



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR

CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

CÁSSIA KELLEN LOPES FONSECA DA COSTA DA COSTA

ESTIMATIVA E VALORAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO NO SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO

Recife

2025

CÁSSIA KELLEN LOPES FONSECA DA COSTA

ESTIMATIVA E VALORAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO NO SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de doutora em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de concentração: Produção sustentável de biomassa

Orientador (a): Rômulo Simões Cezar Menezes

Coorientador (a): Josimar Gurgel Fernandes

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Costa, Cássia Kellen Lopes Fonseca da.

Estimativa e valoração do estoque de carbono no semiárido de Pernambuco / Cássia Kellen Lopes Fonseca da Costa. - Recife, 2025.

116f.: il.

Tese (Doutorado)- Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências (CTG), Programa de Pós Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares (PROTEN), 2025.

Orientação: Rômulo Simões Cezar Menezes.

Coorientação: Josimar Gurgel Fernandes.

1. Estoques de carbono; 2. Serviços ecossistêmicos; 3. Semiárido; 4. Invest; 5. Valoração econômica. I. Menezes, Rômulo Simões Cezar. II. Fernandes, Josimar Gurgel. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

CÁSSIA KELLEN LOPES FONSECA DA COSTA

ESTIMATIVA E VALORAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO NO SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO

Tese Apresentada ao Programa de Pós Graduação Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade]Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociência - CTG, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de Concentração: Dosimetria e Instrumentação Nuclear.

Aprovado em: 29/10/2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente

 ROMULO SIMÕES CEZAR MENEZES
Data: 05/11/2025 08:58:31-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Documento assinado digitalmente

 MILTON MARQUES FERNANDES
Data: 04/11/2025 17:52:36-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Dr. Milton Marques Fernandes (Examinador Externo)
Universidade Federal de Sergipe - UFS

Documento assinado digitalmente

 PAULA RENATA MUNIZ ARAÚJO
Data: 29/10/2025 18:50:58-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Dra. Paula Renata Muniz Araújo (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Documento assinado digitalmente

 JOSENILDO DE SOUZA E SILVA
Data: 29/10/2025 17:58:14-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Dr. Josenildo de Souza e Silva (Examinador Externo)
Universidade Federal do Delta do Parnaíba (UFDPar)

Documento assinado digitalmente

 FERNANDO BRUNO VIEIRA DA SILVA
Data: 30/10/2025 13:11:55-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Dr. Fernando Bruno Vieira da Silva (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

AGRADECIMENTOS

A Deus, presença constante em todos os momentos e decisões da minha vida, pela força e sabedoria concedidas.

Ao meu esposo José Carlos, meu grande companheiro e suporte em todos os momentos, e as minhas filhas Maria Cecília e Maria Helena, que nasceram durante o período do doutorado e se tornaram meu combustível diário, trazendo luz, força e esperança mesmo nos dias de maior cansaço e dificuldade. Aos meus familiares e amigos de tantos âmbitos pessoais, pela torcida e incentivo em cada conquista.

Aos meus orientadores, Dr. Rômulo Menezes e Prof. Josimar Gurgel, pela orientação, paciência, ensinamentos e pela confiança depositada em mim, transmitindo não apenas conhecimento científico, mas também valores fundamentais.

Aos integrantes do Grupo de Pesquisa em Energia da Biomassa, e em especial, aos amigos e companheiros da CarboNE — Jéssica Bárbara, Tarcila Lins e Ivson Lucas, cuja amizade e presença constante fizeram diferença na realização deste trabalho. Registro aqui minha profunda gratidão a Ivson, que me deu suporte nas etapas metodológicas, sou muito grata por seu apoio e amizade durante todo esse processo.

Aos membros do meu comitê de acompanhamento, Profa. Dra. Paula Araújo, Prof. Dr. Samuel Alves, Prof. Dr. Milton Marques e Prof. Dr. Everardo Sampaio, e também o Prof. Dr. Aldo Torres pela compreensão, paciência e pelas valiosas contribuições e orientações que enriqueceram este trabalho.

Por fim, a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho, deixo meu sincero agradecimento.

“É justo que muito custe o que muito vale.”

(Santa Teresa d’Ávila)

RESUMO

A valoração de serviços ecossistêmicos é fundamental para orientar políticas de conservação, especialmente em regiões vulneráveis como o semiárido brasileiro. Nesse contexto, a quantificação de estoques de carbono torna-se crucial para compreender a contribuição dos ecossistemas na regulação do clima. Esta tese objetivou quantificar e valorar os estoques de carbono no semiárido de Pernambuco, fornecendo subsídios para o planejamento de ações sustentáveis. O estudo abrangeu dez microrregiões, analisando a dinâmica do uso e cobertura da terra entre 1994 e 2022, e projetou um cenário futuro para 2050 mediante o modelo Business as Usual (BAU). A metodologia integrou o modelo de estoque de carbono do InVEST com projeções de mudança do uso da terra geradas pelo plugin Molusce no QGIS, permitindo calcular os estoques totais de carbono e sua distribuição por classe de uso e cobertura do solo. Os resultados indicaram uma perda líquida de 281,8 milhões de Mg no estoque total agregado de carbono no período histórico, com projeção de adicional 113,8 milhões de Mg até 2050. A formação savânea (Caatinga aberta) foi a classe que mais perdeu carbono, com destaque para as microrregiões de Petrolina e Araripe, que apresentaram as maiores perdas. A valoração econômica, realizada a partir de diferentes métricas, revelou perdas bilionárias associadas à degradação, destacando a urgência de políticas públicas diferenciadas por microrregião para reverter esse cenário e aproveitar oportunidades como os mercados de carbono, promovendo o desenvolvimento sustentável em nível regional.

Palavras-chave: estoques de carbono; serviços ecossistêmicos; semiárido; invest; valoração econômica.

ABSTRACT

The valuation of ecosystem services is essential to guide conservation policies, especially in vulnerable regions such as the Brazilian semiarid. In this context, the quantification of carbon stocks becomes crucial to understand the contribution of ecosystems to climate regulation. This thesis aimed to quantify and assess the value of carbon stocks in the semiarid region of Pernambuco, providing support for the planning of sustainable actions. The study covered ten microregions, analyzing land use and land cover dynamics between 1994 and 2022, and projected a future scenario for 2050 using the Business as Usual (BAU) model. The methodology integrated the InVEST carbon storage model with land use change projections generated by the Molusce plugin in QGIS, allowing the calculation of total carbon stocks and their distribution by land use and cover class. The results indicated a net loss of 281.8 million Mg in the total aggregated carbon stock during the historical period, with a projected additional loss of 113.8 million Mg by 2050. The savanna formation (open Caatinga) was the class that lost the most carbon, with the microregions of Petrolina and Araripe standing out for presenting the greatest losses. The economic valuation, carried out using different metrics, revealed billion-dollar losses associated with degradation, highlighting the urgency of differentiated public policies by microregion to reverse this scenario and seize opportunities such as carbon markets, promoting sustainable regional development.

Keywords: carbon stocks; ecosystem services; semiarid; InVEST; economic valuation.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS E VALORAÇÃO	17
2.2	O CICLO DO CARBONO	18
2.3	MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DE ESTOQUE DE CARBONO	19
2.4	INVEST	20
2.5	MODELO DE CARBONO DO INVEST	22
2.6	MERCADO DE CARBONO E POLÍTICAS DE CONSERVAÇÃO	25
2.7	REGIÃO SEMIÁRIDA	29
2.8	POLÍTICAS PÚBLICAS PARA A REGIÃO DO SEMIÁRIDO	31
3	MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1	ÁREA DE ESTUDO	32
3.2	CONSTRUÇÃO DE BASE DE DADOS	36
3.2.1	Mapeamento do uso e cobertura da terra (LULC)	36
3.2.2	Banco de dados de carbono	39
3.2	PROJEÇÃO FUTURA	40
3.4	VALORAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO PELO MODELO INVEST	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	EVOLUÇÃO DOS ESTOQUES TOTAIS DE CARBONO	44
4.2	DINÂMICA DO ESTOQUE DE CARBONO POR CLASSE E USO E COBERTURA DA TERRA	51
4.3	VALORAÇÃO DOS SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS DE CARBONO	56
5	CONCLUSÕES	62
	REFERÊNCIAS	65
	APÊNDICE A – RESULTADO PARA TODOS OS USOS DA MICRORREGIÃO DO ALTO CAPIBARIBE	76
	APÊNDICE B – RESULTADO PARA TODOS OS USOS DA MICRORREGIÃO DE ARARIPINA	
	APÊNDICE C - RESULTADO PARA TODOS OS USOS DA MICRORREGIÃO DO VALE DO IPANEMA	
	APÊNDICE D – RESULTADO PARA TODOS OS USOS DA MICRORREGIÃO DE ITAPARICA	

APÊNDICE E – RESULTADO PARA TODOS OS USOS DA MICRORREGIÃO DO PAJEÚ

APÊNDICE F – RESULTADO PARA TODOS OS USOS DA MICRORREGIÃO DE GARANHUNS

APÊNDICE G – RESULTADO PARA TODOS OS USOS DA MICRORREGIÃO DE SALGUEIRO

APÊNDICE H – RESULTADO PARA TODOS OS USOS DA MICRORREGIÃO DO SERTÃO DO MOXOTÓ

APÊNDICE I – RESULTADO PARA TODOS OS USOS DA MICRORREGIÃO DE PETROLINA

APÊNDICE J – RESULTADO PARA TODOS OS USOS DA MICRORREGIÃO DO VALE DO IPOJUCA

APÊNDICE L – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CBIO (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DO ALTO CAIBARIBE

APÊNDICE M – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA MERCADO INTERNACIONAL (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DO ALTO CAIBARIBE

APÊNDICE O – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CSC (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DO ALTO CAIBARIBE

APÊNDICE P – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CBIO (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DE ARARIPINA

APÊNDICE Q – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA MERCADO INTERNACIONAL (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DE ARARIPINA

APÊNDICE R – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CSC (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DE ARARIPINA

APÊNDICE S – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CBIO (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DO VALE DO IPANEMA

APÊNDICE T – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA MERCADO INTERNACIONAL (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DO VALE DO IPANEMA

APÊNDICE U – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CSC (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DO VALE DO IPANEMA

APÊNDICE V – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CBIO (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DE ITAPARICA

APÊNDICE W – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA MERCADO INTERNACIONAL (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DE ITAPARICA

APÊNDICE X – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CSC (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DE ITAPARICA

APÊNDICE Y – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CBIO (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DO PAJEÚ

APÊNDICE Z – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA MERCADO INTERNACIONAL (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DO PAJEÚ

APÊNDICE AA – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CSC (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DO PAJEÚ

APÊNDICE AB – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CBIO (EM DÓLAR)

- PARA A MICRORREGIÃO DE GARANHUNS**
- APÊNDICE AC – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA MERCADO INTERNACIONAL (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DE GARANHUNS**
- APÊNDICE AD – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CSC (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DE GARANHUNS**
- APÊNDICE AE – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CBO (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DE SALGUEIRO**
- APÊNDICE AF – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CSC (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DE SALGUEIRO**
- APÊNDICE AG – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CBO (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DE SALGUEIRO**
- APÊNDICE AH – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CBO (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DO SERTÃO DO MOXOTÓ**
- APÊNDICE AI – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CSC (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DO SERTÃO DO MOXOTÓ**
- APÊNDICE AJ – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CBO (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DE ITAPARICA**
- APÊNDICE AK – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CBO (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DE ITAPARICA**
- APÊNDICE AL – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CSC (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO VALE DO IPOJUCA**
- APÊNDICE AM – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CBO (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO VALE DO IPOJUCA**
- APÊNDICE AN – VALORAÇÃO PELA MÉTRICA CSC (EM DÓLAR) PARA A MICRORREGIÃO DO VALE DO IPOJUCA**

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Microrregiões do semiárido de Pernambuco	35
Tabela 2. Classes de uso e cobertura da terra, versão 9.0 do Mapbiomas	38
Tabela 3. Dados biofísicos de carbono para mapas LULC do Mapbiomas	40
Tabela 4. Preços por tonelada de carbono do CBIO em real e dólar, mercado internacional e CSC	44
Tabela 5. Estoques totais de C nos anos de 1994, 2008, 2022 e 2050	45
Tabela 6. Análise temporal detalhada por períodos de variação	47
Tabela 7. Dados estatísticos de acurácia e índice Kappa para os mapas projetados de 2050 em cada microrregião	50
Tabela 8. Estoques de carbono (em Mg) por classe de uso e cobertura do solo para o semiárido pernambucano, nos anos de 1994, 2008, 2022 e 2050 e a variação	53
Tabela 9. Valoração econômica do estoque de carbono para o ano de 2022	57
Tabela 10. Variação do valor do estoque de carbono por microrregião pela métrica do mercado internacional	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Reservatórios de carbono do modelo de carbono do InVEST	23
Figura 2. Relação entre a estimativa de armazenamento de carbono e o caminho real para o armazenamento	25
Figura 3. Delimitação do semiárido e microrregiões de Pernambuco inseridas no semiárido brasileiro	34
Figura 4. Fluxograma da metodologia adotada no estudo	37
Figura 5. Interface do Molusce 5.0 no QGIS	41
Figura 6. Interface do modelo de estoque e sequestro de carbono no InVEST	43
Figura 7. Evolução temporal dos estoques de Carbono nas microrregiões do semiárido Pernambucano	46
Figura 8. Variação percentual dos estoques de Carbono por microrregião (1994-2022)	48
Figura 9. Variação percentual dos estoques de Carbono por microrregião (2022-2050)	49
Figura 10. Dinâmica dos estoques de Carbono por classes de uso do solo (1994-2050)	54
Figura 11. Trajetória temporal do valor do estoque de carbono agregado das 10 microrregiões	57

1 INTRODUÇÃO

A biodiversidade tem sido progressivamente ameaçada, principalmente devido à superexploração dos recursos naturais, pela degradação ambiental, ao desmatamento para fins agropecuários, pelo crescimento urbano e pelo avanço industrial. Para a conservação da biodiversidade e manutenção dos serviços ecossistêmicos, faz-se necessário aplicar medidas eficazes de conservação e manejo ambiental, possibilitando um desenvolvimento sustentável. Isto pode ser alcançado por meio de análises de compensações (trade-offs), que equilibram pontos negativos e positivos das atividades antrópicas, permitindo identificar os locais com menor prejuízo de conservação (HIPOLITO et. al., 2017).

Nesse contexto, uma ferramenta essencial para orientar tais medidas é a valoração dos serviços ecossistêmicos que atende a estas necessidades, visto que busca quantificar os benefícios econômicos dos ecossistemas, incentivando diretamente a preservação de áreas por meio da atribuição de valor aos serviços que contribuem para as tomadas de decisões de manejo, tornando claros os custos versus benefícios (ABSON; TERMANSEN, 2010). Para aumentar a credibilidade dessas análises, é essencial incorporar medidas biofísicas de referências à paisagem, tendo em vista que fatores bióticos e abióticos de um local trazem importantes influências para os resultados (DAILY et al., 2009; RAYMOND et al., 2009). Para realizar essa valoração de forma sistematizada, um dos principais instrumentos é a modelagem computacional.

O uso da modelagem nas ciências naturais é crescente, devido à sua capacidade de criar previsões e cenários que não poderiam ser representados de outra maneira (HIPOLITO et al., 2017). Um dos métodos de modelagem computacional em uso para estimar a valoração de serviços ecossistêmicos é o InVEST (Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs – Valoração Integrada dos Serviços Ecossistêmicos e Compensações), desenvolvido pelo Projeto Natural Capital, capaz de mapear e dar valor econômico a bens e serviços naturais, gerando informações para auxiliar na tomada de decisões como, por exemplo, indicar áreas em que o investimento em capital natural pode trazer benefícios para a sociedade (HAMEL et al., 2015; TALLIS et al., 2011). Analisar as transformações no uso e na cobertura da terra (Land use and Land Cover - LULC) e prever como as paisagens podem evoluir no futuro oferece suporte aos planejadores para desenvolver estratégias eficazes de

redução de emissões de gases de efeito estufa (HUSSAIN et al., 2024).

Os modelos do InVEST utilizam mapas como dados de entrada e entregam também mapas como saídas, de escalas locais a globais. Representam o fornecimento de serviços, como por exemplo, o sequestro, que se refere à captação de CO₂ na atmosfera por organismos fotossintetizantes, e o estoque de carbono, que corresponde à quantidade de carbono armazenado na biomassa e no solo ao longo do tempo. As análises podem ser realizadas com um software de geoprocessamento baseado em Sistemas de Informações Geográficas (SIG), e não têm como pré-requisito o domínio de linguagens de programação (Sharp et. al., 2015). Sendo assim, a modelagem computacional do InVEST permite quantificar e espacializar os dados, auxiliando na compreensão do papel dos ecossistemas na regulação do clima.

O clima da Terra é regulado pelo equilíbrio dos gases do efeito estufa, como o CO₂, na atmosfera, sendo que a vegetação armazena mais carbono do que a própria atmosfera. O balanço entre o armazenamento e a perda de carbono contribui para a diminuição das mudanças climáticas e das consequências negativas do efeito estufa (LAL, 2004). Desse modo, a maneira como as florestas e ecossistemas são administrados é fundamental para a regulação do clima.

Diante dessa preocupação global com o controle das emissões e a manutenção do equilíbrio climático, foram criados acordos internacionais voltados à redução dos gases de efeito estufa. O protocolo de Kyoto trata-se de um acordo firmado em 1997, no Japão, com adesão de 84 países comprometidos com a redução dos gases de efeito estufa. Esse acordo causou um impacto positivo, fazendo com que o estoque e o sequestro de carbono sejam dos mais reconhecidos entre os serviços ecossistêmicos (SANTOS; SOUZA, 2020; MEA, 2005). A partir dessas iniciativas internacionais, surgiram também mecanismos econômicos voltados à valoração e à compensação das emissões de carbono.

O custo social do carbono (CSC) é um conceito importante para o entendimento da relevância econômica do sequestro de carbono, pois representa o valor social de uma tonelada de carbono sequestrada, que é igual ao dano social evitado ao não liberar esta mesma tonelada de carbono para a atmosfera, estimado em US\$ 31 por tonelada de CO₂, evidenciando o valor econômico do carbono sequestrado pelos ecossistemas (NORDHAUS, 2017). Os créditos de carbono, derivados desse reconhecimento, são negociados em mercados internacionais, podendo ser comercializados no Brasil a partir da Bolsa de Mercadorias e Futuros (BM&F). Estes créditos são considerados um mecanismo de

desenvolvimento sustentável com grande potencial para reduzir os gases de efeito estufa.

Diante desse potencial econômico, mecanismos de créditos de carbono são uma alternativa viável para governos, proprietários rurais e agricultores que enfrentam desafios ambientais e econômicos em regiões mais vulneráveis, como o semiárido brasileiro, conciliando a preservação dos recursos naturais com o desenvolvimento local, considerando a importância do sequestro e do estoque de carbono para mitigar as mudanças climáticas, compreender essa dinâmica em ecossistemas do semiárido brasileiro torna-se essencial.

A região semiárida brasileira, constituída em sua maior parte pelo bioma Caatinga, encontra dificuldades para alcançar uma gestão sustentável quanto aos seus recursos naturais e sistemas produtivos. Encontrar soluções para as crises hídrica, energética e alimentar se torna ainda mais complexo, pois é necessário levar em consideração as características edafoclimáticas da região, além da realidade da população local. Caracterizada pela carência de períodos regulares de chuva, que acarretam uma das maiores dificuldades sociais do país, que é a seca, trazendo sérios prejuízos à população (TRAVASSOS et al., 2013; SILVA et al., 2016).

Apesar de possuírem registro histórico desde o século XVIII, as políticas públicas para a região do semiárido brasileiro ainda são insuficientes para ajudar a população que depende da terra para enfrentar essas dificuldades causadas pela seca, que acabam minando seu desenvolvimento e sustentabilidade. É necessário que cada vez mais sejam formuladas e executadas estratégias que aliem, além da preservação dos recursos naturais, seu aproveitamento para melhorar o desenvolvimento social nessas áreas, por meio de programas que, sem fugir da realidade, trabalhem com arranjos de produção que tragam resultados rentáveis (AGUIAR et al., 2019).

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo quantificar e valorar os estoques de carbono nas microrregiões localizadas no semiárido de Pernambuco, por meio da plataforma InVEST, de modo a compreender a dinâmica de carbono na região e oferecer subsídios para formular políticas públicas e estratégias de gestão ambiental sustentáveis. Especificamente, busca-se:

- (i) avaliar o estoque e o sequestro de carbono total, bem como em diferentes classes de uso e cobertura do solo;
- (ii) analisar os custos e benefícios associados a cada cenário proposto, considerando a valoração econômica do sequestro e do estoque de carbono; e

(iii) subsidiar políticas públicas e estratégias que promovam a conservação e a geração de renda, por meio da monetização de créditos de carbono.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS E VALORAÇÃO

De acordo com MEA (2005), os sistemas ambientais são áreas onde há interações entre a biodiversidade e o ambiente biológico, do qual o homem faz parte. Os serviços ecossistêmicos podem ser definidos como os benefícios que os sistemas ambientais trazem para a população, ou seja, a capacidade que os ecossistemas possuem de fornecer bens e serviços que supram as necessidades humanas. Estes serviços se agrupam em quatro categorias distintas, de acordo com suas funções (ANDRADE; ROMEIRO, 2009):

- Regulação: são aqueles serviços que estão ligados às características regulatórias que os ambientes possuem para equilibrar os sistemas ecológicos essenciais à vida na terra, como por exemplo, os ciclos biogeoquímicos (MA, 2005). É importante salientar que as ações antrópicas têm grande influência nestes processos regulatórios. O sequestro de carbono é um desses serviços.
- Provisão: Serviços relacionados à obtenção de produtos por meio de processos naturais. A água e a madeira são exemplos desses produtos (RIBEIRO, 2018; MA, 2005).
- Suporte: São aqueles serviços essenciais para o funcionamento dos outros serviços, e seus impactos ocorrem de modo indireto, ao longo do tempo. São exemplos: formação do solo, fotossíntese, ciclagem de nutrientes e água (MA, 2005).
- Cultural: Intimamente ligado aos valores e ao comportamento humano, visto que a preservação do meio ambiente depende da necessidade que o homem tem dos seus benefícios para o bem-estar. Nesses serviços, os benefícios são imateriais, como por exemplo: conhecimento educacional, informação cultural e científica, desenvolvimento cognitivo e capacidade de reflexão (MA, 2005).

O processo de avaliação de um serviço ecossistêmico possui duas etapas: quantificação biofísica e avaliação econômica (SEEA, 2012). A quantificação biofísica expressa o fluxo de ativos naturais por meio de um conjunto de dados em unidades físicas. Estas são vinculadas à segunda etapa de avaliação econômica, onde são transformados esses valores em termos econômicos. Essas avaliações são realizadas para demonstrar o quanto os serviços ecossistêmicos são importantes e beneficiam o ser humano, assim como para a gestão das políticas públicas na promoção de um desenvolvimento sustentável (TEEB, 2010; BRAAT E GROOT, 2012).

Segundo Balvanera (2012), os serviços ecossistêmicos são estudados em três níveis: 1) abastecimento: funções que os ecossistemas já possuem e que têm potencial positivo para o ser humano; 2) distribuição: relação entre o fornecimento do serviço e a sociedade, considerando a distribuição espacial do capital e da infraestrutura. O corte de florestas é um exemplo; 3) Valor: considera a preferência por diferentes serviços, e pode ser expresso em valores monetários, como o valor da água potável, por exemplo.

Os elementos naturais, como água, rochas, solo, fauna e vegetação, quando utilizados pela sociedade, oferecem serviços ecossistêmicos, que são fundamentais para sustentar as atividades humanas, promover bem-estar e qualidade de vida ao indivíduo. Essa relação entre os ecossistemas e a sociedade demonstra a necessidade de conservar para garantir a continuidade desses serviços essenciais para o homem (CHAVES et al., 2021).

