

Caderno temático

A aproximação do mercado de carbono florestal no bioma Caatinga: desafios, riscos e perspectivas



Universidade Federal
de Campina Grande



Expediente

Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste

Francisco Ferreira Alexandre

Diretoria de Administração

Teresa Maria Barbosa de Oliveira

Diretoria de Fundos, Incentivos e de Atração de Investimentos

José Wandemberg Rodrigues

Diretoria de Promoção do Desenvolvimento Sustentável

José Farias Gomes Filho

Diretoria de Planejamento e Articulação de Políticas

Álvaro Silva Ribeiro

Autores

Agda Maria Castro Marques

Aldrin Martin Pérez Marín

Artur Moisés Gonçalves Lourenço

Claudionor Vital Pereira

Helder Farias Pereira de Araújo

Jéssica Vivianne da Cunha Silva de Brito

John Elton de Brito Leite Cunha

Johnatan Rafael Santana de Brito

Rodolfo Luiz Bezerra Nóbrega

Sabrina Holanda Oliveira

Victor Herbert de Alcântara Ribeiro

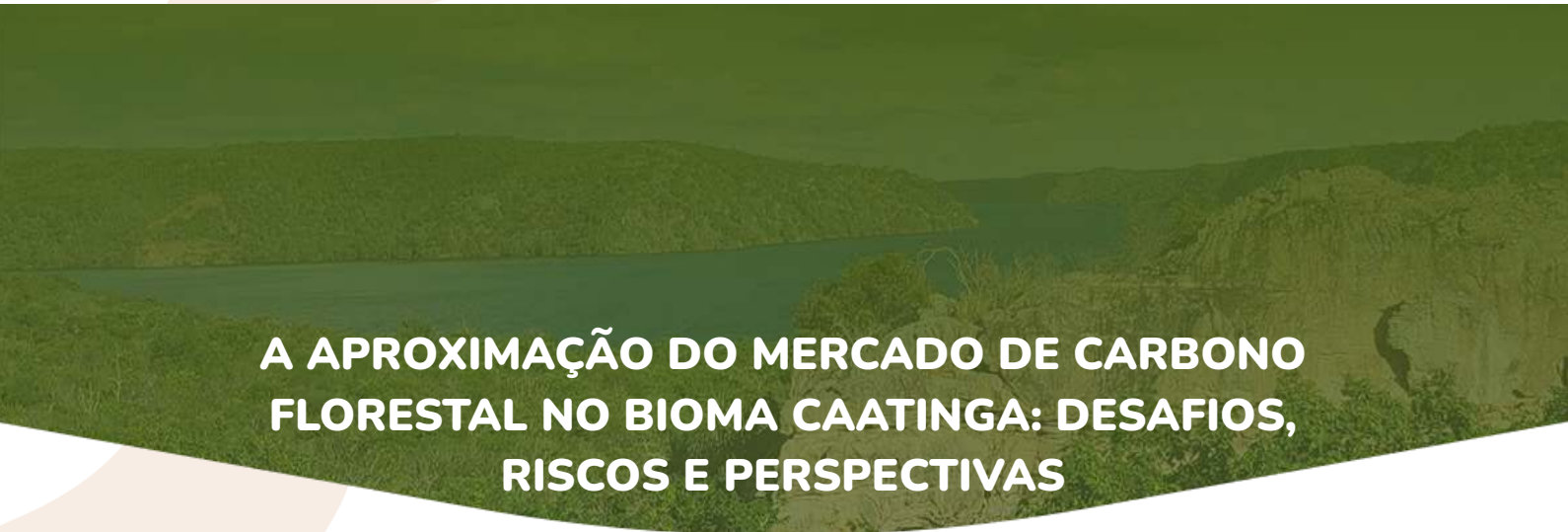
Design e Diagramação

Afonso Henrique Vilar dos Santos Aragão

Avrhyll Kristin Gonçalves Nascimento

Cecília Cavalcanti Araújo

Maria Fernanda Almeida de Medeiros



A APROXIMAÇÃO DO MERCADO DE CARBONO FLORESTAL NO BIOMA CAATINGA: DESAFIOS, RISCOS E PERSPECTIVAS

Apresentação

Em 2024, o Brasil aprovou a Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024, que criou o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), estabelecendo pela primeira vez um mercado regulado de carbono no país. Em outubro de 2025, o Ministério da Fazenda criou a Secretaria Extraordinária do Mercado de Carbono, com a meta de publicar toda a regulamentação infralegal desse mercado até dezembro de 2026. Em novembro de 2025, durante a 30ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática (COP 30) em Belém, o Banco do Nordeste (BNB) e o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) anunciaram um investimento conjunto de R\$ 100 milhões para preservação e recuperação da Caatinga, como parte do Plano Brasil-Nordeste de Transformação Ecológica. No mesmo período, a Controladoria-Geral da União¹ publicou uma avaliação inédita sobre o mercado de carbono brasileiro, evidenciando que a necessidade de maior controle e transparência nesse setor já é reconhecida dentro do próprio Estado. Assim, a agenda climática brasileira em relação ao carbono é construída em diferentes frentes. Os fluxos de capital já estão em movimento. Os arranjos institucionais, em construção. E as disputas por territórios, em curso.

Nesse cenário, a Caatinga ocupa uma posição singular. Resultados recentes revelam que esse bioma é um dos mais eficientes do planeta na captura de carbono, tendo sido responsável por cerca de 40% das remoções de gases de efeito estufa do Brasil em 2022, mais do que qualquer outro bioma². Ao mesmo tempo, não há

registro substancial de projetos de carbono certificados no bioma. A grande maioria dos projetos brasileiros está na Amazônia e no Cerrado³.

Apesar da baixa presença de projetos certificados, a Caatinga já desperta interesse crescente de governos, empresas, instituições financeiras, organizações da sociedade civil e centros de pesquisa. A conversão desse interesse em projetos de carbono, contudo, não é automática nem politicamente neutra. Dependerá das normas de implementação do SBCE, das metodologias reconhecidas, das formas de financiamento, da situação fundiária, da atuação dos órgãos públicos e, sobretudo, do respeito às decisões dos povos, comunidades, assentamentos e demais grupos que vivem e produzem nos territórios potencialmente abrangidos.

O problema central, portanto, não consiste em definir como incorporar a Caatinga ao mercado, mas em examinar criticamente se, sob quais condições e em benefício de quem essa incorporação poderá ocorrer.

Este Caderno Temático apresenta o que a ciência vem revelando, o que a legislação estabelece, o que a experiência brasileira e internacional ensina, e o que está em jogo. Está organizado em cinco perguntas: o que é o mercado de carbono florestal; qual a situação desse mercado no Brasil; o que a Caatinga tem a ver com ele; quais os desafios e as barreiras para seu funcionamento no bioma; e quais as condições para que ele seja justo e confiável. São as perguntas que qualquer cidadão, gestor público, organização da sociedade civil ou investidor deve considerar antes de se posicionar nesse debate.

1. O que é o mercado de carbono florestal?

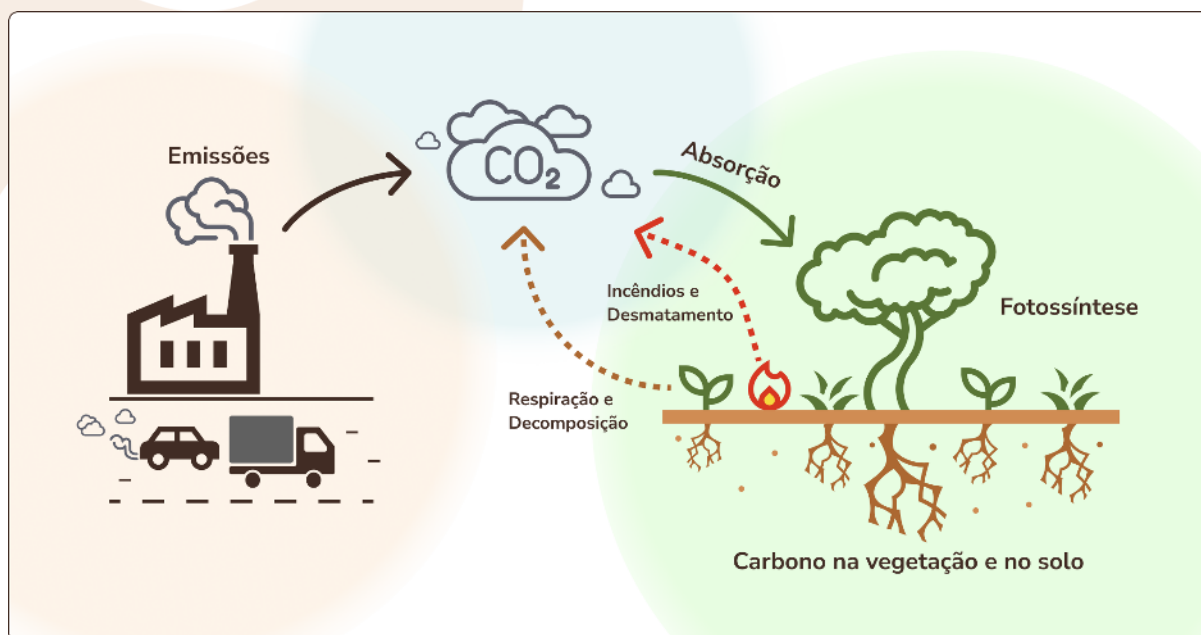
O mercado de carbono é um mecanismo financeiro que atribui um custo às emissões de gases de efeito estufa e um valor às suas reduções e remoções, permitindo que empresas, países e organizações comprem e vendam esses resultados para cumprir metas climáticas. Sua vertente "florestal" gera créditos a partir da conservação e da restauração de florestas, e é nela que se concentra a maior parte da atividade brasileira. Compreender esse mecanismo, porém, exige situá-lo: ele nasceu de uma escolha política diante da crise climática, e não era a única possível.

