

X PRÊMIO SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO EM ESTUDOS DE ECONOMIA E MERCADO FLORESTAL

Tema: Metodologias para precificação de ativos florestais

Eixo temático: Eixo 7 – Impacto do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE)

Precificação territorial de ativos florestais no Pampa brasileiro: carbono do solo, multigases e integridade ambiental no contexto do SBCE

Precificação territorial de ativos florestais no Pampa brasileiro: carbono do solo, multigases e integridade ambiental no contexto do SBCE

Resumo

A precificação de ativos florestais no contexto do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE) exige metodologias capazes de integrar valor econômico, integridade ambiental, rastreabilidade territorial e critérios de mensuração, relato e verificação (MRV). Em biomas campestres, como o Pampa brasileiro, esse desafio é particularmente relevante, pois parte decisiva do valor climático encontra-se abaixo da superfície, no carbono orgânico do solo, nas raízes, na permanência dos campos nativos e na estabilidade do uso da terra. Este artigo propõe um Sistema de Preço Territorial para ativos florestais no Pampa, articulando cobertura e uso da terra, carbono orgânico do solo, biomassa florestal, risco multigases, integridade ambiental e compatibilidade futura com métricas de CO₂Flux como camada complementar de MRV. A metodologia classifica o território em zonas de perda, estabilidade e ganho de carbono orgânico do solo, converte essas variações em CO₂eq e as associa a fatores de ajuste do preço-base. A proposta estrutura três produtos integrados: um sistema de alocação de custos ambientais, uma medida de Poupança Ambiental Ajustada e um Registro Técnico de Integridade Territorial do Ativo Florestal. A abordagem oferece subsídios ao Serviço Florestal Brasileiro, ao SBCE, a programas de Pagamento por Serviços Ambientais, inventários florestais, restauração ecológica, crédito rural e mecanismos de financiamento ambiental, permitindo que a precificação incorpore o território como unidade de valor, risco, custo e permanência.

Palavras-chave: ativos florestais; carbono orgânico do solo; precificação territorial.

Classificação JEL: Q23; Q51; Q54; Q56; Q58; R14.

1 Introdução

No Pampa, o tempo não passa apenas sobre a paisagem; ele se acumula no solo. A imagem literária consagrada por Verissimo (2004), na trilogia *O Tempo e o Vento*, originalmente publicada entre 1949 e 1962, permite compreender essa dimensão de longa duração: a terra, o campo, o vento e a história formam uma mesma matéria territorial. O que a literatura registra como memória, a economia ambiental contemporânea precisa reconhecer como valor: a permanência dos processos ecológicos, a estabilidade do uso da terra e a integridade invisível que sustenta a vida abaixo da superfície. Entre a terra narrada por Verissimo e o carbono negociado nos mercados climáticos há uma travessia histórica na qual a natureza passa a ser traduzida em ativos, métricas, certificados e expectativas financeiras.

A expansão capitalista, por sua vez, nunca ocorreu fora da natureza, mas por meio dela. Madeira, solos, água, rotas marítimas, florestas e territórios coloniais sustentaram a circulação mercantil, a construção naval, a expansão comercial e a formação dos centros

hegemônicos de acumulação. A interpretação de Arrighi (1996) sobre os ciclos sistêmicos de acumulação ajuda a compreender como a mobilização material da natureza acompanhou a formação dos mercados, das finanças e da economia mundial moderna. No presente, a conversão do carbono em ativo climático recoloca esse problema sob nova forma: se o preço se distancia dos fundamentos biofísicos do território, o ativo ambiental pode expressar mais uma expectativa financeira especulativa do que um resultado climático verificável (KINDLEBERGER; ALIBER, 2011). A leitura territorial de Santos (1996), Santos (2000) reforça que dados, índices, imagens de satélite e registros técnicos só produzem valor público quando permanecem vinculados ao chão que pretendem representar.

Esse problema torna-se particularmente relevante no contexto do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), instituído pela Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024. A lei define o Certificado de Redução ou Remoção Verificada de Emissões (CRVE) como ativo transacionável representativo de uma tonelada de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq), condicionado à adoção de metodologia credenciada e registro no âmbito do sistema. Também atribui centralidade à mensuração, ao relato e à verificação, além de tratar de reversão de remoções, vazamento de emissões, dupla contagem, rastreabilidade e integração entre ativos climáticos e mercado financeiro (Brasil, 2024). Nesse cenário, a precificação de ativos florestais exige metodologias capazes de integrar carbono, território, permanência, risco e verificabilidade.

A base técnica internacional para esse debate vem sendo consolidada pelas diretrizes do IPCC para o setor AFOLU, que organizam a estimativa de mudanças de carbono por categorias de uso da terra, estratos territoriais e reservatórios, incluindo biomassa, matéria orgânica morta, solos e emissões não- CO_2 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019c). No caso de biomas campestres, as diretrizes para *grasslands* reconhecem que o carbono do solo é influenciado por manejo, pastejo, fogo, fertilização, irrigação, renovação de raízes e mudanças no uso da terra (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019d).

O Pampa brasileiro constitui território estratégico para testar esse desafio metodológico. Embora seja reconhecido como bioma campestre, combina campos nativos, formações florestais, silvicultura, áreas agrícolas, arroz irrigado, pecuária, áreas úmidas e solos que armazenam parte decisiva de seu valor climático. Os levantamentos de cobertura e uso da terra indicam forte transformação territorial desde 1985, com expansão da soja, do arroz irrigado, da agropecuária e da silvicultura sobre uma matriz historicamente marcada pelos campos nativos (MapBiomass, 2025a). Ao mesmo tempo, o MapBiomass Solo passou a disponibilizar estimativas anuais de estoque de carbono orgânico do solo na camada de 0–30 cm, permitindo que a dinâmica territorial seja analisada também abaixo da superfície (MapBiomass, 2025d). Essa configuração torna insuficiente uma metodologia de precificação baseada apenas na biomassa florestal visível.

As informações do Sistema Nacional de Informações Florestais (SNIF), do Inventário Florestal Nacional (IFN) e dos painéis do Serviço Florestal Brasileiro (SFB) reforçam essa necessidade de leitura integrada. O carbono florestal envolve biomassa aérea e subterrânea, raízes, necromassa e componentes florestais associados (Serviço Florestal Brasileiro, 2026b). No Pampa, esses componentes precisam ser avaliados em conjunto com a matriz campestre, com o carbono do solo e com as trajetórias históricas de conversão territorial. A silvicultura pode representar ativo florestal relevante, mas sua precificação não deve ser dissociada da

paisagem ecológica em que está inserida.

Diante disso, o problema de pesquisa que orienta este artigo pode ser formulado da seguinte maneira: como precificar ativos florestais em um bioma campestre no qual parte decisiva do valor climático está abaixo do solo e depende da integridade territorial do uso da terra? A pergunta norteadora é: de que forma o carbono orgânico do solo, sua variação temporal, a biomassa florestal, os riscos multigases, a compatibilidade futura com métricas de CO₂Flux e os critérios de mensuração, relato e verificação podem ser integrados em um sistema de preço territorial aplicável à precificação de ativos florestais no Pampa?

A hipótese do estudo é que a precificação de ativos florestais em biomas campestres não pode depender apenas da equivalência agregada em CO₂eq ou da biomassa arbórea visível. Antes de atribuir preço a uma tonelada de carbono, é necessário qualificar o território que sustenta esse carbono. Em áreas com perda de carbono orgânico do solo, instabilidade de uso da terra, risco de reversão ou baixa rastreabilidade, o ativo deve receber desconto, cautela ou salvaguardas metodológicas. Em áreas com estabilidade ou ganho de carbono no solo, maior permanência e melhor verificabilidade, o ativo pode preservar o preço-base ou receber bonificação por integridade ambiental.

O objetivo geral deste artigo é propor um Sistema de Preço Territorial para ativos florestais no Pampa brasileiro, integrando zonas de perda, estabilidade e ganho de carbono orgânico do solo, indicadores de cobertura e uso da terra, biomassa florestal, risco multigases, critérios ampliados de mensuração, relato e verificação e compatibilidade futura com métricas de CO₂Flux como camada complementar de MRV. Especificamente, busca-se: i) caracterizar a transformação territorial do Pampa entre 1985 e 2024; ii) classificar zonas de variação do carbono orgânico do solo; iii) propor coeficientes territoriais de ajuste do preço-base; iv) estruturar uma medida de Poupança Ambiental Ajustada; e v) apresentar um Registro Técnico de Integridade Territorial do Ativo Florestal como instrumento de apoio à decisão pública.

A contribuição central do estudo está em deslocar a precificação de ativos florestais de uma lógica exclusivamente métrica para uma lógica territorialmente qualificada. Assim, o carbono abaixo do solo deixa de ser apenas um indicador biofísico e passa a compor a formação do preço, a alocação de custos ambientais e a poupança ambiental do ativo. Essa abordagem permite diferenciar zonas de passivo ambiental subterrâneo, zonas de manutenção do lastro climático e zonas de poupança ambiental positiva.

A justificativa aplicada do trabalho relaciona-se diretamente aos desafios contemporâneos de fomento florestal, inventário, monitoramento, bioeconomia, pagamento por serviços ambientais, recuperação de vegetação nativa, recomposição florestal, manejo sustentável e integração com instrumentos econômicos. Ao propor um sistema de preço territorial baseado em dados públicos, sensoriamento remoto, carbono do solo, biomassa, MRV e risco multigases, o estudo oferece uma arquitetura metodológica capaz de subsidiar políticas públicas, projetos de PSA, instrumentos associados ao SBCE, estratégias de restauração ecológica, programas de fomento florestal e mecanismos de financiamento ambiental. Em biomas campestres, o preço do carbono não pode remunerar apenas o que cresce acima do solo; ele precisa incorporar também o que foi preservado, perdido ou acumulado abaixo dele.

2 Fundamentação teórica

Esta seção apresenta os fundamentos que sustentam a construção de um Sistema de Preço Territorial para ativos florestais no Pampa brasileiro. A proposta articula economia ambiental, teoria do preço, serviços ecossistêmicos, capital natural, governança territorial, integridade climática e contabilidade ambiental. O objetivo não é realizar uma revisão exaustiva sobre mercados de carbono, mas organizar um arcabouço conceitual capaz de justificar por que a precificação de ativos florestais em biomas campestres não pode depender apenas da biomassa arbórea visível ou da equivalência agregada em CO₂eq.

A fundamentação está estruturada em quatro eixos: i) formação econômica do preço do carbono; ii) capital natural, serviços ecossistêmicos e ativos florestais; iii) território, financeirização e risco de dissociação entre preço e valor ecológico; e iv) poupança ambiental ajustada e preço territorial.

2.1 Teoria do preço e externalidades do carbono

A formação do preço do carbono não pode ser compreendida apenas como resultado de uma operação de mercado. Antes de se converter em preço, o carbono expressa uma relação entre dano ambiental, responsabilidade econômica, tempo, território e incerteza. A economia ambiental surge justamente para enfrentar situações em que a produção econômica gera custos não incorporados aos balanços privados, mas acumulados sobre a sociedade, os ecossistemas e as gerações futuras. A contribuição de Pigou (1920) permanece central nesse debate ao demonstrar que o preço de mercado pode ser incompleto quando não incorpora os custos sociais da degradação ambiental.

No caso das mudanças climáticas, essa externalidade assume forma particularmente complexa: as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) acumulam-se na atmosfera, atravessam fronteiras políticas, permanecem por diferentes horizontes temporais e produzem impactos distribuídos de forma desigual no espaço. Por isso, o preço do carbono deve ser entendido como tentativa institucional de atribuir valor econômico a uma perturbação ecológica que se manifesta em múltiplas escalas territoriais.