2.2 O CICLO DO CARBONO

Embora o dióxido de carbono (CO_2) represente uma fração pequena da atmosfera terrestre, ele é um dos gases causadores do efeito estufa, devido à sua emissão crescente por atividades humanas (IPCC, 2013). Essencial para a vida na terra, o carbono faz parte da composição de todos os organismos. Por meio do processo de fotossíntese, as plantas absorvem o gás carbônico atmosférico, e através da energia solar, formam moléculas orgânicas. Parte desse carbono (entre 40 e 65%), é liberado pelas atividades de respiração na forma de CO_2 e a outra parte permanece na biomassa vegetal (FERREIRA, 2013). Quando as plantas morrem, esse carbono pode ser sequestrado no solo, formando importantes reservatórios de matéria orgânica.

O ciclo global do carbono é um processo biogeoquímico que integra mecanismos biológicos, geológicos e químicos, responsáveis pela contínua reciclagem do carbono entre seus principais reservatórios: a atmosfera, biosfera, oceanos e sedimentos (LAL, 2004; BRADY e WEIL, 2013). Dentre esses reservatórios, a biosfera desempenha um papel importante na regulação do CO_2 atmosférico. A dinâmica do uso da terra é um vetor crucial nessa regulação, pois atua como um sumidouro ao remover e armazenar carbono na biomassa e no solo e também como causador da emissão de gases de efeito estufa devido as mudanças na cobertura da terra. Em escala global, o estoque de carbono nas florestas diminuiu de 668 gigatoneladas em 1990 para 662 gigatoneladas em 2020 (FAO, 2020), e essa dinâmica varia regionalmente.

A dinâmica do uso da terra é essencial para essa regulação do clima, e a quantificação precisa do carbono estocado na vegetação e no solo é fundamental para a modelagem do ciclo global e para restauração e preservação dos ecossistemas. O Brasil detém a segunda maior área florestal do mundo e protagoniza esse cenário, sendo o setor de uso e mudanças no uso da terra responsável por 24% das emissões líquidas de CO₂ equivalente (SEEG, 2022).

Por outro lado, as mudanças climáticas por si só exercem um impacto direto nessa ciclagem de C. O aumento da temperatura global e a incidência de eventos climáticos extremos como secas prolongadas e ondas de calor, comprometem a resiliência dos ecossistemas. Estes cenários reduzem a capacidade de sequestro de carbono, aumentam a incidência e a intensidade de incêndios florestais, liberando abruptamente grandes quantidades de CO₂ que estavam armazenadas. Isto significa que o distúrbio no ciclo do C é uma causa para as mudanças climáticas, mas também é amplificado por elas (IPCC, 2021).

2.3 MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DE ESTOQUE DE CARBONO

Diante desse desafio metodológico, o estoque de carbono em uma área pode ser medido de maneira direta, com dados de medições feitas em campo (amostragem destrutiva), e de maneira indireta, por meio de estimativas e modelos (equações alométricas, modelagem). É preciso destacar que a obtenção de dados em campo, apesar de fornecer informações com maior acurácia, envolve altos investimentos em tempo e dinheiro (LIMA JÚNIOR et al. 2014).

Dentro desse contexto, Chen et. al. (2005) consideraram cinco métodos convencionais para estimar o estoque de carbono nos ecossistemas terrestres, e podem ser compreendidos conforme essa categorização. Quando combinados, esses métodos podem apresentar bons resultados:

- 1) Estimativas biométricas: Baseiam-se na medição direta de variáveis dendrométricas como DAP (Diâmetro à altura do peito e altura), para uma maior confiabilidade das informações sobre a biomassa terrestre por meio das medições em locais de amostragem;
- 2) Abordagem ecofisiológica: Medem com alta acurácia taxas de fotossíntese, traduzindo a resposta das plantas aos processos de troca de dióxido de C e vapor de água, fornecendo dados detalhados a partir de instrumentos de grande acurácia. Sendo assim, esta abordagem não apenas quantifica os fluxos de carbono, mas também explica como e por que estes fluxos variam em resposta a fatores ambientais diversos como luz, temperatura,

disponibilidade hídrica e concentração de CO₂ na atmosfera, por exemplo.

- 3) Estimativas micrometeorológicas: Realizadas por meio de torres posicionadas acima do dossel da vegetação que produzem informações diretas e contínuas das trocas de gases, o que também é chamado de Net Ecosystem Exchange (NEE).
- 4) Abordagens de modelagem de processos: Consistem em um conjunto de ferramentas de computação que simulam cenários de processos biofísicos que controlam o sequestro de carbono em diferentes escaladas. Estes modelos integram dados de clima, solo e vegetação, que podem ser calibrados e validados com dados empíricos.
- 5) Uso de ferramentas de sensoriamento remoto: Aliado indispensável nos estudos de carbono em larga escala. Satélites e sensores analisam parâmetros da vegetação para estimar quantidades de carbono sequestrados nos ecossistemas.

Tendo em vista que as taxas de fotossíntese derivam de estimativas da quantidade de luz do sol absorvida pela superfície da terra, os sensores remotos são excelentes alternativas para analisar os fluxos de carbono. Devido à região espectral vermelha e infravermelha próxima e sua afinidade com o alvo, índices de vegetação como o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) são utilizados para fazer estas estimativas. Outros índices também podem ser utilizados com a finalidade de reduzir o ruído do sensor, como, por exemplo, o Índice Ajustado de Vegetação do Solo (SAVI) (HUETE, 1988) ou o Índice de Vegetação Melhorado (EVI) (HUETE, 2002) (JONES e VAUGHAN, 2010). Apesar das estimativas indiretas poderem ser menos precisas que as medições em campo, elas conseguem contornar esse alto investimento e se mostram como uma alternativa para obtenção de informações por meio de outras fontes como imagens de satélite.

Dentre os desafios para a utilização de técnicas de sensoriamento remoto na Caatinga está a diferenciação dos tipos de vegetação, visto que existem áreas mais densas que outras e muitas vezes os softwares de sensoriamento remoto colocam os dois tipos na mesma categoria devido à sua resposta espectral semelhante. Esse tipo de situação dificulta a obtenção de maior precisão dos dados, consequentemente, a análise também não será tão assertiva. Por esse motivo, é necessária a utilização de abordagens mais sofisticadas, com o uso de softwares ou algoritmos que consigam fazer essa distinção, possibilitando uma simulação mais próxima da realidade da área de estudo.

Superar essas limitações técnicas é um passo fundamental para a quantificação precisa do

estoque de carbono. A necessidade da sua remoção de carbono está cada vez mais em evidência, e formações vegetais como a Caatinga desempenham um papel importante nessa função, visto que a fotossíntese é o principal mecanismo biológico para retirada do CO₂ da atmosfera (ROUBUSTE et al, 2022). Sendo assim, ações para neutralizar o CO₂ são essenciais para mitigar os reflexos das mudanças climáticas, que hoje recebe uma maior atenção pública já que elas resultam em grandes perdas econômicas, sociais e ecológicas (ROUBUSTE et al., 2022; PEREIRA et al., 2024). Sendo assim, estudos de modelagem matemática de sistemas produtivos e simulação de cenários são cruciais, permitindo antecipar o conhecimento de impactos, contribuindo para redução de emissão de gases de efeito estufa e auxiliando na definição de práticas de manejo mais sustentáveis (KILL & PORTO, 2019). Ademais, mapear sistematicamente os serviços ecossistêmicos, no qual se inclui o estoque e sequestro de carbono na categoria de regulação, é um grande desafio, porém essencial para a identificação de regiões com maior potencial para prestação de algum serviço em troca de sua conservação (MAES et. al., 2012).

2.3 INVEST

O InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) é um software livre e de código aberto criado pela Universidade de Stanford em parceria com , Academia Chinesa de Ciências, a Universidade de Minnesota e o Centro de Resiliência de Estocolmo e as ONGs The Nature Conservancy (TNC) e World Wildlife Fund (WWF). A partir do conhecimento do valor do capital natural, o objetivo do InVEST é trazer benefícios à sociedade e à natureza a partir da criação de ferramentas que apoiam as tomadas de decisões dessa vertente, permitindo a avaliação de compensações e identificando onde pode haver crescimento econômico sustentável por meio do investimento em capital natural.

O software conta com um conjunto de 16 modelos que são capazes de valorar os bens e serviços ecossistêmicos para ecossistemas terrestres, marinhos, de água doce e costeiros. São exemplos: sequestro e estoque de carbono, purificação de água, qualidade do habitat, retenção de sedimentos, entre outros (INVEST, 2017). Estão disponíveis para download no site <http://naturalcapitalproject.org>.

De forma prática, os modelos usam mapas como fontes de informação de entrada e de saída, e seus valores são em termos biofísicos ou econômicos (toneladas de carbono sequestrado e o seu valor intrínseco, por exemplo), em escalas globais, regionais e/ou locais. Necessitam apenas

de um software de geoprocessamento como o QGIS ou ARCGIS para visualização de resultados (SHARP et. al., 2014).

Os modelos ecossistêmicos do software dão suporte na análise de compensações (*trade-offs*) por meio dos cenários criados, fazendo com que os gestores ambientais possam levar em consideração os saldos de custo-benefício e direcionam seus esforços na seleção de áreas promissoras a investimentos, promovendo então um desenvolvimento sustentável e a valoração dos benefícios concedidos pelos ecossistemas (INVEST, 2017).

2.4 MODELO DE CARBONO DO INVEST

A regulação do clima no planeta se dá pelo equilíbrio entre a adição e remoção dos gases de efeito estufa. Por exemplo, o CO₂, que é muito mais armazenado na vegetação e em outros ecossistemas terrestres do que na própria atmosfera, contribuindo dessa forma com as mudanças climáticas de maneira positiva, pois manteria fora da atmosfera estes gases; o contrário do que acontece com um incêndio ou mudança de uso da terra, que acaba liberando grandes quantidades de carbono (NCP, 2019; LAL, 2014).

O modelo de carbono do InVEST considera o somatório dos valores médios de carbono para quatro reservatórios (Figura 1):

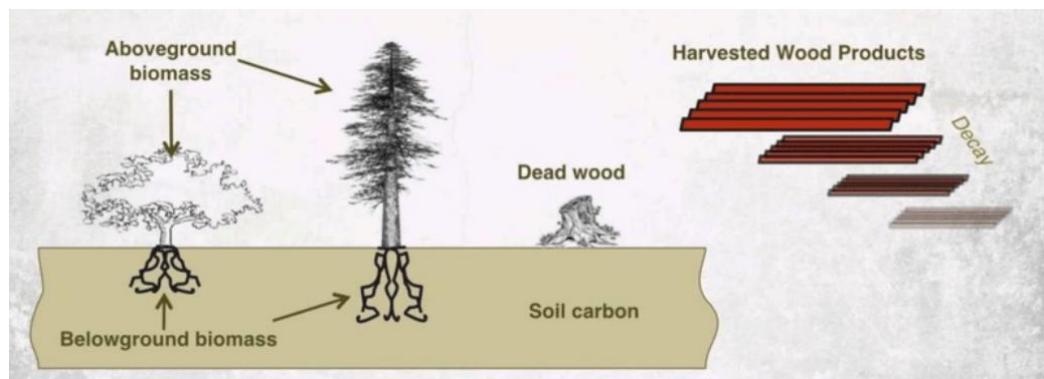


Figura 1. Reservatórios de carbono do modelo de carbono do InVEST

- 1) biomassa acima do solo (todo material vivo acima do solo. Exemplos: troncos, folhas, galhos);
- 2) abaixo do solo (sistemas radiculares vivos);

3) solo;

4) matéria orgânica morta (madeira morta deitada e em pé), este último representando o maior reservatório de carbono terrestre.

O modelo agrega estes valores, que deverão estar organizados em uma tabela csv, aos mapas de uso da terra em formato raster (mapas LULC - Land use and Land Cover) que são fornecidos obrigatoriamente como dados de entrada pelo usuário, assim produzindo um mapa de saída do armazenamento de carbono para cada compartimento avaliado, em toneladas de carbono por pixel.

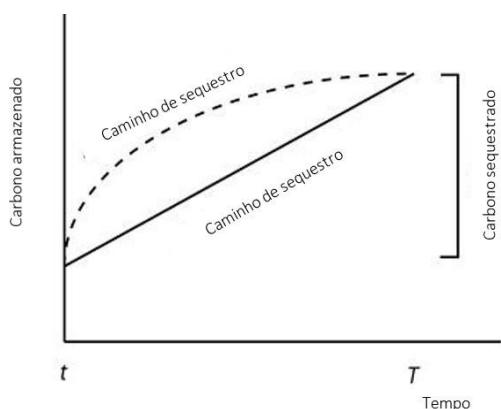
Além disso, o modelo de carbono do InVEST é capaz de estimar o valor econômico desse serviço ecossistêmico em função da quantidade de carbono sequestrado, seu valor monetário por unidade, taxa percentual de desconto e o quanto varia o valor dessa unidade ao longo do tempo. Esse tipo de resposta é obtida por meio da inserção de um mapa LULC de cenário futuro, ou mais de um, fazendo assim a análise do sequestro e perda ao longo do tempo, entre os cenários, pixel a pixel. A importância do conhecimento desse valor econômico está intimamente ligada à visualização dos benefícios imediatos, que causa maior incentivo do que a estimativa de benefícios futuros (HIPOLITO, 2017).

Os mapas do modelo de carbono, produtos diretos do InVEST, podem ser utilizados para as mais diversas finalidades, principalmente para subsidiar tomadas de decisão por parte do governo e órgãos competentes. Um exemplo seria identificar oportunidades para lucrar com créditos de carbono e, ao mesmo tempo, reduzir os danos ao meio ambiente causados pelas emissões de GEE, direcionar investimentos em ONG's de preservação em áreas onde é conhecida a preservação da biodiversidade e consequentemente com grande armazenamento de carbono (INVEST, 2017).

O modelo de carbono do InVEST tem sido amplamente aplicado em estudos para avaliação de estoques de carbono e mudanças no uso da terra. Trabalhos recentes demonstram sua aplicação em diferentes biomas e regiões do país, incluindo o semiárido brasileiro (FERNANDES et al., 2020; FERNANDES et al., 2021), a Amazônia (FERNANDES et al., 2023), o Cerrado (LIMA et al., 2025) e a Mata Atlântica (MONTEIRO et al., 2024). Esses estudos utilizam o módulo de carbono do InVEST para quantificar estoques de carbono e projetar cenários futuros, proporcionando valiosos insights para políticas de conservação e planejamento territorial.

O estudo de Bacani et al. (2024) utilizou o InVEST combinado com Ca-Markov/Random Forest para simular cenários de uso da terra e estimar o estoque e o sequestro de carbono em uma área de plantio de eucalipto no Cerrado de Mato Grosso do Sul, demonstrando como diferentes cenários de conservação influenciam o potencial de mitigação de gases de efeito estufa (BACANI et al., 2023). A combinação do Invest com modelos de simulação de cenários futuros de uso do solo como o Molusce para estimativa de estoque e sequestro de carbono constitui um modelo híbrido com elevada capacidade preditiva de serviços ecossistêmicos, fornecendo subsídios para o planejamento, avaliação e monitoramento de metas de redução de emissões de gases de efeito estufa (WANG et al., 2022).

O modelo é simples e intuitivo, porém possui limitações. O estoque médio de carbono não varia dentro da classe de uso da terra; o modelo não expressa a variação de taxas de fotossíntese, tendo uma postura linear nos resultados de estoque de carbono ao longo do tempo (Figura 2), além de não considerar a influência exercida por organismos vivos terrestres que se relacionam diretamente com o solo e podem captar carbono.



Fonte: Modificado de Natural Capital Project

Figura 2. Relação entre a estimativa de armazenamento de carbono e o caminho real para o armazenamento

Outro fator limitante é que o modelo não consegue expressar o carbono que vai de um compartimento para outro, que é o que acontece quando, por exemplo, uma árvore morre e aquele carbono que se encontrava armazenado na biomassa acima do solo passa a se acumular no material orgânico morto (INVEST, 2017; HIPOLITO, 2017).

2.5 MERCADO DE CARBONO E POLÍTICAS DE CONSERVAÇÃO

As atividades econômicas e industriais cada vez mais carregam consigo um peso negativo no que diz respeito às mudanças climáticas, devido à liberação excessiva de gases de efeito estufa inerentes aos seus processos (IPCC, 2001). O dióxido de carbono é um dos principais gases causadores do aquecimento global, estando o Brasil entre os seus maiores emissores. Em 2023, segundo o SEEG – Sistema de estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2023), o Brasil emitiu 2.296 milhões tCO₂e, sendo: 46% pelas mudanças de uso da terra, 27% pela agropecuária, 18% pelo setor de energia, 4% pelos resíduos, 4% pelos processos industriais. Os setores de mudanças de uso da terra e agropecuária, somados, são responsáveis por 73,8% do total de emissões nacionais, destacando-se como a principal fonte de pressão climática no país. Essa condição impõe ao Brasil, como nação, a necessidade de assumir compromissos robustos de redução destas emissões.

Diante dessa necessidade de reduzir os impactos negativos das emissões de C, em 1992 aconteceu no Rio de Janeiro a Conferência das Nações Unidas para o Desenvolvimento e Meio Ambiente, onde foram discutidas quais ações poderiam ser traçadas para reduzir as emissões de gás carbônico. Com o estabelecimento do Protocolo de Kyoto, em 1997, os países se comprometeram a reduzir a concentração dos gases causadores de efeito estufa em 5,2% até o ano de 2012 (primeiro período de compromisso).

Durante a COP 15, ou Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), o Brasil comprometeu-se voluntariamente a reduzir em até 80% a taxa média anual de desmatamento até 2020, propondo medidas de controle e fiscalização do código florestal do país, além de um programa nacional de pagamento por serviços ecossistêmicos. Uma das estratégias de longo prazo foi a criação de uma Política Nacional de Pagamento por Serviços Ecossistêmicos, instituída pela Lei 14.119 em janeiro de 2021. Esta lei prevê diferentes modalidades de compensação, como a geração de certificados de redução resultantes de desmatamento e degradação (REDD+), sendo um instrumento fundamental no combate às mudanças climáticas, auxiliando o país a atingir suas metas (BLASS et al., 2011; BRASIL, 2021).

Sabendo que algumas ações de preservação afetam diretamente a economia de alguns

países, para auxiliar no cumprimento de suas metas, o protocolo permite, em seu parágrafo 12, que haja compensação das emissões por meio do comércio de créditos de outros países que possuam um Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (ROCHA, 2003). O MDL surgiu a partir da sugestão de criação de um fundo de desenvolvimento, onde os países que não conseguissem cumprir as metas de redução deveriam pagar multas que seriam destinadas a esse fundo, e então os recursos seriam usados para dar suporte a projetos de mitigação dos impactos dos GEE. Os países desenvolvidos então se opuseram a esta medida, propondo, em contrapartida, um sistema baseado no mercado, que foi aceito também pelos países em desenvolvimento. O MDL acabou estimulando os países a construir seus próprios mecanismos de sustentabilidade para gerar Reduções Certificadas de Emissões (RCEs) ou créditos de carbono, fazendo com que, além da mitigação das emissões, haja movimentação econômica e desenvolvimento sustentável entre os países (FERNANDES E LEITE, 2021). Essa medida possibilita aos países desenvolvidos, a partir da compra dos créditos, promover indiretamente a redução da emissão dos GEE em países em desenvolvimento por meio do mercado de carbono, termo usado para denominar estes sistemas de negociação.

O banco mundial definiu as transações de carbono como:

(...) contratos de compra por meio dos quais uma parte paga outra em retorno pelas reduções de emissões de GEE ou pelo direito de emitir uma quantidade de GEE, que o comprador pode usar para atingir seus objetivos (...) o pagamento é feito usando uma ou mais das seguintes formas: dinheiro, equidade, débito, débito convertido ou autorização (...) fornecendo ou tecnologias para o abatimento das emissões (Este último pedaço está vago em relação ao “fornecendo”.

Os créditos de carbono são certificados de projetos com metodologias que mitigam emissões de gases de efeito estufa (LIMA, 2017). O Brasil é um dos países mais aptos a receber os créditos de carbono devido às suas condições climáticas e características territoriais propícias. O mercado brasileiro de reduções de emissões (MBRE), conduzido pela BM&F e pelo Ministério do Desenvolvimento, indústria e comércio exterior (MDIC), incentiva a negociação de certificados ambientais alinhados aos objetivos do Protocolo de Kyoto (DELGADO E ALTHEMAN, 2007).

Além de ajudar na redução das emissões de gases de efeito estufa, os projetos podem gerar impactos positivos sobre a biodiversidade, visto que estes envolvem preservação ou restauração de ecossistemas naturais. A adicionalidade, requisito essencial desses projetos, busca garantir que

as ações vão além do que é exigido por lei, e que essa redução de emissões e os benefícios atrelados a isso sejam mensuráveis e comprovados, transformando a preservação da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos em um ativo financeiro valorizado no cenário nacional e mundial.

Quanto à regularização do mercado de carbono no Brasil, o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões ainda é recente, iniciando pelo Sistema Nacional de Redução de Gases de Efeito Estufa foi instituído pelo Decreto nº 11.075 em 2022 (BRASIL, 2022). Um marco fundamental foi alcançado em 2024 com a sanção da Lei nº 15.042 (BRASIL, 2024), estabelece regras para o mercado brasileiro de redução de emissões (MBRE). No entanto, a implementação prática no mercado é gradual e depende de etapas futuras de estruturação. Paralelamente, outras propostas tramitam no senado, como a PL 528/2021 que trata do Projeto de Lei da Taxa de carbono (Carbon Tax). Esse projeto tem como objetivo criar um sistema de taxação sobre a emissão de carbono, aplicado a setores que geram grandes emissões como energia, transporte e pecuária, destinando os recursos para programas de mitigação das mudanças climáticas, reflorestamento e tecnologias limpas (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2021).

Os mercados voluntários de carbono têm sido uma alternativa cheia de oportunidades, envolvendo setores não submetidos a regulamentações obrigatórias e permitindo a compra e venda de créditos de carbono de forma mais flexível. São várias as certificadoras que garantem a credibilidade dos projetos e dos créditos gerados, como a Verified Carbon Standard (VCS), o Gold Standard e o Climate, Community and Biodiversity Standards (CCB). Ingressar nesse mercado oferece diversas vantagens, incluindo novas fontes de receita para projetos de conservação, além da possibilidade mais tangível de cumprimento de compromissos sustentáveis.

De acordo com a INVEST NEWS (2024), o preço dos créditos neste mercado no Brasil varia em torno de US\$ 5 a 10 toneladas de CO₂ equivalente e alguns projetos específicos conseguem um valor um pouco superior. Essa valorização representa um atrativo financeiro para governos e desenvolvedores de projetos. Estas iniciativas de investimento e valorização de práticas sustentáveis podem aumentar a demanda e fazer com que o valor desse crédito possa aumentar 15 vezes até 2030 e até 100 vezes até 2050 (INVEST NEWS, 2024).

Para além destes valores, é crucial diferenciar entre as diversas métricas de precificação de carbono que operam em paralelo no país e fora dele. Neste contexto, destacam-se o Crédito de Descarbonização (CBIO), atrelado ao mercado regulado, o mercado internacional e o conceito de

Custo Social do Carbono (CSC), que transcende a lógica de mercado.

O CBIO refere-se ao valor por tonelada de carbono segundo o preço do crédito de descarbonização do Brasil, associado ao mercado regulado no país. Este crédito foi criado pela Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), com objetivo de contribuir com o compromisso brasileiro de reduzir as emissões de gases de efeito estufa do país desde a COP 21 (LIMA et al., 2025). A conversão desse valor para dólar reflete a mesma métrica, ajustada para a moeda americana, permitindo comparações internacionais mais diretas.

O valor médio de mercado internacional calcula-se a partir do preço médio do mercado voluntário global, superiores aos valores de CBIO, sugerindo que, por meio de mecanismos que possibilitem a participação direta das microrregiões neste mercado internacional, haverá maior retorno econômico.

Quanto ao custo social do carbono, trata-se de uma métrica distinta, visto que não considera a partir de preços de mercado, mas sim um conceito que representa o valor social de uma tonelada de carbono sequestrada, ou seja, a estimativa de danos econômicos e sociais associados às emissões de CO₂ (NORDHAUS, 2017).

2.6 REGIÃO SEMIÁRIDA

Com uma área de mais de um milhão de km² e ocupando cerca de 11% do território nacional, o semiárido é definido por um índice de aridez que considera precipitação, evapotranspiração e variabilidade interanual da chuva (PULITI et al., 2020; MMA, 2007). Do ponto de vista político-administrativo, o Brasil adota uma delimitação oficial para fins de políticas públicas. Ratificada na Resolução Nº 115, de 23 de novembro de 2017, incluindo a região conta com 1.262 municípios nos estados do Nordeste (Alagoas, Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe) além do norte de Minas Gerais, abrangendo uma população de aproximadamente 27 milhões de habitantes (BRASIL, 2018).