A concentração de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera teve um aumento de cerca de 50% desde o período pré-industrial. A temperatura média global já subiu aproximadamente $1,1^\circ\text{C}$ nesse intervalo. Esse aquecimento rompe o equilíbrio de sistemas climáticos e ecológicos e desencadeia secas prolongadas, ondas de calor, tempestades devastadoras e derretimento acelerado das calotas polares, fenômenos que têm se intensificado nas últimas décadas.

Esse cenário decorre de padrões historicamente desiguais de produção e consumo, baseados principalmente na extração e na queima de combustíveis fósseis, no desmatamento e em mudanças intensivas no uso da terra. As responsabilidades não se distribuem igualmente entre países, setores econômicos e grupos sociais, mas variam conforme as emissões acumuladas, a escala atual de emissão, o poder econômico e os benefícios obtidos com as atividades emissoras.

Enquanto isso, as florestas, que funcionam como mitigadoras desse processo, não estão conseguindo acompanhar o ritmo das alterações climáticas⁴. As florestas são sistemas naturais de captura de carbono. Por meio da fotossíntese, as plantas absorvem CO_2 da atmosfera e fixam seu carbono em compostos orgânicos que passam a integrar a biomassa, algo que tecnologias humanas ainda não conseguem replicar em escala, conforme **Figura 1**.

Figura 1 - Ciclo do carbono nas florestas



Quando um ecossistema absorve mais carbono da atmosfera do que emite, ele funciona como um sumidouro de carbono. Nesse contexto, o Brasil se destaca por concentrar aproximadamente 15% do potencial global de captura de carbono por meios naturais⁵.

É diante desse desequilíbrio entre emissões crescentes e capacidade limitada de absorção que emergiu o mercado de carbono. Ele não foi, porém, a única resposta possível. Outras alternativas, como regulação direta, tributação das emissões e investimento público, estavam e seguem disponíveis. A opção por um mecanismo de mercado resultou de escolhas políticas e econômicas, influenciadas inclusive pelos interesses dos setores responsáveis pela poluição, que participaram ativamente da definição dessa arquitetura.

Na prática, o mecanismo opera atribuindo custo e valor por meio de ativos negociáveis, partindo da premissa de que, se poluir passa a ter custo, surge o incentivo econômico para poluir menos. Essa lógica abre espaço para a compensação: em vez de reduzir suas próprias emissões, o emissor pode adquirir créditos gerados por projetos que reduzem ou removem carbono em outro lugar, o que mantém a atividade poluidora e transfere o esforço de mitigação para outros territórios. A comercialização ocorre entre empresas, países e organizações que buscam cumprir metas climáticas, por obrigação legal ou por iniciativa própria.

No Brasil, a maior parte das atividades se concentra no mercado de carbono "florestal", que se refere especificamente a projetos baseados em florestas e no uso do solo, classificados internacionalmente como AFOLU (*Agriculture, Forestry and Other Land Use*). Esses projetos geram créditos por duas vias principais: a redução do desmatamento e da degradação de florestas existentes, estratégia conhecida como REDD+ (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation*), e a restauração e o reflorestamento de áreas degradadas, que geram novas remoções de carbono.

O mercado opera em duas modalidades, o regulado e o voluntário, cujas principais diferenças estão sintetizadas na **Figura 2**.

Figura 2 – Mercado regulado e mercado voluntário



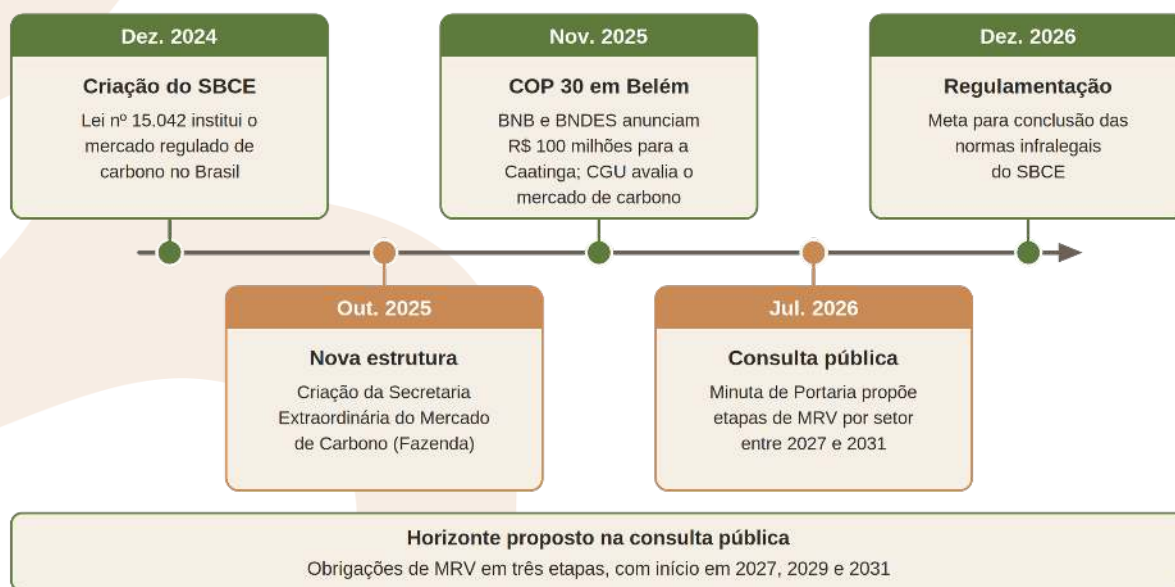
No mercado regulado, instituído por leis e políticas governamentais, governos definem um teto de emissões para setores da economia: empresas que poluem menos do que seu limite podem vender permissões excedentes, e as que ultrapassam a cota precisam comprar permissões para evitar penalidades. No mercado voluntário, a participação é por iniciativa própria. O ativo negociado é um crédito de carbono, ou seja, uma tonelada de CO₂ equivalente (tCO₂e) que, em tese, deixou de ser emitida (redução) ou foi retirada da atmosfera (remoção) por um projeto ambiental específico. Para garantir legitimidade, esses projetos passam por processos de validação e certificação segundo padrões internacionais.

2. Qual a situação do mercado de carbono no Brasil?

A situação é de transição. Até aqui, o mercado de carbono no Brasil funcionou de forma predominantemente voluntária, concentrado em projetos florestais na Amazônia e no Cerrado e marcado por controvérsias sobre a qualidade dos créditos. Agora, passa a contar também com um mercado regulado em estruturação, criado

pela Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024, cujas regras em construção definirão quem terá obrigações, quem terá direitos e quem será afetado nos territórios rurais. A **Figura 3** a seguir sintetiza os principais marcos recentes desse processo.

Figura 3 – Marcos recentes do mercado de carbono no Brasil



Esses marcos mostram que o mercado regulado está sendo estruturado sobre um cenário no qual o mercado voluntário já opera e enfrenta importantes questionamentos. Para compreender essa transição, é necessário examinar primeiro o mercado existente, depois a lei que o reorganiza e, por fim, as questões que permanecem em aberto.

O mercado que existe

Em 2022, cerca de 23% das emissões mundiais já estavam sujeitas a algum mecanismo que atribui preço ao carbono⁶. Diversas nações já participam ou se preparam para entrar nesse mercado. Isso não significa, porém, que ele seja necessariamente a opção mais eficaz e justa para reduzir emissões. No Brasil, um diagnóstico da Fundação Getúlio Vargas (FGV), publicado em 2022, mostrou que os projetos de carbono florestal estão fortemente concentrados na Amazônia e no

Cerrado, que reúnem cerca de 80% da oferta nacional. A Amazônia, sozinha, concentra o maior volume de créditos globais emitidos via REDD+³.

A concentração dessas iniciativas na floresta amazônica se deve à sua escala, à pesquisa científica consolidada, às metodologias de medição desenvolvidas para florestas tropicais úmidas, à visibilidade política internacional e aos sistemas robustos de monitoramento por satélite. Esses fatores conferiram confiança a compradores e doadores ao longo dos últimos anos.

Entretanto, o mercado de carbono florestal brasileiro enfrenta desafios preocupantes. A FGV, por exemplo, identificou entraves estruturais, técnicos e científico-tecnológicos que limitam sua expansão⁷. Insegurança jurídica, questões fundiárias não resolvidas e controvérsias nos sistemas de Mensuração, Relato e Verificação (MRV) já vinham freando o avanço. A isso somaram-se o *greenwashing*, isto é, estratégias de marketing que simulam compromisso ambiental sem ações reais correspondentes, e as salvaguardas mal implementadas, ou seja, falhas nos mecanismos de proteção de direitos sociais, ambientais e territoriais das populações envolvidas. Casos de corrupção e fiscalização precária completam o quadro. O problema é de escala global, visto que a maioria dos projetos de crédito de carbono implementados ao redor do mundo não alcançou as reduções de emissões que alegava⁸.

As controvérsias sobre a integridade dos créditos estimularam a criação de novos padrões, iniciativas de transparência e critérios de qualidade^{9,10,11}. Ainda não há, contudo, evidência suficiente de que essas respostas tenham superado os problemas de adicionalidade, superestimação, permanência, vazamento e dupla contagem identificados pela literatura^{12,13}, problemas que a seção 4 detalha. Estudos produzidos por agentes do setor continuam a projetar possibilidades de expansão econômica dos mercados de carbono^{14,15,16}. Segundo relatório da Câmara de Comércio Internacional (ICC Brasil)¹⁷, o país poderia gerar até R\$ 100 bilhões em receitas no mercado de carbono até 2030 e criar 8,5 milhões de empregos até 2050. Os investimentos privados em projetos de sustentabilidade e descarbonização no Brasil já alcançaram R\$ 48,2 bilhões em 2025, o que representa um crescimento de 24,2% em relação a 2024¹⁸.