A contribuição de Coase (1960) amplia essa discussão ao deslocar parte do problema para os direitos de propriedade, os custos de transação e os arranjos institucionais necessários à negociação de externalidades. Nos mercados de carbono, essa dimensão é decisiva: não existe ativo climático confiável sem regras claras de titularidade, metodologias reconhecidas, sistemas de mensuração, relato e verificação, registros interoperáveis e mecanismos capazes de reduzir assimetrias de informação. A tonelada de CO₂eq somente se torna unidade econômica legítima quando está associada a uma base verificável de redução, remoção ou permanência.

A discussão de Weitzman (1974) sobre instrumentos de preço e quantidade também contribui para compreender a arquitetura dos mercados climáticos. Sistemas de comércio de emissões, como o SBCE e o EU ETS, operam por meio da definição de limites quantitativos e da negociação de ativos associados a esses limites. Contudo, o preço resultante não expressa automaticamente a integridade ambiental do ativo, pois também reflete regras de alocação, expectativas de demanda, liquidez, custo de abatimento, confiança regulatória, intermediação e qualidade dos mecanismos de verificação.

Nesse sentido, a precificação do carbono exige uma distinção fundamental entre

unidade de transação e unidade de confiança. A unidade de transação pode ser a tonelada de CO₂eq; a unidade de confiança ambiental deve ser o território onde essa tonelada é gerada, removida ou mantida. Essa distinção é essencial para biomas campestres como o Pampa, nos quais o valor climático não se reduz à biomassa arbórea e não pode ser capturado integralmente por uma métrica agregada. O carbono orgânico do solo, a permanência dos campos nativos, os riscos de conversão territorial e os fluxos de CO₂, CH₄ e N₂O alteram a qualidade econômica do ativo e, portanto, devem interferir na formação do preço.

A equivalência climática pode ser expressa de forma geral pela conversão dos diferentes gases em CO₂ equivalente:

$$CO_{2eq} = \sum_{g=1}^n E_g \cdot GWP_g \quad (1)$$

em que E_g representa a emissão ou remoção do gás g , e GWP_g corresponde ao potencial de aquecimento global associado a esse gás em determinado horizonte temporal. A Equação 1 é indispensável para padronizar unidades climáticas, mas não resolve, sozinha, o problema da qualidade territorial do ativo. Dois ativos com o mesmo saldo em CO₂eq podem apresentar integridade ambiental distinta quando diferem em permanência, risco de reversão, histórico de uso da terra, carbono do solo, incerteza metodológica e qualidade do MRV.

A precificação territorial proposta neste artigo parte dessa premissa. O preço não é tratado apenas como expressão monetária da quantidade de carbono, mas como síntese de informação, risco, permanência e verificabilidade. Em termos econômicos, isso significa que ativos com mesma quantidade estimada de CO₂eq podem apresentar preços distintos quando diferem em integridade do solo, histórico de uso da terra, risco de reversão, qualidade do MRV e estabilidade territorial.

2.2 Capital natural e ativos florestais

A discussão sobre os serviços prestados pela natureza antecede a formulação contemporânea dos serviços ecossistêmicos. Em Jean-Baptiste Say, já aparece a percepção de que elementos naturais, como o vento e o sol, realizam trabalho útil à economia, ainda que não sejam apropriados como mercadorias privadas nem plenamente convertidos em valor de troca (SAY, 1828; GÓMEZ-BAGGETHUN et al., 2010; SANTOS, 2014). Essa passagem histórica revela uma tensão que permanece atual: a natureza produz utilidade, sustenta a atividade econômica e condiciona o bem-estar humano, mas sua tradução em preço exige critérios institucionais, ecológicos e territoriais.

A incorporação da natureza à análise econômica avançou significativamente com os debates sobre capital natural, serviços ecossistêmicos e economia da biodiversidade. Stern (2007) demonstrou que os custos da inação climática tendem a superar os custos da mitigação, recolocando a mudança climática como problema econômico de primeira ordem. Nordhaus (2013) contribuiu para a modelagem econômica do clima ao relacionar crescimento, emissões, danos climáticos e políticas de controle. Mais recentemente, Dasgupta (2021) reforçou que a economia depende de estoques e fluxos da natureza, e que a degradação dos ecossistemas compromete a própria base material da prosperidade.

Essa tradição permite compreender os ativos florestais não apenas como bens

produtivos, mas como estruturas ecológicas capazes de armazenar carbono, regular ciclos hidrológicos, conservar biodiversidade, proteger solos, sustentar paisagens e gerar benefícios climáticos. Entretanto, para que esses benefícios sejam convertidos em valor econômico legítimo, é necessário que sejam mensuráveis, verificáveis e associados a critérios claros de permanência, adicionalidade e integridade ambiental. Um ativo florestal não possui valor climático apenas porque existe vegetação; seu valor depende da qualidade ecológica, da estabilidade temporal e da capacidade de manter ou ampliar serviços ambientais ao longo do tempo.

No caso dos mercados de carbono, essa distinção é essencial. A biomassa florestal pode ser contabilizada como estoque de carbono, mas a qualidade econômica e ambiental do ativo depende também das condições territoriais que sustentam esse estoque. Áreas sujeitas à conversão de uso da terra, incêndios recorrentes, perda de carbono orgânico do solo, fragmentação ecológica ou baixa rastreabilidade apresentam riscos maiores de reversão e, portanto, deveriam receber tratamento metodológico diferenciado.

Essa leitura é particularmente importante em biomas campestres. Nesses ambientes, parte expressiva do valor climático não se encontra na biomassa arbórea visível, mas no solo, nas raízes, na estrutura da paisagem e na permanência dos campos nativos. A Lei nº 15.042/2024 reforça essa abertura ao reconhecer que a remoção de GEE pode ocorrer por meio da recuperação da vegetação nativa, da restauração ecológica, do reflorestamento e do incremento dos estoques de carbono em solos agrícolas e pastagens (Brasil, 2024). No Pampa, essa possibilidade é decisiva: o solo não é apenas suporte físico da vegetação, mas parte da infraestrutura climática que condiciona permanência, estabilidade e valor ecológico no tempo.

As diretrizes do IPCC para o setor AFOLU também sustentam essa leitura integrada, ao organizar a estimativa de mudanças de carbono por categorias de uso da terra, estratos territoriais e reservatórios de carbono, incluindo biomassa, matéria orgânica morta, solos e emissões não-CO₂ (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019c). No caso de *grasslands*, o IPCC reconhece que os estoques de carbono do solo são influenciados por manejo, pastejo, fogo, fertilização, irrigação, renovação de raízes, alocação de carbono entre parte aérea e subterrânea e mudanças no uso da terra (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019d). Essa base é especialmente relevante para o Pampa, pois reforça que o carbono subterrâneo não é componente acessório, mas elemento central da avaliação climática em paisagens campestres.

Assim, o ativo florestal deixa de ser visto apenas como área plantada, volume de madeira ou estoque de biomassa, e passa a ser compreendido como unidade territorial de valor. Essa unidade reúne componentes acima e abaixo do solo, histórico de uso da terra, capacidade de permanência, risco de reversão, fluxos multigases e qualidade da mensuração. Para a economia e o mercado florestal, essa mudança aproxima a precificação da realidade biofísica dos territórios e reduz o risco de atribuir valor financeiro a créditos ou certificados desconectados de sua base ambiental.

2.3 Território, financeirização e risco

A transformação do carbono em ativo negociável desloca a política climática para uma zona de contato entre regulação ambiental, mercado financeiro e governança territorial.

Essa passagem pode ampliar recursos para mitigação, restauração ecológica, conservação e manejo florestal sustentável, mas também introduz um risco estrutural: a separação entre preço financeiro e valor ecológico. Quando a unidade negociada passa a circular como ativo abstrato, sua valorização pode ser orientada por expectativas de rentabilidade, liquidez, prêmio, intermediação e demanda especulativa, e não necessariamente pela qualidade ambiental do território que assegura o lastro necessário ao mercado.

A leitura de Arrighi (1996) permite compreender esse movimento em perspectiva histórica. Nos ciclos sistêmicos de acumulação de capital, os momentos de expansão financeira tendem a aparecer quando a valorização se desloca progressivamente da produção material para formas mais abstratas de circulação, crédito e expectativa. Aplicada aos mercados ambientais, essa interpretação sugere que a natureza pode ser incorporada como nova fronteira de valorização, na qual florestas, solos, água, biodiversidade e carbono são traduzidos em métricas financeiras. A questão central, portanto, não é rejeitar a mensuração ambiental, mas perguntar se essa mensuração preserva a materialidade ecológica do território ou se apenas cria uma forma negociável de valor descolada de sua base concreta.

Esse risco também pode ser lido à luz de Kindleberger e Aliber (2011). Ao analisarem manias, pânicos, bolhas e crises, os autores demonstram que processos especulativos se formam quando expectativas de valorização futura passam a se sobrepor aos fundamentos reais dos ativos. A analogia com os mercados de carbono deve ser feita com cautela, pois créditos, certificados e permissões de emissão possuem finalidade pública vinculada à mitigação climática. Ainda assim, quando esses instrumentos circulam em mercados financeiros, tornam-se sujeitos a assimetrias de informação, intermediação, baixa transparência e risco de precificação dissociada dos fundamentos ecológicos, especialmente quando não há clareza sobre adicionalidade, permanência, reversão, vazamento, dupla contagem, titularidade e qualidade do MRV.

A contribuição de Santos (1996), Santos (2000) é indispensável para enfrentar esse problema. O território não é apenas suporte físico das atividades econômicas; ele é uma construção histórica, técnica, política e informacional. No período contemporâneo, marcado pelo meio técnico-científico-informacional, os territórios são cada vez mais descritos por imagens de satélite, sensores, inventários, bancos de dados, plataformas digitais, índices espectrais e sistemas de registro. Essa capacidade técnica amplia a possibilidade de rastrear, auditar e qualificar ativos ambientais, mas também pode reduzir paisagens complexas a indicadores simplificados quando a informação é separada do contexto ecológico, social e histórico que lhe dá sentido.

No Pampa, essa discussão ganha densidade porque a paisagem combina campos nativos, áreas agrícolas, arroz irrigado, silvicultura, formações florestais, solos com diferentes capacidades de armazenamento de carbono e dinâmicas multigases associadas ao uso da terra. A soja pode estar associada a emissões de N_2O decorrentes do manejo do solo e da fertilização, além de emissões de CO_2 vinculadas à mudança de uso da terra e às operações produtivas. O arroz irrigado exige atenção ao CH_4 , especialmente em razão das condições anaeróbias criadas pelo alagamento. A silvicultura contribui para o balanço de CO_2 na biomassa, mas precisa ser avaliada em relação à matriz campestre em que está inserida, pois o aumento de biomassa arbórea não substitui automaticamente as funções

ecológicas dos campos nativos.

As diretrizes do IPCC para solos manejados reforçam a necessidade dessa leitura multigases, especialmente porque as emissões de N_2O estão associadas a adições antrópicas de nitrogênio, fertilizantes sintéticos e orgânicos, resíduos culturais, esterco, mineralização de matéria orgânica e mudanças de uso ou manejo do solo (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019e). O biochar, por sua vez, aparece no IPCC como fronteira metodológica para estimar mudanças de carbono em solos minerais, especialmente em áreas agrícolas e campestres; neste artigo, contudo, é tratado apenas como possibilidade futura de integração ao Sistema de Preço Territorial, e não como componente empírico da aplicação ao Pampa (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019b).

Metodologias voluntárias, como a VM0042, demonstram que o carbono orgânico do solo já é tratado como componente mensurável em projetos de manejo aprimorado da terra, com exigências de linha de base, adicionalidade, monitoramento, incerteza e verificação (Verra, 2025). Contudo, a existência de protocolos privados não elimina os problemas de assimetria informacional, concentração institucional, adicionalidade, permanência e integridade. Por isso, a proposta deste estudo não adota tais metodologias como modelo normativo, mas as utiliza como evidência de que a mensuração do SOC já integra a arquitetura técnica dos mercados climáticos, exigindo uma camada territorial adicional de controle público e transparência.