A Caatinga é o bioma predominante nesta região. Sua vegetação xerófila, caducifólia e espinhosa compõe esse ecossistema, devido à combinação de fatores climáticos e as formações de relevo, solo e hidrografia, proporcionando a formação de ambientes extremamente diversos (ANDRADE-LIMA, 1981; RODAL et. al., 2013; VELLOSO et. al., 2002). Caracteriza-se por apresentar altas temperaturas, com médias registradas entre 25 e 30 ° C, e níveis de precipitação médios entre 200 a 800 mm ao ano, fazendo com que o semiárido brasileiro seja considerado o mais chuvoso do mundo (BRASIL, 2018; MELO, 2019). Outra peculiaridade deste bioma é o seu regime

de chuvas irregulares, que se concentram em três ou quatro meses do ano e, geralmente, são sucedidos por períodos de seca que podem chegar a durar entre oito a nove meses. Além disso, a taxa elevada de evapotranspiração potencial compreende entre 1500 e 2000 mm ano⁻¹, o que faz com que haja um déficit de água por muitos meses, resultando em ambientes extremamente secos ou desertos, mesmo com altos índices pluviométricos comparados a outros semiáridos (ZANELLA, 2014).

A estrutura da vegetação, que varia ao longo do gradiente de conservação do bioma, é fundamental para determinar a capacidade de estoque de carbono do ecossistema. Formações mais conservadas, como a fitofisionomia da caatinga densa - definida como uma formação florestal decídua caracterizada pela elevada densidade de arbustos e árvores, formando um dossel fechado e heterogêneo (FONSECA et al., 2024), podem estocar, em média, cerca de 125 Mg ha⁻¹ de carbono (C). Desse total, a maior parte desse carbono (72,1%) está na matéria orgânica do solo, seguida pela biomassa acima do solo (15,9%), biomassa abaixo do solo (7,3%), biomassa morta (2,9%), serapilheira (1,3%) e biomassa herbácea (0,5%) (MENEZES et al., 2021). Em contrapartida, áreas abertas apresentam uma redução de aproximadamente 30% desse total. A mudança de uso da terra de florestas nativas para pastagens ou agricultura acarreta em perdas de mais de 50% nos estoques totais de carbono do ecossistema (MENEZES et al., 2021).

Todas essas características edafoclimáticas requerem um olhar diferenciado para o manejo sustentável nesta região. O histórico de uso intensivo dos recursos explica que 70% das áreas de vegetação nativa já tenham sido modificadas, restando poucos remanescentes (ARAÚJO FILHO, 2013). Essa degradação, impulsionada por práticas como o extrativismo predatório para desenvolvimento de atividades agrícolas, resulta em grandes áreas desmatadas ou queimadas, prejudicando a sustentabilidade do ecossistema com a redução das coberturas florestais e diminuição da fertilidade do solo (ARAÚJO FILHO, 2002; ARAÚJO, 2011; MELO, 2019).

Estudos recentes têm mostrado que a Caatinga funciona como um importante sumidouro de carbono. Em escala local, Mendes et al. (2020) observaram que o bioma atuou como sumidouro de CO₂ em anos consecutivos, mesmo sob condições de seca controlado pela precipitação. Em escala nacional, Costa et al. (2025) evidenciam que a Caatinga respondeu com aumento de fotossíntese e remoções de carbono entre 2015 e 2022, chegando a representar até 50% das remoções líquidas de GEE do Brasil (COSTA et al., 2025; MENDES et al., 2020).

Mesmo o semiárido brasileiro sendo um dos maiores e mais populosos do mundo (EMBRAPA, 2018), os avanços econômicos e sociais realizados ainda não são considerados suficientes, pois os indicadores sociais permanecem abaixo das médias do país. Parte deste quadro pode ser atribuído à degradação dos seus ecossistemas, criando limites ao sistema produtivo da região, e em danos sociais (MELO, 2019). O fenômeno das estiagens prolongadas causa várias consequências. No âmbito social, causa a desestabilização da economia local, baseada principalmente na agropecuária; a migração forçada de pessoal em busca de trabalho remunerado, prejudicando as relações do núcleo familiar; além dos impactos ambientais, como perda de biodiversidade e desertificação (CAMURÇA et al., 2016).

Grande parte do bioma Caatinga está vulnerável à degradação do solo e dos recursos naturais. No Brasil, cerca de 20% do território apresenta áreas afetadas por esse processo, com maior concentração na região semiárida do Nordeste, que se estende por aproximadamente 1.143.491 km² e inclui diferentes níveis de suscetibilidade à degradação (CGEE, 2016; BEZERRA et al., 2020).

Apesar de sua extrema relevância, a Caatinga é o bioma menos estudado do país (SANTOS, 2021). Este fato, somado ao alto grau de degradação, implica que os estudos de quantificação ou estimativa de biomassa e carbono na Caatinga ainda são limitados, comprometendo totalmente a compreensão desse ecossistema, sua conversão de CO₂ e capacidade de regular o ciclo (SANTOS, 2021). Apesar de complexo, é crucial acompanhar o bioma Caatinga, que ocupa aproximadamente 10% do território nacional (IBGE, 2023). O monitoramento dos seus fluxos de energia, água e carbono é essencial para a criação de estratégias de manejo e construção de políticas públicas que busquem atender as exigências de diminuição do impacto das mudanças climáticas (OLIVEIRA et.al., 2021). Sendo assim, essas áreas devem ser priorizadas em futuras iniciativas de conservação.

2.7 POLÍTICAS PÚBLICAS PARA A REGIÃO DO SEMIÁRIDO

Em 13 de janeiro de 2021, o governo federal do Brasil assinou um decreto de lei (nº 14.119) que cria a Cédula de Produto Rural Verde (CPR Verde), que tem como objetivo remunerar o produtor rural em troca da preservação ambiental e assim fazê-lo obter uma renda extra. A lei dispõe sobre contratos de pagamento por serviços ecossistêmicos no país (BRASIL, 2021).

Foram considerados o ecossistema e seus serviços para esta determinação, na qual são

apresentadas as quatro modalidades/categorias anteriormente citadas descritas por Andrade e Romeiro (2009): serviços de provisão, suporte, culturais e de regulação. Neste último, é importante salientar que, visando à manutenção da estabilidade dos serviços ecossistêmicos, o decreto visa, entre outros objetivos, minimizar as secas e os processos críticos de erosão, características das áreas do semiárido (BRASIL, 2021).

O decreto menciona que o pagamento por serviços ambientais poderá ser feito de forma monetária ou não, por meio de prestação de melhorias às comunidades, compensação através de CREs, títulos verdes, comodatos ou outras modalidades de pagamento que podem ser pactuadas entre as partes interessadas. Dentre os vários objetivos da Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA), pode-se destacar a orientação ao pagamento por serviços ambientais como alternativa para incentivar a manutenção e valoração dos serviços ecossistêmicos no país, contribuir com o equilíbrio do clima e redução das emissões devido à degradação e desmatamento, fomentar o desenvolvimento sustentável, criar um mercado de serviços ambientais (BRASIL, 2021).

Salientando o ponto V do decreto, é notório que a região semiárida é habilitada para participar desse programa de incentivos:

“incentivar medidas para garantir a segurança hídrica em regiões submetidas à escassez de água para consumo humano e processos de desertificação.” (BRASIL, 2021)

No âmbito federal, destacam-se programas de crédito rural que tem a sustentabilidade como premissa. O Plano Setorial de adaptação e baixa emissão de Carbono na Agropecuária (Plano ABC e Plano ABC+), é uma das principais políticas públicas para promoção de tecnologias de produção sustentável, contribuindo assim para adaptação as mudanças climáticas e redução de gases de GEE (BRASIL, 2012). O acesso ao Plano ABC+ pode ser viabilizado por meio de linhas de crédito como o RenovAgro – Programa para Financiamento a sistemas de produção Agropecuária sustentáveis, contribuindo com taxas de juros mais baixas para produtores que se utilizem de práticas como recuperação de pastagens e sistemas agroflorestais. O Plano Safra consolida essas iniciativas anualmente, com um investimento de R\$ 400 bilhões de reais na safra 2024/2025 alocado em financiamentos à descarbonização da agricultura, promovendo a economia de baixo carbono.

Em relação ao Estado de Pernambuco, foi instituído o Plano de Descarbonização de Pernambuco, que traz metas setoriais de redução de emissões de GEE na economia pernambucana até 2050 (PERNAMBUCO, 2022). O plano está alinhado ao Plano Pernambucano de Mudança Econômico-Ecológica (PerMeie), lançado na COP-28 em Dubai. O documento internaliza o desenvolvimento sustentável como importante vetor na economia estadual, através de ações de curto e médio prazos com soluções de baixo carbono (PERNAMBUCO, 2024).

Em relação à CPR Verde, a Secretaria de Meio ambiente e Sustentabilidade (SEMAS) mantém um programa vigente de Pagamento por Serviços Ambientais regulamentado pela Lei nº 15.809/16 (PERNAMBUCO, 2016)., que institui Política Estadual de Pagamento por Serviços Ambientais, que cria o Programa Estadual de Pagamento por Serviços Ambientais e o Fundo Estadual de Pagamento por Serviços Ambientais, operante por meio do FEMA – Fundo estadual de Meio Ambiente (PERNAMBUCO, 2020).

Historicamente, o estado já implantou iniciativas de pagamento por serviços ambientais, como o Projeto Água do Parque, no Parque Estadual de Dois Irmãos, em Recife; e o projeto Carbono Vivo, localizado nos municípios de Pombos e Vitória de Santo Antão (REIS et. al. 2018).

O projeto Água no Parque teve sua conclusão em 2013, impactando uma área considerável de 600 hectares. O serviço ambiental dessa região foi determinado e valorado, através do método de custo e reposição do tratamento de água. A fonte pagadora deste projeto foi a COMPESA (Companhia Pernambucana de Saneamento) (MMA, 2013). Já o projeto Carbono Vivo, também finalizado em 2013, beneficiou uma área de 1.992,21 hectares, abrangendo 196 assentados rurais e utilizou ferramentas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas (SIG). Previa a medição da quantidade de carbono nas árvores das florestas dos assentamentos de Serra Grande (Vitória de Santo Antão) e Ronda (Pombos), com objetivo claro de conhecer o estoque do recurso por meio de mapas de carbono e estimar a valoração por meio do mapa REDD (redução de emissões), com esperança de creditá-las no mercado de carbono e que os agricultores responsáveis pudessem receber por esse carbono lá gerado e preservado (REIS et. al. 2018).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo comprehende a região semiárida de Pernambuco (Figura 3), situada no Nordeste do Brasil, nos domínios do bioma Caatinga. A região do semiárido caracteriza-se pelo seu clima BS'h, predominantemente seco, de acordo com a classificação de Koppen, igual ou superior a seis meses anuais, temperatura média variando entre 25 a 30° C, evapotranspiração alta e precipitação média de 700 mm ao ano (SILVA et. al., 2017). Possui 11 classes de solo com maior expressão geográfica (Argissolos, Chernossolos, Luvissolos, Neossolos Regolíticos, Neossolos Quartzarênicos, Neossolos Litólicos, Neossolos Flúvicos, Vertissolos, Cambissolos, Latossolos e Planossolos) (GIONGO; ANGELOTTI, 2022), a maioria com pedregosidade, com baixa capacidade de reter água, e pouco desenvolvidos (ALVES et. al., 2009). O bioma é composto majoritariamente por uma floresta tropical sazonalmente seca, que tem como característica a regulação do crescimento pela disponibilidade de água (BORGES et. al., 2020).

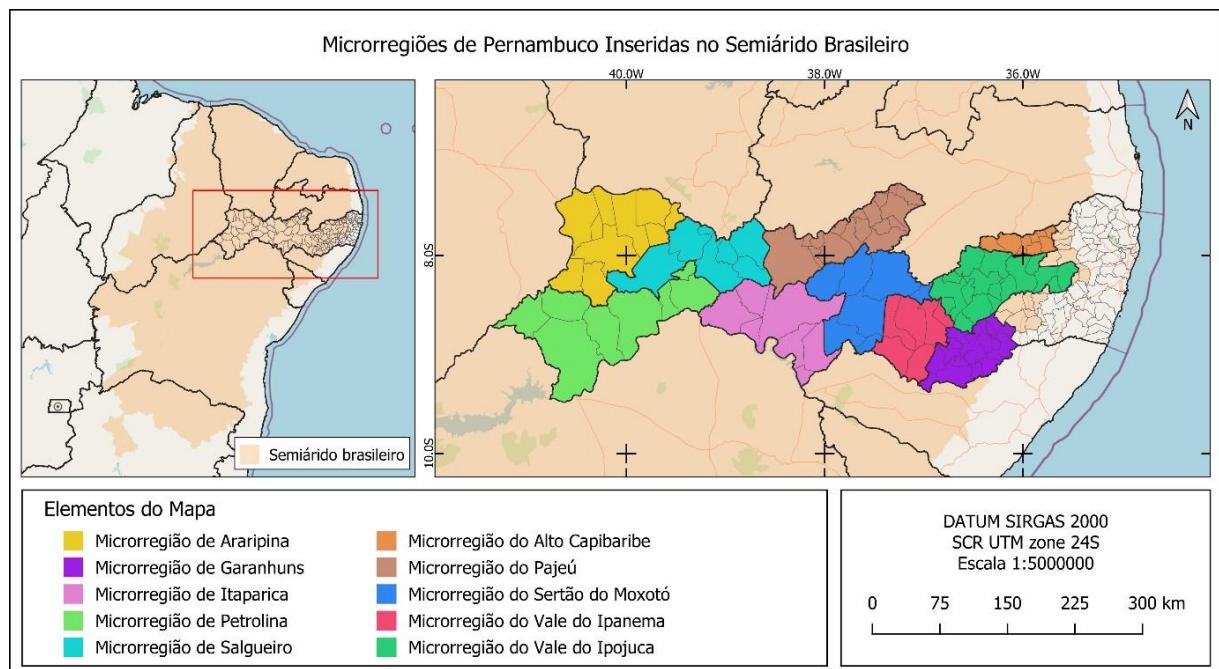


Figura 3. Delimitação do semiárido e microrregiões de Pernambuco inseridas no semiárido brasileiro

As análises do estoque e sequestro de carbono foram realizadas para dez microrregiões localizadas dentro do semiárido pernambucano (Tabela 1), quantificando os estoques de carbono ao longo do tempo e estimando o sequestro considerando diferentes cenários de uso e cobertura da terra.

Tabela 1. Microrregiões do semiárido de Pernambuco

Microrregião	Mesorregião	Municípios
Microrregião de Araripina	Sertão Pernambucano	Araripina, Bodocó, Exu, Granito, Ipubi, Moreilândia, Ouricuri, Santa Cruz, Santa Filomena e Trindade.
Microrregião de Salgueiro	Sertão Pernambucano	Cedro, Mirandiba, Parnamirim, Salgueiro, São José do Belmonte, Serrita e Verdejante.
Microrregião do Pajeú	Sertão Pernambucano	Afogados da Ingazeira, Brejinho, Calumbi, Carnaíba, Flores, Iguaçacy, Ingazeira, Itapetim, Quixaba, Santa Cruz da Baixa Verde, Santa Terezinha, São José do Egito, Serra Talhada, Solidão, Tabira, Triunfo e Tuparetama.
Microrregião Sertão do Moxotó	Sertão Pernambucano	Arcoverde, Betânia, Custódia, Ibimirim, Inajá, Manari e Sertânia.
Microrregião de Petrolina	São Francisco Pernambucano	Afrânio, Cabrobó, Dormentes, Lagoa Grande, Orocó, Petrolina, Santa Maria da Boa Vista e Terra Nova.
Microrregião de Itaparica	São Francisco Pernambucano	Belém do São Francisco, Carnaubeira da Penha, Floresta, Itacuruba, Jatobá, Petrolândia e Tacaratu.
Microrregião de Garanhuns	Agreste Pernambucano	Angelim, Bom Conselho, Brejão, Caetés, Calçado, Canhotinho, Correntes, Garanhuns, Iati, Jucati, Jupi, Jurema, Lagoa do Ouro, Lajedo, Palmeirina, Paranatama, Saloá, São João e Terezinha.

Microrregião do Vale do Ipojuca	Agreste Pernambucano	Alagoinha, Belo Jardim, Bezerros, Brejo da Madre de Deus, Cachoeirinha, Capoeiras, Caruaru, Gravatá, Jataúba, Pesqueira, Poção, Riacho das Almas, Sanharó, São Bento do Una, São Caitano e Tacaimbó.
Microrregião Vale do Ipanema	Agreste Pernambucano	Águas Belas, Buíque, Itaíba, Pedra, Tupanatinga e Venturosa.
Microrregião do Alto Capibaribe	Agreste Pernambucano	Casinhais, Frei Miguelinho, Santa Cruz do Capibaribe, Santa Maria do Cambucá, Surubim, Taquaritinga do Norte, Toritama, Vertentes do Lério e Vertentes.

3.2 CONSTRUÇÃO DE BASE DE DADOS

3.2.1 Mapeamento do uso e cobertura da terra (LULC)

Os mapas rasters de uso e cobertura do solo para análise do estoque e sequestro de carbono para os anos de 1994, 2008 e 2022 foram obtidos por meio da plataforma Mapbiomas (coleção 9.0) (MAPBIOMAS, 2023). Esses anos de referência foram selecionados de modo a manter intervalos regulares entre os períodos analisados, o que possibilita maior consistência na identificação das tendências de mudança no uso e cobertura da terra e favorece a geração de projeções futuras com base em séries temporais equilibradas.

Também foram elaborados cenários para o ano de 2050, considerando um cenário de continuidade das tendências atuais (Business as Usual – BAU). Os cenários permitiram a projeção das mudanças no uso e cobertura da terra (LULC, do inglês Land Use and Land Cover) com base nos padrões observados ao longo do período analisado. A metodologia utilizada nesta pesquisa está demonstrada no fluxograma da Figura 4.

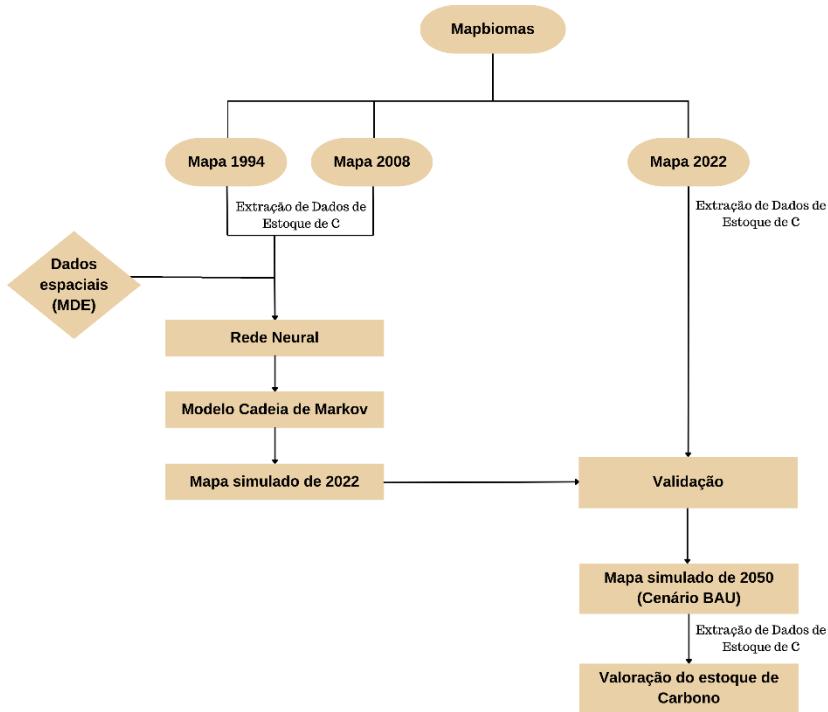


Figura 4. Fluxograma da metodologia adotada no estudo

Em seguida, a classificação do LULC para o ano de 2022 (observado) e o cenário projetado para 2050 (simulado) foram utilizados como base para estimar os estoques e o sequestro de carbono no tempo presente (2022) e no cenário futuro (2050). Por fim, foi realizada a valoração econômica do carbono sequestrado e estocado na área de estudo.

O Mapbiomas realiza seu mapeamento a partir de imagens com o satélite Landsat, com uma classificação automatizada na plataforma do *Google Earth Engine* e armazenamento no *Google Cloud*. A metodologia utiliza mosaicos de imagens anuais de satélites em períodos pré-definidos, através de algoritmos de Random Forest, que reduzem a cobertura de nuvens para melhor discriminação das classes de cobertura (Tabela 2), realizada pixel a pixel, cada um equivalente a 900 m². O mapbiomas utiliza ferramentas estatísticas para validar seus mapas. Após a coleta das amostras, cria-se uma matriz de confusão (CONGALTON E GREEN, 2008) e, comparando os dados classificados com as amostras validadas, calcula-se a acurácia em relação ao total e separadamente para cada classe, além de calcular o índice Kappa (LANDIS E KOCH, 1977), avaliando a concordância entre a classificação automática e os pontos de referência.

Tabela 2. Classes de uso e cobertura da terra, versão 9.0 do Mapbiomas

1. Floresta (1)	1.1. Formação florestal (3) 1.2. Formação savânica (4) 1.3. Mangue (5) 1.4. Floresta alagável (6) 1.5. Restinga arborizada (49)
2. Vegetação herbácea e arbustiva (10)	2.1. Campo alagado e área pantanosa (11) 2.2. Formação Campestre (12) 2.3. Apicum (32) 2.4. Afloramento rochoso (29) 2.5. Restinga herbácea (50)
3. Agropecuária (14)	3.1. Pastagem (15) 3.2. Agricultura (18) 3.2.1. Lavoura temporária (19) 3.2.1.1. Soja (39) 3.2.1.2. Cana (20) 3.2.1.3 Arroz (40) 3.2.1.4 Algodão (62) 3.2.1.5 Outras lavouras temporárias (41) 3.2.2. Lavoura perene (36) 3.2.2.1. Café (46) 3.2.2.2 Citrus (47) 3.2.2.3 Dendê (35) 3.2.1.3. Outras lavouras perenes (48) 3.3 Silvicultura (9) 3.4 Mosaico de usos (21)
4. Área não vegetada (22)	4.1. Praia, duna e areal (23) 4.2. Área urbanizada (24) 4.3. Mineração (30) 4.5. Outras Áreas não Vegetadas (25)
5. Corpos D'água (26)	5.1 Rio, Lago e Oceano (33) 5.2 Aquicultura (31)
6. Não observado (27)	6. Não observado (27)

*o Code ID é um identificador numérico único associado a cada classe de uso e cobertura da terra.

Fonte: Mapbiomas

3.2.2 Banco de dados de carbono

O modelo de estoque de C do InVEST compreende o somatório dos dados médios de estoque de carbono (Equação 1) em quatro compartimentos principais: parte aérea, serapilheira, raízes e do solo, para os diferentes tipos de uso e cobertura da terra.

$$Ct = Cpa + Cas + Cs + Cn \quad (1)$$

Sendo: Ct = carbono total; Cpa = Carbono da parte aérea; Cas = carbono abaixo do solo; Cs= Carbono do solo; Cn= Carbono da necromassa.

Todos estes dados de carbono dos compartimentos foram organizados em uma tabela CSV, como descrito abaixo, além do ano de referência representado pelo mapa LULC (Tabela 3).

- 1) “*lucode*”: código do tipo de uso/cobertura da terra, sendo formação florestal, agricultura, formação nativa não florestal, corpos d-água e áreas urbanas, entre outros;
- 2) “*c_above*”: densidade de carbono na biomassa acima do solo (Mg/ha^{-1});
- 3) “*c_below*”: densidade de carbono na biomassa abaixo do solo, contido nas raízes vivas das plantas (Mg/ha^{-1});
- 4) “*c_soil*”: densidade de carbono no solo (Mg/ha^{-1});
- 5) “*c_dead*”: densidade de carbono de biomassa morta (Mg/ha^{-1}).