A lei que o reorganiza

O Brasil avançou com a promulgação da Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024, que instituiu o mercado regulado brasileiro, ao criar o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). A lei adota o modelo de teto e comércio (*cap-and-trade*), estabelece obrigações diferenciadas conforme o volume anual de emissões e condiciona sua aplicação à existência de metodologias consolidadas. O Estado define um limite máximo de emissões para os setores regulados e distribui cotas negociáveis entre os operadores, que também podem utilizar, em parcela limitada, créditos de carbono certificados para cumprir suas obrigações. Há ainda a previsão de integração com mercados internacionais, como o sistema europeu de comércio de emissões (EU-ETS), o que abre possibilidades para que empresas brasileiras exportem créditos ou atraiam investimentos estrangeiros para projetos de descarbonização.

A regulamentação infralegal do mercado está em curso, com meta de conclusão até dezembro de 2026. Como parte desse processo, a minuta de Portaria em consulta pública, conduzida pela Secretaria Extraordinária do Mercado de Carbono em julho de 2026, propõe três etapas de implementação das obrigações de MRV entre 2027 e 2031, iniciando pelos setores mais intensivos em emissões, como siderurgia, cimento e petróleo e gás, e avançando para indústria química, mineração, alimentos, setor elétrico e transportes¹⁹. As expectativas oficiais são elevadas: estimativas do Banco Mundial, divulgadas pelo Ministério da Fazenda, indicam que o SBCE pode elevar o PIB em 5,8% até 2040 e reduzir as emissões dos setores regulados em 21%²⁰. Tanto as projeções do setor quanto as estimativas oficiais devem ser compreendidas como cenários condicionados a hipóteses sobre preços futuros, demanda, desenho regulatório e integridade dos projetos, e não como previsões de resultados garantidos.

As questões que ela deixa em aberto

A produção agropecuária primária e as estruturas diretamente associadas foram excluídas das atividades reguladas, o que significa que as emissões do setor, embora expressivas no perfil nacional, não estarão sujeitas a teto nem a obrigações de MRV. Ao mesmo tempo, a lei permite que remoções de carbono ocorridas em áreas rurais pertencentes ou controladas por operadores regulados sejam

utilizadas, nos termos da futura regulamentação, para abater parte das obrigações dessas empresas. Cria-se, assim, uma assimetria: o setor agropecuário não responde por suas emissões, mas as terras rurais podem gerar créditos para compensar emissões de outros setores. Esse arranjo pode estimular a aquisição ou o arrendamento de terras por empresas reguladas, com efeitos fundiários e distributivos que merecem análise específica.

A lei reconhece a titularidade dos créditos gerados em territórios de povos indígenas, de povos e comunidades tradicionais e em lotes de assentados da reforma agrária. No caso de povos indígenas e comunidades tradicionais, os projetos dependem de consentimento obtido por consulta livre, prévia e informada, e a lei assegura a essas populações percentuais mínimos dos créditos gerados: 50% nos projetos de remoção e 70% nos de REDD+. Aos assentados, a lei reconhece a titularidade e algumas salvaguardas, mas não estende expressamente os pisos de participação nem a exigência de consentimento. Essas garantias são relevantes, porém não eliminam as assimetrias de informação, capacidade técnica e poder de negociação entre comunidades e desenvolvedores de projetos. Na prática, sua efetividade dependerá de condições como assessoria técnica e jurídica independente, transparência nos contratos e possibilidade real de recusa.

3. O que a Caatinga tem a ver com o mercado de carbono?

A Caatinga tem com o mercado de carbono uma relação de potência e ausência: é o bioma que mais removeu carbono da atmosfera no Brasil em 2022 e um dos mais eficientes do mundo nessa função, mas até hoje não gerou volume relevante de créditos certificados, enquanto avança sobre ela uma degradação que pressiona justamente os territórios que mantêm a vegetação em pé. Esta seção apresenta as quatro dimensões desse quadro: um bioma que a ciência reconhece, mas a política ignora; as populações que o habitam; a eficiência que o distingue; e a degradação que o ameaça.

Um bioma que a ciência reconhece, mas a política ignora

Os ecossistemas semiáridos são responsáveis por grande parte da variabilidade interanual do ciclo global de carbono²¹, dominando tanto a tendência

quanto a variabilidade do sumidouro terrestre de carbono²². Esses achados abriram caminho para legitimar as florestas secas sazonais como peças-chave na regulação climática do planeta.

A Caatinga é a maior e mais diversa Floresta Tropical Sazonalmente Seca (FTSS) do mundo. É o único bioma exclusivamente brasileiro e ocupa cerca de 10% do território nacional. Em escala global, as FTSS sustentam quase 20% da população e estão entre os ecossistemas menos estudados e mais vulneráveis às mudanças climáticas²³, o que torna seu monitoramento ainda mais urgente.

As populações que o habitam

A Caatinga também é território habitado. Segundo dados do Censo Demográfico de 2022 disponíveis na plataforma Data Nordeste²⁴, da Sudene, vivem no Semiárido brasileiro cerca de 26 milhões de pessoas, população que cresceu de forma contínua nas últimas duas décadas, marcadamente jovem e uma das maiores do mundo em região semiárida. Ela se distribui entre cidades de todos os portes e uma vasta rede de comunidades rurais: agricultores e agricultoras familiares, assentamentos da reforma agrária, comunidades quilombolas, povos indígenas, comunidades de fundo e fecho de pasto e outros povos e comunidades tradicionais.

São essas populações que manejam os roçados, os quintais produtivos e as áreas de vegetação nativa, e que detêm conhecimentos acumulados sobre a convivência com o Semiárido. Qualquer discussão sobre carbono no bioma é, portanto, também uma discussão sobre esses territórios, sobre quem os sustenta e sobre a geração que herdará os compromissos de longo prazo que vierem a ser firmados.

A eficiência que o distingue

Em 2022, os biomas brasileiros removeram da atmosfera cerca de 1,07 bilhão de toneladas de CO₂ equivalente, segundo estimativas do inventário *Climate TRACE*. A Caatinga foi o bioma que mais removeu: aproximadamente 410 milhões de toneladas (Mt CO₂e), cerca de 40% do total nacional, à frente da Mata Atlântica (320 Mt CO₂e) e do Cerrado (240 Mt CO₂e), conforme **Figura 4**. Juntos, os três biomas responderam por 90% das remoções do país². Com apenas 10% do

território nacional, a Caatinga teve contribuição decisiva para o balanço de carbono do Brasil.

Figura 4 – Remoções de gases de efeito estufa por bioma em 2022



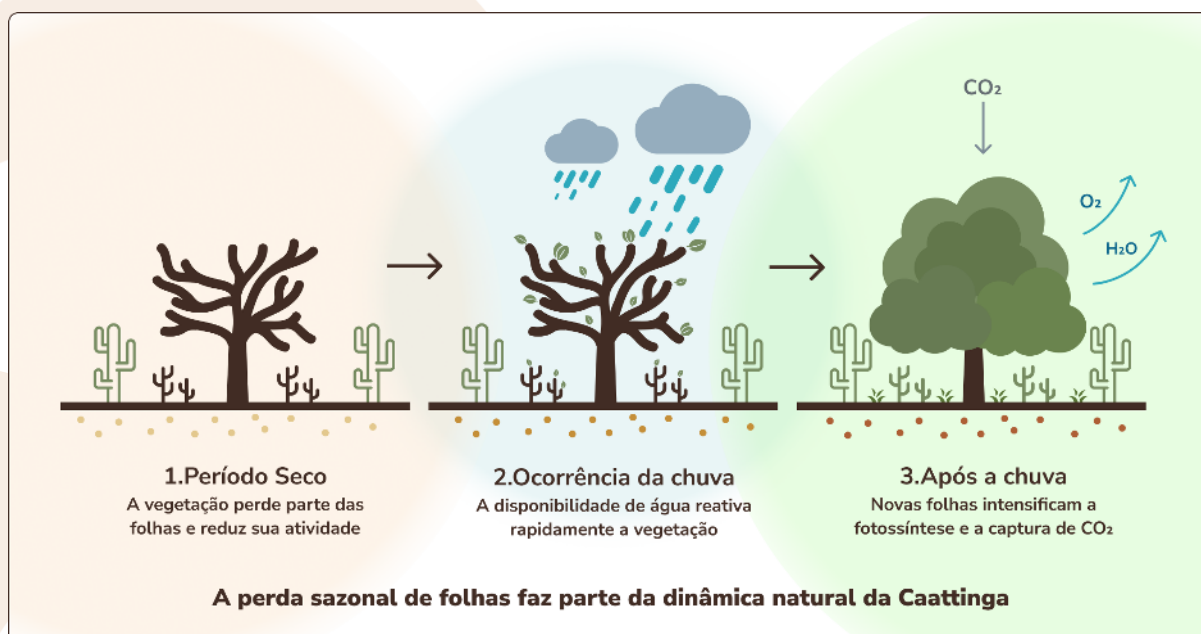
Além desse volume expressivo, pesquisas conduzidas por instituições públicas do Semiárido brasileiro revelam que a Caatinga apresenta uma das maiores eficiências no uso do carbono entre os ecossistemas do Brasil e do mundo. Essa métrica, chamada eficiência do uso do carbono (CUE, *Carbon Use Efficiency*), indica quanto do carbono capturado pela fotossíntese é efetivamente convertido e armazenado em biomassa vegetal. Na Caatinga, a CUE pode alcançar até 60%, valor consideravelmente superior à média de 30% observada na Amazônia²⁵. Isso ocorre porque, nas florestas tropicais úmidas, a captação de carbono é mais constante ao longo do ano, mas a respiração do ecossistema consome uma parcela proporcionalmente maior do CO₂ absorvido.

A capacidade de remoção de CO₂ atmosférico da Caatinga varia de 1,5 a 5 toneladas por hectare ao ano, dependendo da densidade da vegetação, da fisionomia e do regime de chuvas²⁶. Em áreas mais densas, os estoques totais de carbono na vegetação e no solo podem alcançar até 125 toneladas de carbono por hectare, com a maior parcela retida no solo²⁷. Dados da Embrapa mostram que a Caatinga densa estoca mais carbono do que pastagens e agricultura convencional, e

que alguns sistemas de produção agroecológicos podem acumular carbono em ritmo até superior ao da vegetação nativa²⁸.