Assim, a integridade ambiental não pode ser tratada como atributo genérico do ativo. Ela deve ser construída por meio de indicadores territoriais verificáveis, capazes de relacionar biomassa, carbono orgânico do solo, histórico de uso da terra, risco multigases, permanência, reversão, vazamento, titularidade e qualidade do MRV. Quanto maior a distância entre a métrica financeira e o território que a sustenta, maior o risco de que o preço remunere uma aparência de compensação climática, e não um resultado ambiental efetivo.

A base teórica desta subseção sustenta uma premissa central: o preço do carbono só é ambientalmente confiável quando carrega a memória ecológica do território que o produz. No caso dos ativos florestais do Pampa, essa memória não está apenas nas árvores ou na biomassa visível, mas também no solo, nas raízes, nos campos nativos, nas trajetórias de conversão e nos fluxos multigases que atravessam a paisagem. Reconectar preço, lastro socioecológico e território é condição para reduzir o risco de financeirização vazia e fortalecer uma precificação compatível com integridade ambiental.

2.4 Poupança ambiental e preço territorial

A noção de Poupança Ambiental Ajustada proposta neste artigo parte da ideia de que o território pode acumular ou perder valor climático ao longo do tempo. Em termos econômicos, a poupança representa a parcela de valor preservada ou acumulada para uso futuro. Em termos ambientais, essa lógica pode ser reinterpretada como o saldo de integridade ecológica mantido no território, considerando estoques de carbono, permanência, estabilidade de uso da terra, capacidade de regeneração, riscos de conversão e qualidade da mensuração.

No contexto do Pampa, essa noção é especialmente relevante porque o carbono orgânico do solo opera como forma de capital ambiental subterrâneo. Quando uma área

mantém ou amplia seus estoques de carbono no solo, ela preserva parte de seu lastro climático. Quando perde carbono orgânico, gera um passivo ambiental que pode não ser imediatamente visível na paisagem, mas compromete a confiabilidade do ativo climático. Assim, a variação do carbono orgânico do solo não deve ser tratada apenas como indicador biofísico, mas como componente da formação do preço e da avaliação de risco que sustentam o ativo florestal perante o mercado, o poder público e a sociedade.

A variação do carbono orgânico do solo pode ser expressa por:

$$\Delta SOC_i = SOC_{i,t_1} - SOC_{i,t_0} \quad (2)$$

em que ΔSOC_i representa a variação do estoque de carbono orgânico do solo na unidade territorial i , SOC_{i,t_1} representa o estoque no ano final e SOC_{i,t_0} representa o estoque no ano inicial. No caso deste estudo, $t_0 = 1985$ e $t_1 = 2024$. Valores negativos indicam perda de carbono orgânico do solo; valores próximos de zero indicam estabilidade relativa; e valores positivos indicam ganho de carbono orgânico do solo.

A conversão da variação de carbono orgânico do solo em dióxido de carbono equivalente pode ser representada por:

$$\Delta CO_{2eq,i} = \Delta SOC_i \cdot \frac{44}{12} \quad (3)$$

em que $\frac{44}{12}$ corresponde à razão entre a massa molecular do CO_2 e a massa atômica do carbono. Essa conversão permite expressar a variação do carbono do solo em unidade compatível com os mercados climáticos, mas não elimina a necessidade de qualificação territorial do ativo.

A poupança ambiental ajustada permite integrar essa dimensão ao sistema de precificação. Áreas com perda de carbono orgânico do solo indicam redução do lastro subterrâneo e, portanto, devem ser associadas a desconto, cautela ou salvaguardas metodológicas. Áreas com estabilidade relativa preservam o preço-base, desde que mantidas as condições de permanência e monitoramento. Áreas com ganho de carbono orgânico do solo podem representar zonas de maior integridade ambiental, admitindo bonificação condicionada à verificação territorial e à ausência de riscos relevantes de reversão.

A leitura territorial do SOC pode ser sintetizada por um fator de ajuste associado ao comportamento do carbono do solo:

$$F_{SOC,i} = \begin{cases} 0,70, & \text{se } \Delta SOC_i < -1 \\ 1,00, & \text{se } -1 \leq \Delta SOC_i \leq 1 \\ 1,20, & \text{se } \Delta SOC_i > 1 \end{cases} \quad (4)$$

em que $F_{SOC,i}$ representa o fator territorial associado à variação do carbono orgânico do solo na unidade i . Valores inferiores a 1 indicam desconto territorial por perda de lastro climático; valores iguais a 1 indicam manutenção do preço-base; e valores superiores a 1 indicam bonificação condicionada à verificação.

O Sistema de Preço Territorial parte de um preço-base conceitual, representado por P_0 , ajustado por fatores de integridade. Esses fatores podem incluir a variação do carbono orgânico do solo, a permanência territorial, a qualidade do MRV, o risco multigases e a

pressão de conversão do uso da terra. A formulação geral pode ser expressa por:

$$P_{T,i} = P_0 \cdot F_{SOC,i} \cdot F_{PERM,i} \cdot F_{MRV,i} \cdot F_{MG,i} \cdot F_{CONV,i} \quad (5)$$

em que $P_{T,i}$ representa o preço territorial ajustado do ativo na unidade i , P_0 corresponde ao preço-base, $F_{SOC,i}$ representa o fator de carbono orgânico do solo, $F_{PERM,i}$ representa o fator de permanência territorial, $F_{MRV,i}$ representa o fator de qualidade da mensuração, relato e verificação, $F_{MG,i}$ representa o fator de risco multigases e $F_{CONV,i}$ representa o fator associado à pressão de conversão do uso da terra.

A Poupança Ambiental Ajustada pode ser representada como a variação do carbono convertida em CO_{2eq} e ponderada pelo fator territorial de integridade do solo:

$$PAA_i = \Delta CO_{2eq,i} \cdot F_{SOC,i} \quad (6)$$

em que PAA_i representa a poupança ambiental ajustada da unidade territorial i . Valores negativos indicam passivo ambiental subterrâneo; valores próximos de zero indicam manutenção do lastro climático; e valores positivos indicam poupança ambiental positiva.

Essa abordagem não pretende substituir metodologias certificadoras, inventários oficiais ou protocolos regulatórios. Sua função é anterior e complementar: oferecer um sistema de pré-qualificação territorial do ativo florestal, capaz de indicar se determinado ativo apresenta alta integridade, integridade condicionada ou baixa integridade ambiental. Ao fazer isso, o modelo fornece subsídios para políticas públicas, programas de pagamento por serviços ambientais, instrumentos associados ao SBCE, estratégias de fomento florestal, financiamento ambiental e mecanismos de monitoramento territorial.

A integração entre Poupança Ambiental Ajustada e preço territorial permite transformar dados biofísicos em informação econômica qualificada. O carbono abaixo do solo deixa de ser apenas um estoque invisível e passa a atuar como componente de valor, risco e permanência. Essa é a base teórica do modelo: a precificação de ativos florestais em biomas campestres deve reconhecer que o valor climático não está apenas no carbono removido ou estimado, mas também no carbono preservado, perdido ou acumulado no território.

3 Materiais e métodos

Esta seção apresenta o procedimento metodológico utilizado para construir um Sistema de Preço Territorial para ativos florestais no Pampa brasileiro. A abordagem foi estruturada para ser replicável, auditável e compatível com bases públicas de monitoramento territorial, inventário florestal, carbono do solo, sensoriamento remoto, mensuração, relato e verificação (MRV) e instrumentos regulatórios associados ao SBCE. O método não substitui inventários florestais oficiais, metodologias certificadoras ou protocolos formais de mercado, mas propõe uma camada técnico-econômica de pré-qualificação territorial do ativo antes de sua conversão em unidade econômica negociável.

A metodologia parte de três premissas: i) em biomas campestres, o valor climático do ativo florestal não pode ser inferido apenas pela biomassa arbórea visível, pois parte relevante do carbono encontra-se no solo, nas raízes e na permanência ecológica da paisagem; ii) a precificação de ativos florestais inseridos em matrizes agropecuárias deve considerar

histórico de uso da terra, conversão territorial, riscos de reversão e fluxos multigases associados ao CO₂, CH₄ e N₂O; e iii) a formação de preço ambientalmente confiável depende de controles técnicos capazes de transformar dados biofísicos em informação econômica auditável, rastreável e territorialmente situada.

Com base nessas premissas, o procedimento foi organizado em sete etapas: i) delimitação territorial do Pampa; ii) seleção das bases públicas e institucionais; iii) construção dos indicadores territoriais; iv) classificação das zonas de perda, estabilidade e ganho de carbono orgânico do solo; v) elaboração da matriz multigases e dos critérios de integridade; vi) construção do sistema de alocação de custos ambientais; e vii) proposição do Sistema de Preço Territorial, da Poupança Ambiental Ajustada e do Registro Técnico de Integridade Territorial do Ativo Florestal. O Quadro 1 sintetiza essa arquitetura.

Quadro 1: Arquitetura metodológica do Sistema de Preço Territorial no Pampa

Etapas	Base empírica e normativa	Pergunta metodológica	Produto gerado
Delimitação territorial	Bioma Pampa; cobertura e uso da terra; sistemas ecológicos; bases cartográficas	Em que território o ativo florestal está inserido?	Recorte espacial e unidade territorial de análise
Indicadores biofísicos	MapBiomass; MapBiomass Solo; SNIF/SFB; IFN; PEVS/IBGE	Quais estoques, fluxos e componentes sustentam o valor climático do ativo?	Base territorial de carbono, biomassa e uso da terra
Zonas de carbono do solo	SOC 1985; SOC 2024; diferença espacial do SOC	Onde o território perdeu, manteve ou acumulou carbono subterrâneo?	Zonas de perda, estabilidade e ganho de SOC
Matriz climática e multigases	CO ₂ ; CH ₄ ; N ₂ O; arroz irrigado; soja; pecuária; silvicultura	Quais riscos climáticos precisam ser incorporados além do CO ₂ eq?	Matriz multigases e fatores de risco
Alocação de custos ambientais	Conversão territorial; perda de SOC; risco de reversão; risco multigases; permanência	Onde estão os custos ambientais ocultos que devem afetar o preço?	Regras territoriais de alocação de custos ambientais
Sistema de preço territorial	Preço-base; fatores de ajuste; integridade; MRV; permanência; conversão	Como transformar integridade territorial em fator de preço?	Preço territorial ajustado
Controle técnico do ativo	MRV; rastreabilidade; adicionalidade; permanência; reversão; dupla contagem	O ativo possui informação suficiente para ser auditado e precificado?	Registro Técnico de Integridade Territorial do Ativo Florestal

Fonte: elaborado pelo autor com base na Lei nº 15.042/2024, no Artigo 6 do Acordo de Paris, nas diretrizes do IPCC, no MapBiomass Coleção 10.1, no MapBiomass Solo Coleção 3 e nos painéis do SNIF/SFB.

3.1 Área de estudo: o Pampa brasileiro

O recorte espacial do estudo corresponde ao Pampa brasileiro, bioma localizado no extremo sul do Brasil e restrito, em território nacional, ao estado do Rio Grande do Sul. Embora frequentemente interpretado a partir de sua matriz campestre, o Pampa possui formações florestais, áreas de silvicultura, campos nativos, áreas úmidas, sistemas agrícolas, arroz irrigado, soja, pecuária e mosaicos de uso da terra. Essa configuração torna o bioma especialmente relevante para discutir os limites das metodologias convencionais de precificação de ativos florestais.