Tabela 3. Dados biofísicos de carbono para mapas LULC do Mapbiomas

lucode	lulc_name	c_above	c_below	c_soi	c_dead	c_total_ha
0	vazio	0	0	0	0	0
3	Formação florestal	19,83	9,05	89,86	3,62	122,36
4	Formação savânica	10,88	5,55	65,42	1,61	85,50
9	Silvicultura	19,83	9,05	89,86	3,62	122,36
12	Formação Campestre	0,5	1,51	69,38	0,5	71,89
15	Pastagem	0,5	1,51	69,38	0,5	71,89
21	Mosaico de usos	0,5	1,51	69,38	0,5	71,89
24	Área urbanizada	0	0	0	0	0
25	Outras áreas não vegetadas	0	0	0	0	0
30	Mineração	0	0	0	0	0
33	Rio, lago e oceano	0	0	0	0	0
41	Outras lavouras temporárias	0	0,84	59,36	0	60,2
48	Outras lavouras perenes	15,35	7,3	77,64	2,62	102,91

Fonte: Menezes et. al, 2021 e adaptações

Para as classes de uso e cobertura do solo não contempladas no estudo de Menezes et al. (2021), os valores de carbono foram estimados com base em uma análise de similaridade fisionômica e estrutural, atribuindo os valores de carbono de uma classe de referência à classe-alvo quando compartilhavam características semelhantes.

Para quantificar o estoque total de carbono por classe de uso do solo (uma informação não fornecida diretamente pelo relatório do InVEST), foi realizada uma análise espacial adicional no software QGIS, a partir da ferramenta “Estatísticas zonais da camada raster”. Nesta análise, o raster das classes advindo do mapbiomas foi considerada camada zonal, e o raster de estoque de carbono do InVEST como camada de valor de entrada. A função soma foi aplicada para cada classe para cada microrregião, calculando assim o estoque de C por classe.

A estimativa desses estoques realizada no modelo de estoques do InVEST opera calculando a densidade de carbono ($Mg\ C\ ha^{-1}$) para cada pixel com base nos valores do banco de dados de carbono. Para converter essa densidade em um estoque por pixel, estes valores médios foram multiplicados pela área de um pixel, de 0,09 ha, considerando a

resolução espacial do Mapbiomas de 30x30 metros. Sendo assim, o InVEST forneceu a dinâmica espacial da paisagem, ou seja, a quantidade de carbono por classe, permitindo o cálculo dos estoques e variações entre os períodos avaliados neste trabalho.

3.3 PROJEÇÃO FUTURA

Para análise de sequestro e valoração, faz-se necessária a obtenção de um mapa com código em formato raster de uma projeção futura. Neste estudo, a projeção foi realizada para o ano de 2050, escolhido por representar um horizonte temporal amplamente utilizado em estudos de mudanças climáticas e planejamento ambiental, além de permitir a manutenção de intervalos regulares entre os períodos analisados e a projeção futura. A avaliação e precisão das alterações no uso e cobertura da terra (LULC) foram realizadas utilizando o plugin Molusce no software QGIS. O “Molusce” (NEXTGIS, 2017) – Modules for Land Use Change Evaluation (Módulos de Avaliação de Mudanças no Uso do Solo) – é um plug-in do Quantum GIS 2.18.24, e foi utilizado nesta pesquisa para prever o mapa

futuro LULC, modelando as mudanças do uso e cobertura da terra para o ano selecionado. Foi criado com objetivo de analisar as mudanças LULC no decorrer do tempo, projetando o uso futuro da terra e suas mudanças potenciais (ANNESHA SATYA et. al. 2020).

Com uma interface simples, suas funções estão agrupadas em módulos (Figura 5):

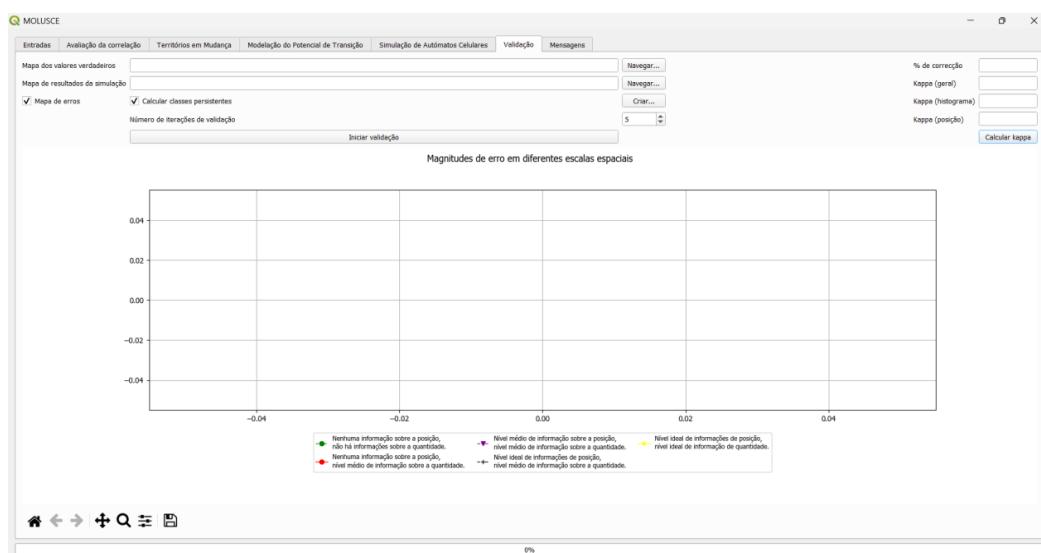


Figura 5. Interface do Molusce 5.0 no QGIS

Para projetar as mudanças no uso e cobertura foi realizada uma modelagem baseada em autômato celular e cadeias de Markov neste plugin, extrapolando as tendências do passado, em um cenário de modelagem “Business as usual” (BAU), onde não há mudanças significativas nas políticas de uso da terra. Esta abordagem simula a evolução do uso da terra com base em duas imagens de datas distintas, integrando as regras do autômato celular (FERNANDES et. al., 2020; SANG et. al., 2011), em um modelo probabilístico que permite simular as mudanças no uso da terra com base nas condições atuais, e gera mapas de potencial de transição para cada classe de uso e cobertura do solo, entendendo que os pixels próximos a uma classe específica têm maior probabilidade de transitar para essa classe (SHOOSHTARI e GHOLLAMALIFARD, 2015).

Em relação a calibração do modelo, levando em consideração o número elevado de microrregiões analisadas e a extensão territorial total, a aquisição de variáveis espaciais preditivas homogêneas para toda área de estudo foi operacionalmente inviável dentro do escopo deste trabalho. Diante dessa limitação, optou-se por utilizar o Modelo digital de elevação (MDE), fornecido pelo projeto TOPODATA/INPE, como variável fundamental comum para todas as microrregiões. O MDE é amplamente reconhecido por sua relevância na demonstração da distribuição da vegetação e uso da terra, derivando camadas de altitude e declividade, fundamentais para modelagem das transições de uso e cobertura.

Os mapas rasters de 1994 e 2008 foram usados para calibrar a simulação para o ano de 2022. O Molusce então calcula, a partir destes, a matriz de transição de Markov, quantificando a probabilidade de mudança de uma classe para outra nesse período. Paralelamente, atua um modelo de regressão multinomial para cada LULC. Para avaliar a acurácia do modelo calibrado, foi realizada também uma simulação para 2022 com o mapa de 2008 como base. Esse mapa simulado de 2022 foi comparado com o mapa do mapbiomas para o mesmo ano por meio de uma matriz de confusão. A acurácia via índice Kappa é calculada para que, uma vez validado, possibilite a posterior geração dos mapas futuros de 2050, simulando o cenário BAU. Esta acurácia do índice Kappa avalia a proporção de amostras corretamente classificadas, calculado como a razão entre a soma da diagonal principal da matriz e a soma total de todos elementos, refletindo na totalidade das amostras e número de classes (COHEN, 1960).

No processo de configuração do modelo de cadeia de Markov, o número de períodos para a projeção futura foi determinado com base no intervalo de tempo entre a primeira e a segunda imagem de cada período analisado (14 anos), sendo configurado para projetar 28 anos à frente (2022-2050).

3.4 VALORAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO PELO MODELO INVEST

A estimativa do estoque de carbono no cenário proposto foi realizada por meio do Modelo de estoque e sequestro de Carbono do programa InVEST (Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs – Valoração Integrada dos Serviços Ecossistêmicos e Compensações. A plataforma é estruturada em modelos (ou módulos), sendo considerado para este trabalho apenas o modelo de Carbono (Carbon Model), que necessita de dados obrigatórios contendo informações para realização de tais análises, apresentadas na Figura 6. Toda a geoinformação foi processada usando o software QGIS 3.26.2.

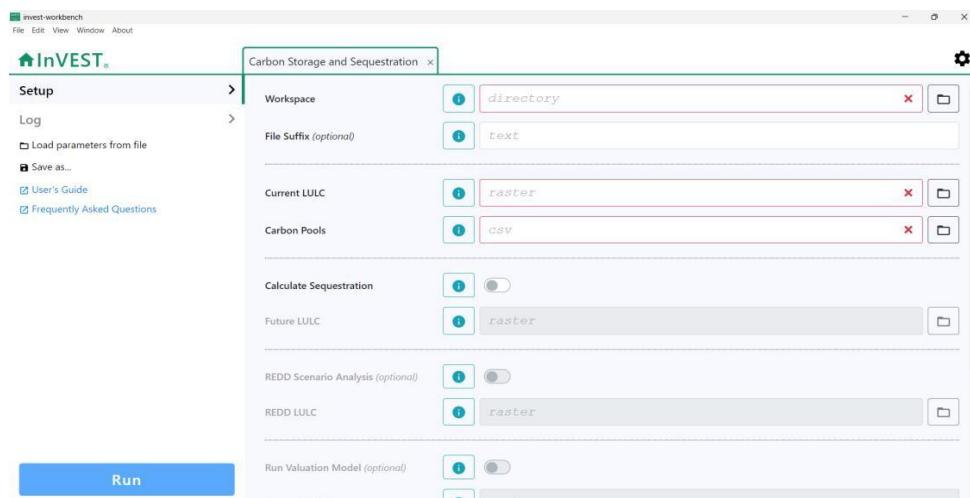


Figura 6. Interface do modelo de estoque e sequestro de carbono no InVEST

3.5 AVALIAÇÃO ECONÔMICA DOS ESTOQUES DE CARBONO

A partir dos valores de estoque obtidos pelo InVEST, realizou-se a valoração do serviço ecossistêmico de carbono nas microrregiões estudadas. Os valores médios utilizados foram extraídos de Lima et al., 2025, servindo como referência para a conversão monetária dos estoques de carbono analisados, descritos na tabela abaixo (Tabela 4):

Tabela 4. Preços por tonelada de carbono do Crédito de descarbonização (CBIO) em real e dólar, mercado internacional e custo social do carbono (CSC).

	Mínimo	Médio	Máximo
CBIO Real	R\$ 110,86	R\$ 113,39	R\$ 115,41
CBIO dólar	\$ 22,20	\$ 22,70	\$ 23,11
Mercado Voluntário	\$ 61,00	\$ 91,50	\$ 122,00
CSC	\$ 44,00	\$ 185,00	\$ 413,00

O objetivo desta análise econômica é identificar padrões de perdas e ganhos, quantificando o custo da degradação e salientando o potencial de geração de renda e desenvolvimento associado a conservação de tais áreas, demonstrando que a variação desses valores é o reflexo monetário das mudanças de uso e cobertura da terra em cada uma dessas microrregiões, subsidiando políticas públicas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 EVOLUÇÃO DOS ESTOQUES TOTAIS DE CARBONO POR MICRORREGIÃO

A análise dos estoques de carbono total nas dez microrregiões estudadas, no período de 1994 a 2050, revela comportamentos distintos, refletindo como o armazenamento de carbono está diretamente relacionado às mudanças de uso da terra e aos diferentes contextos regionais. Essa relação acontece devido que os estoques de carbono são influenciados pela quantidade de tipo de biomassa contida em cada classe de uso e cobertura da terra, visto que o modelo de carbono do InVEST estima os cvalores com base nesses parâmetros (SHARP et al., 2020). Os dados quantitativos (Tabela 5) demonstram os valores totais de estoque de carbono por microrregião.

Tabela 5. Estoques totais de C nos anos de 1994, 2008, 2022 e 2050

Estoques Totais de C (Mg) por microrregião				
Microrregião	1994	2008	2022	2050
Alto Capibaribe	121.056.518	116.167.015	110.980.799	108.798.909
Araripe	946.396.405	901.359.085	856.388.837	818.282.180
Vale do Ipanema	333.399.000	337.906.910	356.116.424	356.459.550
Garanhuns	315.561.644	322.748.572	315.759.114	306.430.317
Pajeú	764.965.790	763.334.245	755.508.466	746.942.188
Itaparica	715.010.572	691.213.496	695.568.637	711.289.069
Petrolina	1.232.113.892	1.181.425.555	1.101.529.482	1.019.012.048
Salgueiro	770.773.158	747.799.889	725.145.155	728.966.404
Sertão Moxotó	727.860.678	710.570.866	699.166.696	697.914.405
Vale do Ipojuca	533.450.340	552.335.762	562.626.721	570.938.228
Total Semiárido de Pernambuco	6.460.587.997	6.324.861.397	6.178.790.332	6.065.033.297

Fonte: A própria autora

O estoque total de carbono no total agregado para o semiárido apresentou um declínio contínuo ao longo das últimas três décadas, passando de 6.460,6 milhões de Mg em 1994 para 6.178,8 milhões de Mg em 2022, uma perda de 281,8 milhões de Mg no período. A projeção para 2050, mantida a tendência atual, indica um estoque de 6.065,0 milhões de Mg, o que representa uma perda adicional de 113,8 milhões de Mg em relação a 2022. É possível visualizar estas informações na figura 7.

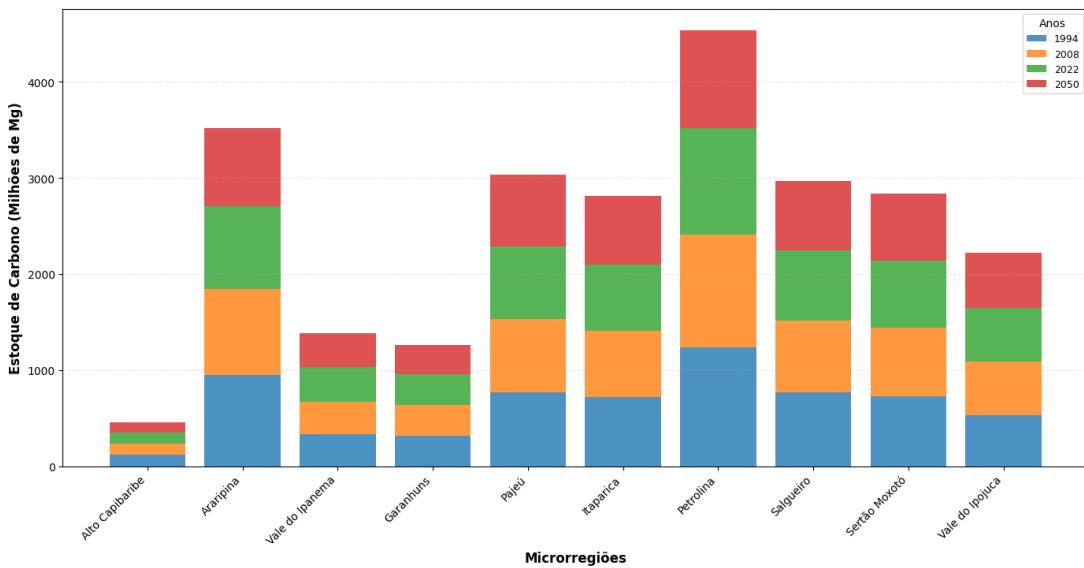


Figura 7. Evolução Temporal dos Estoques de Carbono nas Microrregiões do Semiárido Pernambucano (1994-2050)

As microrregiões de Petrolina e Araripina destacam-se com os maiores estoques ao longo do tempo, com valores iniciais de 121 bilhões e 946 milhões de toneladas de C em 1994, que se projetam para 1,019 bilhão e 818 milhões de toneladas em 2050. As microrregiões de Petrolina, Araripina e Alto Capibaribe, Pajeú e Sertão do Moxotó demonstram um padrão de redução nos estoques ao longo do tempo, sendo Petrolina a microrregião com maior redução, chegando a aproximadamente -213,1 milhões de toneladas (-17,3%) até o ano de 2050, seguida de Araripina, que registra uma redução absoluta de aproximadamente -128,1 milhões de toneladas (-13,5%), mantendo uma trajetória decrescente nos estoques em todos os intervalos analisados.

Nas microrregiões do Vale do Ipojuca e Vale do Ipanema observou-se um padrão de manutenção dos estoques de carbono. O Vale do Ipojuca obteve desempenho mais favorável, acumulando +37,6 milhões de toneladas, equivalente a 7,1% de aumento sobre o estoque inicial de 1994. A mesma tendência foi verificada para o Vale do Ipanema, que demonstra comportamento positivo, aumentando 23,5 milhões de toneladas (7% de aumento desde o ano base). Também pode ser observado um padrão de alternância, com períodos de acréscimo e decréscimo nas microrregiões de Itaparica (redução inicial, recuperação e equilíbrio projetado para 2050), Garanhuns (crescimento inicial, seguido de redução) e Salgueiro (reduções significativas e discreta recuperação no final).

Uma análise detalhada por períodos (Tabela 6) revela padrões importantes na dinâmica regional do carbono. Entre 1994 e 2008, a maioria das microrregiões apresenta perdas nos estoques de carbono, exceto Vale do Ipanema, Garanhuns e Vale do Ipojuca. No período 2008-2022, nota-se diferenças maiores entre as regiões, com reduções consideráveis em Petrolina e Araripina, enquanto Vale do Ipanema, Itaparica e Vale do Ipojuca mantiveram seus estoques. No período projetado (2022 até 2050), os dados indicam uma tendência de estabilização na maioria das microrregiões ou apresenta perdas moderadas. Apesar disso, Petrolina e Araripina permanecem com quedas significativas em seus estoques de carbono.

Tabela 6. Análise temporal detalhada por períodos de variação

Microrregião	Estoque de C(Mg ha)		
	Variação	Variação	Variação
	2008-1994	2022-2008	2050-2022
Alto Capibaribe	-4.889.502	-5.186.217	-2.181.889
Araripina	-45.037.320	-44.970.248	-38.106.657
Vale do Ipanema	4.507.911	18.209.514	343.126
Garanhuns	7.186.928	-6.989.458	-9.328.797
Pajeú	-1.631.545	-7.825.779	-8.566.279
Itaparica	-23.797.076	4.355.141	15.720.432
Petrolina	-50.688.337	-79.896.073	-82.517.434
Salgueiro	-22.973.269	-22.654.734	3.821.284
Sertão do Moxotó	-17.289.812	-11.404.170	-1.252.291
Vale do Ipojuca	18.884.937	10.288.170	8.311.507

Fonte: A própria autora

A análise da variação percentual (Figuras 8 e 9) complementa a compreensão das dinâmicas regionais. Ao considerar o período 1994-2022, Petrolina sofreu a maior perda proporcional, reduzindo -10,6% do seu estoque inicial de carbono entre 1994 e 2022 (Figura 8). Araripina também apresenta perda de -9,5%, consolidando estas duas como as áreas mais críticas. Em contraste, Pajeú, por exemplo, apresenta impacto percentual menor, de - 1,24%, e Itaparica projeta estabilidade, com apenas -2,72% de perda em

toneladas no período.

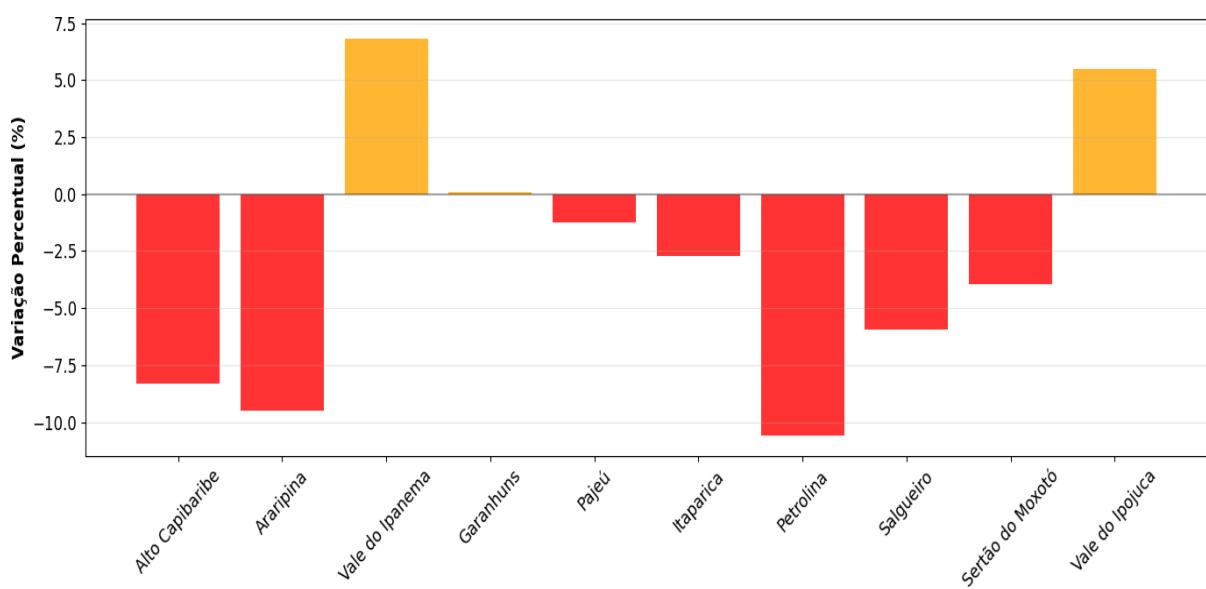


Figura 8. Variação Percentual dos Estoques de Carbono por Microrregião (1994-2022)

Entre 2022 e 2050, observa-se uma tendência geral de redução mais moderada quando comparada ao período anterior (Figura 9). As microrregiões de Petrolina e Araripe continuam apresentando as maiores perdas proporcionais, com reduções de 7,49% e 4,45%, respectivamente, indicando que essas áreas permanecem mais vulneráveis à degradação. Por outro lado, algumas regiões projetam estabilidade ou ganho de carbono, como Itaparica (+2,26%), Vale do Ipojuca (+1,48%) e Salgueiro (+0,53%). Microrregiões como Alto Capibaribe e Garanhuns apresentam pequenas reduções de -1,97% e -2,95%, indicando possivelmente impactos mais moderados.

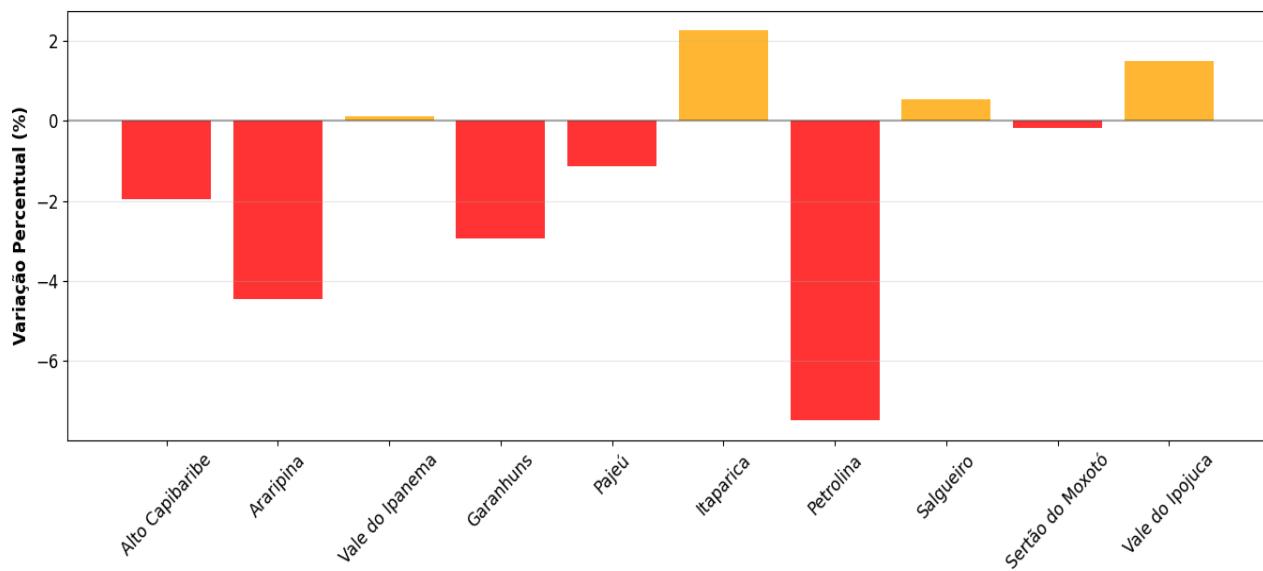


Figura 9. Variação Percentual dos Estoques de Carbono por Microrregião (2022-2050)

Com relação aos mapas projetados para 2050 para cada microrregião, estes apresentaram diferentes níveis de confiabilidade, de acordo com os resultados de acurácia e índice Kappa. A classificação da concordância do índice Kappa seguiu a metodologia de Landis e Koch (1977), que considera valores entre 0,41 e 0,60 como bons; 0,61 a 0,80 como muito bons; e superiores a 0,80 como excelentes. Todos os mapas apresentaram, pelo menos, Kappa geral bons, indicando que mesmo nos casos de menor modelagem, houve uma confiabilidade mínima adequada para validar o estudo. É possível observar os valores na tabela 7. Microrregiões como Alto Capibaribe, Itaparica e Salgueiro apresentaram acurácia e valores de Kappa geral elevados, o que significa que o modelo projetou bem tanto a localização dos pixels quanto a proporção de classes de uso e cobertura, de acordo com os padrões.