A vegetação da Caatinga responde de maneira muito rápida à chuva. Mesmo após períodos prolongados de seca, a fotossíntese é rapidamente reativada pela produção de novas folhas adaptadas às condições ambientais. Estudos com torres que monitoram fluxos de água e carbono nesse bioma documentaram essa dinâmica com precisão, mostrando que os eventos de chuva funcionam como indutores de trocas intensas de energia, água e CO₂ entre a vegetação e a atmosfera^{29,30}. É nesse momento que o bioma se transforma em um sumidouro de CO₂ de altíssima eficiência (**Figura 5**).

Figura 5 – Resposta da vegetação da Caatinga às chuvas



A degradação que o ameaça

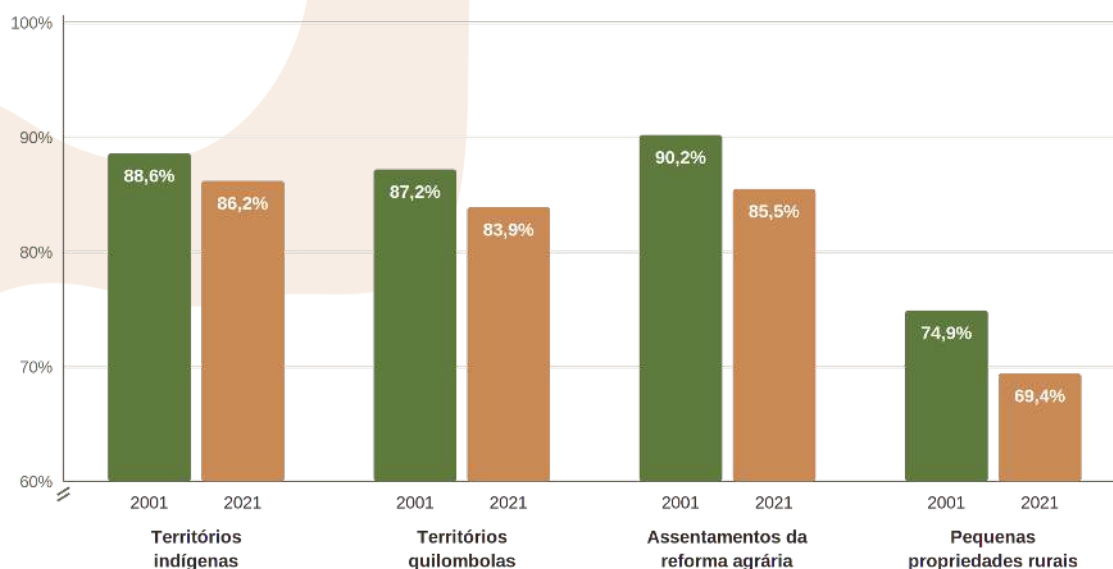
Apesar dessa capacidade de absorver e reter carbono, a Caatinga enfrenta uma crise de degradação contínua e negligenciada, documentada com dados oficiais. Segundo o Boletim Temático sobre Desertificação da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (Sudene) e do Observatório da Caatinga e Desertificação (OCA), 18% do território brasileiro está suscetível à desertificação, com a maior parte dessas áreas localizada na região Nordeste, onde vivem aproximadamente 39 milhões de pessoas³¹. Entre 2000 e 2020, as áreas suscetíveis

à desertificação e seu entorno se expandiram em aproximadamente 170 mil km², e o território afetado por desertificação severa cresceu de 74 mil km² para 107 mil km² no mesmo período, correspondendo a uma área superior ao território do estado de Pernambuco.

As análises ambientais da Caatinga por satélites confirmam a gravidade da situação e revelam impactos diretos sobre os ecossistemas e os regimes de precipitação na região³². Pesquisas demonstram que a degradação amplifica a sensibilidade da produtividade das terras secas à variabilidade de chuvas: quanto mais degradado o ecossistema, mais vulnerável ele se torna às oscilações climáticas³³.

Os dados por categoria fundiária dentro das áreas suscetíveis à desertificação são especialmente reveladores. Entre 2001 e 2021, houve redução das áreas conservadas em todas as categorias analisadas³¹, com perdas mais acentuadas nos assentamentos da reforma agrária e nas pequenas propriedades rurais, como mostra a **Figura 6**.

Figura 6 – Total das áreas conservadas (%) por categoria fundiária entre 2001 e 2021



A redução da cobertura vegetal nessas categorias fundiárias resulta de pressões diferenciadas, cuja importância varia entre regiões e períodos^{34.35}. Entre os fatores documentados estão extração ilegal de madeira^{35.36}, grilagem³⁷, mineração³⁵, expansão agropecuária^{35.36} e energética^{35.38}, fragilidade da proteção

territorial^{35,37} e agravamento das secas³⁹. Os dados não autorizam atribuir uma causa única à degradação³⁴, mas demonstram que territórios socialmente vulnerabilizados estão submetidos a pressões ambientais e econômicas que excedem sua capacidade de resposta^{34,35,37}.

Esse quadro define a posição singular da Caatinga diante do mercado de carbono: a elevada eficiência de captura e a extensão das áreas degradadas indicam potencial concreto de geração de remoções, enquanto os territórios indígenas, quilombolas, os assentamentos e as pequenas propriedades, que mantêm níveis elevados de conservação, seguem sujeitos a pressões crescentes de degradação e a contextos de fragilidade fundiária. São territórios que guardam parte relevante do ativo ambiental do bioma e que, sem proteção adequada, ficam expostos tanto à perda da vegetação quanto a arranjos desvantajosos. O modo como o mercado tratará essa condição definirá se ele remunera quem conservou o bioma ou se aprofunda as desigualdades existentes.

4. Quais os desafios e as barreiras para o funcionamento do mercado na Caatinga?

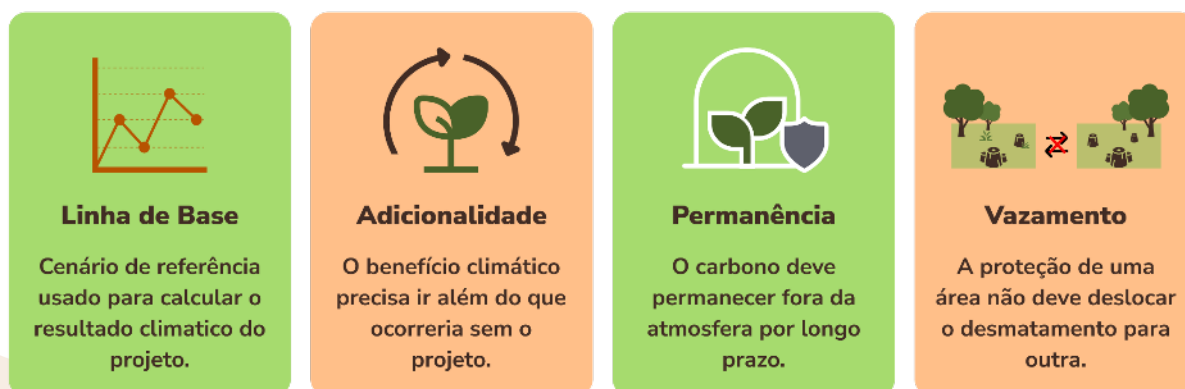
Os desafios são três, e todos têm a mesma raiz: as regras do mercado foram construídas sem a Caatinga em vista. O primeiro é construir sistemas de certificação e metodologias feitos para o bioma; o segundo é democratizar a certificação aos diferentes atores do território, dos povos e comunidades tradicionais aos pequenos e médios proprietários, para que um crédito de carbono socialmente justo seja possível; o terceiro é assegurar a integridade socioambiental dos créditos, de modo que a correção climática venha acompanhada da legitimidade dos arranjos territoriais e da autonomia de quem vive no bioma. As barreiras que se interpõem a cada um deles são conhecidas: metodologias de medição desenvolvidas para florestas úmidas, que não reconhecem a dinâmica da Caatinga; os custos e a complexidade da certificação, somados à fragilidade fundiária, que concentram os projetos em grandes propriedades; e as assimetrias de informação, capacidade técnica e poder contratual, que permitem gerar créditos climaticamente corretos em arranjos que retiram das comunidades o controle sobre seus territórios, dados e decisões. Esta seção examina cada desafio e suas barreiras, nessa ordem.