A escolha do Pampa justifica-se por sua condição de território-limite: nele, o valor climático não se concentra apenas na biomassa arbórea, mas também no carbono do solo, nas raízes, na permanência dos campos nativos e na estabilidade ecológica da paisagem. Além disso, a consolidação do SBCE exige metodologias capazes de avaliar reduções e remoções de gases de efeito estufa com integridade, rastreabilidade e controle de riscos,

nacionais de GEE (Brasil, 2024; United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019a). Também foram considerados GHG Protocol e ISO 14064 como referenciais de verificação, adicionalidade, mensurabilidade, vazamento e elegibilidade de projetos climáticos (World Resources Institute; World Business Council for Sustainable Development, 2004; International Organization for Standardization, 2018; International Organization for Standardization, 2019a; International Organization for Standardization, 2019b).

O Quadro 2 sintetiza as principais fontes utilizadas e sua função na metodologia.

Quadro 2: Fontes utilizadas e função na metodologia de precificação territorial

Eixo de dados	Fonte principal	Informação extraída	Função na metodologia
Cobertura e uso da terra	MapBiomass Coleção 10.1	Classes anuais, 1985–2024, 30 m	Identificar conversão, permanência, expansão agropecuária, silvicultura e pressão sobre ativos florestais.
Solo e carbono subterrâneo	MapBiomass Solo Coleção 3	SOC, textura e granulometria, 0–30 cm	Incorporar carbono subterrâneo, classificar zonas de perda/ganho e estimar poupança ambiental.
Biomassa e carbono florestal	SNIF/SFB e IFN	Biomassa, carbono, raízes, necromassa, madeira caída e florestas plantadas	Aproximar a proposta das rotinas institucionais de inventário e carbono florestal.
Regulação e governança	Lei nº 15.042/2024; Artigo 6; IPCC	SBCE, CRVE, MRV, reversão, vazamento, dupla contagem, AFOLU e multigases	Vincular a precificação aos requisitos de integridade, rastreabilidade e credibilidade climática.
Protocolos e base técnico-científica	GHG Protocol; ISO 14064; literatura especializada	Verificação, adicionalidade, índices espectrais, biomassa, CO ₂ Flux e valoração ambiental	Apoiar critérios de auditoria, elegibilidade, inventário e integração entre sensoramento remoto e precificação.

Fonte: elaborado pelo autor com base nas fontes indicadas na subseção.

3.3 Indicadores territoriais

A integração das bases foi tratada como etapa de tradução metodológica entre território, carbono e preço. Se a fundamentação teórica demonstrou que a precificação ambiental pode se dissociar da materialidade ecológica quando o ativo passa a circular como abstração financeira, os procedimentos analíticos buscaram reconstruir o caminho inverso: partir do território concreto para qualificar a unidade econômica que poderá ser precificada.

A construção dos indicadores territoriais foi orientada por cinco dimensões: permanência territorial, integridade ecológica, estabilidade do carbono do solo, risco multigases e segurança regulatória. Essas dimensões foram associadas a indicadores extraídos de bases públicas e organizadas em uma matriz de interpretação técnico-econômica. A Figura 2 sintetiza o encadeamento metodológico adotado.

Roteiro metodológico da construção dos indicadores territoriais no Pampa

Da leitura do território à qualificação do ativo florestal

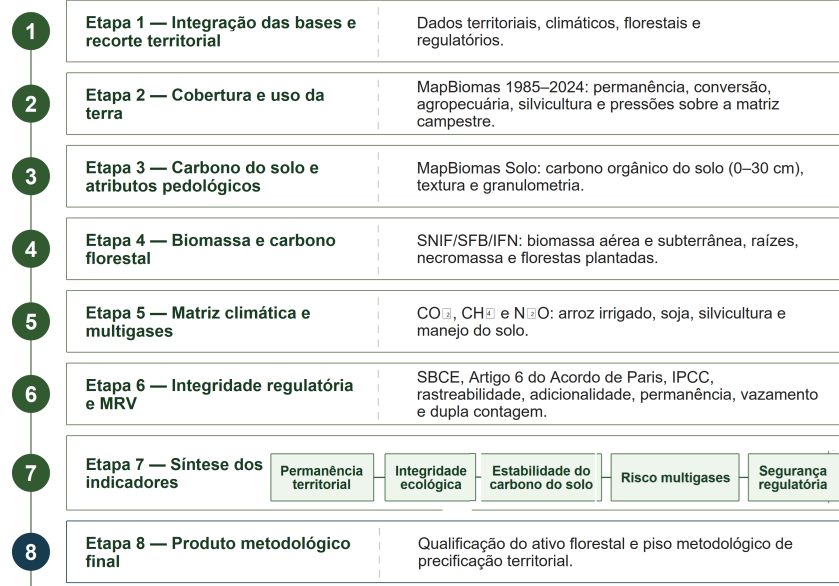


Figura 2: Roteiro metodológico da construção dos indicadores territoriais no Pampa.

Fonte: elaboração própria.

Em termos operacionais, os indicadores foram tratados como controles de integridade. O custo ambiental somente é incorporado ao preço territorial quando há evidência espacial de perda, risco ou fragilidade associada ao ativo. Assim, a metodologia diferencia três dimensões: i) poupança ambiental preservada, correspondente à manutenção ou ampliação do lastro climático; ii) poupança ambiental perdida, associada à redução do carbono orgânico do solo e à conversão territorial; e iii) poupança ambiental requerida, entendida como esforço necessário para manter, recuperar ou compensar a integridade do ativo ao longo do tempo.

3.4 Zonas de carbono orgânico do solo

A etapa central da metodologia consistiu na classificação das zonas de variação do carbono orgânico do solo. Para cada unidade espacial i , a variação do SOC foi calculada pela diferença entre o estoque estimado em 2024 e o estoque estimado em 1985, conforme a Equação 7.

$$\Delta SOC_i = SOC_{2024,i} - SOC_{1985,i} \quad (7)$$

em que ΔSOC_i representa a variação do carbono orgânico do solo na unidade espacial i , $SOC_{2024,i}$ corresponde ao estoque em 2024, e $SOC_{1985,i}$ corresponde ao estoque em 1985.

A variação do SOC foi convertida em dióxido de carbono equivalente por meio do fator estequiométrico 44/12, conforme a Equação 8.

$$\Delta CO_{2eq,i} = \Delta SOC_i \times \frac{44}{12} \quad (8)$$

em que $\Delta CO_{2eq,i}$ representa a variação equivalente em dióxido de carbono da unidade espacial i , e 44/12 corresponde à razão entre a massa molecular do CO₂ e a massa atômica do carbono.

Com base em ΔSOC_i , foram definidas três zonas de interpretação ambiental: perda de SOC, estabilidade relativa e ganho de SOC. A zona de perda representa áreas com redução do lastro subterrâneo; a zona de estabilidade representa áreas que mantiveram aproximadamente o estoque de carbono; e a zona de ganho representa áreas com acúmulo de carbono no solo e potencial poupança ambiental positiva.

Quadro 3: Regras de classificação das zonas de carbono orgânico do solo

Zona	Condição	Leitura ambiental	Função econômica
Perda de SOC	$\Delta SOC_i < -1$ tC/ha	Redução do carbono subterrâneo e formação de passivo ambiental oculto.	Alocar custo ambiental e aplicar desconto territorial.
Estabilidade relativa	$-1 \leq \Delta SOC_i \leq 1$ tC/ha	Manutenção aproximada do estoque de carbono no solo.	Preservar preço-base e exigir monitoramento.
Ganho de SOC	$\Delta SOC_i > 1$ tC/ha	Acúmulo de carbono subterrâneo e maior integridade potencial.	Reconhecer poupança ambiental positiva e admitir bonificação.

Nota: os limiares foram definidos como critério operacional para classificação territorial preliminar, permitindo distinguir perda, estabilidade e ganho de carbono orgânico do solo.

Fonte: elaborado pelo autor.

3.5 Matriz multigases e integridade ambiental

A classificação das zonas de SOC foi complementada por uma matriz multigases e de integridade ambiental. Essa etapa é necessária porque a precificação de ativos florestais tende a ser expressa em CO₂ equivalente, mas os processos ecológicos e produtivos que sustentam ou comprometem esse valor não se limitam ao dióxido de carbono. No Pampa, a coexistência entre campos nativos, formações florestais, silvicultura, soja, arroz irrigado, pecuária e mosaicos agropecuários torna indispensável diferenciar gases, usos da terra e riscos territoriais associados à permanência do carbono.

A matriz multigases foi concebida como instrumento de qualificação do ativo florestal, e não como substituto das metodologias formais de inventário de GEE. Sua função é organizar os principais processos territoriais associados ao CO₂, ao CH₄ e ao N₂O, avaliando se a precificação proposta para determinado ativo está sustentada por integridade ecológica, estabilidade territorial e coerência climática (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019a; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019e).

Quadro 4: Matriz multigases e critérios de integridade ambiental aplicados ao Pampa

Uso ou componente territorial	Gás ou estoque associado	Risco para a precificação	Critério de integridade
Campos nativos	Carbono orgânico do solo; CO ₂	Subvalorização do carbono subterrâneo e da permanência ecológica quando se considera apenas biomassa arbórea.	Permanência territorial; estabilidade do SOC; integridade ecológica.
Formações florestais e silvicultura	CO ₂ ; biomassa aérea e subterrânea	Superestimação do valor climático sem considerar reversão, manejo, solo e matriz de inserção.	MRV; permanência; risco de reversão; rastreabilidade.
Arroz irrigado	CH ₄ ; CO ₂ eq	Emissões de metano associadas a condições anaeróbias podem alterar o balanço climático.	Leitura multigases; mensuração compatível; avaliação do uso da terra.
Soja e agricultura anual	N ₂ O; CO ₂ ; carbono do solo	Manejo do solo, fertilização e conversão territorial podem gerar custos climáticos ocultos.	Controle de conversão; risco multigases; proteção do carbono do solo.
Mosaicos agropecuários	CO ₂ ; CH ₄ ; N ₂ O	Heterogeneidade de usos dificulta a atribuição precisa de risco, permanência e responsabilidade climática.	Classificação territorial; rastreabilidade; controle de vazamento.

Fonte: elaborado pelo autor com base nas diretrizes do IPCC, na Lei nº 15.042/2024, no Artigo 6 do Acordo de Paris e nas bases territoriais utilizadas no estudo.

3.6 Alocação de custos ambientais

A alocação de custos ambientais foi concebida como instrumento espacial de contabilidade ambiental. Sua função é identificar onde o território apresenta perda de lastro climático, estabilidade relativa ou formação de poupança ambiental positiva. Diferentemente de uma leitura apenas descritiva da variação do SOC, a alocação de custos traduz a mudança biofísica em regra de reconhecimento econômico: áreas com perda de SOC indicam custos ambientais ocultos; áreas estáveis indicam manutenção do capital ambiental; e áreas com ganho indicam acúmulo de poupança ambiental.

A lógica de alocação foi organizada em três classes: passivo ambiental subterrâneo, associado à perda de SOC; manutenção do lastro climático, associada à estabilidade relativa; e poupança ambiental positiva, associada ao ganho de SOC. Essa estrutura permite visualizar onde o preço territorial deve ser reduzido, preservado ou bonificado.

Quadro 5: Regras de alocação de custos ambientais e poupança territorial

Classe territorial	Condição	Interpretação contábil-ambiental	Efeito no preço
Passivo ambiental subterrâneo	$\Delta SOC_i < -1$ tC/ha	Representa poupança ambiental perdida e custo oculto associado à redução do carbono no solo.	Desconto territorial.
Manutenção do lastro climático	$-1 \leq \Delta SOC_i \leq 1$ tC/ha	Representa manutenção do capital ambiental existente e necessidade de controle de permanência.	Preservação do preço-base.
Poupança ambiental positiva	$\Delta SOC_i > 1$ tC/ha	Representa acúmulo de carbono subterrâneo e potencial incremento do valor ambiental do ativo.	Bonificação condicionada.

