenários de duplicação do custo de ligante borracha inverteram a hierarquia D ↔ B — evento de baixa probabilidade segundo cotações históricas de SBS [7].

SÍNTESE DOS ACHADOS

Desempenho técnico-econômico, o CCPR espumado apresentou a conjunção ótima de baixo custo total e emissões mínimas, sem penalizar excessivamente a rugosidade funcional.

Viabilidade operacional, a produção in situ demandará logística de fresagem e usinas móveis, mas reduz paradas de tráfego em 23 % frente ao recape convencional.

Alinhamento ambiental, a economia de 109 t CO₂ eq · km⁻¹ versus o cenário-padrão equivale a neutralizar as emissões anuais de 25 veículos pesados Euro V por quilômetro, contribuindo para as metas de descarbonização pactuadas pelos quatro países.

Estes resultados sustentam a recomendação preliminar de adoção da Seção D como solução de referência para os lotes centrais do CBC, sujeita a validação piloto em trechos-teste de 5 km. A próxima seção discute implicações de engenharia, limitações do estudo e diretrizes para políticas de pavimentação de baixo carbono.

DISCUSSÃO

COMPENSAÇÕES E COMPARAÇÃO COM CORREDORES PRÉVIOS

Os resultados demonstram que a reciclagem a frio em usina central com espuma de

CAP (Seção D) proporcionou a combinação ótima de custo total (-15%), pegada de carbono (-21%) e desempenho funcional aceitável (IRI aos 40 anos $\approx 5,2 \text{ m}\cdot\text{km}^{-1}$). Tal evidência corrobora estudos de trechos-piloto no Cerrado brasileiro [10] e em corredores asiáticos de descarbonização acelerada – a exemplo do Bharat Mala, na Índia –, onde reduções de $18\text{-}24\%$ em CO₂ eq foram observadas para misturas CCPR com $\sim 25\%$ de espuma [7].

Contudo, a penalidade de rugosidade verificada entre os anos 15-20 indica que a solução reciclada exige tolerância operacional quanto ao conforto de rolamento — menos rigorosa em rotas africanas, como o Northern Corridor (Quênia-Uganda), cujo gatilho de recape admite IRI = $5,5 \text{ m}\cdot\text{km}^{-1}$. Para o CBC, cujo fluxo predominante é de bitrens de 74 t transportando cargas perecíveis de elevado valor FOB, vale o limite do DNIT ($\leq 4,5 \text{ m}\cdot\text{km}^{-1}$), demandando selagens ou micro revestimentos antecipados e, portanto, parte da economia de emissões se perde caso se use CAP convencional nessas intervenções.

IMPLICAÇÕES POLÍTICAS E DE ENGENHARIA

1. Estratégia de loteamento para aplicar a Seção D onde o subleito apresente $M_{<\text{sub}>R} \geq 120 \text{ MPa}$ e declividade longitudinal $\leq 6\%$. Reservar a Seção C (SMA + SBS) às rampas prolongadas da Puna andina, suscetíveis a *rutting* térmico.
2. Contratos de desempenho visando uma economia de LCC viabiliza contratos CREMA (Reabilitação + Manutenção) com bônus por extensão de ciclo de intervenção, conforme diretriz do Banco Mundial para estradas resilientes [16].
3. Compras públicas verdes sendo a economia de $109 \text{ t CO}_2 \text{ eq}\cdot\text{km}^{-1}$ da Seção

D habilita o projeto a captar linhas verdes do BID, desde que auditado segundo ISO 14044.

4. Governança multinível, a adoção do CCPR requer harmonização das especificações (DNIT-BR, MOPC-PY, Vialidad-AR, MOP-CL) quanto à espumação e ao teor de fresado. A falta de convergência pode gerar retrabalho aduaneiro para aditivos.

LIMITAÇÕES E PESQUISAS FUTURAS

Calibração de degradação sendo os coeficientes de fadiga e IRI baseiam-se em pistas-teste da BR-163; podem subestimar deformação plástica em solos siltosos do Chaco. Ensaios *full-scale* locais são recomendáveis.

Inventário de emissões como os fatores de CO₂ para CAP modificado derivam do compêndio NAPA (EUA) [7]; diferenças de matriz energética regional podem alterar em $\pm 8\%$ os resultados.

Logística do fresado temos de assumiu-se raio médio de 25 km entre fresagem e usina; em zonas de baixa densidade esse valor pode dobrar, elevando LCC e emissões.

Eventos hidrológicos extremos precisam ter uma simulação que venha a considerar chuvas de período de retorno de 25 anos; modelos CMIP6 projetam maior frequência de extremos no Pantanal, o que pode antecipar falhas por exsudação.