Tabela 7. Dados estatísticos de acurácia e índice Kappa para os mapas projetados de 2050 em cada microrregião

Microrregião	% de correção	Kappa (geral)
Alto Capibaribe	86,8	0,80
Araripina	73,5	0,52
Vale Ipanema	77,3	0,58
Garanhuns	75,8	0,56
Itaparica	89,7	0,83
Pajeú	87,83	0,63
Petrolina	76,1	0,56
Salgueiro	91,3	0,86
Sertão Moxotó	87,1	0,71
Vale do Ipojuca	74,6	0,56

Em contrapartida, as microrregiões de Araripina, Vale do Ipanema, Petrolina e Vale do Ipojuca apresentaram um valor de Kappa entre 0,52 – 0,58, que significa menor acurácia global comparado ao grupo já citado. Apesar disso, são valores moderados, indicando que embora a posição espacial dos pixels projetados tenha uma margem de erro maior, a distribuição de classes foi preservada. Sendo assim, tais mapas foram utilizados com segurança para estas análises agregadas e de tendências gerais, pois permitem representar a cobertura da área.

De forma geral, as microrregiões de Petrolina e Araripina apresentaram tendências às maiores perdas de estoque de carbono no semiárido pernambucano, resultado de pressões antrópicas intensivas sobre a Caatinga. Em Petrolina, a expansão da fruticultura irrigada, sobretudo para uva e manga voltadas à exportação, é um fator determinante para o desenvolvimento local e para o crescimento populacional, que promove um alto grau de industrialização e urbanização (LIMA et al., 2021). Em 2020, o município registrou um produto interno bruto (PIB) de aproximadamente R\$ 6 bilhões, que equivale a 3,56% do PIB de Pernambuco. Nesse contexto, é o sétimo maior PIB de Pernambuco, sendo o terceiro mais relevante fora da região metropolitana do Recife (PEREIRA, 2025). Segundo o Censo Demográfico do IBGE, o município registrou 293.962 habitantes em 2010, passando para 386.791 em 2022. Projeções do próprio instituto indicam que a população pode atingir 418.444 pessoas em 2025.

Estudos realizados por Morais et al. (2017) em áreas de Caatinga do município de Petrolina corroboram com essa tendência, demonstrando que o sequestro de carbono sofre variação conforme o grau de preservação e as condições climáticas. Utilizando imagens do sensor MODIS os autores inferiram que no período chuvoso, áreas de caatinga preservada atingiram valores de assimulação de até 1,6 Mg de carbono por ha, e no final do período seco caíram para menos de 0,2 Mg. No total anual, o sequestro variou de 5 a 7 Mg de carbono em 2011 e de 1 a 4 Mg em 2012. Esses resultados indicam que o uso e a cobertura exercem influência sobre as perdas de carbono, demonstrando a importância da conservação das áeras de caatinga e de manejo sustentável.

Alves et al. (2024) observou em áreas de Caatinga de Petrolina que locais com menor cobertura vegetal apresentam menores teores de carbono orgânico. Esse achado sugere que a redução da cobertura vegetal, como ocorre quando a caatinga densa passa a formar áreas mais abertas ou degradadas, associa-se a perda de carbono no solo. A mudança no uso e cobertura da terra é, portanto, identificada como o principal fator que influencia o estoque de carbono (Chang et al., 2022) e constitui uma abordagem econômica e ecológica para reduzir o CO₂ atmosférico, contribuindo para a mitigação do efeito estufa.

No caso da microrregião de Araripina, a principal pressão pode estar associada ao polo gesseiro do Araripe, responsável por mais de 90% da produção nacional de gesso. A atividade demanda grandes quantidades de lenha como fonte energética para os fornos, intensificando o desmatamento da Caatinga e, consequentemente, de C na forma de CO₂. Além disso, a região se destaca no setor industrial, resultando em significativa expansão urbana e consequentemente, maior pressão antrópica sobre os recursos naturais (SOUZA et al., 2025). O município de Araripina registrou 77.302 habitantes no Censo de 2010, com crescimento para 85.088 pessoas em 2022. Segundo projeções do IBGE, a população estimada para 2025 é de 90.504 habitantes. Assim, o agronegócio irrigado em Petrolina e a mineração associada ao uso de lenha em Araripina são indicadores do porque essas microrregiões concentram grandes reduções de estoque de carbono. Albuquerque et al. (2025) acrescentam devido esse destaque no setor industrial na região resulta em significativa expansão urbana e maior pressão antrópica sobre os recursos naturais.

Em relação a Araripina, o estudo de Galvincio et al., (2016) observou que a

exploração da caatinga pelo polo gesseiro acaba mantendo a vegetação em estágios primários de regeneração, o que faz com que os estoques de carbono sejam reduzidos, corroborando com os expressivos casos de perda identificados neste estudo, resultado da pressão antrópica nessa região.

Em resumo, a tendência predominante entre os períodos nas microrregiões estudadas é de redução nos estoques totais de carbono. Os resultados demonstram heterogeneidade na dinâmica espaço-temporal dos estoques de carbono, e essa diferença salienta a influência de fatores locais, padrões de uso e cobertura do solo, políticas ambientais regionais e atividades econômicas, o que não permite generalizar estratégias uniformes de manejo. Os resultados sugerem a necessidade de desenvolvimento de políticas públicas específicas adaptadas às particularidades de cada microrregião, fazendo-se necessárias medidas mais urgentes, no caso de áreas com reduções mais críticas em seus estoques, assim como políticas de incentivo à conservação nas áreas com potencial de manutenção de estoques, como Vale do Ipojuca e Vale do Ipanema.

4.2 DINÂMICA DO ESTOQUE DE CARBONO POR CLASSE E USO E COBERTURA DA TERRA

O foco desta seção é demonstrar padrões de transição e quantificação dos fluxos de carbono entre as classes, determinando vetores de perda e potenciais de sequestro de carbono. Para consolidar essas informações, os dados das microrregiões somados foram consolidados em uma base regional única para trazer maior representatividade regional e evitar a apresentação exaustiva de dados brutos. As classes do Mapbiomas categorizadas foram: Formação florestal, formação savânica, silvicultura, formação campestre, pastagem, cana de açúcar, mosaico de usos, área urbanizada, outras áreas não vegetadas, mineração, rio lagos e oceano, outras lavouras temporárias e outras lavouras perenes.

As variações de estoque entre os períodos que foram calculadas para identificar o saldo de carbono em cada classe estão demonstradas na Tabela 8.

Tabela 8. Estoques de carbono (em Mg) por classe de uso e cobertura do solo para o semiárido pernambucano, nos anos de 1994, 2008, 2022 e projeção para 2050, e a variação de 1994-2008 e 2022-2050.

	Estoque 1994	Estoque 2008	Estoque 2022	Estoque 2050	Variação 1994- 2022	Variação 2022- 2050
Formação Florestal	127.672.589	135.483.037	154.443.785	145.184.856	26.771.195 (20,9%)	-9.258.928 (-6,0%)
Formação Savânica	5.086.897.126	4.758.856.571	4.516.960.049	4.311.083.912	-569.937.076 (-11,2%)	-205.876.137 (-4,6%)
Silvicultura	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Formação Campestre	18.808.827	22.301.138	26.843.545	16.564.900	8.034.718 (-42,7%)	-10.278.645 (-38,3%)
Pastagem	946.448.383	983.938.094	1.046.101.431	1.133.156.728	99.653.048 (-10,5%)	87.055.296 (-8,3%)
Cana-de-açúcar	8.930.076	7.751.576	8.324.924	5.395.230	-605.152 (-6,8%)	-2.929.693 (-35,2%)
Mosaico de usos	250.754.540	248.719.731	320.565.399	376.618.928	69.810.859 (-27,8%)	56.053.529 (-17,5%)
Área urbanizada	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Outras áreas não vegetadas	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mineração	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rios, lagos e oceanos	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Outra lavouras temporárias	2.144.536	15.684.992,04	34.040.413	10.416.950	31.895.877	-23.623.463 (-69,4%)
Outras lavouras perenes	18.931.920	49.754.621	71.507.508	66.610.940	52.575.588,59	-4.896.567 (-6,9%)
Total	6.460.587.997	6.222.489.763	6.178.787.057	6.065.032.448	-281.800.940 (-4,4%)	-113.754.608 (-1,8%)

*Os valores podem ter pequenas divergências devido a arredondamentos e valores percentuais.

A análise por classe de cobertura do solo revela dinâmicas que ditam o balanço de carbono no semiárido pernambucano (Figura 10). Neste estudo, a classe formação florestal equivale a áreas de Caatinga densa, enquanto a formação Savântica representa a Caatinga aberta. A formação Savântica detém a maior fração de estoque total, chegando a 73% do estoque total em 2022 (4,52 bilhões de 6,17 bilhões de Mg C totais), e consequentemente foi a classe que mais contribuiu para as perdas. No período de 1994- 2022 chegou a perder 569,9 milhões de Mg de carbono, reduzindo em 11,2% o seu estoque inicial, podendo perder 4,6% (205,9 milhões de Mg C) até 2050, considerando a projeção. Esse decréscimo em menos de 30 anos é um grande indicador da degradação, que fragiliza o ecossistema.

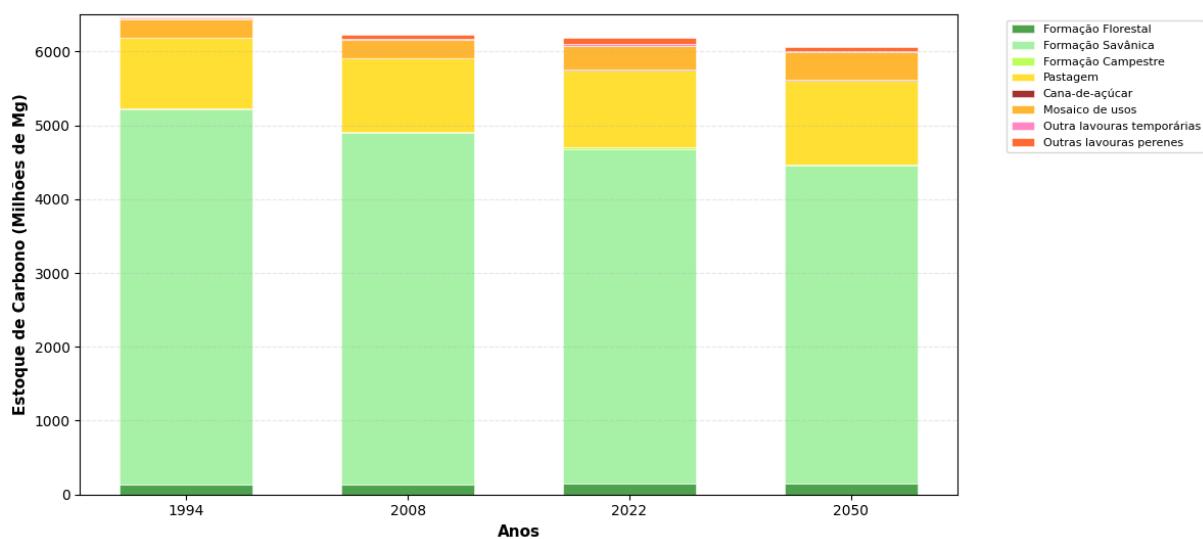


Figura 10. Dinâmica dos estoques de Carbono por Classes de uso do solo (1994-2050)

Historicamente, a expansão de atividades agropecuárias, extração de lenha e avanços nos processos de desertificação contribuem para estes resultados, o que persistirá sem a implantação de políticas de conservação e manejo adequados. O estudo de Alves (2020) constatou que a vegetação do semiárido apresenta alto nível de degradação, sendo a agricultura, pecuária e o extrativismo os principais responsáveis. Em todos esses casos há mudança de uso e cobertura da terra. Esses fatores, combinados com as condições climáticas e a urbanização crescente, em que a população depende dos recursos naturais, causa uma intensificação na pressão antrópica no bioma, acelerando a degradação ambiental (MMA, 2019; GOUVEIA, 2013).

A formação florestal apresentou um comportamento positivo no período histórico, ganhando 26,8 milhões de Mg de carbono (+20,9%) até 2022, no entanto, a projeção para 2050 aponta uma reversão nesse cenário, estimando uma perda de 6% (9,3 milhões de Mg C). Embora pareça contra intuitiva, essa projeção de reversão do ganho num cenário BAU pode sinalizar um esgotamento do potencial de regeneração natural mediante as pressões antrópicas e climáticas crescentes.

A divergência observada no comportamento do estoque de carbono entre a Caatinga densa (Formação Florestal) e a aberta (Formação Savânica) refletem a dinâmica espacial complexa de paisagens sob intensa pressão antrópica. Segundo a modelagem de Sotteroni et al. (2015), a regeneração florestal no Brasil tende a atingir um limite e se estabilizar em 2030, mesmo em cenários com maior proteção ambiental. No cenário BAU (Business as Usual, ou “Situação Normal”, em português), que pressupõe a continuidade das políticas e tendências atuais, ausente de novos mecanismos obrigatórios de recuperação, as áreas convertidas tendem a manter como pasto e lavoura. Essa estabilização de áreas regeneradas, em paralelo, exerce uma pressão indireta na vegetação nativa remanescente, visto que a produção agropecuária acaba se deslocando para áreas onde ainda é legalmente permitido desmatar e a terra está disponível, intensificando a perda de florestas maduras num cenário onde não existem cotas ambientais (SOTERRONI et al., 2015).

Uma hipótese que explica essa dinâmica nesta projeção é que o modelo MOLUSCE, baseado nos drivers de transição do período histórico, projeta a continuidade e até intensificação desses processos, sob a premissa de que os fatores que causaram a degradação poderá persistir com o tempo e avançará sobre a vegetação nativa de forma mais agressiva, recaindo tanto na caatinga aberta quanto na densa.

A pastagem demonstra ser a classe com o mais significativo crescimento, ganhando 99,7 milhões de Mg de carbono entre 1994 e 2022, equivalente a 10,5% positivos no seu estoque inicial, com previsão de aumento desse estoque em 87,1 milhões até o cenário projetado, equivalente a +8,3%. Mosaico de usos também obteve grandes ganhos, aumentando o estoque em 69,8 milhões de Mg de carbono, projetando crescimento de mais 56 milhões até 2050. O aumento do estoque nessas classes é o reflexo da dinâmica da região, associada a transição de solos degradados para pastagens manejadas, assim como a conversão de áreas de caatinga para pasto. Este processo resultou em uma perda de aproximadamente 282 milhões de Mg C no primeiro período, demonstrando que o ganho de

carbono em áreas antrópicas não compensa a perda nas áreas nativas. A substituição de vegetação nativa por sistemas agropecuários, mesmo que estes sequestrem algum carbono no solo, representa uma perda líquida de carbono e uma grande redução na resiliência ecológica da região (BERNADIN et al., 2025).

Esse cenário de expansão das pastagens é enraizado na tradição produtiva do nordeste brasileiro. O uso da caatinga como pastagem é uma prática tradicional no sistema de produção animal, fazendo com que a pecuária seja uma atividade econômica predominante na região, onde há uma utiliação direta da vegetação para alimentação animal (SANTOS, 2021; KILL & PORTO, 2019).

As formações campestres apresentam crescimento significativo no período histórico até 2022, porém apresentam estoques absolutos menores, visto que sua contribuição positiva acaba sendo superada pela perda na formação Savântica. A projeção para 2050, por sua vez, indica reversão nessa tendência, prevendo declínio para a classe.

Os dados observados neste trabalho corroboram com estudos de campo para Caatinga e outras florestas secas. A Caatinga aberta (formação savântica) armazena menos carbono do que a densa (formação florestal), e as perdas por conversão dessas formações para pastagem ou lavoura podem superar 50% do estoque do ecossistema, refletindo nas grandes perdas de carbono observadas (MENEZES et al., 2021; SCHULZ et al., 2016). Quanto ao potencial de recuperação, o trabalho de Araújo Filho et al. (2018) indica que acontece de forma lenta, necessitando de aproximadamente cinco a seis décadas para aproximar-se dos valores iniciais, concordando com Althoff et al. (2016). Mesmo para uma recuperação considerada parcial, são necessários pelo menos 33 anos entre os ciclos de corte, o que é um intervalo muito superior às práticas realizadas atualmente. Áreas em processo de regeneração de 40 a 60 anos ainda podem apresentar marcas dos impactos antrópicos, em conformidade com o histórico de uso e o nível de perturbação dessas áreas (SALAMI, 2020).

Sendo assim, a projeção de reversão de ganhos na formação florestal é consistente, devido à lentidão na regeneração devido a pressões antrópicas. Visto que a projeção para 2050 é de apenas 28 anos após 2022, é evidente que o período é insuficiente para a recuperação natural, principalmente num cenário BAU, onde subentende-se que as pressões antrópicas continuarão como estão.

Em resumo, a dinâmica de carbono no semiárido no período analisado demonstra a

perda da vegetação nativa e expansão das atividades agropecuárias, pois mesmo que algumas classes tenham apresentado resultados relevantes no sequestro de carbono, são parte da sucessão do ecossistema que ocorre de forma natural, e não da sua conservação. Os resultados apontam para uma intensificação da emissão de carbono e vulnerabilidade às mudanças climáticas, fazendo-se necessária a adoção de políticas públicas urgentes de conservação e práticas de manejo sustentável.

4.3 VALORAÇÃO DOS SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS DE CARBONO

A valoração do estoque de carbono permite analisar se a microrregião está perdendo ou ganhando valor monetário ao longo do tempo e como isso se modela na tendência para o futuro. Esta análise foi realizada com base em quatro métricas distintas: CBIO real, CBIO em dólar, mercado internacional de carbono e custo social do carbono (CSC), extraídos de Lima et al. (2025), considerando o estoque total por microrregião, para os anos de 1994, 2008, 2022 e uma projeção para 2050.

A figura 11 exibe a trajetória temporal do valor do estoque de carbono agregado das 10 microrregiões, demonstrando as tendências de ganho ou perda de capital para cada métrica adotada.

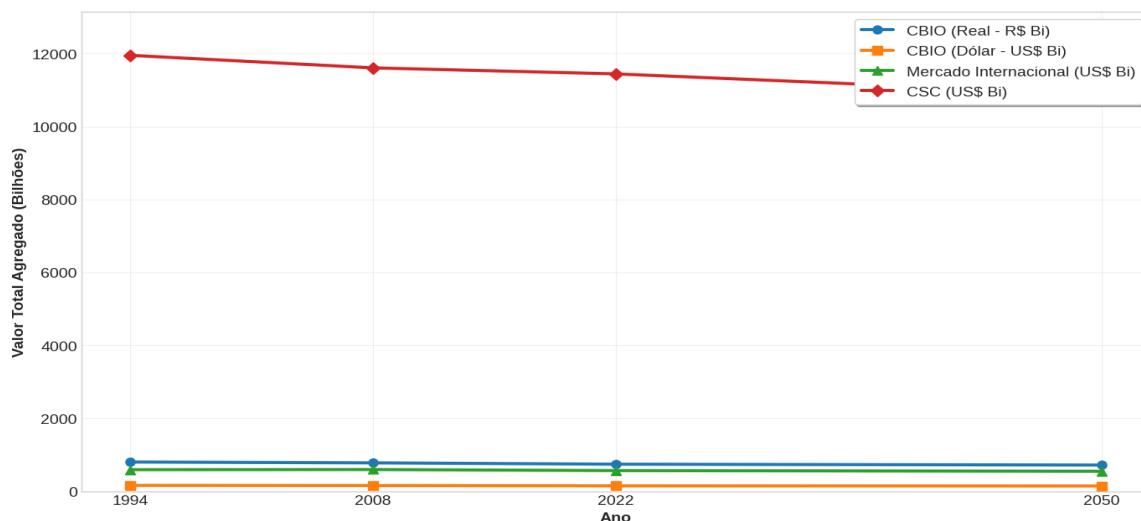


Figura 11. Trajetória temporal do valor do estoque de carbono agregado das 10 microrregiões

Tomando como exemplo o ano de 2022 (Tabela 9), podemos fazer algumas

observações importantes. Em relação ao CBIO, nota-se uma grande diferença entre os valores, devido à natureza dessa moeda. Ele é um ativo negociado internacionalmente em dólar, mas a sua negociação no Brasil acontece em real. O valor total agregado de R\$ 701 bilhões de reais é a conversão para a moeda local do valor de US\$ 140,26 bilhões de dólares. Quando comparado este preço em dólar do CBIO (médio de US\$ 22,70) com o mercado voluntário (US\$ 91,70), é possível observar uma subvalorização do carbono no mercado regulado brasileiro, que se traduz numa perda de capital natural para a região.

Tabela 9. Valoração econômica do estoque de carbono para o ano de 2022

Microrregião	CBIO (Real - R\$)	CBIO (Dólar - US\$)	Mercado Internacional (US\$)	CSC (Custo Social - US\$)
Alto Capibaribe	12,58 Bi	2,52 Bi	10,15 Bi	20,53 Bi
Araripe	97,10 Bi	19,44 Bi	78,36 Bi	158,43 Bi
Vale Ipanema	40,38 Bi	8,08 Bi	32,58 Bi	65,88 Bi
Garanhuns	35,80 Bi	7,17 Bi	28,89 Bi	58,41 Bi
Itaparica	78,87 Bi	15,79 Bi	63,64 Bi	128,68 Bi
Pajeú	85,67 Bi	17,15 Bi	69,13 Bi	139,76 Bi
Petrolina	124,90 Bi	25,01 Bi	100,79 Bi	203,78 Bi
Salgueiro	82,22 Bi	16,46 Bi	66,35 Bi	134,15 Bi
Sertão Moxotó	79,28 Bi	15,87 Bi	63,97 Bi	129,34 Bi
Vale Do Ipojuca	63,79 Bi	12,77 Bi	51,48 Bi	104,09 Bi
Valor Total	701,59 Bi	140,26 Bi	565,34 Bi	1.143,05 Bi

*Os valores são apresentados conforme calculados nas planilhas de origem. Bi = Bilhão. A soma dos valores individuais podem apresentar divergência do total devido a arredondamentos. Os valores completos e séries históricas encontram-se em planilha em apêndices.

O mesmo pode ser observado quando comparado aos valores elevadíssimos do CSC, que tem uma métrica diferente das demais e demonstra o impacto que a emissão ou não emissão de CO₂ pode causar para a sociedade. Conforme medido pela OCDE (2021), 81% das emissões dos países do G20 e OCDE não atingiam sequer o piso conservador considerado de € 60/tCO₂, confirmando que os mercados de carbono atuais, sejam nacionais ou

internacionais, capturam uma pequena porção do valor socioeconômico do carbono, provocando um maior desinteresse na conservação.