Fonte: elaborado pelo autor.

3.7 Preço Territorial e Poupança Ambiental Ajustada

O Sistema de Preço Territorial foi construído a partir de um preço-base conceitual, representado por P_0 , ajustado por fatores de integridade ambiental. No protótipo aplicado

neste artigo, o fator diretamente calculado corresponde ao carbono orgânico do solo, representado por F_{SOC} . Os demais fatores são apresentados como expansão metodológica, a ser calibrada em aplicações futuras com dados de permanência, MRV, risco multigases e conversão territorial.

O preço territorial ajustado com base no SOC é definido pela Equação 9.

$$P_{territorial,i} = P_0 \times F_{SOC,i} \quad (9)$$

em que $P_{territorial,i}$ representa o preço territorial ajustado da unidade espacial i , P_0 representa o preço-base do modelo e $F_{SOC,i}$ representa o fator de ajuste associado à zona de carbono orgânico do solo.

A versão expandida do modelo incorpora fatores adicionais de integridade, conforme a Equação 10.

$$P_{territorial,i} = P_0 \times F_{SOC,i} \times F_{perm,i} \times F_{MRV,i} \times F_{multi,i} \times F_{conv,i} \quad (10)$$

em que $F_{perm,i}$ representa o fator de permanência territorial, $F_{MRV,i}$ representa o fator de mensuração, relato e verificação, $F_{multi,i}$ representa o fator de risco multigases, e $F_{conv,i}$ representa o fator de conversão e pressão de uso da terra.

A Poupança Ambiental Ajustada foi definida como a variação biofísica do carbono subterrâneo convertida em CO_2 equivalente e ponderada pelo fator de integridade territorial. Na versão demonstrativa, utiliza-se o fator F_{SOC} , conforme a Equação 11.

$$PAA_i = \Delta CO_{2eq,i} \times F_{SOC,i} \quad (11)$$

em que PAA_i representa a Poupança Ambiental Ajustada da unidade espacial i . Valores negativos indicam perda de poupança ambiental e formação de passivo climático subterrâneo; valores próximos de zero indicam estabilidade relativa; e valores positivos indicam ganho de poupança ambiental.

Para operacionalizar o protótipo, adotou-se $P_0 = 1,00$. Esse valor não representa moeda final, mas unidade de referência para demonstrar a lógica de ajuste territorial. Assim, fatores inferiores a 1 indicam desconto por perda, risco ou incerteza; fatores iguais a 1 preservam o preço-base; e fatores superiores a 1 indicam bonificação por ganho, permanência ou maior integridade.

Quadro 6: Fatores demonstrativos do Sistema de Preço Territorial

Zona territorial	Condição	Leitura econômica e ambiental	F_{SOC}	$P_{territorial}$
Perda de SOC	$\Delta SOC_i < -1$ tC/ha	Redução do lastro subterrâneo, formação de custo ambiental oculto e necessidade de desconto.	0,70	0,70
Estabilidade relativa	$-1 \leq \Delta SOC_i \leq 1$ tC/ha	Manutenção aproximada do estoque e preservação do preço-base, condicionada a monitoramento.	1,00	1,00
Ganho de SOC	$\Delta SOC_i > 1$ tC/ha	Acúmulo de carbono subterrâneo e potencial bonificação por integridade territorial.	1,20	1,20

Nota: $P_0 = 1,00$ representa o preço-base conceitual. Os fatores são demonstrativos e podem ser calibrados futuramente com preços de mercado, custo social do carbono, metodologias certificadoras, critérios regulatórios do SBCE ou parâmetros definidos por políticas públicas.

Fonte: elaborado pelo autor.

3.8 Registro Técnico do Ativo Florestal

Para transformar o sistema em instrumento aplicável de controle, propõe-se o Registro Técnico de Integridade Territorial do Ativo Florestal. Esse registro funciona como documento de pré-qualificação do ativo, inspirado na lógica de inventários, relatórios de MRV, controles contábeis e documentação de risco utilizada na avaliação de ativos ambientais.

O registro organiza informações mínimas sobre identificação territorial, histórico de uso da terra, componentes de carbono, matriz multigases, integridade regulatória, fatores de preço e classificação final do ativo. Sua função é permitir que o comprador, o gestor público, o certificador ou o formulador de política pública não avalie o crédito apenas pelo volume de CO₂eq, mas também pelo lastro territorial que sustenta esse volume.

Quadro 7: Estrutura do Registro Técnico de Integridade Territorial do Ativo Florestal

Módulo do registro	Informação requerida	Função de controle e precificação
Identificação territorial	Bioma, município, coordenadas, área, sistema de referência, tipologia do ativo	Localizar o ativo e definir sua unidade espacial de análise.
Histórico de uso da terra	Classes de cobertura, permanência, conversão, pressão antrópica e série temporal	Avaliar trajetória territorial, permanência ecológica e risco de conversão.
Componentes de carbono	SOC, ΔSOC , ΔCO_{2eq} , biomassa acima e abaixo do solo, raízes e necromassa	Estimar estoques, perdas, ganhos e lastro climático do ativo.
Matriz multigases	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, usos associados e risco climático	Identificar custos e pressões que afetam a coerência climática do ativo.
Integridade e MRV	Adicionalidade, permanência, reversão, vazamento, dupla contagem, rastreabilidade e método	Qualificar confiança ambiental, auditabilidade e aderência regulatória.
Preço territorial	P_0 , F_{SOC} , fatores de permanência, MRV, multigases e conversão	Aplicar descontos ou bonificações conforme integridade territorial.
Síntese do ativo	Classe final, observações, salvaguardas e recomendação de elegibilidade	Apoiar decisão pública, certificação, PSA, SBCE, fomento florestal e financiamento ambiental territorial.

Fonte: elaborado pelo autor.

Dessa forma, a metodologia proposta converte dados territoriais em um sistema de controle e precificação. A alocação de custos identifica onde a poupança ambiental foi

perdida, mantida ou ampliada; a Poupança Ambiental Ajustada expressa o saldo biofísico ponderado por integridade; e o Registro Técnico organiza as evidências necessárias para qualificar o ativo florestal. A próxima seção apresenta a aplicação desse sistema ao Pampa, demonstrando como as transformações territoriais, as zonas de carbono do solo e a presença da silvicultura em matriz campestre fundamentam a formação do preço territorial.

4 Resultados e discussão

Os resultados demonstram que a precificação de ativos florestais no Pampa não pode ser construída apenas sobre a quantidade agregada de CO₂eq ou sobre a presença de biomassa arbórea. A aplicação do Sistema de Preço Territorial indica que a formação do preço precisa considerar, simultaneamente, a transformação do uso da terra, a variação do carbono orgânico do solo, o contexto ecológico da silvicultura, os riscos multigases e a qualidade da informação disponível para mensuração, relato e verificação. A discussão está organizada em cinco movimentos analíticos: transformação territorial, zonas de SOC, risco multigases, silvicultura em matriz campestre e síntese contábil-territorial da precificação.

4.1 Transformação territorial e pressão sobre a matriz campestre

A Figura 3 sintetiza a transformação territorial do Pampa entre 1985 e 2024. A cobertura natural passou de 74,1% para 54,6%, enquanto a cobertura antrópica aumentou de 25,2% para 45,0%. No mesmo período, a vegetação herbácea e arbustiva, elemento central da matriz campestre, reduziu-se de 52,9% para 44,2%, ao passo que a agropecuária passou de 24,8% para 32,9%. Entre os principais vetores de mudança destacam-se a expansão da soja, da agropecuária, da silvicultura e do arroz, acompanhada pela redução expressiva das formações campestres.

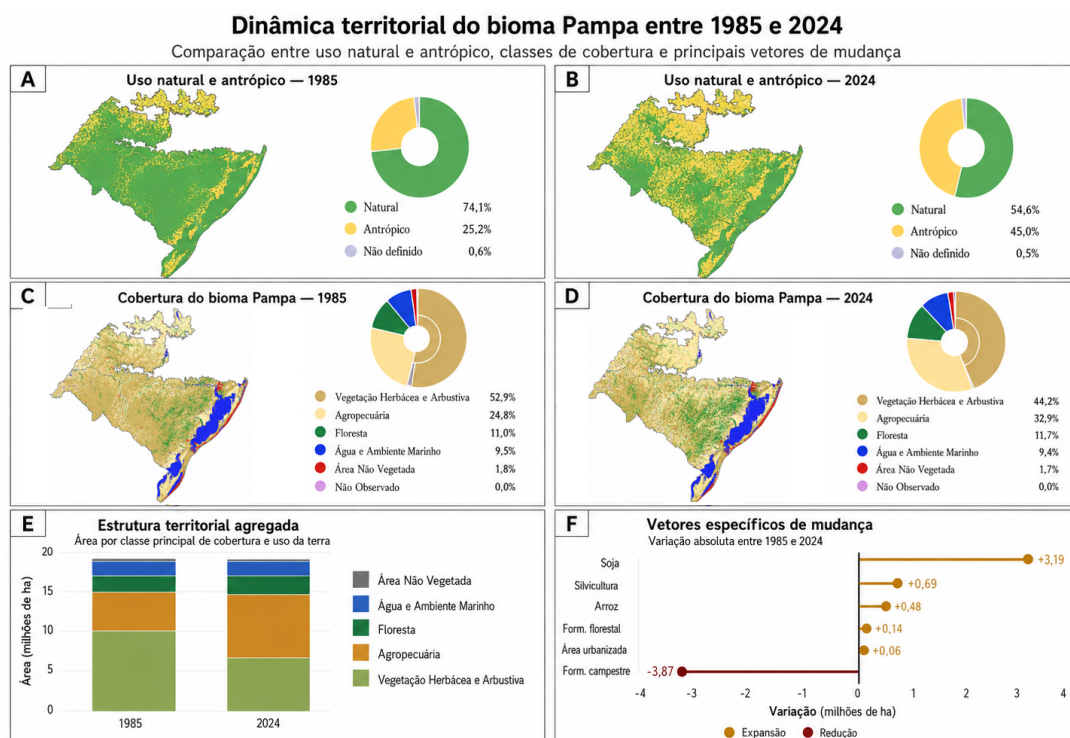


Figura 3: Dinâmica territorial do bioma Pampa entre 1985 e 2024.

Fonte: elaborado pelo autor com base no MapBiomias Coleção 10.1 (MapBiomias, 2025a).

Esses resultados atendem ao primeiro objetivo específico do estudo, ao caracterizar a transformação territorial do Pampa no período analisado. A mudança observada não representa apenas substituição de classes de cobertura, mas reorganização da base ecológica que sustenta o valor climático do bioma. A expansão de usos produtivos sobre a matriz campestre altera a permanência da cobertura, a estabilidade do solo e os riscos associados ao carbono, exigindo que a precificação florestal considere o território como unidade de análise.

A pressão sobre a matriz campestre também revela uma limitação das abordagens convencionais de precificação florestal. Quando a análise privilegia apenas a biomassa arbórea, o Pampa tende a aparecer como território de menor relevância climática quando comparado a formações florestais densas. Entretanto, essa interpretação ignora a função dos campos nativos, das raízes, da matéria orgânica e do carbono orgânico do solo na manutenção do lastro climático. Por isso, antes de precificar o carbono, é necessário perguntar em que paisagem o ativo está inserido, quais processos históricos o atravessam e qual grau de permanência pode ser atribuído à sua base ecológica.