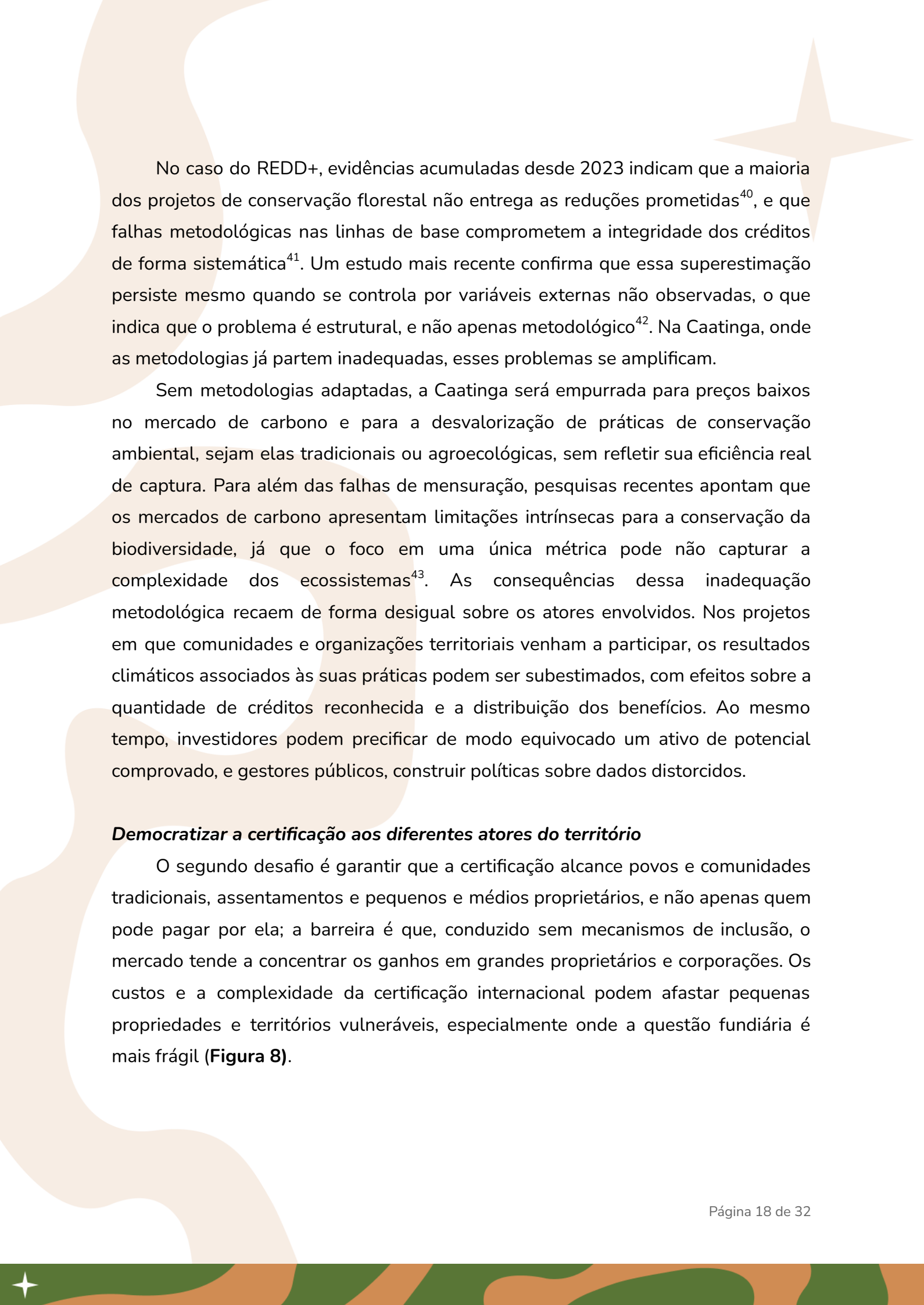
Construir sistemas de certificação e metodologias feitos para a Caatinga

Este é o primeiro desafio, e sua barreira é técnica: os sistemas de MRV adotados pelas principais certificadoras foram desenvolvidos para florestas tropicais úmidas, onde a cobertura vegetal varia pouco ao longo do ano. A Caatinga é uma floresta predominantemente decídua, ou seja, perde suas folhas durante a estação seca. Um sistema de monitoramento que não reconheça essa dinâmica interpretará a perda sazonal de folhas como degradação. A rápida resposta da vegetação aos pulsos de chuva exige metodologias capazes de capturar essas variações temporais, sem subvalorizar o bioma. E a alta variabilidade das chuvas de um ano para outro torna tecnicamente inadequada qualquer linha de base estática, isto é, qualquer cenário fixo de referência sobre o que aconteceria com o carbono na ausência do projeto.

A esses desajustes somam-se problemas que a literatura identifica nos sistemas de certificação em geral¹². Quatro se destacam e podem representar falhas nos critérios básicos de integridade (**Figura 7**). O primeiro é a superestimação das linhas de base, os cenários de referência usados para calcular quanto carbono o projeto evitou ou removeu em comparação com o que aconteceria sem ele; linhas de base infladas geram créditos que não correspondem a reduções reais. O segundo é a falta de adicionalidade, quando os projetos não geram benefícios climáticos além do que já ocorreria naturalmente. O terceiro é a ausência de garantias de permanência, ou seja, de que o carbono sequestrado permanecerá fora da atmosfera por longo prazo. O quarto é o vazamento, quando a proteção de uma área apenas desloca o desmatamento para outra.

Figura 7 – Quatro critérios para a integridade dos créditos de carbono





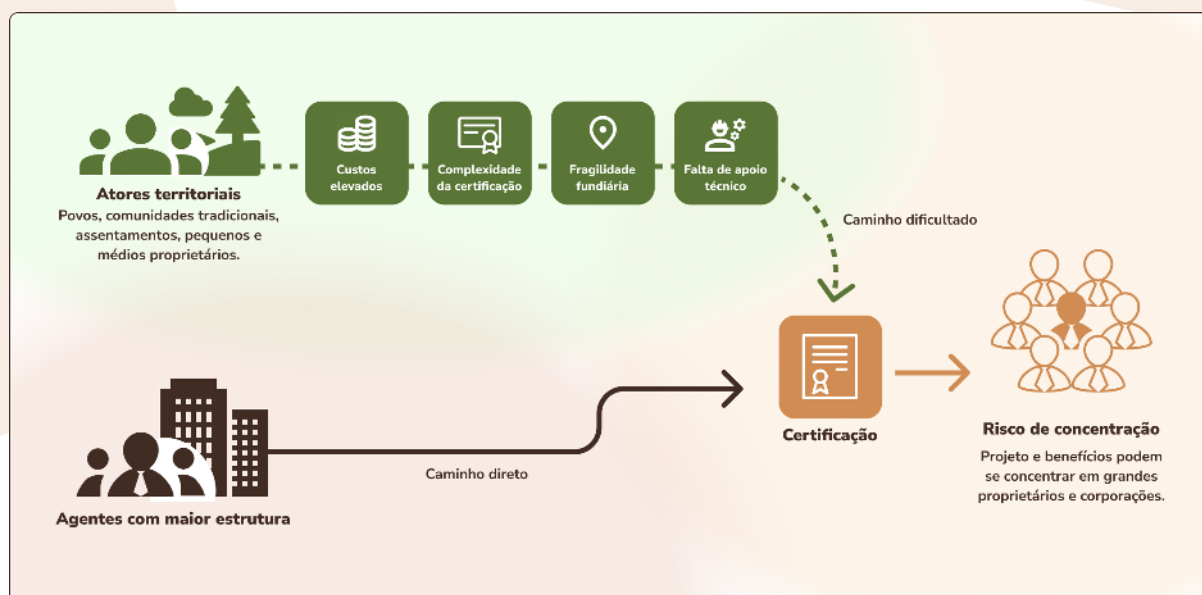
No caso do REDD+, evidências acumuladas desde 2023 indicam que a maioria dos projetos de conservação florestal não entrega as reduções prometidas⁴⁰, e que falhas metodológicas nas linhas de base comprometem a integridade dos créditos de forma sistemática⁴¹. Um estudo mais recente confirma que essa superestimação persiste mesmo quando se controla por variáveis externas não observadas, o que indica que o problema é estrutural, e não apenas metodológico⁴². Na Caatinga, onde as metodologias já partem inadequadas, esses problemas se amplificam.

Sem metodologias adaptadas, a Caatinga será empurrada para preços baixos no mercado de carbono e para a desvalorização de práticas de conservação ambiental, sejam elas tradicionais ou agroecológicas, sem refletir sua eficiência real de captura. Para além das falhas de mensuração, pesquisas recentes apontam que os mercados de carbono apresentam limitações intrínsecas para a conservação da biodiversidade, já que o foco em uma única métrica pode não capturar a complexidade dos ecossistemas⁴³. As consequências dessa inadequação metodológica recaem de forma desigual sobre os atores envolvidos. Nos projetos em que comunidades e organizações territoriais venham a participar, os resultados climáticos associados às suas práticas podem ser subestimados, com efeitos sobre a quantidade de créditos reconhecida e a distribuição dos benefícios. Ao mesmo tempo, investidores podem precificar de modo equivocado um ativo de potencial comprovado, e gestores públicos, construir políticas sobre dados distorcidos.

Democratizar a certificação aos diferentes atores do território

O segundo desafio é garantir que a certificação alcance povos e comunidades tradicionais, assentamentos e pequenos e médios proprietários, e não apenas quem pode pagar por ela; a barreira é que, conduzido sem mecanismos de inclusão, o mercado tende a concentrar os ganhos em grandes proprietários e corporações. Os custos e a complexidade da certificação internacional podem afastar pequenas propriedades e territórios vulneráveis, especialmente onde a questão fundiária é mais frágil (**Figura 8**).

Figura 8 - Barreiras de acesso à certificação no mercado de carbono



Esse risco não é hipotético. A expansão de usinas eólicas e solares na Caatinga, embora baseada em fontes renováveis de energia, concentrou benefícios econômicos em alguns agentes e distribuiu custos ambientais e sociais para as comunidades locais. No Nordeste, foram identificados impactos socioambientais relacionados à expansão da energia eólica, incluindo violações de direitos humanos, conflitos fundiários, assimetrias contratuais em arrendamentos de longa duração, prejuízos à agricultura familiar, supressão de vegetação nativa e agravos à saúde das comunidades vizinhas⁴⁴. Pesquisa sobre a expansão solar fotovoltaica no semiárido paraibano identificou alterações no solo, perda de habitats, pressão sobre fauna e flora, e perpetuação de desigualdades socioambientais em territórios já vulnerabilizados pela desertificação⁴⁵. Em 2024, a Caatinga concentrou 62% das áreas ocupadas por usinas solares de médio e grande porte instaladas no Brasil⁴⁶.

O mercado de carbono pode repetir esse padrão se não houver salvaguardas específicas. Outro risco concreto é a concentração geográfica. A experiência observada na Amazônia e no Cerrado sugere que a implantação tende a privilegiar regiões com melhor infraestrutura e presença de grandes proprietários ou de outros agentes econômicos capazes de arcar com os custos de elaboração, certificação e monitoramento. Essa facilidade pode decorrer tanto da concentração da propriedade formal quanto da fragilidade do reconhecimento jurídico dos direitos territoriais de comunidades camponesas e tradicionais. Dessa forma, a seletividade

territorial pode direcionar os recursos para áreas consideradas mais rentáveis, enquanto territórios submetidos à desertificação, à pressão sobre os recursos naturais e a maiores vulnerabilidades socioeconômicas recebem menor atenção. O resultado pode ser o aprofundamento das desigualdades territoriais e o distanciamento entre a distribuição dos investimentos privados e as prioridades públicas de conservação, restauração e garantia dos direitos das comunidades camponesas.