Sabendo que a análise de 2022 esconde a dinâmica temporal dos anos anteriores, a tabela 10 demonstra a dinâmica entre 1994 a 2022 e num cenário projetado para 2050, utilizando como exemplo a métrica do mercado internacional de carbono.

Tabela 10. Variação do Valor do Estoque de Carbono por Microrregião (1994 – 2050) pela métrica do mercado internacional (US\$ Bi)

Microrregião	1994	2022	2050	Variação	%	Variação	%
	(Bi)	(Bi)	(Bi)	2022-1994 (Bi)	Variação 1994-2022 (Bi)	2050-2022 (Bi)	Variação 2022-2050
Alto							
Capibaribe	11,1	10,2	10,0	-0,9	-8,1%	-0,2	-2,0%
Araripina	86,6	78,4	74,9	-8,2	-9,5%	-3,5	-4,5%
Buíque	30,5	32,6	32,6	+2,1	+6,9%	0,0	0,0%
Garanhuns	28,9	28,9	27,9	0,0	0,0%	-1,0	-3,5%
Itaparica	65,4	63,6	64,3	-1,8	-2,8%	+0,7	+1,1%
Pajeú	70,0	69,1	68,3	-0,9	-1,3%	-0,8	-1,2%
Petrolina	112,7	100,8	87,6	-11,9	-10,6%	-13,2	-13,1%
Salgueiro	70,5	66,4	66,5	-4,1	-5,8%	+0,1	+0,2%
Sertânia	66,6	64,0	63,9	-2,6	-3,9%	-0,1	-0,2%
Vale do Ipojuca							
	48,8	51,5	52,1	+2,7	+5,5%	+0,6	+1,2%
Total Geral	591,1	566,3	548,0	-24,8	-4,2%	-18,3	-3,2

É possível observar que as microrregiões possuem valores distintos, reflexo das suas dinâmicas locais de uso e cobertura da terra, assim como sua extensão territorial, entretanto, algumas tendências regionais são preocupantes para o todo.

O período de 1994-2022 revela padrões distintos entre as microrregiões. É possível perceber que Petrolina e Araripina se destacam negativamente, pois somadas, protagonizam uma perda de US\$ 20,1 bilhões de um total de US\$ 24,8 bilhões para todas as microrregiões nesse período. As microrregiões de Salgueiro, Sertão do Moxotó, Itaparica, Pajeú e Alto Capibaribe apresentaram perdas mais moderadas, indicando pressão de degradação existente, porém em menor intensidade. Em contraste, Vale do Ipojuca (ganho de US\$ 2,7 Bi, equivalente a +5,5%), Vale do Ipanema (ganho de US\$ 2,1 Bi, +6,9%) e Garanhuns (0,0% de variação) tiveram uma variação positiva ou neutra, sugerindo recuperação ou estabilidade nos seus estoques.

Em relação ao cenário BAU projetado, o período de 2022-2050 consolida ou amplifica as tendências já observadas no período anterior: Petrolina e Araripina seguem em declínio, com uma perda de US\$ 13,2 bilhões de capital natural, seguido de Araripina como segunda maior fonte de perda de valor do total agregado, causando uma redução de US\$ 3,5 bilhões. Vale do Ipojuca e Vale do Ipanema se mantendo resilientes e projetando ganho ou estabilidade, e as demais microrregiões projetando estabilidade ou leve declínio.

O valor total agregado para o semiárido pernambucano apresenta perda de valor em US\$ 24,8 bilhões (-4,2%) entre os anos de 1994 e 2022, e projeta uma perda acrescida de US\$ 18,1 bilhões (-3,2%) de 2022 até 2050 no cenário BAU.

A comparação entre os valores do CBIO, do mercado internacional e do Custo Social do Carbono mostra diferenças importantes, e é preciso refletir sobre a viabilidade de cada um no contexto do semiárido de Pernambuco. O CBIO, por ser parte de uma política já existente no Brasil, surge como a alternativa mais imediata, entretanto, ainda existem muitas limitações, visto que foi projetado para o setor de biocombustíveis. Isso significa que, para beneficiar diretamente projetos de conservação na Caatinga, seria necessário criar mecanismos complementares que permitam a inserção desses serviços ambientais dentro do mercado regulado.

O mercado voluntário é uma via atual para projetos de conservação, por outro lado, chama atenção pelos valores mais elevados do carbono, o que poderia trazer ganhos significativos para produtores locais e comunidades da região. O desafio, porém, é o acesso: certificações internacionais, auditorias e comprovação de adicionalidade exigem estrutura técnica e recursos financeiros, muitas vezes inviáveis para agricultores familiares e pequenas associações, necessitando, então, do apoio de governos e instituições. Já o Custo Social do Carbono (CSC) funciona mais como um norte conceitual do que como uma oportunidade prática. Ele aponta o real valor econômico e social do carbono sequestrado, traduzindo em cifras os impactos evitados pelas emissões. Embora sua aplicação direta ainda seja distante da realidade local, serve como um argumento forte para reforçar a relevância das ações de conservação no semiárido.

Optou-se por apresentar esta análise detalhada na métrica do mercado internacional devido ao seu reconhecimento como referência global. A replicação desta análise para as demais métricas seria redundante, visto que a direção da tendência é a mesma em todas, uma vez que o estoque físico de carbono em cada território é invariável, alterando apenas o valor monetário atribuído a cada tonelada. Sendo assim, e evitando a repetição desnecessária, concentrou-se o foco em interpretar a dinâmica de perda e do ganho, que justifica essa investigação e é o foco desta seção. É possível conferir todos os dados das demais métricas nos apêndices deste trabalho.

Especificamente na Caatinga, os valores monetários referentes ao estoque de carbono entram em consonância com o trabalho de Fernandes et al.(2025), que quantifica perdas bilionárias no serviço ecossistêmico de sequestro de CO₂, reforçando a importância desse bioma como um sumidouro de carbono (COSTA et al., 2025; MENDES et al., 2020). Em termos metodológicos similares, estudos como o de Lima et al. (2025), no Cerrado, também identificaram perdas bilionárias associadas à mudança de uso da terra, destacando que se trata de um problema que ultrapassa as barreiras regionais, embora tenha suas particularidades.

Tais resultados, por sua vez, exigem a atuação de políticas públicas específicas para cada microrregião. Aquelas em declínio acelerado, como Petrolina e Araripina, implementação de políticas de controle para combater a degradação acelerada, combinadas com incentivos econômicos, pode facilitar a transição para práticas mais sustentáveis. Vale do

Ipojuca e Vale do Ipanema, pode-se adotar práticas de valorização e atração de investimentos verdes, para consolidar as tendências positivas observadas. Quanto às demais microrregiões, estratégias focadas em conservação preventiva, implementação de programas de pagamento por serviços ambientais (PSA), podem trazer benefícios, transformando esta estabilidade dos estoques de carbono em ganho.

É importante salientar que os valores projetados para 2050 constituem estimativas modeladas e não determinísticas. Apesar da confiabilidade das projeções, respaldada pelos dados estatísticos de correlação moderada a alta, estes resultados devem ser interpretados como um cenário de referência, que assume as dinâmicas e padrões de uso da terra observados historicamente. Mudanças abruptas nas políticas ambientais, inovações tecnológicas, oscilações de mercado e eventos climáticos extremos, podem alterar significativamente estas tendências de forma real. A principal finalidade desta análise é subsidiar planejamentos estratégicos precoces, embasando e auxiliando na criação de cenários e na elaboração de políticas públicas para mitigação dessas consequências negativas, que devem ter um olhar específico para os padrões de cada microrregião.

5. CONCLUSÕES

Este estudo permitiu quantificar e valorar a dinâmica dos estoques de carbono no semiárido de Pernambuco, a partir da análise de dez microrregiões, entre 1994 e 2022, e para um cenário de Business as Usual (BAU) projetado para 2050. O InVEST e o Molusce mostraram-se ferramentas satisfatórias, atingindo o objetivo esperado e permitindo identificar as tendências. Reconhece-se, porém, que estes modelos utilizados possuem limitações inerentes às suas estruturas metodológicas, as quais devem ser consideradas na interpretação dos resultados. Além disso, as projeções do Molusce são probabilísticas, não determinísticas, e representam tendências e não realidades futuras imutáveis.

Os resultados demonstram uma perda de 281,8 milhões de Mg de carbono no período histórico, com perda adicional de mais 113,8 milhões de Mg até 2050, caso mantenham-se os hábitos atuais e não haja intervenções significativas nas políticas de uso e cobertura da terra.

As microrregiões de Petrolina e Araripina demonstram ser as mais críticas, responsáveis pelas maiores perdas, provavelmente impulsionadas pela expansão da fruticultura irrigada e pela demanda do polo gesseiro, respectivamente. Entretanto, microrregiões como Vale do Ipojuca e Vale do Ipanema tendem à manutenção ou leve aumento nos estoques, indicando potencial para aplicação de valorização de serviços ecossistêmicos estratégicos. A análise por classes revelou que a formação savântica (caatinga aberta) foi a classe que mais perdeu carbono, enquanto pastagens e mosaicos de usos aumentaram os seus estoques, embora não suficientes para compensar as perdas nas áreas nativas.

A valoração reforçou o alto custo da degradação. A depender da métrica adotada, as perdas variaram de US\$ 422,4 milhões a US\$ 3,44 bilhões entre 1994 e 2022. A disparidade entre os valores do mercado regulado brasileiro e do mercado voluntário internacional são reflexos da subvalorização do mercado de carbono no contexto brasileiro, limitando o potencial de geração de renda e desestimula a conservação.

Sendo assim, conclui-se que a trajetória atual é insustentável, levando a perda contínua do capital natural de carbono, trazendo prejuízos econômicos e socioambientais, fazendo-se necessárias urgentes políticas públicas, que contemplam as particularidades de cada microrregião. O mercado voluntário de carbono é uma oportunidade financeira considerável, embora dependa de mecanismos de acesso para agricultores familiares e

comunidades.

Esse trabalho corrobora com a importância da Caatinga como sumidouro de carbono de relevância nacional, e oferece subsídio quantitativo e espacial para a formulação de políticas públicas de desenvolvimento sustentável no semiárido, destacando a necessidade de integração da valoração dos serviços ecossistêmicos nesses processos, na busca por transitar de um cenário atual de perdas para um futuro mais sustentável.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A. S.; FREIRE, F. J.; LEITE, M. J. H.; MELO, F. F.; FREIRE, C. S.; FREITAS, G. P.; MARQUES, P. R. D.; AZEVEDO, S. R. V. Estoque de carbono e nitrogênio no sistema solo-vegetação em área de floresta tropical seca no Nordeste Brasileiro. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 22(1), p. 1-32, 2025.

ALBUQUERQUE, E. R. G. M. Biomassa de raízes em áreas com diferentes usos da terra e tipos de solos. **Tese (Doutorado em botânica)** – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de biologia, Recife, 2015.

ALTHOFF, T. D.; MENEZES, R. S. C.; CARVALHO, A. L.; PINTO, A.S.; SANTIAGO, G. A. C. F.; OMETTO, J. P. H. B.; RANDOW, S. V.; SAMPAIO, E. V. S. B. Climate change impacts on the sustainability of the firewood harvest and vegetation and soil carbon stocks in a tropical dry forest in Santa Teresinha Municipality. Northeast Brazil. **Forest Ecology Management**, v. 360, 367–375. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.10.001>.

ALVES, A. C. N. Análise espacial integrada da degradação da terra em área do bioma Caatinga. 2024. **Relatório de Iniciação Científica (PIBIC)** — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2024.

ALVES, T. G. R. Bioma Caatinga – um olhar sobre o recorte territorial de Patos/PB, pp. 138. **Dissertação (Mestrado)** - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2020.

ALVES, J. J. A.; ARAÚJO, M. A.; NASCIMENTO, S.S. Degradação da Caatinga: uma investigação ecogeográfica. **Revista Caatinga**, v. 22, p. 126-135, 2009.

ANDRADE, D. C.; ROMEIRO, A. R. **Serviços ecossistêmicos e sua importância para o sistema econômico e o bem-estar humano**. Texto para Discussão. IE/UNICAMP. 2009.

ANDRADE-LIMA. The Caatingas dominium. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 4, p. 149– 153, 1981.

ANEESHA SATYA, B.; SHASHI, M.; DEVA, P. Future land uses land cover scenario simulation using open source GIS for the city of Warangal, Telangana, India. **Applied Geomatics**, v. 12, p. 281–290, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12518-020-00298-4>

ARAÚJO FILHO, J. A. Caatinga: Agroecologia versus desertificação. **Ciência Hoje**, v. 30, n. 180, p. 44–45, 2002.

ARAÚJO FILHO, R. N.; FREIRE, M. B. G. S.; WILCOX, B. P. W., FREIRE, F. J.; MARQUES, F. Recovery of carbon stocks in deforested caatinga dry forest soils requires at least 60 years. **Forest Ecology and Management**, v. 407, p. 210-220, 2018.

ARAÚJO, S. M. S. A região semiárida do nordeste do Brasil: questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos. **Rios Eletrônica - Revista Científica da FASETE**, v. 5, 2011.

BACANI, V. M.; SILVA, B. H. M. da; SATO, A. A. S. A.; SAMPAIO, B. D. S.; CUNHA, E. R. da; VICK, E. P.; OLIVEIRA, V. F. R. de; DECCO, H. F. Carbon storage and sequestration in a eucalyptus productive zone in the Brazilian Cerrado, using the Ca-Markov/Random Forest and InVEST models. **Journal of Cleaner Production**, v. 444, p. 141291, 2024.

BACCINI, A. et al. Estimativa das emissões de dióxido de carbono pelo desmatamento tropical aprimorada por mapas de densidade de carbono. **Nature Climate Change**, v. 2, n. 3, p. 182-185, 2012.

BALVANERA, P.; URIARTE, M.; ALMEIDA-LEÑERO, L.; ALTESOR, A.; DECLERCK, F.; GARDNER, T.; VALLEJOS, M. Ecosystem services research in Latin America: The state of the art. **Ecosystem Services**, v. 2, p. 56–70, 2012. <http://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.09.006>

BERNADIN, R.; FREDDI, O. S.; SOARES, M. B.; RODRIGUES, D. J.; MARIMON JUNIOR, B. H.; LIMA, L. B.; ANDRÉ, P. F. Soil organic carbon dynamics in the Cerrado–Amazon ecotone: Effects of land-use change on organic carbon sequestration and losses. **Catena**, v. 259, p. 109366, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109366>. Acesso em: 19 set. 2025.

BEZERRA, F. G. S. et al. Analysis of areas undergoing desertification, using EVI2 multi-temporal data based on MODIS imagery as indicator. **Ecological Indicators**, v. 117, p. 106579, 2020.

BORGES, C. K. Variação Sazonal dos Fluxos de Energia em uma Região Semiárida de Caatinga no Nordeste Brasileiro (Seasonal variation of energy fluxes in caatinga areas preserved and degraded in Northeast Brazil). **Revista Brasileira De Geografia Física**, v.9(5), 1313–1321, 2016. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20160089>

BRAAT, L. C., & DE GROOT, R. The ecosystem services agenda: Bridging the worlds of natural

science and economics, conservation and development, and public and private policy. **Ecosystem Services**, v. 1(1), p. 4-15, 2012.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. Matéria Orgânica do Solo, In: **Elementos da Natureza e propriedades dos solos**, BRADY, N.C.; WEIL, R.R.; (Orgs), 3º ed.; Porto Alegre, Bookman, p. 398-436, 2013.

BRASIL. Decreto nº 11.075, de 19 de maio de 2022. **Regulamenta o mercado de carbono no Brasil e institui o Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br>. Acesso em: 15 de junho de 2024.

BRASIL. Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021. **Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais e dá outras providências**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 13 jan. 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/Lei/L14119.htm. Acesso em: 15 de junho de 2024.

BRASIL. Lei nº 15.042, de 8 de julho de 2024. **Institui o Mercado de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa; altera a Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009; e dá outras providências**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2024. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l15042.htm. Acesso em: 01 de outubro de 2025.

BRASIL. **Nova delimitação Semiárido**. Ministério da Integração Nacional Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste Diretoria de Planejamento e Articulação de Políticas. Coordenação-Geral de Estudos e Pesquisas, Avaliação, Tecnologia E Inovação, [S. I.], n. 2017, p. 63, 2018.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono)**. Coordenação da Casa Civil da Presidência da República. Brasília: MAPA/ACS, p. 173, 2012.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Projeto de Lei nº 528, de 2021. Estabelece a Política de Preços de Carbono**. Brasília, 2021.

CAMURÇA, C. E. de S. et al. Implicações psicosociais da seca na vida de moradores de um

município da zona rural do nordeste do Brasil. **Avances en Psicología Latinoamericana**, v. 34(1), p. 117–128, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.12804/apl34.1.2016.08>

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Desertificação, degradação da terra e secas no Brasil**. CGEE: Brasília, 2016.

Chang, X., Xing, Y., Wang, J., Yang, H., Gong, W., Effects of land use and cover change (LUCC) on terrestrial carbon stocks in China between 2000 and 2018. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 182, p. 106333, 2022.

CHAVES, A. M. S. et al. Análise dos serviços ecossistêmicos na paisagem semiárida da Bacia do Riacho São José em Pernambuco. **GEOSABERES: Revista de Estudos Geoeducacionais**, v. 12, n. 1, p. 139-158, 2021.

CONGALTON, R.G., Verde, K., 2008. Avaliando a Conformidade de Classificações de Dados de Sensoriamento Remoto: Princípios e Práticas, Segundo Edi. ed, **Sensoriamento Remoto do Meio Ambiente**. Taylor & Francis Group, Nova Iorque, 2008.

COSTA, L. M.; DAVITT, A.; VOLPATO, G.; MENDONÇA, G. C.; PANOSO, A. R.; ESCALA JR, N. L. A comparative analysis of GHG inventories and ecosystems carbon absorption in Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 958, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177932>.

DA SILVA, J. M. C.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. **Caatinga: The Largest Tropical Dry Forest Region in South America**. Switzerland: Springer, p. 487, 2017.

ELLERT, B. H.; JANZEN H. H.; McCONKEY, B. G. Measuring and comparing soil carbon storage. In: LAL, R.; KIMBLE, J. M.; FOLLET, R. F.; STEWART, B. A. (eds) **Assessments methods for soil carbon**. Lewis Imprint of the CRC Press, Boca Raton, FL, p. 131–146. 2001.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2018). Acesso em 05 de julho de 2020, em <https://www.embrapa.br>.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo. 1997. Manual de Métodos de Análises de Solos. Rio de Janeiro, 212 p., 1997.

FERNANDES, M. M. et al. Assessment of land use and land cover changes and valuation of

carbon stocks in the Sergipe semiarid region, Brazil (1992–2030). **Land Use Policy**, v. 99, p. 104795, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104795>.

FERNANDES, E. A.; LEITE, G. B. Atuação dos projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo para o desenvolvimento sustentável no Brasil. **Revista de Economia Política**, vol. 41(2), p. 351-371, 2021.

FERNANDES, M. M. et al. Land use and land cover changes and carbon stock valuation in the São Francisco river basin, Brazil. **Environmental Challenges**, v. 5, p. 1-10. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100247>.

FERNANDES, M. M. et al. Assessing economic and ecological impacts of carbon stock and land use changes in Brazil's Amazon Forest: A 2050 projection. **Sustainable Production and Consumption**, v. 41, p. 64-74. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.07.009>.

FERNANDES, M. M. et al. **Economic ecological assessment of carbon stock dynamics in the Brazilian Caatinga**. Preprint, 2025. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=5204677>. Acesso em: 19 de setembro de 2025.

FERREIRA, E. Dinâmica De Longo Prazo Do Carbono Do Solo Em Sistemas De Manejo No Cerrado. **Tese (Doutorado em Ecologia)**. Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Ecologia, 2013.

FONSECA, C. K. L.; SALES, A. T.; FERNANDES, J. G.; SAMPAIO, E. V. S. B.; SILVA, A. S. A., MENEZES, R. S. C. Use of RGB drone sensors to estimate vegetation biomass in a semiarid region: uso de sensores RGB em drones para estimar biomassa vegetal em uma região semiárida. **Geociências**, v. 43, n. 4, p. 1075-1091, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v43i4.18383>.

GALVINCIO, J. D.; BADARAU, M. S., BARBOSA, V. V.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; SOUZA, W. M. Avaliação do estágio de regeneração do bioma caatinga na microrregião do Araripe, com sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.9(4), p. 985-996, 2016.

GIONGO, V.; ANGELOTTI, F. (ed.). **Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas: experiência brasileira**. Brasília, DF: Embrapa, 2022.

GOUVEIA, L. de F. P. Distribuição preditiva da Algaroba e seus efeitos na regeneração da Caatinga. Dissertação de mestrado – Biologia Vegetal, Universidade Federal de Pernambuco,

pp. 76, 2013.

HUSSAIN, S., MUBEEN, M., NASIM, W., MUMTAZ, F., ABDO, H.G., MOSTAFAZADEH, R., FAHAD, S. Assessment of future prediction of urban growth and climate change in district Multan, Pakistan using CA-Markov method. **Urban Climate**, v. 53, p. 101766, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ulim.2023.101766>.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>. Acesso em 15 de julho de 2023.

INVEST - INTEGRATED VALUATION OF ECOSYSTEM SERVICES. **InVEST User's Guide.** The Natural Capital Project. 2017. Disponível em: Acesso em: setembro de 2021.

INVEST NEWS. Mercado de carbono: como funciona. Disponível em: <https://investnews.com.br/infograficos/mercado-de-carbono-como-funciona/>. Acesso em: 23 de setembro de 2024.

IPCC, 2013: Resumo para Decisores. In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel 95 Intergovernamental sobre Alterações Climáticas** [Stocker, T.F.; D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova Iorque, NY, EUA. 2013.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Editado por V. Masson-Delmotte *et al.* Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 19 de outubro de 2025.

JESUS, K. N. Estoques e dinâmica do Carbono e Nitrogênio em solos sob diferentes coberturas e usos de terra em Pernambuco. **Tese (Doutorado em Tecnologias energéticas e nucleares).** Universidade Federal de Pernambuco, programa de pós graduação em Tecnologias energéticas e nucleares, 2017.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Global Forest Resources Assessment 2020: Main report.** Rome; 2020, 164p. Disponível em: <https://www.fao.org/3/ca9825en/ca9825en.pdf>. Acesso em: 19 de outubro de 2025.

FERREIRA, E. Dinâmica De Longo Prazo Do Carbono Do Solo Em Sistemas De Manejo No

Cerrado. **Tese (Doutorado em Ecologia).** Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Ecologia, 2013.

JONES, H. G., & VAUGHAN, R. A. **Remote sensing of vegetation: Principles, techniques, and applications.** Oxford: Oxford University Press. 2010.

KAMARAJ, M.; RANGARAJAN, S. Predicting the Future Land Use and Land Cover Changes for Bhavani Basin, Tamil Nadu, India Using QGIS MOLUSCE Plugin. **Research Square**, p. 15, 2021.

KILL, L. H. P.; PORTO, D. D. **Bioma Caatinga: oportunidades e desafios de pesquisa para o desenvolvimento sustentável.** In: VILELA, Evaldo Ferreira; CALLEGARO, Geraldo Magela Callegaro; FERNANDES, Geraldo Wilson. BIOMAS E AGRICULTURA: oportunidades e desafios. Vertentes Edições. Rio de Janeiro, p.65-77, 2019.

LAL, R. Societal value of soil carbon. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 69(6), p. 186-192, 2014.

LANDIS, J.R., Koch, G.G., 1977. A Medição da Concordância do Observador para Dados Categóricos. **Biometria**, v. 33 (1), p. 159-174, 1977.

LIMA, F. M. A. C. Crédito de carbono: Consequências socioambientais de sua comercialização no Brasil. **Dissertação de mestrado (Energia e Meio Ambiente)**. São Luís, 2017.

LIMA, T. A.; SANTOS, L. S.; GONÇALVES, M. V. S.; OLIVEIRA, T. A. A.; LIMA, J. R. F. A fruticultura como vetor do crescimento populacional do polo Petrolina-PE/Juazeiro-BA. In: SOUZA, M. M. A.; DINIZ, L. F. A. C.; SILVA, J. C. S.; CLEMENTINO, V. D. R.; NETO, A. F. (orgs.). Desenvolvimento do semiárido: organizações, gestão, inovação & empreendedorismo. v. 2. Belo Horizonte: Poisson, 2021. p. 73-82. ISBN 978-65-5866-041-5. DOI: <https://doi.org/10.36229/978-65-5866-041-5>.