4.2 Carbono orgânico do solo e zonas de integridade territorial

A Figura 4 apresenta a mudança espacial do estoque de carbono orgânico do solo entre 1985 e 2024. A classificação territorial indica que 54,04% da área válida analisada foi enquadrada como passivo ambiental subterrâneo, com ΔSOC médio de -2,47 tC/ha e ΔCO_{2eq} médio de -9,06 tCO_{2eq}/ha. As áreas de manutenção do lastro climático corresponderam a 39,66%, com ΔSOC médio de 0,21 tC/ha e ΔCO_{2eq} médio de 0,76 tCO_{2eq}/ha, enquanto as áreas de poupança ambiental positiva representaram 6,30%, com ΔSOC médio de 4,24 tC/ha e ΔCO_{2eq} médio de 15,56 tCO_{2eq}/ha.

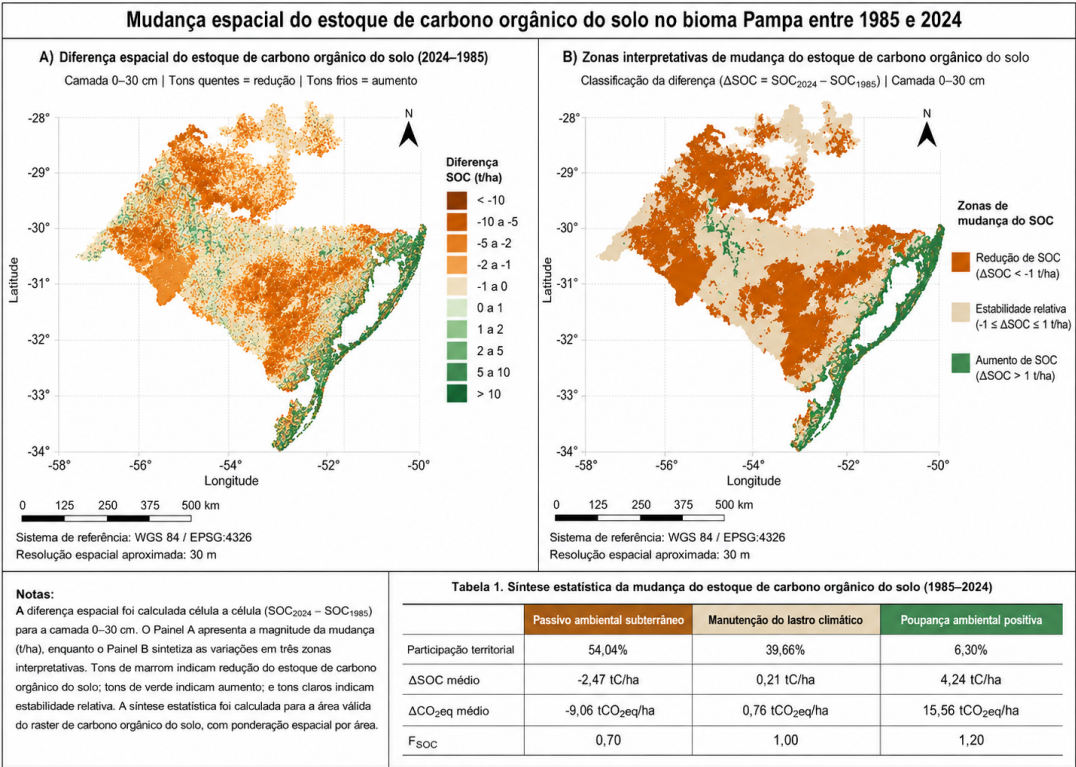


Figura 4: Mudança espacial do estoque de SOC no bioma Pampa entre 1985 e 2024.

Fonte: elaborado pelo autor com base no MapBiomass Solo Coleção 3 (MapBiomass, 2025d).

A predominância de áreas com perda de SOC responde ao segundo objetivo específico, ao classificar zonas de variação do carbono orgânico do solo. O resultado demonstra que parte expressiva do território apresenta perda relativa de lastro climático subterrâneo. Essa perda não significa ausência de carbono no solo, mas redução do estoque em relação à condição inicial, o que justifica sua interpretação como passivo ambiental subterrâneo. Por outro lado, as áreas estáveis preservam o preço-base e as áreas com ganho de SOC indicam poupança ambiental positiva, desde que mantidas as condições de permanência, rastreabilidade e integridade.

A leitura desses resultados deve considerar o caráter beta do MapBiomass Solo e a função metodológica assumida neste artigo. Os dados não são utilizados para afirmar, de forma definitiva, a contabilidade local de créditos de carbono do solo em cada pixel ou propriedade. Sua função é construir uma camada territorial de pré-qualificação, capaz de indicar onde há sinais de perda, estabilidade ou ganho de carbono subterrâneo. Esse cuidado é importante porque a precificação proposta não substitui inventário de campo, amostragem de solo ou protocolo certificador, mas oferece uma estrutura pública de triagem territorial para orientar políticas, projetos e auditorias futuras.

Com base nesses resultados, o terceiro objetivo específico também é atendido: a proposição de coeficientes territoriais de ajuste do preço-base. O fator $F_{SOC} = 0,70$ foi associado às áreas de perda, $F_{SOC} = 1,00$ às áreas de estabilidade e $F_{SOC} = 1,20$ às áreas de ganho. Esses fatores não representam preço monetário final, mas regra demonstrativa de qualificação territorial, permitindo diferenciar ativos com maior risco, ativos em condição de controle e ativos com potencial de bonificação.

A implicação econômica é direta. Uma tonelada de CO_2eq associada a uma área com perda de carbono orgânico do solo não possui a mesma qualidade territorial que uma tonelada associada a uma área com estabilidade ou ganho. A equivalência química em CO_2eq não elimina a diferença econômica entre ativos com trajetórias ecológicas distintas. Assim, o SOC atua como componente de lastro: quando o solo perde carbono, o preço deve incorporar cautela, desconto ou salvaguarda; quando mantém seu estoque, o preço-base pode ser preservado; quando há ganho, a bonificação deve ser possível, mas condicionada à verificação e à permanência.

4.3 Risco multigases, CO_2Flux e integridade climática

A interpretação dos resultados exige considerar que o CO_2eq , embora necessário como unidade comum de mercado e regulação, pode ocultar diferenças relevantes entre processos territoriais. No Pampa, arroz irrigado, soja, pecuária, silvicultura, campos nativos e mosaicos agropecuários estão associados a diferentes combinações de CO_2 , CH_4 e N_2O . Por isso, a matriz multigases apresentada na metodologia funciona como camada de integridade climática, em diálogo com as diretrizes do IPCC e com os requisitos de MRV, rastreabilidade, reversão, vazamento e dupla contagem previstos no SBCE (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019a; Brasil, 2024).

As diretrizes do IPCC para solos manejados reforçam essa necessidade ao associarem emissões de N_2O a adições antrópicas de nitrogênio, fertilizantes sintéticos e orgânicos, resíduos culturais, esterco, mineralização da matéria orgânica e mudanças de uso ou manejo

do solo (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019e). Em biomas campestres, o IPCC também reconhece que os estoques de carbono do solo são influenciados por manejo, pastejo, fogo, fertilização, irrigação, ressemeadura, renovação de raízes e alocação de carbono entre parte aérea e subterrânea (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019d). Esses elementos indicam que o valor climático do ativo florestal não pode ser avaliado de forma isolada da matriz agropecuária e campestre que o envolve.

O arroz irrigado exige atenção ao CH₄; a soja e outros sistemas agrícolas anuais demandam atenção ao N₂O e à perda de carbono do solo; e a silvicultura, embora contribua para estoques de biomassa, precisa ser avaliada quanto à permanência, ao manejo, ao risco de reversão e à matriz ecológica de inserção. Assim, o CO₂eq isolado pode sugerir equivalência climática entre ativos que, territorialmente, apresentam riscos distintos.

O CO₂Flux deve ser entendido, neste artigo, como camada complementar de MRV e calibração futura, e não como resultado empírico calculado. A proposta é compatível com sua incorporação posterior, especialmente para aproximar estoques de carbono e fluxos efetivos de troca de CO₂ entre ecossistema e atmosfera. Essa distinção evita superinterpretação metodológica e reforça que a contribuição deste estudo está na construção de um protótipo territorial de precificação baseado em cobertura da terra, SOC, biomassa florestal, risco multigases e critérios de integridade.

4.4 Silvicultura, ativo florestal e heterogeneidade ecológica

A Figura 5 mostra que a área plantada no Pampa alcançou aproximadamente 572 mil hectares em 2024, com predomínio do eucalipto, que representa 388,8 mil hectares, ou 68,0% da área plantada. O pinus corresponde a 115,0 mil hectares, ou 20,1%, enquanto outras espécies somam 68,5 mil hectares, ou 11,9%. No contexto estadual, o Rio Grande do Sul apresenta 995.494 hectares de florestas plantadas, enquanto o Brasil alcança 9.905.629 hectares (Serviço Florestal Brasileiro, 2026a).

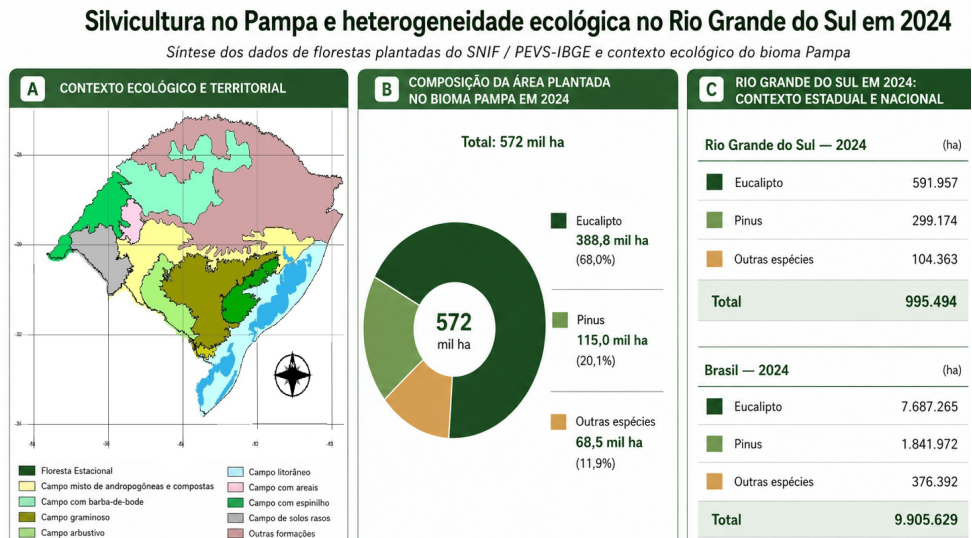


Figura 5: Silvicultura no Pampa e heterogeneidade ecológica no Rio Grande do Sul em 2024.

Fonte: elaborado pelo autor com base no SNIF/SFB, PEVS/IBGE e adaptação cartográfica dos sistemas ecológicos do Pampa (Serviço Florestal Brasileiro, 2026a).

Esses dados reforçam que a silvicultura possui relevância econômica e territorial, mas sua precificação não deve ser dissociada do contexto ecológico do Pampa. O aumento

de biomassa arbórea não substitui automaticamente a função climática dos campos nativos, nem compensa, por si só, perdas de carbono orgânico do solo. O ativo florestal precisa ser interpretado como unidade territorial de valor, risco e permanência, articulando biomassa, solo, histórico de uso da terra, matriz campestre, risco multigases e qualidade do MRV.

A presença da silvicultura no Pampa deve ser lida em duas dimensões complementares. Na primeira, ela representa ativo florestal produtivo, associado a biomassa, madeira, cadeias econômicas e possibilidades de mensuração de carbono acima e abaixo do solo. Na segunda, ela é componente de uma paisagem campestre em transformação, na qual a substituição de usos, a pressão sobre campos nativos e a variação do SOC podem alterar a qualidade climática do ativo. Assim, uma abordagem convencional poderia atribuir maior valor climático apenas à expansão de biomassa arbórea; no Pampa, porém, essa leitura deve ser condicionada por três perguntas: qual era o uso anterior da terra? O carbono orgânico do solo foi mantido, perdido ou ampliado? O ativo está inserido em uma matriz de maior permanência ecológica ou em uma zona de conversão acelerada?