Assegurar a integridade socioambiental dos créditos

O terceiro desafio é fazer com que um crédito só seja considerado íntegro quando sua geração respeita os territórios; a barreira é que a certificação hoje mede carbono, não legitimidade. Em territórios camponeses e tradicionais, a vegetação, o solo e as práticas de manejo estão voltados à produção de alimentos, ao acesso à água, às relações comunitárias e à reprodução dos modos de vida. Quando os resultados climáticos gerados nesses territórios são convertidos em ativos negociáveis, os usos locais podem ser restringidos e subordinados às exigências da certificação e da rentabilidade, com transferência do controle sobre práticas produtivas, dados e monitoramento para desenvolvedores e intermediários, concentração da renda e conflitos sobre a titularidade e a repartição dos benefícios, dinâmica que tende a enfraquecer a governança coletiva.

Os próprios mecanismos de integridade climática podem produzir efeitos adversos quando aplicados sem participação comunitária. Linhas de base construídas sem as comunidades podem desconsiderar sua história de conservação e seus conhecimentos locais. A exigência de adicionalidade pode dificultar a remuneração de quem conservou o território durante décadas, ao favorecer áreas sob maior ameaça de degradação. Garantias de permanência podem impor contratos de longa duração e transferir às comunidades a responsabilidade por incêndios, secas e outros eventos que escapam ao seu controle. E medidas contra o vazamento podem ampliar o monitoramento e as restrições sobre áreas e populações que não participaram da decisão sobre o projeto. Dessa forma, um crédito pode corresponder a uma redução ou remoção real e, ainda assim, carecer de integridade socioambiental em razão das condições territoriais, contratuais e distributivas de sua geração.

5. Quais as condições para um mercado justo e confiável na Caatinga?

As condições existem, podem ser nomeadas e respondem, uma a uma, aos desafios da seção anterior. Ao desafio de assegurar a integridade socioambiental corresponde a condição de partida: integridade climática e socioambiental garantidas desde a concepção dos projetos. Ao desafio de construir sistemas e metodologias feitos para o bioma correspondem metodologias e conhecimento à altura da Caatinga, articulados por uma plataforma própria de cooperação científica.

Ao desafio de democratizar a certificação correspondem políticas públicas que não se subordinem à geração de créditos, proteção efetiva à agricultura familiar e aos projetos comunitários, e um fundo específico com governança territorial. Nenhuma dessas condições está assegurada de antemão, e todas pressupõem um enquadramento: o mercado de carbono não substitui a redução direta das emissões pelos agentes responsáveis, nem os investimentos públicos estruturantes necessários à conservação do bioma, ao combate à desertificação, à restauração de áreas degradadas e à melhoria das condições de vida de sua população, embora possa mobilizar recursos complementares para algumas dessas finalidades. Detalhadas a seguir, essas condições definem a distância entre um mercado que remunera quem conservou e um mecanismo que aprofunda desigualdades.

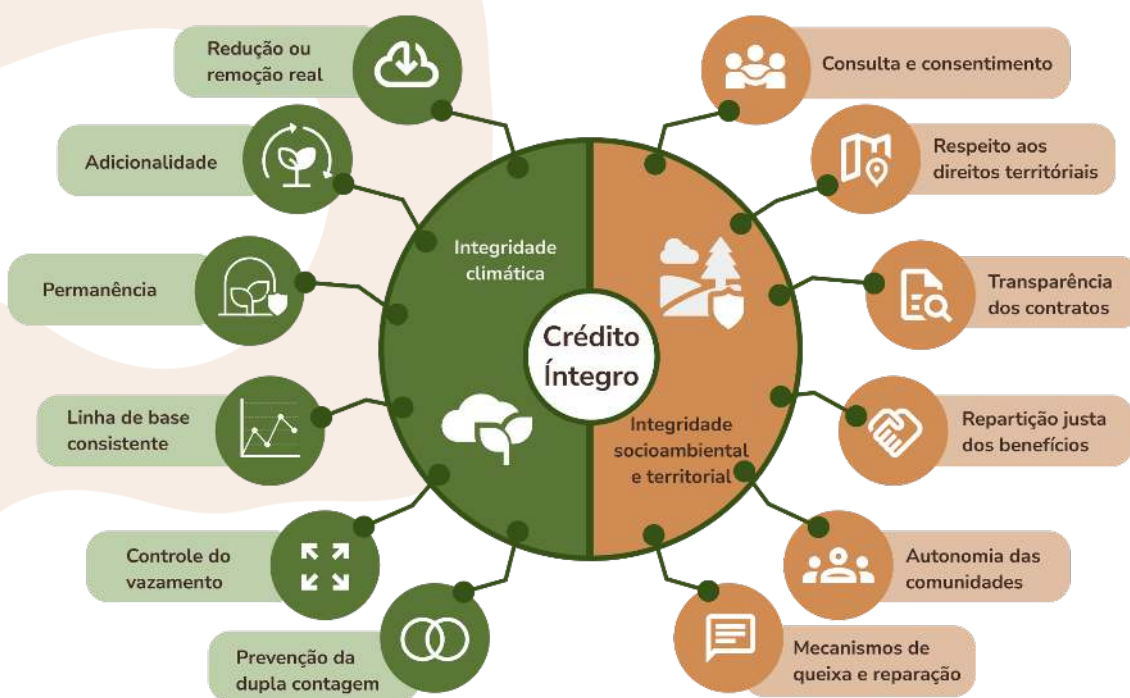
Integridade climática e socioambiental como condições de partida

Esta é a condição que responde ao terceiro desafio e antecede as demais. Para que as alegações climáticas associadas aos créditos sejam consideradas confiáveis, a literatura propõe requisitos como embasamento em evidências científicas, adicionalidade, permanência dos resultados e transparência dos dados e processos⁴⁷, aos quais se somam linhas de base consistentes, o controle do vazamento e a prevenção da dupla contagem. São justamente os pontos em que, como mostrou a seção anterior, os sistemas de certificação vêm apresentando falhas estruturais.

A integridade climática, contudo, não é suficiente para assegurar a legitimidade dos projetos, que depende também da integridade socioambiental e

territorial. Na prática, a consulta livre, prévia e informada e o consentimento, assegurados pela Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024, aos povos indígenas e às comunidades tradicionais, não podem ser reduzidos a etapas burocráticas de validação de decisões previamente tomadas: exigem acesso a informações compreensíveis, assessoria técnica e jurídica independente, tempo adequado para deliberação e possibilidade efetiva de recusa. Da mesma forma, a repartição de benefícios não deve se limitar a pagamentos simbólicos, e os mecanismos de queixa, fiscalização e reparação precisam operar de maneira acessível e efetiva. Essas duas dimensões constituem o ponto de partida: projetos que não as atendam desde a concepção não deveriam ser considerados aptos a gerar créditos no bioma, independentemente do volume de carbono que aleguem remover (**Figura 9**).

Figura 9 - Duas dimensões de um crédito de carbono íntegro



Metodologias e conhecimento à altura do bioma

Responder ao primeiro desafio exige enfrentar as condições ecológicas que, como visto, inviabilizam a aplicação direta de metodologias concebidas para florestas úmidas, e que impõem exigências adicionais: a importância dos estoques subterrâneos e do carbono do solo, pouco capturados pelos protocolos

convencionais, e a necessidade de que linhas de base, estimativas de remoção e cálculos de permanência representem adequadamente as dinâmicas do bioma, cujos erros podem produzir tanto a superestimação quanto a subestimação dos resultados climáticos.

Uma análise sobre a restauração de terras secas desmatadas indica que essas áreas podem recuperar estoques de carbono e produzir benefícios hídricos, ecológicos e climáticos, desde que sejam adotadas metodologias adequadas⁴⁸. O carbono do solo, que constitui parcela relevante dos estoques do bioma, também representa um campo importante de pesquisa e monitoramento. Entretanto, resultados relacionados ao solo somente podem fundamentar a emissão de créditos quando atendam a critérios rigorosos de mensuração, adicionalidade e permanência⁴⁹.

Uma plataforma de cooperação científica para a Caatinga

Responder a essas exigências metodológicas requer um esforço coordenado de produção de conhecimento. Uma plataforma específica de cooperação científica e organização de dados sobre o carbono na Caatinga, com participação de instituições de pesquisa locais, órgãos públicos, organizações sociais e representantes dos territórios envolvidos, poderia cumprir esse papel: apoiar a produção de conhecimento, o desenvolvimento e a avaliação de metodologias, a transparência dos dados e o monitoramento participativo. Essa plataforma não substituiria as competências regulatórias e certificadoras legalmente estabelecidas, nem criaria ativos paralelos, mas contribuiria para que as regras aplicáveis considerassem as características ecológicas e sociais do bioma.

O papel das políticas públicas

Democratizar a certificação, o segundo desafio, começa pelo desenho das políticas públicas, e é necessário distinguir instrumentos com fundamentos, finalidades e regimes jurídicos diferentes. A Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais pode apoiar práticas de conservação e restauração sem que os resultados sejam convertidos em créditos compensatórios; o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões estabelece obrigações para agentes regulados e disciplina ativos específicos; e os créditos do mercado voluntário permanecem submetidos a

outros padrões e formas de certificação. No âmbito do SBCE, merece atenção especial a futura regulamentação das remoções ocorridas em áreas rurais pertencentes ou controladas por operadores regulados: para que a conciliação de obrigações não se converta em vetor de concentração fundiária, ela deverá estabelecer critérios de caracterização e comprovação do controle da área, identificação georreferenciada, tratamento das sobreposições com territórios coletivos e assentamentos e prevenção da dupla contagem. O diagnóstico institucional sobre projetos de carbono e pagamentos por serviços ambientais conduzido pelo BNDES, pelo Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA) e pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) identificou caminhos e lacunas que podem subsidiar essa diferenciação⁵⁰.