LIMA, M. T. D., FERNANDES, M. M., GARCIA, J. R., MACEDO, L. O. B. Changes in land use and cover and carbon stock estimates in the Red River Sub-basin state of Mato Grosso, Brazil. **Environmental Development**, v. 56, p. 1-13. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2025.101299>.

MAES, J., EGOH, B., WILLEMEN, L., LIQUETE, C., VIHERVAARA, P., SCHÄGNER, J. P., BIDOGLIO, G. Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the european union.

Ecosystem Services, 1(1), 31-39. 2012. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.06.004>

MEA - MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and Human WellBeing: Synthesis**. Island Press, Washington, DC, p. 155, 2005.

MELO, W. O. de. Biomimética no semiárido: análise dos princípios funcionais das plantas xerófilas para aplicação conceitual no design de sistema de armazenamento de água. **Dissertação (Mestrado em Design)**, Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, pp. 105, 2019.

MENDES, K. R.; CAMPOS, S.; SILVA, L. L.; MUTTI, P. R.; FERREIRA, R. R. et al. Seasonal variation in net ecosystem CO₂ exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. **Scientific Reports**, v. 10, p. 9454, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66415-w>.

MENEZES, R. S. C.; SALES, A. T.; PRIMO, D. C. et al. Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest. **Geoderma**, v. 390, p. 114943, 2021. DOI: [10.1016/j.geoderma.2021.114943](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114943).

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Lições aprendidas na conservação e recuperação da Mata Atlântica: sistematização de desafios e melhores práticas dos projetos-pilotos de Pagamentos por Serviços Ambientais**. Brasília: MMA, 2013.

MMA. Ministério do Meio Ambiente; IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Caatinga: Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por Satélite. 2017.

MODULES FOR LAND USE CHANGE SIMULATIONS. Nextgis / molusce: Asia Air Survey; NextGIS, 2018.

MONTEIRO, B. C. G., GARCIA, J. R., FERNANDES, M. M., RIBEIRO, A. S. Prediction of land use/land cover and environmental estimation of carbon stocks in the Atlantic forest: A study in the state of Sergipe, Brazil. **Cleaner and Circular Bioeconomy**, v. 9, p. 1-11. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2024.100113>.

MORAIS, Y. C. B.; ARAÚJO, M. do S. B. de; MOURA, M. S. B. de; GALVÍNCIO, J. D.; MIRANDA, R. de Q. Análise do sequestro de carbono em áreas de Caatinga do Semiárido pernambucano.

Revista Brasileira de Metereologia, v. 32 (4), p. 585–599, 2017. DOI:
<https://doi.org/10.1590/0102-7786324007>.

NEXTGIS. **MOLUSCE-quick and Convenient Analysis of Land Cover Changes**. 2017. Acesso em:
<https://nextgis.com/blog/molusce/>

NORDHAUS, W. **Revisiting the social cost of carbon**. PNAS, v. 114 (7), p. 1518–1523, 2017.

OECD. (2021). **Effective Carbon Rates 2021: Pricing Carbon Emissions through Taxes and Emissions Trading**. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/0e8e24f5-en>.

PEREIRA, C.C. et al. Scientists' warning: Six key points where biodiversity can improve climate change mitigation. **BioScience**, 2024. DOI: 10.1093/biosci/biae035.

PEREIRA, C. S. P. Produção do espaço urbano e reestruturação da cidade: Petrolina/PE no contexto da globalização contemporânea. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, v. 47, 2025. DOI: 10.12957/geouerj.2025.73812.

PERNAMBUCO. **Lei nº 16.094, de 30 de junho de 2017**. Altera a Lei nº 15.089/17 maio de 2016, que institui a Política Estadual de Pagamentos por Serviços ambientais, cria o Programa estadual de Pagamento por Serviços ambientais e o Fundo estadual de pagamento por serviços ambientais. Diário Oficial do estado de Pernambuco, Recife, 2017.

PERNAMBUCO. Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS). **Plano de Ação e Modelo de Governança para a promoção de Economia Sustentável de matriz regenerativa e inclusiva em Pernambuco**. Recife: Governo do Estado, pp. 98, 2024. Disponível em: <https://drive.expresso.pe.gov.br/s/X2P7sSvubr964La>. Acesso em: 01 de outubro de 2025.

PERNAMBUCO. **Lei nº 17.134, de 18 de dezembro de 2020**. Disciplina o Fundo Estadual do Meio Ambiente de Pernambuco - FEMA-PE. *Diário Oficial do Estado de Pernambuco*, Poder Executivo, Recife, PE, 2020. Acesso em: 01 de outubro de 2025.

PULITI, S. et al. Modelling above-ground biomass stock over Norway using national forest inventory data with ArcticDEM and Sentinel-2 data. **Remote Sensing of Environment**, v. 236, p. 111501, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111501>

RIBEIRO, J. N. A. Aplicação de modelos ecossistêmicos em sistemas de lagoas costeiras como suporte à gestão. **Dissertação de mestrado em Sensoriamento remoto**, Porto Alegre, pp. 213,

2018.

RICKE, K.; DROUET, L.; CALDEIRA, K.; TAVONI, M. Country-level social cost of carbon. **Nature Climate Change**, v.8, p. 895–900, 2018.

RODAL, M. J. N.; SAMPAIO, E. V. S. B.; FIGUEIREDO, M. A. **Manual sobre métodos de estudo florístico e fitossociológico: Ecossistema Caatinga. [S. l.]: SBB, 2013.**

ROUBUSTE, R. R.; VALCORTE, G.; BIANCHINI, N. H.; SOUZA, K. M. O. S. **Mudanças climáticas e o mercado de carbono.** Iheringia, Série Botânica, Porto Alegre, v. 77, 2022.

SALAMI, G. Estoque e dinâmica de biomassa e carbono acima do solo em floresta tropical seca. **Tese de doutorado em Ciências Florestais** – Universidade Federal Rural de Pernambuco, pp. 104, 2020.

SANTOS, M. P. Estimativa de estoques de carbono da biomassa para áreas de Caatinga de Pernambuco. 2021. 94 f. **Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Biológicas)** – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2021.

SHARP, R et. al. **Invest version users guide.** 2015.

SCHULZ, K.; VOIGT, K.; BEUSCH, C.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S.; KOWARIK, I.; WALZ, A.; CIERJACKS, A. Grazing deteriorates the soil carbon stocks of Caatinga forest ecosystems in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 367, p. 62–70, 2016.

SEEG. Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Emissões totais. Observatório do Clima; 2022. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission. Acesso em: 19 de outubro de 2025.

SOTERRONI, A. C.; RAMOS, F. M.; MOSNIER, A.; CARVALHO, A. X. Y.; CÂMARA, G.; OBERSTEINER, M.; ANDRADE, P. R.; SOUZA, R. C.; PENA, M. G.; MANT, R.; PIRKER, J.; KRAXNER, F.; HAVLIK, P.; KAPOS, V. **Modelagem de mudanças de uso da terra no Brasil: 2000-2050.** Brasília: Ipea, 2015.

SOUZA, J. S.; CORREIA, M. F.; EMILIAVACA, S. A. S.; ARAGÃO, M. R. S. Sustentabilidade energética no semiárido: um estudo sobre eventos de sobreirradiância na região de Araripina. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 22 (12), 2025. DOI: 10.55905/oelv22n12-310.

SYSTEM OF ENVIRONMENTAL ECONOMIC ACCOUNTING (SEEA). Experimental Ecosystem Accounting. Central framework. United Nations, New York, 2012.

THE ECONOMICS OF ECOSYSTEMS AND BIODIVERSITY (TEEB). The economics of ecosystems and biodiversity: Mainstreaming the economics of nature: A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB, 2010.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE – UNFCCC. **Convenção sobre mudança do clima.** 2 ed. Brasília: MCT, p. 30, 2001.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE – UNFCCC. **Protocolo de Kyoto.** 2 ed. Brasília: MCT, p. 34, 2001.

VELLOSO, A. L.; SAMPAIO, E. V. S. B.; PAREYN, F. G. C. **Ecorregiões: propostas para o bioma Caatinga.** Associação Plantas do Nordeste/Instituto de Conservação Ambiental, The Nature Conservancy do Brasil, Brazil, v. 1, p. 75, 2002.

WANG, Z.; LI, X.; MAO, Y.; LI, L.; WANG, X.; LIN, Q. Simulação dinâmica de mudanças no uso do solo e avaliação do armazenamento de carbono com base em cenários de mudanças climáticas em nível urbano: um estudo de caso de Bortala, China. **Ecological Indicators**, v. 134, pp. 11. 2022. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108499

ZANELLA, M. E. Considerações sobre o clima e os recursos hídricos do semiárido nordestino. **Caderno Prudentino de Geografia**, v. 36, p. 126–142, 2014.

Apêndice A – Resultado para todos os usos da Microrregião do Alto Capibaribe

lucode	lulc_name	Estoque de Carbono				Variação do Estoque de Carbono		
		1994	2008	2022	2050	1994 - 2008	2008 - 2022	2022 - 2050
0	Vazio	0	0	0	0	0	0	0
3	Formação florestal	3.272.361	3.515.461	3.115.260	2.637.808	243.100	-400.201	-477.452
4	Formação savânica	70.801.479	63.423.681	55.854.550	52.931.158	-7.377.798	-7.569.131	-2.923.392
9	Silvicultura		ND	ND	ND	ND	ND	ND
12	Formação Campestre	10.232	74.598	133.457	39.308	64.366	58.858	-94.148
15	Pastagem	40.429.154	41.897.986	47.302.981	51.888.858	1.468.832	5.404.995	4.585.878
20	Cana de açúcar	880.048	767.612	760.235	414..673	-112.436	-7.377	-345.561
21	Mosaico de usos	5.663.243	6.487.677	3.814.316	887.101	824.434	-2.673.362	-2.927.214
24	Área urbanizada	0	0	0	0	0	0	0
25	Outras áreas não vegetadas	0	0	0	0	0	0	0
30	Mineração	0	0	0	0	0	0	0
33	Rio, lago e oceano	0	0	0	0	0	0	0
41	Outras lavouras temporárias		0	0	ND	0	0	ND
48	Outras lavouras perenes		0	0	ND	0	0	ND
Total		121.056.518	116.167.015	110.980.799	108.798.909	-4.889.502	-5.186.217	-2.181.889

Apêndice B – Resultado para todos os usos da Microrregião de Araripina

lucode	lulc_name	Estoque de Carbono				Variação do Estoque de Carbono		
		1994	2008	2022	2050	1994 - 2008	2008 - 2022	2022 - 2050
0	Vazio	0	0	0	0	0	0	0
3	Formação florestal	28.414.861	29.537.485	34.971.969	35691970,28	1.122.624	5.434.484	720.001
4	Formação savânica	768.251.408	690.598.420	605.528.137	571343780,4	-77.652.988	-85.070.283	-34.184.357
9	Silvicultura	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND
12	Formação Campestre	7.954	15.280	40.439	29348,3736	7.326	25.159	-11.091
15	Pastagem	123.394.551	151.038.753	165.446.631	190513505	27.644.202	14.407.879	25.066.873
20	Cana de açúcar	0	0	0	0	0	0	0
21	Mosaico de usos	26.203.096	20.488.488	29.623.153	20703575,94	-5.714.608	9.134.666	-8.919.577
24	Área urbanizada	0	0	0	0	0	0	0
25	Outras áreas não vegetadas	0	0	0	0	0	0	0
30	Mineração	0	0	0	0	0	0	0
33	Rio, lago e oceano	0	0	0	0	0	0	0
41	Outras lavouras temporárias	120.589	9.680.660	20.778.507	ND	9.560.071	11.097.847	ND
48	Outras lavouras perenes	3.946			ND	-3.946	0	ND
Total		946.396.405	901.359.085	856.388.837	818.282.179,99	-45.037.320	-44.970.248	-17.328.150

]

Apêndice C – Resultado para todos os usos da Microrregião do Vale do Ipanema

lucode	lulc_name	Estoque de Carbono				Variação do Estoque de Carbono		
		1994	2008	2022	2050	1994 - 2008	2008 - 2022	2022 - 2050
0	Vazio	0	0	0	0	0	0	0
3	Formação florestal	7.658.751	7.848.058	7.843.935	7621042,114	189.307	-4.123	-222.893
4	Formação savântica	145.548.954	154.763.914	190.905.320	158307211,7	9.214.959	36.141.407	-32.598.109
9	Silvicultura		ND	ND	ND	ND	ND	ND
12	Formação Campestre	142.415	90.799	352.228	66155,18859	-51.616	261.429	-286.073
15	Pastagem	140.837.397	150.981.820	138.660.102	175051796,1	10.144.424	-12.321.718	36.391.694
20	Cana de açúcar							
21	Mosaico de usos	39.211.103	24.145.820	17.954.527	15413344,62	-15.065.283	-6.191.293	-2.541.183
24	Área urbanizada	0	0	0	0	0	0	0
25	Outras áreas não vegetadas	0	0	0	0	0	0	0
30	Mineração	0	0	0	0	0	0	0
33	Rio, lago e oceano	0	0	0	0	0	0	0
41	Outras lavouras temporárias	379	76.498	400.310	ND	76.119	323.812	ND
48	Outras lavouras perenes				ND	0	0	ND
Total		333.399.000	337.906.910	356.116.424	356.459.549,75	4.507.911	18.209.514	743.436

Apêndice D – Resultado para todos os usos da Microrregião de Itaparica

lucode	lulc_name	Estoque de Carbono				Variação do Estoque de Carbono		
		1994	2008	2022	2050	1994 - 2008	2008 - 2022	2022 - 2050
0	vazio	0	0	0	0	0	0	0
3	Formação florestal	19.483.350	20.109.119	23.725.357	22412456,09	625.768	3.616.238	-1.312.901
4	Formação savânica	572.858.704	522.203.363	517.530.517	547714651,4	-50.655.341	-4.672.846	30.184.135
9	Silvicultura	0	0	0	0			
12	Formação Campestre	18.276.280	21.552.290	23.997.503	15194301,81	3.276.010	2.445.213	-8.803.201
15	Pastagem	49.790.977	52.890.370	51.610.140	57732109,41	3.099.393	-1.280.230	6.121.969
20	Cana de açúcar	0	0	0	0	0	0	0
21	Mosaico de usos	53.686.882	69.622.856	66.303.854	59574045,93	15.935.974	-3.319.002	-6.729.808
24	Área urbanizada	0	0	0	0	0	0	0
25	Outras áreas não vegetadas	0	0	0	0	0	0	0
30	Mineração	0	0	0	0	0	0	0
33	Rio, lago e oceano	0	0	0	0	0	0	0
41	Outras lavouras temporárias	793	12.446	321.933	247841,9379	11.654	309.487	ND
48	Outras lavouras perenes	913.587	4.823.052	12.079.333	8413662,283	3.909.465	7.256.281	ND
Total		715.010.572	691.213.496	695.568.637	711.289.068,88	-23.797.076	4.355.141	19.460.194

Apêndice E – Resultado para todos os usos da Microrregião do Pajeú

lucode	lulc_name	Estoque de Carbono				Variação do Estoque de Carbono		
		1994	2008	2022	2050	1994 - 2008	2008 - 2022	2022 - 2050
0	Vazio	0	0	0	0	0	0	0
3	Formação florestal	18.316.462	18.318.887	18.889.113	18442949,5	2.425	570.225	-446.163
4	Formação savânica	680.038.644	680.890.381	665.063.713	641453457,2	851.737	-15.826.668	-23.610.256
9	Silvicultura	0	0	0	0			
12	Formação Campestre	139.150	201.441	456.298	332009,0579	62.291	254.857	-124.289
15	Pastagem	62.224.634	60.207.463	67.232.232	83711200,72	-2.017.172	7.024.769	16.478.969
20	Cana de açúcar	0	0	0	0	0	0	0
21	Mosaico de usos	4.246.166	3.514.582	3.584.660	2740257,334	-731.584	70.077	-844.402
24	Área urbanizada	0	0	0	0	0	0	0
25	Outras áreas não vegetadas	0	0	0	0	0	0	0
30	Mineração	0	0	0	0	0	0	0
33	Rio, lago e oceano	0	0	0	0	0	0	0
41	Outras lavouras temporárias	734	201.491	282.451	262313,817	200.757	80.960	ND
48	Outras lavouras perenes	0	0	0	0	0	0	ND
Total		764.965.790	763.334.245	755.508.466	746.942.187,59	-1.631.545	-7.825.779	-8.546.142

Apêndice F – Resultado para todos os usos da Microrregião de Garanhuns

lucode	lulc_name	Estoque de Carbono				Variação do Estoque de Carbono		
		1994	2008	2022	2050	1994 - 2008	2008 - 2022	2022 - 2050
0	Vazio	0	0	0	0	0	0	0
3	Formação florestal	16.942.075	21.496.481	25.148.617	20048370,74	4.554.406	3.652.135	-5.100.246
4	Formação savânica	126.375.470	139.454.087	125.447.644	125533296,9	13.078.616	-14.006.443	85.653
9	Silvicultura	0	0	0	0			
12	Formação Campestre	6.405	18.922	55.133	14582,64779	12.517	36.211	-40.550
15	Pastagem	159.687.984	144.758.587	142.428.830	148229262,5	-14.929.398	-2.329.757	5.800.433
20	Cana de açúcar	4.959.777	5.132.170	5.016.076	3473287,697	172.392	-116.093	-1.542.789
21	Mosaico de usos	7.562.280	10.261.428	14.402.855	7652022,727	2.699.149	4.141.427	-6.750.832
24	Área urbanizada	0	0	0	0	0	0	0
25	Outras áreas não vegetadas	0	0	0	0	0	0	0
30	Mineração	0	0	0	0	0	0	0
33	Rio, lago e oceano	0	0	0	0	0	0	0
41	Outras lavouras temporárias	27.652	1.626.898	3.259.960	1479493,561	1.599.245	1.633.062	ND
48	Outras lavouras perenes	0	0	0	0	0	0	ND
Total		315.561.644	322.748.572	315.759.114	306.430.316,78	7.186.928	-6.989.458	-7.548.331

Apêndice G – Resultado para todos os usos da Microrregião de Salgueiro

lucode	lulc_name	Estoque de Carbono				Variação do Estoque de Carbono		
		1994	2008	2022	2050	1994 - 2008	2008 - 2022	2022 - 2050
0	Vazio	0	0	0	0	0	0	0
3	Formação florestal	5.777.201	5.902.961	6.245.800	6.241.434	125.760	342.839	-4.366
4	Formação savântica	709.987.648	669.122.269	624.656.843	631795.515	-40.865.379	-44.465.426	7.138.673
9	Silvicultura	0	0	0	0			
12	Formação Campestre	19.633	30.852	140.615	131.321	11.219	109.763	-9.293
15	Pastagem	41.372.490	58.500.867	66.473.689	63.519.976	17.128.377	7.972.822	-2.953.713
20	Cana de açúcar	0	0	0	0	0	0	0
21	Mosaico de usos	13.599.855	13.063.516	25.033.299	24.697.982	-536.338	11.969.783	-335.316
24	Área urbanizada	0	0	0	0	0	0	0
25	Outras áreas não vegetadas	0	0	0	0	0	0	0
30	Mineração	0	0	0	0	0	0	0
33	Rio, lago e oceano	0	0	0	0	0	0	0
41	Outras lavouras temporárias	11.184	1.174.277	2.583.157	2.568.420	1.163.093	1.408.880	ND
48	Outras lavouras perenes	5.147	5.147	11.752	11.752	0	6.605	ND
Total		770.773.158	747.799.889	725.145.155	728.966.403,51	-22.973.269	-22.654.734	3.835.985

Apêndice H – Resultado para todos os usos da Microrregião do Sertão do Moxotó

lucode	lulc_name	Estoque de Carbono				Variação do Estoque de Carbono		
		1994	2008	2022	2050	1994 - 2008	2008 - 2022	2022 - 2050
0	vazio	0	0	0	0	0	0	0
3	Formação florestal	6.923.231	7.030.436	7.106.838	6.173.157	107.205	76.402	-933.681
4	Formação savânica	617.602.838	587.611.371	566.004.916	560.427.232	-29.991.466	-21.606.456	-5.577.683
9	Silvicultura	0	0	0	0			
12	Formação Campestre	188.464	277.546	1.363.577	512.518	89.083	1.086.031	-851.058
15	Pastagem	83.637.984	105.456.099	116.266.257	127.835.501	21.818.115	10.810.158	11.569.245
20	Cana de açúcar	0	0	0	0	0	0	0
21	Mosaico de usos	19.505.940	10.181.513	8.326.055	2.907.538	-9.324.427	-1.855.458	-5.418.517
24	Área urbanizada	0	0	0	0	0	0	0
25	Outras áreas não vegetadas	0	0	0	0	0	0	0
30	Mineração	0	0	0	0	0	0	0
33	Rio, lago e oceano	0	0	0	0	0	0	0
41	Outras lavouras temporárias	1.879	13.386	96.137	55.539	11.507	82.751	ND
48	Outras lavouras perenes	343	515	2.917	2.916	172	2.402	ND
Total		727.860.678	710.570.866	699.166.696	697.914.405,24	-17.289.812	-11.404.170	-1.211.694

Apêndice I – Resultado para todos os usos da Microrregião de Petrolina

lucode	lulc_name	Estoque de Carbono				Variação do Estoque de Carbono		
		1994	2008	2022	2050	1994 - 2008	2008 - 2022	2022 - 2050
0	vazio	0	0	0	0	0	0	0
3	Formação florestal	3.107.498	2.787.944	3.104.709	2.916.736	-319.554	316.765	-187.973
4	Formação savântica	1.088.922.249	962.811.247	798.499.794	635.494.555	-126.111.002	-164.311.453	-163.005.238
9	Silvicultura	0	0	0	0	0	0	0
12	Formação Campestre	13.145	11.010	89.836	82845.28124	-2.135	78.827	-6.991
15	Pastagem	50.521.305	92.336.487	101.229.733	90.126.581	41.815.182	8.893.246	-11.103.151
20	Cana de açúcar	364.975	11.260	13.589	12.812	-353.715	2.330	-777
21	Mosaico de usos	69.201.513	76.518.983	134.841.182	228.218.488	7.317.470	58.322.199	93.377.307
24	Área urbanizada	0	0	0	0	0	0	0
25	Outras áreas não vegetadas	0	0	0	0	0	0	0
30	Mineração	0	0	0	0	0	0	0
33	Rio, lago e oceano	0	0	0	0	0	0	0
41	Outras lavouras temporárias	1.974.311	2.022.717	4.337.131	3.977.418	48.406	2.314.415	ND
48	Outras lavouras perenes	18.008.897	44.925.908	59.413.507	58.182.609	26.917.011	14.487.599	ND
Total		1.232.113.892	1.181.425.555	1.101.529.482	1.019.012.047,76	-50.688.337	-79.896.073	-80.926.824

Apêndice J – Resultado para todos os usos da Microrregião do Vale do Ipojuca

lucode	lulc_name	Estoque de Carbono				1994 - 2008	2008 - 2022	2022 - 2050
		1994	2008	2022	2050			
0	vazio	0	0	0	0	0	0	0
3	Formação florestal	17.776.797	22.132.437	24.292.187	22.998.932	4.355.640	2.159.750	-1.293.255
4	Formação savânica	306.509.732	344.553.715	367.468.615	386.083.052	38.043.983	22.914.901	18.614.438
9	Silvicultura	0	485	3.274	848			
12	Formação Campestre	5.149	91.469	214.460	162.509.0358	86.320	122.991	-51.951
15	Pastagem	194.551.908	161.292.018	149.450.836	144.547.936	-33.259.890	-11.841.182	-4.902.900
20	Cana de açúcar	2.725.276	2.569.191	2.535.023	1.494.456	-156.085	-34.168	-1.040.567
21	Mosaico de usos	11.874.462	20.819.827	16.681.498	13.824.570	8.945.365	-4.138.329	-2.856.927
24	Área urbanizada	0	0	0	0	0	0	0
25	Outras áreas não vegetadas	0	0	0	0	0	0	0
30	Mineração	0	0	0	0	0	0	0
33	Rio, lago e oceano	0	0	0	0	0	0	0
41	Outras lavouras temporárias	7.016	876.620	1.980.827	1.825.922	869.604	1.104.207	ND
48	Outras lavouras perenes	0	0	0	0	0	0	ND
Total		533.450.340	552.335.762	562.626.721	570.938.228	18.884.937	10.288.170	8.468.837