A integração entre dados de silvicultura, MapBiomass, MapBiomass Solo e SFB permite aproximar a precificação florestal de uma lógica pública de integridade. Essa contribuição é relevante para políticas de fomento, PSA, restauração, bioeconomia e financiamento climático, pois diferencia ativos florestais que apenas acumulam biomassa daqueles que também preservam ou ampliam o lastro territorial do carbono.

A relevância aplicada dessa proposta é reforçada pela existência de projetos de carbono já listados ou em desenvolvimento no próprio Pampa. O Palmas Camaquã Project, localizado em Bagé (RS), está estruturado no padrão VCS como estratégia de conservação do bioma Pampa, com foco na prevenção da conversão não planejada de vegetação nativa, área útil de 1.367,6 ha e período de crédito de 2022 a 2062 (Coomysa; LEPF-UFSM, 2025). O projeto adota a metodologia VM0015 para desmatamento não planejado evitado e incorpora módulos associados à biomassa acima e abaixo do solo e ao carbono orgânico do solo (Coomysa; LEPF-UFSM, 2025). Esse caso demonstra que o mercado voluntário já começa a reconhecer o Pampa como território climático relevante. Contudo, também evidencia a necessidade de instrumentos públicos e replicáveis de pré-qualificação territorial, capazes de avaliar carbono orgânico do solo, permanência, matriz campestre, risco multigases, rastreabilidade e integridade antes da atribuição de preço ao ativo.

Assim, o problema não é a inexistência de mercado de carbono no Pampa, mas a necessidade de qualificar territorialmente o mercado que já começa a se formar.

4.5 Síntese contábil-territorial da precificação

A Figura 6 sintetiza a contribuição aplicada do artigo. A leitura contábil-territorial organiza os resultados em três categorias: débito territorial, controle/preço-base e crédito qualificado. As áreas de passivo ambiental subterrâneo representam débito, pois expressam perda de SOC e redução do lastro climático. As áreas de estabilidade representam conta de controle, pois preservam o preço-base desde que mantidas as condições de monitoramento. As áreas de poupança ambiental positiva representam crédito qualificado, com bonificação condicionada à verificação territorial.

Quadro-síntese da leitura contábil-territorial para precificação florestal no bioma Pampa

Integração entre uso da terra, mudança do carbono orgânico do solo (Δ SOC) e qualificação territorial do ativo

A. Base territorial e mudança no uso da terra (1985–2024)					C. Leitura para o mercado e qualificação do ativo	
Indicador	1985	2024	Variação	Leitura territorial		
Cobertura natural	74,1%	54,6%	-19,5 p.p.	Débito territorial	⚠ Risco de superavaliação	O CO ₂ eq isolado pode sugerir crédito positivo mesmo em territórios com perda de carbono no solo.
Cobertura antrópica	25,2%	45,0%	+19,8 p.p.	Pressão antrópica crescente	⚖ Redução da assimetria	A integração entre cobertura da terra, Δ SOC e F SOC melhora a rastreabilidade e a consistência do ativo.
Vegetação herbácea e arbustiva	10,3 Mha	6,3 Mha	-4,0 Mha	Perda de lastro ecológico	⬆ Regra de decisão	Aplicar desconto (F SOC = 0,70), preço-base (F SOC = 1,00) ou prêmio (F SOC = 1,20), conforme a integridade territorial.
Agropecuária	4,8 Mha	8,6 Mha	+3,8 Mha	Expansão sobre a matriz campestre		
Floresta	2,1 Mha	2,3 Mha	+0,2 Mha	Ganho localizado; não compensa a perda de solo		

B. Classificação contábil do carbono do solo					
Zona territorial	Participação	Δ SOC médio (tC/ha)	Δ CO ₂ eq médio (tCO ₂ eq/ha)	F SOC	Leitura contábil
⚠ Passivo ambiental subterrâneo	54,04%	-2,47	-9,06	0,70	Débito
⚖ Manutenção do lastro climático	39,66%	0,21	0,76	1,00	Controle / preço-base
⬆ Poupança ambiental positiva	6,30%	4,24	15,56	1,20	Crédito qualificado

Notas: Mha = milhões de hectares; p.p. = pontos percentuais. A figura sintetiza a qualificação territorial do ativo florestal.

Figura 6: Quadro-síntese da leitura contábil-territorial para precificação florestal no Pampa.

Fonte: elaborado pelo autor com base no MapBiomass Coleção 10.1, MapBiomass Solo Coleção 3, SNIF/SFB, PEVS/IBGE e síntese analítica do estudo.

Essa síntese responde ao quarto e ao quinto objetivos específicos: estruturar uma medida de Poupança Ambiental Ajustada e apresentar um Registro Técnico de Integridade Territorial do Ativo Florestal. A Poupança Ambiental Ajustada traduz a variação do carbono subterrâneo em CO₂eq ponderado por integridade territorial, enquanto o Registro Técnico organiza as evidências necessárias para qualificar o ativo antes da precificação. Com isso, o comprador, o certificador, o gestor público ou o formulador de política pública não avalia apenas uma tonelada abstrata de CO₂eq, mas um ativo territorialmente situado.

A principal implicação econômica é a redução da assimetria informacional. Em mercados ambientais, a especulação tende a crescer quando o preço se distancia dos fundamentos ecológicos do ativo (ARRIGHI, 1996; KINDLEBERGER; ALIBER, 2011). Ao integrar cobertura da terra, SOC, biomassa, risco multigases e MRV, o Sistema de Preço Territorial reduz esse distanciamento e aproxima a formação do preço da integridade ambiental efetivamente observável e aceita no mercado de capitais.

A síntese contábil-territorial também permite diferenciar três situações de política pública: zonas de débito, onde a prioridade deve ser restauração, recomposição do solo, controle de conversão e salvaguardas; zonas de controle, voltadas à preservação da permanência, monitoramento e prevenção de reversão; e zonas de crédito qualificado, nas quais pode haver bonificação condicionada, desde que a integridade seja confirmada por MRV e que não haja compensação indevida de passivos territoriais ocultos.

Essa diferenciação fortalece a aplicabilidade do modelo ao SFB porque transforma a precificação em instrumento de gestão, e não apenas em cálculo financeiro. O sistema pode apoiar decisões sobre fomento florestal, elegibilidade de projetos, PSA, restauração ecológica, priorização territorial, monitoramento do SBCE e desenho de mecanismos de financiamento climático. Em vez de perguntar apenas quanto carbono existe, a proposta pergunta que território sustenta esse carbono, que riscos atravessam sua permanência e que grau de confiança pode ser atribuído ao ativo.

Do ponto de vista conceitual, o resultado mais importante é a passagem da tonelada abstrata para o ativo territorialmente qualificado. Essa passagem não elimina a necessidade

de métricas, protocolos e certificação; ao contrário, organiza uma etapa anterior de qualificação pública e territorial. O carbono torna-se preço apenas depois de se tornar evidência. E, no Pampa, essa evidência precisa incluir não apenas a árvore, mas o campo, o solo, o histórico de conversão, os gases associados e a permanência ecológica do território.

5 Conclusões

Este artigo propôs um Sistema de Preço Territorial para ativos florestais no Pampa brasileiro, partindo da premissa de que, em biomas campestres, o valor climático não está apenas na biomassa arbórea visível, mas também no carbono orgânico do solo, na permanência da matriz campestre, na estabilidade do uso da terra e nos riscos multigases. A aplicação do modelo demonstrou que o Pampa passou por forte transformação territorial entre 1985 e 2024, com redução da cobertura natural, expansão de usos antrópicos e retração da vegetação herbácea e arbustiva.

A classificação do carbono orgânico do solo indicou predominância de áreas com perda de SOC, interpretadas como passivo ambiental subterrâneo. Essas áreas correspondem a 54,04% da área válida analisada e justificam a aplicação de desconto territorial no protótipo de precificação. As áreas de estabilidade representam 39,66% e preservam o preço-base, enquanto as áreas de poupança ambiental positiva correspondem a 6,30% e admitem bonificação condicionada à verificação. Esses resultados demonstram que a equivalência agregada em CO₂eq não é suficiente para diferenciar a qualidade ambiental dos ativos, pois uma mesma tonelada de carbono pode estar associada a territórios com trajetórias ecológicas, riscos e graus de permanência distintos.

A silvicultura no Pampa também deve ser avaliada em relação à heterogeneidade ecológica do bioma. A presença de aproximadamente 572 mil hectares de florestas plantadas em 2024 confirma a relevância do ativo florestal, mas não elimina a necessidade de considerar solo, permanência, matriz campestre, risco de reversão e integridade territorial. No Pampa, valorar apenas a árvore seria insuficiente; é necessário valorar também o território que sustenta, limita ou fragiliza o ativo.

A principal contribuição do estudo está em transformar dados territoriais em informação econômica auditável. O sistema de alocação de custos ambientais, a Poupança Ambiental Ajustada e o Registro Técnico de Integridade Territorial do Ativo Florestal formam uma arquitetura metodológica aplicável a políticas públicas, programas de pagamento por serviços ambientais, instrumentos vinculados ao SBCE, estratégias de fomento florestal, restauração ecológica e financiamento ambiental. A proposta não substitui metodologias certificadoras ou inventários oficiais, mas oferece uma camada de pré-qualificação territorial capaz de orientar decisões públicas e privadas antes da conversão do carbono em unidade econômica negociável.

Conclui-se que a precificação de ativos florestais no Pampa deve operar como mecanismo de integridade, e não apenas como conversão monetária do CO₂eq. O preço ambientalmente confiável precisa carregar a memória ecológica do território: o que foi perdido, o que foi mantido e o que foi acumulado no solo. Ao reconectar preço, carbono e território, o sistema proposto reduz assimetrias informacionais, limita a supervalorização de ativos frágeis e contribui para uma governança climática mais compatível com a complexidade dos biomas campestres.

Essa conclusão possui implicação crítica para os mercados ambientais. O mercado de capitais opera, muitas vezes, como um oráculo moderno: antecipa expectativas, precifica promessas e transforma incertezas futuras em valor presente. Essa capacidade pode mobilizar recursos para a transição climática, mas também pode produzir distorções quando a expectativa financeira passa a valer mais do que o fundamento ecológico. No caso do carbono, essa tensão é especialmente sensível, porque a natureza não “compensa” em sentido abstrato; ela responde por processos ecológicos, ciclos biogeoquímicos, biodiversidade, resiliência, perdas, regenerações e irreversibilidades. Por isso, a compensação climática só possui legitimidade quando vinculada a lastro territorial, permanência, MRV, salvaguardas e integridade ambiental.

As enchentes ocorridas no Rio Grande do Sul em 2024 reforçam essa leitura ao evidenciar que eventos climáticos extremos afetam paisagens, infraestrutura, agricultura, abastecimento, cadeias produtivas, preços e segurança alimentar. O caso do arroz é ilustrativo: em um estado responsável por parcela majoritária da produção nacional, choques climáticos e expectativas de escassez podem alterar mercados, estoques, importações e formação de preços. Essa experiência evidencia que commodities ambientais e agrícolas são vulneráveis não apenas ao risco físico, mas também ao risco informacional. No mercado de carbono, essa vulnerabilidade pode ser ainda mais sensível, pois créditos e certificados dependem de confiança, rastreabilidade e qualidade metodológica.

No caso do Pampa, esse risco é agravado pela possibilidade de perda progressiva de solo, carbono e funcionalidade ecológica. A redução do carbono orgânico do solo não deve ser interpretada apenas como variação estatística, mas como sinal de enfraquecimento do capital ambiental subterrâneo. Em um bioma marcado por campos, solos frágeis, áreas arenizadas, pressões agrícolas e eventos climáticos extremos, a perda de SOC pode ampliar vulnerabilidades territoriais, reduzir a resiliência ecológica e comprometer a capacidade futura de armazenamento de carbono.