O Plano Brasil-Nordeste de Transformação Ecológica, lançado na COP 30, inclui um eixo de "Bioeconomia e Caatinga", voltado à valorização e à recuperação do bioma por meio do fortalecimento da agricultura familiar e da agroecologia, e os programas jurisdicionais dos estados amazônicos oferecem experiências que podem ser estudadas para eventual adaptação. A articulação desses instrumentos com as políticas de combate à desertificação pode ampliar as fontes de financiamento para o bioma, sob duas condições: a adaptação exigiria avaliar as diferenças ecológicas, fundiárias, produtivas e institucionais entre os biomas, e nenhum desses arranjos deve subordinar políticas públicas permanentes de conservação, agroecologia e desenvolvimento territorial às oscilações do mercado de créditos. Áreas de elevada relevância socioambiental podem não apresentar as condições metodológicas ou econômicas exigidas pelo mercado e, ainda assim, devem ser priorizadas pelos investimentos públicos. Na mesma direção, o BNDES, que já financiou projetos de restauração com foco em carbono na Mata Atlântica e na Amazônia, poderia ampliar essas linhas para a Caatinga, desde que o apoio público não esteja condicionado à geração de créditos nem sirva apenas para reduzir custos e riscos de empreendimentos privados.

Para os gestores municipais e estaduais, as receitas vinculadas a resultados ambientais podem constituir fonte complementar de recursos, mas são condicionadas aos preços dos créditos, às metodologias reconhecidas, aos custos de certificação, à demanda e às regras de repartição de benefícios, e por isso não devem ser tratadas como base estável para o financiamento de políticas

continuadas. Sua gestão requer capacidade técnica e institucional para monitoramento, prestação de contas, transparência e participação social, de modo a evitar que a urgência por novas receitas favoreça compromissos contratuais ou territoriais incompatíveis com o interesse público.

Agricultura familiar e projetos comunitários

A democratização da certificação tem destinatário concreto. A agricultura familiar agroecológica possui importância produtiva, social, cultural e ecológica para os territórios da Caatinga. Sistemas agroflorestais, iniciativas de restauração e outras formas de manejo sustentável podem ampliar os estoques de carbono no solo, conservar a vegetação nativa, a água e a biodiversidade e fortalecer a resiliência dos sistemas produtivos, benefícios que existem por si e não pertencem ao mercado, ainda que essas práticas venham a ser vinculadas a projetos de carbono.

A eventual participação no mercado deve, portanto, partir do reconhecimento da amplitude dessas funções, que não se reduzem aos resultados climáticos passíveis de quantificação e remuneração. A geração de créditos não pode se tornar o parâmetro que define o valor, a orientação ou a continuidade das práticas, e a remuneração de resultados climáticos deve ter caráter complementar: não pode transferir às famílias e comunidades custos, riscos ou responsabilidades desproporcionais, restringir seus modos de produção nem permitir que terceiros se apropriem, sem decisão livre e informada, dos dados e dos resultados derivados de suas práticas.

Um fundo específico para a Caatinga

Democratizar a certificação exige também financiamento acessível. A criação de um fundo específico para a Caatinga poderia articular recursos destinados à pesquisa, à conservação, à restauração, à agroecologia e ao fortalecimento das organizações territoriais. Esse fundo seria alimentado por recursos públicos e por parcela dos valores gerados pelas transações realizadas no bioma, assegurando reinvestimento local. Seu desenho, contudo, deve separar duas funções: o financiamento de ações socioambientais, devido independentemente da emissão de créditos, e o apoio a projetos de carbono que as comunidades tenham escolhido de

forma autônoma. A governança desse fundo deveria incluir instituições públicas, organizações sociais, comunidades camponesas e tradicionais e entidades de pesquisa, com critérios transparentes de seleção e destinação dos recursos.

A governança que definirá os resultados

A garantia de que os recursos eventualmente mobilizados contribuam para a conservação e para o bem-estar das populações que vivem no bioma depende de sistemas de governança, controle social, transparência e responsabilização capazes de assegurar direitos e distribuir adequadamente benefícios, custos e riscos. Não existe um resultado previamente determinado para a aproximação entre a Caatinga e os mercados de carbono. Seus efeitos dependerão das escolhas políticas, dos investimentos públicos, das regras de regulação, da capacidade de organização dos atores territoriais e das correlações de força que se estabelecerem ao longo da implementação dos mecanismos regulados e voluntários. A questão central, portanto, não é apenas quanto carbono poderá ser convertido em créditos, mas quem definirá as regras, controlará os dados, assumirá os riscos, receberá os recursos e decidirá sobre os territórios.

Referências

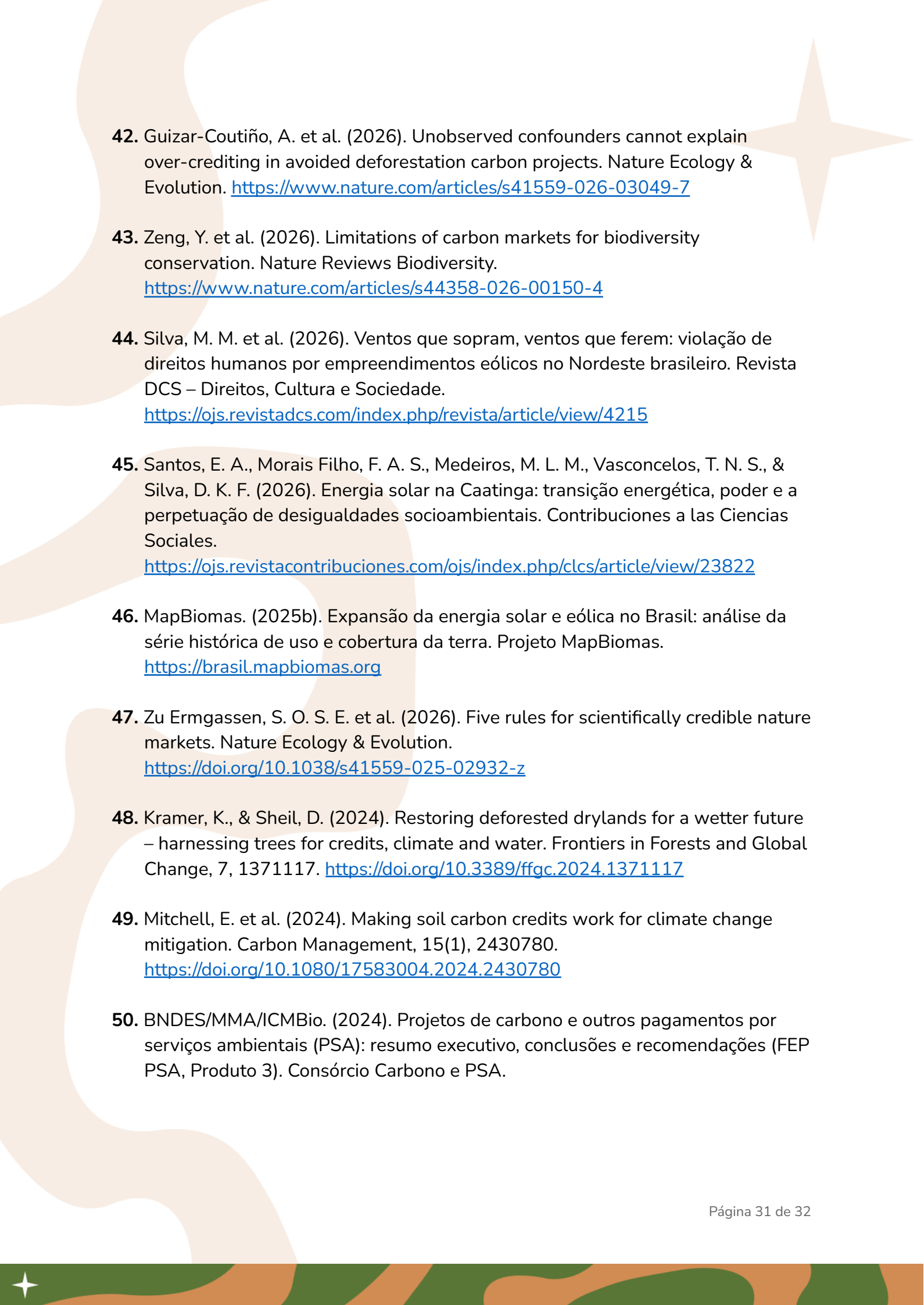
1. CGU – Controladoria-Geral da União. (2025). CGU avalia mercado de carbono no Brasil. Brasília: CGU.
2. Da Costa, L. M. et al. (2025). A comparative analysis of GHG inventories and ecosystems carbon absorption in Brazil. *Science of The Total Environment*, 958, 177932. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177932>
3. Vargas, D. B., Delazeri, L. M. M., & Ferreira, V. H. P. (2022a). Mercado de carbono voluntário no Brasil: na realidade e na prática. *Observatório de Conhecimento e Inovação em Bioeconomia*, FGV EESP. <https://eesp.fgv.br/centros/observatorios/bioeconomia>
4. Aguirre-Gutiérrez, J. et al. (2025). Tropical forests in the Americas are changing too slowly to track climate change. *Science*, 387(6738), eadl5414. <https://doi.org/10.1126/science.adl5414>