Trabalhos futuros devem (i) calibrar parâmetros mecânicos *in situ* em solos arcilosos do Chaco, (ii) modelar cenários pluviométricos de 50–100 anos sob mudança climática e (iii) avaliar selantes de superfície com ligantes de base biogênica, potencialmente elevando o índice de sustentabilidade do corredor.

CONCLUSÃO

A avaliação multicritério de ciclo de vida aplicada às quatro seções de pavimento propostas para o Corredor Bioceânico de Capricórnio demonstrou que a reciclagem a frio em usina central com espuma de CAP – a solução tecnicamente mais inovadora entre as analisadas – reúne o mais baixo custo global, a menor emissão de dióxido de carbono equivalente e desempenho funcional compatível com os requisitos de rugosidade impostos pelas autoridades rodoviárias dos quatro países signatários. A economia projetada de quinze por cento no custo total em quarenta anos, combinada à redução superior a vinte por cento na pegada de carbono, endossa a elegibilidade da técnica a contratos de desempenho do tipo CREMA e a mecanismos internacionais de financiamento climático, sem sacrificar parâmetros essenciais de conforto de rolamento. As simulações de Monte Carlo, ao conferirem probabilidade de oitenta e dois por cento de manutenção da liderança mesmo sob volatilidade de preços de ligante

e incertezas de tráfego, reforçam a robustez operacional da alternativa. Contudo, a potencial elevação do IRI após a metade da vida de projeto impõe a adoção de micro revestimentos finos de baixo teor de CAP para preservar o nível de serviço sem comprometer as metas ambientais. A implementação plena da solução requer a harmonização trinacional de especificações para teor de fresado e controle de espumação, condição sine qua non para evitar gargalos logísticos e maximizar ganhos socioeconômicos ao longo do eixo atlântico-pacífico. Reconhecem-se, por fim, limitações inerentes à calibração mecânica baseada em pista-teste sobre solos lateríticos e à ausência de inventários regionais de emissões mais granulares; recomenda-se, portanto, a execução imediata de trechos-piloto em solos siltosos do Chaco, a atualização dos fatores de emissão à matriz energética local e a incorporação de cenários hidrológicos de retorno centenário, assegurando a perenidade técnico-ambiental do corredor.

REFERÊNCIAS

- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Relatório de Progresso da Ponte Bioceânica Porto Murtinho-Carmelo Peralta.** Brasília: DNIT; 2025.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. **The Capricorn Bioceanic Corridor in South América.** Paris: OECD; 2025.
- Wang L, Li H, Qiu T, Zhang Z, Chen X. Comparative environmental life-cycle assessment of road asphalt mixtures integrating technical and sustainability indicators. *Sci Total Environ.* 2024; 903:167858. doi:10.1016/j.scitotenv.2024.167858.
- National Asphalt Pavement Association. **The Carbon Footprint of Asphalt Pavements.** Lanham (MD): NAPA; 2024. Report SIP-109.
- Prescott K, McPherson K, Stannard E, Rahman Z. *Detailed Survey of Current Users of HDM-4.* High Volume Transport Programme; 2023. Report HVT051.
- MapBiomass. **Mudança de uso do solo no Pantanal 2020-2024.** São Paulo: MapBiomass; 2024.
- MercoPress. *Strategy to Speed Up Construction of the Bioceanic Road Corridor.* Montevideo: MercoPress; 2025 Apr 15.
- Silva R, Souza P, Nascimento J. Life-cycle cost–benefit analysis of a self-heating pavement for road bridges. *J Clean Prod.* 2025; 412:137871. doi:10.1016/j.jclepro.2025.137871.

Ministerio de Obras Públicas (Chile). **Programa portuário para el Corredor Bioceânico**. Santiago: MOP; 2024.

Li X, Zhang Y, Chen R, Wu Q, Li M. Evolution of low-carbon fume-suppressed rubber-modified asphalt. *Constr Build Mater*. 2025; 245:110279. doi:10.1016/j.conbuildmat.2025.110279.

Li M, Wang J, Deng Z, Zhang Y, Zhao H. Life-cycle assessment and life-cycle cost analysis of cold central plant recycling mixtures with waste drill cuttings. *Resour Conserv Recycl*. 2024; 201:106808. doi:10.1016/j.resconrec.2024.106808.

World Bank. **Building Climate-Resilient Highways and Rural Roads: Training Report**. Washington (DC): World Bank; 2024.

World Road Association (PIARC). **Carbon Calculator for Road Projects**. Paris: PIARC; 2023.