A existência de projetos de carbono já listados ou em desenvolvimento no Pampa, como o Palmas Camaquã Project, reforça que o problema não é a ausência de mercado climático no bioma, mas a necessidade de qualificar territorialmente o mercado que já começa a se formar. Nesse contexto, o Sistema de Preço Territorial proposto neste artigo oferece uma camada pública de pré-qualificação capaz de avaliar solo, permanência, matriz campestre, risco multigases, rastreabilidade e integridade antes da atribuição de preço ao ativo.

6 Limitações e perspectivas futuras

Este estudo apresenta um protótipo metodológico de precificação territorial e, portanto, possui limitações que devem ser explicitadas. A primeira refere-se ao uso do MapBiomas Solo Coleção 3, ainda em versão beta, como base para classificação espacial do carbono orgânico do solo. Embora a série permita uma leitura inédita e territorializada da variação do SOC, seus resultados devem ser interpretados como camada de triagem e pré-qualificação, e não como substituto de inventários pedológicos, amostragem de campo ou protocolos certificadores de crédito de carbono.

A segunda limitação está relacionada à profundidade analisada. O estudo utilizou a camada de 0–30 cm, compatível com a base disponível e com diversas referências

de inventários e mapeamentos nacionais. Entretanto, parte relevante do carbono em biomas campestres pode estar armazenada em camadas mais profundas, especialmente em sistemas com raízes profundas, solos com maior estabilidade orgânica ou áreas com histórico de campo nativo. Pesquisas futuras devem incorporar perfis de solo mais profundos, combinando amostragem de campo, espectroscopia proximal, sensores geofísicos, sensoriamento remoto, aprendizado de máquina e validação laboratorial.

A terceira limitação refere-se ao caráter demonstrativo dos fatores de ajuste. Os coeficientes $F_{SOC} = 0,70$, $F_{SOC} = 1,00$ e $F_{SOC} = 1,20$ foram definidos como regra operacional para demonstrar a lógica de desconto, manutenção e bonificação territorial. Aplicações regulatórias futuras devem calibrar esses fatores com base em dados locais, custos de restauração, custo social do carbono, preços de mercado, incerteza da base de dados, critérios do SBCE, protocolos certificadores e diretrizes definidas por políticas públicas.

A quarta limitação diz respeito à matriz multigases e ao CO₂Flux. O estudo propõe uma leitura integrada de CO₂, CH₄ e N₂O, mas não calcula inventário completo de emissões por sistema produtivo. Também trata o CO₂Flux como camada complementar futura de MRV, e não como resultado empírico calculado. Estudos posteriores poderão integrar dados de manejo, fertilização, irrigação, pecuária, torres de fluxo, câmaras de solo, índices espectrais e modelos ecofisiológicos para aproximar estoques de carbono, fluxos efetivos e dinâmica temporal da paisagem.

Como perspectivas futuras, recomenda-se aplicar o Registro Técnico de Integridade Territorial do Ativo Florestal em estudos de caso municipais, propriedades rurais, áreas de silvicultura, projetos de restauração e programas de PSA. Também se recomenda testar o Sistema de Preço Territorial em diferentes biomas brasileiros, comparando sua aplicabilidade em formações florestais, campestres, agrícolas e urbanas. No Pampa, estudos futuros devem investigar com mais detalhe as áreas de estabilidade e ganho de SOC, especialmente unidades de conservação, campos nativos preservados, áreas arenizadas, zonas úmidas e sistemas produtivos capazes de manter ou ampliar carbono subterrâneo.

Pesquisas futuras também devem aplicar o Sistema de Preço Territorial a projetos reais de carbono já listados, em desenvolvimento ou em validação no Pampa e no Rio Grande do Sul. O caso Palmas Camaquã, localizado em Bagé (RS), é especialmente relevante por estar estruturado no padrão VCS, com foco na conservação da vegetação nativa do Pampa, prevenção da conversão não planejada e estimativa de reduções/remoções ao longo de um período de crédito de 40 anos (Coomysa; LEPF-UFSM, 2025). A aplicação do modelo a esse tipo de projeto permitiria verificar em que medida a precificação de ativos climáticos incorpora adequadamente carbono orgânico do solo, biomassa acima e abaixo do solo, permanência ecológica, matriz campestre, risco multigases, salvaguardas e rastreabilidade.

Por fim, a pesquisa aponta para uma agenda estratégica de integração entre SFB, SBCE, MapBiomas, SNIF, IFN, universidades, órgãos estaduais, extensão rural, produtores rurais e sistemas de MRV. A precificação territorial de ativos florestais pode se tornar uma ferramenta pública de governança climática se for utilizada não apenas para vender créditos, mas para identificar passivos, orientar restauração, qualificar projetos, reduzir assimetria informacional e proteger o lastro ecológico dos territórios. Em biomas campestres, essa

agenda é urgente: antes de perguntar quanto vale uma tonelada de carbono, é preciso perguntar que solo, que paisagem e que futuro sustentam esse valor.

Referências

ARRIGHI, G. *O longo século XX: dinheiro, poder e as origens de nosso tempo*. Rio de Janeiro and São Paulo: Contraponto and Editora UNESP, 1996.

Brasil. *Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024: Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE)*. Brasília, DF: Presidência da República, 2024. Acesso em: 28 maio 2026. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l15042.htm>.

COASE, R. H. The problem of social cost. *Journal of Law and Economics*, v. 3, p. 1–44, 1960. Disponível em: <<https://doi.org/10.1086/466560>>.

Coomysa; LEPP-UFMS. *Conservation Strategy for the Brazilian Pampa Biome: Palmas Camaquã Project*. Verified Carbon Standard, 2025. VCS Project Description. Project ID 4752. Project location: Bagé, Rio Grande do Sul, Brazil. Version 2.0. Crediting period: 21 Dec. 2022–21 Dec. 2062. Acesso em: 03 jun. 2026. Disponível em: <<https://registry.verra.org/>>.

DASGUPTA, P. *The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review*. London: HM Treasury, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.uk/government/publications/final-report-the-economics-of-biodiversity-the-dasgupta-review>>.

GÓMEZ-BAGGETHUN, E. et al. The history of ecosystem services in economic theory and practice: From early notions to markets and payment schemes. *Ecological Economics*, v. 69, n. 6, p. 1209–1218, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.007>>.

Intergovernmental Panel on Climate Change. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Acesso em: 28 maio 2026. Disponível em: <<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>>.

Intergovernmental Panel on Climate Change. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Geneva: IPCC, 2019. Acesso em: 28 maio 2026. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>>.

Intergovernmental Panel on Climate Change. Appendix 4: Method for estimating the change in mineral soil organic carbon stocks from biochar amendments. In: *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use*. IPCC, 2019. Disponível em: <<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>>.

Intergovernmental Panel on Climate Change. Generic methodologies applicable to multiple land-use categories. In: *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use*. IPCC, 2019. Disponível em: <<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>>.

Intergovernmental Panel on Climate Change. Grassland. In: *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use*. IPCC, 2019. Disponível em: <<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>>.

Intergovernmental Panel on Climate Change. N₂O emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application. In: *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use*. IPCC, 2019. Disponível em: <<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>>.

International Organization for Standardization. *ISO 14064-1:2018: Greenhouse gases – Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals*. Geneva: ISO, 2018. Acesso em: 28 maio 2026. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/66453.html>>.

International Organization for Standardization. *ISO 14064-2:2019: Greenhouse gases – Part 2: Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements*. Geneva: ISO, 2019. Acesso em: 28 maio 2026. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/66454.html>>.

International Organization for Standardization. *ISO 14064-3:2019: Greenhouse gases – Part 3: Specification with guidance for the verification and validation of greenhouse gas statements*. Geneva: ISO, 2019. Acesso em: 28 maio 2026. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/66455.html>>.

KINDLEBERGER, C. P.; ALIBER, R. Z. *Manias, pânico e crises: uma história das crises financeiras*. São Paulo: Saraiva, 2011. Conferir edição utilizada.

MapBiomias. *Coleção 10 de mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil*. 2025. Série anual de cobertura e uso da terra do Brasil, 1985–2024. Acesso em: 28 maio 2026. Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org/>>.

MapBiomias. *Mapas de granulometria e textura do solo do Brasil 0–100 cm: MapBiomias Solo Coleção 3 (beta)*. 2025. Acesso em: 28 maio 2026. Disponível em: <<https://doi.org/10.58053/MapBiomias/9ORUPF>>.

MapBiomias. *Pampa: evolução anual da cobertura e uso da terra, 1985–2024*. 2025. Infográfico da Coleção 10 do MapBiomias. Acesso em: 28 maio 2026. Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org/infograficos/>>.

MapBiomias. *Série de mapas anuais do estoque de carbono orgânico do solo do Brasil 0–30 cm (1985–2024): MapBiomias Solo Coleção 3 (beta)*. 2025. Acesso em: 28 maio 2026. Disponível em: <<https://doi.org/10.58053/MapBiomias/2LUSVQ>>.

NORDHAUS, W. D. *The Climate Casino: Risk, Uncertainty, and Economics for a Warming World*. New Haven: Yale University Press, 2013.

PIGOU, A. C. *The Economics of Welfare*. London: Macmillan, 1920.

SANTOS, M. *A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção*. São Paulo: Hucitec, 1996.

SANTOS, M. *Por uma outra globalização: do pensamento único à consciência universal*. Rio de Janeiro: Record, 2000.

SANTOS, R. F. d. *O contexto histórico da definição conceitual de serviços ecossistêmicos*. São Paulo: FAPESP, 2014. Palestra apresentada no Programa BIOTA-FAPESP Educação, Ciclo de Conferências 2014. Acesso em: 30 maio 2026. Disponível em: <https://fapesp.br/eventos/2014/02/biota/Rozely_Ferreira.pdf>.

SAY, J.-B. *Cours complet d'économie politique pratique*. Paris: Rapilly, 1828. Conferir volume e edição utilizada.

Serviço Florestal Brasileiro. *Floresta plantada no Brasil 2024*. Brasília, DF: Sistema Nacional de Informações Florestais, 2026. Dados com base em IBGE/PEVS. Acesso em: 28 maio 2026. Disponível em: <<https://snif.florestal.gov.br/pt-br/paineis-interativos/floresta-plantada-no-brasil-2024>>.

Serviço Florestal Brasileiro. *Painel de Biomassa e Carbono das Florestas Brasileiras*. Brasília, DF: Sistema Nacional de Informações Florestais, 2026. Acesso em: 28 maio 2026. Disponível em: <<https://snif.florestal.gov.br/>>.

STERN, N. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

United Nations Framework Convention on Climate Change. *Paris Agreement*. Paris: UNFCCC, 2015. Adopted on 12 December 2015; entered into force on 4 November 2016. Acesso em: 28 maio 2026. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement_publication.pdf>.

VERISSIMO, E. *O tempo e o vento*. São Paulo: Companhia das Letras, 2004. Obra originalmente publicada entre 1949 e 1962. Conferir edição utilizada.

Verra. *VM0042: Improved Agricultural Land Management, Version 2.2*. [S.l.]: Verra, 2025. VCS Methodology. Sectoral Scope 14: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Version 2.2, 21 October 2025.

WEITZMAN, M. L. Prices vs. quantities. *The Review of Economic Studies*, v. 41, n. 4, p. 477–491, 1974. Disponível em: <<https://doi.org/10.2307/2296698>>.

World Resources Institute; World Business Council for Sustainable Development. *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*. Washington, DC and Geneva: World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2004. Acesso em: 28 maio 2026. Disponível em: <<https://ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/standards/ghg-protocol-revised.pdf>>.