5. McKinsey & Company. (2022). Mercado voluntário de carbono tem potencial gigantesco no Brasil. McKinsey & Company.
<https://www.mckinsey.com/br/our-insights/all-insights/mercado-voluntario-de-carbono-tem-potencial-gigantesco-no-brasil>
6. World Bank. (2023). State and Trends of Carbon Pricing 2023. Washington, DC: World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/39796>
7. Vargas, D. B., Delazeri, L. M. M., & Ferreira, V. H. P. (2022b). O avanço do mercado voluntário de carbono no Brasil: desafios estruturais, técnicos e científico-tecnológicos. Observatório de Conhecimento e Inovação em Bioeconomia, FGV EESP. <https://eesp.fgv.br/centros/observatorios/bioeconomia>
8. Probst, B. S. et al. (2024). Systematic assessment of the achieved emission reductions of carbon crediting projects. Nature Communications, 15(1), 9562. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-53645-z>
9. Integrity Council for the Voluntary Carbon Market (ICVCM). (2024). Core Carbon Principles, Assessment Framework and Assessment Procedure. Version 3. <https://icvcm.org/wp-content/uploads/2024/05/CCP-Foreword-V3-FINAL-10May24.pdf>
10. Voluntary Carbon Markets Integrity Initiative (VCMI). (2024). VCMI Claims Code of Practice. Version 2.1.
11. Climate Action Data Trust (CAD Trust). (2023). CAD Trust Data Dashboard is live: CAD Trust launches its Public Data Dashboard to enhance transparency in carbon markets. <https://climateactiondata.org/cad-trust-data-dashboard-is-live/>
12. Romm, J., Lezak, S., & Alshamsi, A. (2025). Are carbon offsets fixable? Annual Review of Environment and Resources, 50, 649–680. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112823-064813>
13. Schneider, L., & La Hoz Theuer, S. (2019). Environmental integrity of international carbon market mechanisms under the Paris Agreement. Climate Policy, 19(3), 386–400. <https://doi.org/10.1080/14693062.2018.1521332>
14. Blaufelder, C., Levy, C., Mannion, P., & Pinner, D. (2021). A blueprint for scaling voluntary carbon markets to meet the climate challenge. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/a-blueprint-for-scaling-voluntary-carbon-markets-to-meet-the-climate-challenge>

15. Porsborg-Smith, A., Nielsen, J., Owolabi, B., & Clayton, C. (2023). The voluntary carbon market is thriving. Boston Consulting Group.
<https://www.bcg.com/publications/2023/why-the-voluntary-carbon-market-is-thriving>
16. Morgan Stanley. (2023). Where the carbon offset market is poised to surge. Morgan Stanley Research.
<https://morganstanley.com/ideas/carbon-offset-market-growth>
17. ICC Brasil. (2025). Oportunidades para o Brasil em mercados de carbono: Relatório 2025. São Paulo: ICC Brasil/WayCarbon.
https://waycarbon.com/pt/wp-content/uploads/sites/3/2025/11/RELATORIO_ICC_BR_2025_PT-2.pdf
18. Amcham Brasil. (2025). Brasil pelo Meio Ambiente (BPMA): Investimentos privados em sustentabilidade e descarbonização. São Paulo: Amcham Brasil.
19. Brasil. Ministério da Fazenda. Secretaria Extraordinária do Mercado de Carbono. (2026). Consulta pública sobre a Portaria de etapas de implementação das obrigações de MRV no âmbito do SBCE. Plataforma Brasil Participativo.
<https://brasilparticipativo.presidencia.gov.br/processes/obrigacoesmrvsbce>
20. Brasil. Ministério da Fazenda. (2025). Projeções macroeconômicas do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), com base em estimativas do Banco Mundial. Brasília: Ministério da Fazenda.
21. Poulter, B. et al. (2014). Contribution of semi-arid ecosystems to interannual variability of the global carbon cycle. *Nature*, 509(7502), 600–603.
<https://doi.org/10.1038/nature13376>
22. Ahlström, A. et al. (2015). The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO₂ sink. *Science*, 348(6237), 895–899.
<https://doi.org/10.1126/science.aaa1668>
23. Chaturvedi, R. K. et al. (2025). Disturbance mediated changes in litter turnover and nutrient use efficiency facilitate vegetation shifts in tropical dry ecosystems: Insights from a 10-year vegetation management study. *Land Degradation & Development*, 37(8), 3652–3672. <https://doi.org/10.1002/ldr.70334>
24. Sudene. (2025). Demografia. Data Nordeste. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste.
<https://datanordeste.sudene.gov.br/data-panel/populacao>

- 
25. Mendes, K. R. et al. (2025). The caatinga dry tropical forest: A highly efficient carbon sink in South America. *Agricultural and Forest Meteorology*, 369, 110573. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2025.110573>
 26. Oliveira, C. L. D. et al. (2023). A Caatinga emite ou sequestra carbono? *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(2), 791–804.
 27. Silva, J. N. B. da et al. (2024). Estimativas de sequestro de carbono por diferentes métodos em ecossistemas florestais: uma abordagem sobre a floresta tropical sazonalmente seca (Caatinga). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11267196>
 28. Embrapa. (2025). Sistemas resilientes são a chave para enfrentar as mudanças climáticas na Caatinga. Portal Embrapa. <https://www.embrapa.br/en/cop30/busca-de-noticias/-/noticia/103130824/sistemas-resilientes-sao-a-chave-para-enfrentar-as-mudancas-climaticas-na-caatinga>
 29. Santos e Silva, C. M. et al. (2024). Rainfall and rain pulse role on energy, water vapor and CO₂ exchanges in a tropical semiarid environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 345, 109829. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109829>
 30. Mendes, K. R. et al. (2023). Interannual variability of energy and CO₂ exchanges in a remnant area of the Caatinga biome under extreme rainfall conditions. *Sustainability*, 15(13), 10085. <https://doi.org/10.3390/su151310085>
 31. Sudene. (2025). Boletim temático: Desertificação. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. <https://www.gov.br/sudene/pt-br/assuntos/boletins-tematicos/arquivos/blt-sdn-desert.pdf>
 32. De Oliveira, M. L. et al. (2022). Remote sensing-based assessment of land degradation and drought impacts over terrestrial ecosystems in Northeastern Brazil. *Science of The Total Environment*, 835, 155490. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155490>
 33. Terry, T. J. et al. (2024). Disturbance amplifies sensitivity of dryland productivity to precipitation variability. *Science Advances*, 10(30), eadm9732. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adm9732>

34. MapBiomas. (2025a). Relatório Anual do Desmatamento no Brasil 2024 — RAD 2024. Projeto MapBiomas.
<https://alerta.mapbiomas.org/rad-2024/navegue-pelo-relatorio/>
35. Brasil. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. (2024). Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas na Caatinga: PPCaatinga 2024–2027. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima.
<https://www.gov.br/icmbio/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/governanca-e-gestao-estrategica/gestao-estrategica/compromissos-assumidos/combate-ao-desmatamento/ppcaatinga.pdf>
36. Antongiovanni, M., Venticinque, E. M., Matsumoto, M., & Fonseca, C. R. (2020). Chronic anthropogenic disturbance on Caatinga dry forest fragments. *Journal of Applied Ecology*, 57(10), 2064–2074.
<https://doi.org/10.1111/1365-2664.13686>
37. Instituto Socioambiental – ISA. (2025). Terras Indígenas não demarcadas são as mais vulneráveis na Caatinga, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal. Instituto Socioambiental.
<https://www.socioambiental.org/noticias-socioambientais/terras-indigenas-nao-demarcadas-sao-mais-vulneraveis-na-caatinga-mata>
38. Neri, M., Jameli, D., Bernard, E., & Melo, F. P. L. (2019). Green versus green? Adverting potential conflicts between wind power generation and biodiversity conservation in Brazil. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 17(3), 131–135. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2019.08.004>
39. Marengo, J. A., Alves, L. M., Alvalá, R. C. S., Cunha, A. P. M. A., Brito, S. S. B., Moraes, O. L. L. (2018). Climatic characteristics of the 2010–2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90(2, supl. 1), 1973–1985. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>
40. West, T. A. P. et al. (2023). Action needed to make carbon offsets from forest conservation work for climate change mitigation. *Science*, 381(6660), 873–877.
<https://doi.org/10.1126/science.ade3535>
41. West, T. A. P., Bomfim, B., & Haya, B. K. (2024). Methodological issues with deforestation baselines compromise the integrity of carbon offsets from REDD+. *Global Environmental Change*, 87, 102863.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2024.102863>

- 
42. Guizar-Coutiño, A. et al. (2026). Unobserved confounders cannot explain over-crediting in avoided deforestation carbon projects. *Nature Ecology & Evolution*. <https://www.nature.com/articles/s41559-026-03049-7>
43. Zeng, Y. et al. (2026). Limitations of carbon markets for biodiversity conservation. *Nature Reviews Biodiversity*. <https://www.nature.com/articles/s44358-026-00150-4>
44. Silva, M. M. et al. (2026). Ventos que sopram, ventos que ferem: violação de direitos humanos por empreendimentos eólicos no Nordeste brasileiro. *Revista DCS – Direitos, Cultura e Sociedade*. <https://ojs.revistadcs.com/index.php/revista/article/view/4215>
45. Santos, E. A., Morais Filho, F. A. S., Medeiros, M. L. M., Vasconcelos, T. N. S., & Silva, D. K. F. (2026). Energia solar na Caatinga: transição energética, poder e a perpetuação de desigualdades socioambientais. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*. <https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/23822>
46. MapBiomass. (2025b). Expansão da energia solar e eólica no Brasil: análise da série histórica de uso e cobertura da terra. Projeto MapBiomass. <https://brasil.mapbiomas.org>
47. Zu Ermgassen, S. O. S. E. et al. (2026). Five rules for scientifically credible nature markets. *Nature Ecology & Evolution*. <https://doi.org/10.1038/s41559-025-02932-z>
48. Kramer, K., & Sheil, D. (2024). Restoring deforested drylands for a wetter future – harnessing trees for credits, climate and water. *Frontiers in Forests and Global Change*, 7, 1371117. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1371117>
49. Mitchell, E. et al. (2024). Making soil carbon credits work for climate change mitigation. *Carbon Management*, 15(1), 2430780. <https://doi.org/10.1080/17583004.2024.2430780>
50. BNDES/MMA/ICMBio. (2024). Projetos de carbono e outros pagamentos por serviços ambientais (PSA): resumo executivo, conclusões e recomendações (FEP PSA, Produto 3). Consórcio Carbono e PSA.



Universidade Federal
de Campina Grande