Apêndice K – Valoração pela métrica CBIO (em dólar) para a Microrregião do Alto Capibaribe

Lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	vazio	-	-	-	-
3	Formação florestal	74.292.541	79.811.642	70.725.862	59.886.259
4	Formação savânica	1.607.408.655	1.439.910.228	1.268.067.968	1.201.698.092
9	Silvicultura				
12	Formação Campestre	232.307	1.693.610	3.029.871	892.424,63
15	Pastagem	917.864.612	951.211.560	1.073.921.372	1.178.034.728
20	Cana de açúcar	19.979.769	17.427.130	17.259.647	9.414.352
21	Mosaico de usos	128.572.823	147.289.981	86.596.552	20.139.904
24	Área urbanizada	-	-	-	0,00
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	0,00
30	Mineração	-	-	-	0,00
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	0,00
41	Outras lavouras temporárias	-	-	-	
48	Outras lavouras perenes	-	-	-	
Total		2.748.350.709	2.637.344.154	2.519.601.274	2.470.065.762

Apêndice L - Valoração pela métrica Mercado Internacional (em dólar) para a Microrregião do Alto Capibaribe

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	vazio	-	-	-	0,00
3	Formação florestal	299.421.055	321.664.674	285.046.275	241.359.449
4	Formação savânica	6.478.335.305	5.803.266.793	5.110.691.336	4.843.200.981
9	Silvicultura				
12	Formação Campestre	936.268	6.825.756	12.211.285	3.596.736
15	Pastagem	3.699.267.578	3.833.665.703	4.328.222.770	4.747.830.582
20	Cana de açúcar	80.524.419	70.236.524	69.561.515	37.942.644
21	Mosaico de usos	518.186.745	593.622.462	349.009.880	81.169.809
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	-	-	-	-
48	Outras lavouras perenes	-	-	-	-
Total		11.076.671.372	10.629.281.914	10.154.743.065	9.955.100.205

Apêndice M - Valoração pela métrica CSC (em dólar) para a Microrregião do Alto Capibaribe

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	vazio	-	-	-	0,00
3	Formação florestal	605.386.834	650.360.270	576.323.071	487.994.516
4	Formação savânica	13.098.273.568	11.733.380.947	10.333.091.773	9.792.264.280
9	Silvicultura				
12	Formação Campestre	1.893.000	13.800.709	24.689.484	7.272.090
15	Pastagem	7.479.393.464	7.751.127.378	8.751.051.503	9.599.438.883
20	Cana de açúcar	162.808.935	142.008.274	140.643.500	76.714.636
21	Mosaico de usos	1.047.699.976	1.200.220.279	705.648.392	164.113.822
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	-	-	-	-
48	Outras lavouras perenes	-	-	-	-
Total		22.395.455.781	21.490.897.859	20.531.447.727	20.127.798.230

Apêndice N - Valoração pela métrica CBIO (em dólar) para a Microrregião de Araripina

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	vazio	-	-	-	-
3	Formação florestal	645.103.673	670.590.644	793.969.940	810.316.153
4	Formação savânica	17.441.640.828	15.678.682.106	13.747.328.252	12.971.239.499
9	Silvicultura				
12	Formação Campestre	180.575	346.895	918.085	666.297
15	Pastagem	2.801.431.165	3.429.038.529	3.756.141.144	4.325.235.323
20	Cana de açúcar				
21	Mosaico de usos	594.889.879	465.150.916	672.535.574	470.034.069
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	2.737.741	219.780.384	471.735.227	
48	Outras lavouras perenes	89.586			
Total		21.486.073.451	20.463.589.477	19.442.628.225	18.577.491.343

Apêndice O - Valoração pela métrica Mercado Internacional (em dólar) para a Microrregião de Araripina

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	vazio	-	-	-	0,00
3	Formação florestal	2.599.959.812	2.702.679.891	3.199.935.174	3.265.815.280
4	Formação savânica	70.295.003.820	63.189.755.450	55.405.824.576	52.277.955.908
9	Silvicultura				
12	Formação Campestre	727.774	1.398.092	3.700.157	2.685.376
15	Pastagem	11.290.601.408	13.820.045.885	15.138.366.780	17.431.985.705
20	Cana de açúcar				
21	Mosaico de usos	2.397.583.275	1.874.696.638	2.710.518.536	1.894.377.198
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	11.033.912	885.780.363	1.901.233.373	
48	Outras lavouras perenes	361.059			
Total		86.595.271.064	82.474.356.322	78.359.578.599	74.872.819.469

Apêndice P - Valoração pela métrica CSC (em dólar) para a Microrregião de Araripina

lulc_code	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	vazio	-	-	-	0,00
3	Formação florestal	5.256.749.348	5.464.434.753	6.469.814.287	6.603.014.501
4	Formação savântica	142.126.510.455	127.760.707.741	112.022.705.428	105.698.599.377
9	Silvicultura				
12	Formação Campestre	1.471.456	2.826.744	7.481.192	5.429.449
15	Pastagem	22.827.991.919	27.942.169.276	30.607.626.824	35.244.998.421
20	Cana de açúcar				
21	Mosaico de usos	4.847.572.743	3.790.370.252	5.480.283.380	3.830.161.548
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	22.309.003	1.790.922.046	3.844.023.759	
48	Outras lavouras perenes	730.011			
		175.083.334.938	166.751.430.815	158.431.934.873	151.382.203.298

Apêndice Q - Valoração pela métrica CBIO (em dólar) para a Microrregião de Buíque

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	vazio	-	-	-	0,00
3	Formação florestal	173.876.922	178.174.768	178.081.157	173.020.807
4	Formação savântica	3.304.403.428	3.513.611.000	4.334.130.723	3.594.054.626
9	Silvicultura				
12	Formação Campestre	3.233.257	2.061.415	7.996.656	1.501.923
15	Pastagem	3.197.436.755	3.427.745.987	3.148.005.554	3.974.207.561
20	Cana de açúcar				
21	Mosaico de usos	890.211.152	548.183.472	407.622.316	349.929.746
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	8.610	1.736.746	9.088.261	
48	Outras lavouras perenes	-			
Total		7.569.170.127	7.671.513.390	8.084.924.670	8.092.714.667

Apêndice R - Valoração pela métrica Mercado Internacional (em dólar) para a Microrregião de Buíque

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	Vazio	-	-	-	0,00
3	Formação florestal	700.775.749	718.097.348	717.720.068	697.325.353
4	Formação savânica	13.317.729.331	14.160.898.114	17.467.836.814	14.485.109.871
9	Silvicultura				
12	Formação Campestre	13.030.989	8.308.117	32.228.907	6.053.199
15	Pastagem	12.886.621.801	13.814.836.553	12.687.399.349	16.017.239.345
20	Cana de açúcar				
21	Mosaico de usos	3.587.815.905	2.209.342.554	1.642.839.257	1.410.321.032
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	34.702	6.999.604	36.628.399	
48	Outras lavouras perenes	-			
Total		30.506.008.479	30.918.482.293	32.584.652.798	32.616.048.802

Apêndice S - Valoração pela métrica CSC (em dólar) para a Microrregião de Buíque

lulc_code	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	Vazio	-	-	-	-
3	Formação florestal	1.416.869.002	1.451.890.814	1.451.128.007	1.409.892.791
4	Formação savânica	26.926.556.572	28.631.324.055	35.317.484.270	29.286.834.166
9	Silvicultura				
12	Formação Campestre	26.346.808	16.797.833	65.162.272	12.238.709
15	Pastagem	26.054.918.395	27.931.636.748	25.652.118.903	32.384.582.283
20	Cana de açúcar				
21	Mosaico de usos	7.254.054.016	4.466.976.748	3.321.587.570	2.851.468.753
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	70.163	14.152.206	74.057.419	
48	Outras lavouras perenes	-			
Total		61.678.814.959	62.512.778.406	65.881.538.444	65.945.016.704

Apêndice T - Valoração pela métrica CBIO (em dólar) para a Microrregião de Garanhuns

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	Vazio	-	-	-	-
3	Formação florestal	384.636.578	488.035.432	570.949.997	455.158.920
4	Formação savântica	2.869.107.094	3.166.031.419	2.848.042.610	2.849.987.197
9	Silvicultura				
12	Formação Campestre	145.411	429.580	1.251.675	331.070
15	Pastagem	3.625.402.361	3.286.459.676	3.233.567.122	3.365.254.563
20	Cana de açúcar	112.602.008	116.515.840	113.880.174	78.854.182
21	Mosaico de usos	171.686.722	232.965.596	326.988.566	173.724.161
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	627.787	36.935.516	74.010.985	
48	Outras lavouras perenes	-	-	-	
Total		7.164.207.964	7.327.373.062	7.168.691.132	6.923.310.096

Apêndice U - Valoração pela métrica Mercado Internacional (em dólar) para a Microrregião de Garanhuns

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	Vazio	-	-	-	0,00
3	Formação florestal	1.550.199.892	1.966.928.049	2.301.098.424	1.834.425.922
4	Formação savântica	11.563.355.545	12.760.048.950	11.478.459.402	11.486.296.668
9	Silvicultura				
12	Formação Campestre	586.049	1.731.336	5.044.624	1.334.312
15	Pastagem	14.611.450.572	13.245.410.669	13.032.237.934	13.562.977.517
20	Cana de açúcar	453.819.608	469.593.517	458.970.997	317.805.824
21	Mosaico de usos	691.948.592	938.920.694	1.317.861.248	700.160.079
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	2.530.171	148.861.124	298.286.299	
48	Outras lavouras perenes	-	-	-	
Total		28.873.890.433	29.531.494.341	28.891.958.932	27.903.000.324

Apêndice V - Valoração pela métrica CSC (em dólar) para a Microrregião de Garanhuns

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	Vazio	-	-	-	-
3	Formação florestal	3.134.283.935	3.976.849.061	4.652.494.082	3.708.948.586
4	Formação savântica	23.379.462.032	25.799.006.073	23.207.814.091	23.223.659.930
9	Silvicultura				
12	Formação Campestre	1.184.909	3.500.516	10.199.514	2.697.789
15	Pastagem	29.542.277.113	26.780.338.512	26.349.333.529	27.422.413.560
20	Cana de açúcar	917.558.771	949.451.373	927.974.148	642.558.223
21	Mosaico de usos	1.399.021.743	1.898.364.246	2.664.528.207	1.415.624.204
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	5.115.647	300.976.043	603.092.518	
48	Outras lavouras perenes	-	-	-	
Total		58.378.904.154	59.708.485.827	58.415.436.092	56.415.902.295

Apêndice W - Valoração pela métrica CBIO (em dólar) para a Microrregião do Pajeú

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	Vazio	-	-	-	0,00
3	Formação florestal	415.839.326	415.894.391	428.840.242	418.710.981
4	Formação savântica	15.438.943.106	15.458.280.132	15.098.966.682	14.562.942.147
9	Silvicultura				
12	Formação Campestre	3.159.126	4.573.319	10.359.348	7.537.614
15	Pastagem	1.412.688.233	1.366.892.309	1.526.375.909	1.900.498.562
20	Cana de açúcar	-	-	-	-
21	Mosaico de usos	96.400.868	79.791.695	81.382.663	62.212.166
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	16.661	4.574.453	6.412.499	
48	Outras lavouras perenes	-	-	-	
Total		17.367.047.322	17.330.006.302	17.152.337.345	16.951.901.472

Apêndice X - Valoração pela métrica Mercado Internacional (em dólar) para a Microrregião do Pajeú

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	Vazio	-	-	-	-
3	Formação florestal	1.675.956.255	1.676.178.184	1.728.353.814	1.687.529.879
4	Formação savânica	62.223.535.924	62.301.469.893	60.853.329.747	58.692.991.330
9	Silvicultura	-	-	-	-
12	Formação Campestre	12.732.218	18.431.840	41.751.258	30.378.828
15	Pastagem	5.693.554.051	5.508.982.844	6.151.749.219	7.659.574.865
20	Cana de açúcar	-	-	-	-
21	Mosaico de usos	388.524.191	321.584.283	327.996.357	250.733.546,10
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	67.148	18.436.410	25.844.280	-
48	Outras lavouras perenes	-	-	-	-
Total		69.994.369.790	69.845.083.456	69.129.024.678	68.321.208.450

Apêndice Y - Valoração pela métrica CSC (em dólar) para a Microrregião do Pajeú

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	Vazio	-	-	-	-
3	Formação florestal	3.388.545.433	3.388.994.143	3.494.485.855	3.411.945.658
4	Formação savânica	125.807.149.136	125.964.720.549	123.036.786.920	118.668.889.574
9	Silvicultura	-	-	-	-
12	Formação Campestre	25.742.737	37.266.562	84.415.113	61.421.675
15	Pastagem	11.511.557.372	11.138.380.614	12.437.962.903	15.486.572.132
20	Cana de açúcar	-	-	-	-
21	Mosaico de usos	785.540.714	650.197.731	663.162.033	506.947.606
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	135.765	37.275.803	52.253.464	-
48	Outras lavouras perenes	-	-	-	-
Total		141.518.671.160	141.216.835.404	139.769.066.290	138.135.776.648

Apêndice Z - Valoração pela métrica CBIO (em dólar) para a Microrregião de Petrolina

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	Vazio	-	-	-	0,00
3	Formação florestal	70.549.653	63.294.801,05	70.486.328	66.218.768
4	Formação savânica	24.721.843.086	21.858.740.226	18.128.371.080	14.427.656.973
9	Silvicultura	-	-	-	-
12	Formação Campestre	298.425,28	249.954	2.039.556	1.880.839
15	Pastagem	1.146.987.094	2.096.318.765	2.298.222.473	2.046.147.204
20	Cana de açúcar	8.286.041	255.633	308.522	290.892
21	Mosaico de usos	1.571.084.577	1.737.213.366	3.061.304.458	5.181.252.993
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	44.822.850	45.921.812	98.466.053	-
48	Outras lavouras perenes	408.856.666	1.019.954.589	1.348.867.094	-
Total		27.972.728.394	26.821.949.149	25.008.065.567	21.723.447.672

Apêndice AA - Valoração pela métrica Mercado Internacional (em dólar) para a Microrregião de Petrolina

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	Vazio	-	-	-	-
3	Formação florestal	284.336.101	255.096.887	284.080.882	266.881.344
4	Formação savânica	99.636.385.779	88.097.229.088	73.062.731.132	58.147.751.812
9	Silvicultura	-	-	-	-
12	Formação Campestre	1.202.742	1.007.392	8.220.018	7.580.343
15	Pastagem	4.622.699.378	8.448.788.569	9.262.520.604	8.246.582.243
20	Cana de açúcar	33.395.211	1.030.277	1.243.438	1.172.385
21	Mosaico de usos	6.331.938.460	7.001.486.927	12.337.968.125	20.881.991.699
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	180.649.428	185.078.572	396.847.502	-
48	Outras lavouras perenes	1.647.814.055	4.110.720.570	5.436.335.864	-
Total		112.738.421.158	108.100.438.285	100.789.947.568	87.551.959.828

Apêndice AB- Valoração pela métrica CSC (em dólar) para a Microrregião de Petrolina

lucode	lulc_name	Médio	Médio	Médio	Médio
0	Vazio	-	-	-	0,00
3	Formação florestal	574.887.199	515.769.662	574.371.183	539.596.161
4	Formação savânica	201.450.616.057	178.120.080.670	147.722.461.851	117.566.492.735
9	Silvicultura	-	-	-	-
12	Formação Campestre	2.431.774	2.036.805	16.619.709	15.326.377,03
15	Pastagem	9.346.441.367	17.082.250.113	18.727.500.675	16.673.417.650
20	Cana de açúcar	67.520.373	2.083.075	2.514.056	2.370.396
21	Mosaico de usos	12.802.279.946	14.156.011.820	24.945.618.614	42.220.420.376
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	365.247.478	374.202.577	802.369.266	-
48	Outras lavouras perenes	3.331.645.904	8.311.292.956	10.991.498.742	-
Total		227.941.070.102	218.563.727.681	203.782.954.099	177.017.623.697

Apêndice AC - Valoração pela métrica CBIO (em dólar) para a Microrregião de Salgueiro

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	Vazio	-	-	-	-
3	Formação florestal	131.160.021	134.015.156	141.798.636	141.699.518
4	Formação savânica	16.118.876.478	15.191.108.223	14.181.607.976	14.343.677.530
9	Silvicultura	-	-	-	-
12	Formação Campestre	445.737	700.444,04	3.192.390	2.981.401
15	Pastagem	939.281.201	1.328.147.394	1.509.154.679	1.442.096.429
20	Cana de açúcar	-	-	-	0,00
21	Mosaico de usos	308.758.013	296.581.502	568.331.930	560.719.234
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	253.914	26.659.656	58.645.512	-
48	Outras lavouras perenes	116.851	116.851	266.811	-
Total		17.498.892.218	16.977.329.229	16.462.997.936	16.491.174.115

Apêndice AD - Valoração pela métrica Mercado Internacional (em dólar) para a Microrregião de Salgueiro

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	Vazio	-	-	-	-
3	Formação florestal	528.613.924	540.120.970	571.490.707	571.091.234
4	Formação savânica	64.963.869.787	61.224.687.582	57.156.101.119	57.809.289.662
9	Silvicultura	-	-	-	-
12	Formação Campestre	1.796.453	2.822.997	12.866.282	12.015.935
15	Pastagem	3.785.582.808	5.352.829.305	6.082.342.539	5.812.077.831
20	Cana de açúcar	-	-	-	0,00
21	Mosaico de usos	1.244.386.693	1.195.311.727	2.290.546.837	2.259.865.407
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	1.023.349	107.446.349	236.358.868	-
48	Outras lavouras perenes	470.947	470.947	1.075.330	-
Total		70.525.743.965	68.423.689.881	66.350.781.685	66.464.340.072

Apêndice AE - Valoração pela métrica CSC (em dólar) para a Microrregião de Salgueiro

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	Vazio	-	-	-	-
3	Formação florestal	1.068.782.251	1.092.047.863	1.155.473.015	1.154.665.337
4	Formação savânica	131.347.714.871	123.787.619.703	115.561.515.924	116.882.170.356
9	Silvicultura	-	-	-	-
12	Formação Campestre	3.632.173	5.707.700	26.013.795	24.294.514
15	Pastagem	7.653.910.596	10.822.660.345	12.297.632.457	11.751.195.615
20	Cana de açúcar	-	-	-	0,00
21	Mosaico de usos	2.515.973.096	2.416.750.488	4.631.160.272	4.569.126.780
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	2.069.067	217.241.252	477.884.051	-
48	Outras lavouras perenes	952.189	952.189	2.174.164	-
Total		142.593.034.246	138.342.979.541	134.151.853.681	134.381.452.605

Apêndice AF - Valoração pela métrica CBIO (em dólar) para a Microrregião de Sertânia

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	Vazio	-	-	-	-
3	Formação florestal	157.178.372	159.612.258	161.346.815	140.149.430
4	Formação savânica	14.021.460.633	13.340.563.234	12.850.031.053	12.723.400.702
9	Silvicultura	-	-	-	-
12	Formação Campestre	4.278.696	6.301.145	30.957.345	11.635.734
15	Pastagem	1.898.836.314	2.394.173.802	2.639.597.229	2.902.254.240
20	Cana de açúcar	-	-	-	0,00
21	Mosaico de usos	442.844.102	231.151.285	189.026.751	66.009.960
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	42.652	303.897	2.182.595	-
48	Outras lavouras perenes	7.790	11.685	66.216	-
Total		16.524.648.561	16.132.117.308	15.873.208.006	15.843.450.068

Apêndice AG - Valoração pela métrica Mercado Internacional (em dólar) para a Microrregião de Sertânia

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	Vazio	-	-	-	-
3	Formação florestal	633.475.622	643.284.907	650.275.687	564.843.918
4	Formação savânica	56.510.659.662	53.766.440.482	51.789.449.793	51.279.091.790
9	Silvicultura	-	-	-	-
12	Formação Campestre	17.244.419	25.395.490	124.767.316	46.895.473
15	Pastagem	7.652.875.512	9.649.233.021	10.638.362.477	11.696.948.408
20	Cana de açúcar	-	-	-	-
21	Mosaico de usos	1.784.793.538	931.608.478	761.834.070	266.039.787
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	171.901	1.224.796	8.796.510	-
48	Outras lavouras perenes	31.396	47.094	266.870	-
Total		66.599.252.052	65.017.234.271	63.973.752.726	63.853.819.378

Apêndice AH - Valoração pela métrica CSC (em dólar) para a Microrregião de Sertânia

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	Vazio	-	-	-	-
3	Formação florestal	1.280.797.707	1.300.630.687	1.314.765.051	1.142.034.152
4	Formação savânica	114.256.525.001	108.708.103.707	104.710.909.417	103.679.038.045
9	Silvicultura	-	-	-	-
12	Formação Campestre	34.865.765	51.346.073	252.261.788	94.815.984
15	Pastagem	15.473.026.992	19.509.378.239	21.509.257.467	23.649.567.820
20	Cana de açúcar	-	-	-	0,00
21	Mosaico de usos	3.608.598.956	1.883.579.984	1.540.320.252	537.894.652
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	347.559	2.476.364	17.785.293	-
48	Outras lavouras perenes	63.479	95.218	539.573	-
Total		134.654.225.462	131.455.610.276	129.345.838.844	129.103.350.655

Apêndice AI- Valoração pela métrica CBIO (em dólar) para a Microrregião de Itaparica

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	vazio	-	-	-	0,00
3	Formação florestal	442.331.238	456.538.084	538.637.683	508.830.840
4	Formação savânica	13.005.632.860	11.855.602.740	11.749.514.936	12.434.786.488
9	Silvicultura	-	-	-	-
12	Formação Campestre	414.927.082	489.302.454	544.816.209	344.956.809
15	Pastagem	1.130.406.434	1.200.772.073	1.171.706.972	1.310.694.267
20	Cana de açúcar	-	-	-	-
21	Mosaico de usos	1.218.855.314	1.580.650.342	1.505.298.911	1.352.511.822
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	17.993	282.571	7.308.863	-
48	Outras lavouras perenes	20.741.194	109.497.928	274.237.547	-
Total		16.232.912.120	15.692.646.196	15.791.521.122	15.951.780.228

Apêndice AJ - Valoração pela métrica Mercado Internacional (em dólar) para a Microrregião de Itaparica

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	Vazio	-	-	-	-
3	Formação florestal	1.782.726.547	1.839.984.363	2.170.870.181	2.050.739.732
4	Formação savânica	52.416.571.390	47.781.607.713	47.354.042.288	50.115.890.605
9	Silvicultura	-	-	-	-
12	Formação Campestre	1.672.279.641	1.972.034.527	2.195.771.479	1.390.278.615
15	Pastagem	4.555.874.382	4.839.468.850	4.722.327.841	5.282.488.010
20	Cana de açúcar	-	-	-	-
21	Mosaico de usos	4.912.349.694	6.370.491.342	6.066.802.644	5.451.025.202
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	72.520	1.138.845	29.456.893	-
48	Outras lavouras perenes	83.593.188	441.309.244	1.105.258.938	-
Total		65.423.467.365	63.246.034.887	63.644.530.269	64.290.422.166

Apêndice AK- Valoração pela métrica CSC (em dólar) para a Microrregião de Itaparica

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	vazio	-	-	-	-
3	Formação florestal	3.604.419.795	3.720.186.964	4.389.191.078	4.146.304.377
4	Formação savânica	105.978.860.187	96.607.622.152	95.743.145.610	101.327.210.513
9	Silvicultura	-	-	-	-
12	Formação Campestre	3.381.111.842	3.987.173.635	4.439.537.964	2.810.945.834
15	Pastagem	9.211.330.718	9.784.718.440	9.547.875.963	10.680.440.240
20	Cana de açúcar	-	-	-	-
21	Mosaico de usos	9.932.073.153	12.880.228.397	12.266.212.997	11.021.198.496
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	146.626,85	2.302.584	59.557.653	-
48	Outras lavouras perenes	169.013.551	892.264.591	2.234.676.542	-
Total		132.276.955.875	127.874.496.767	128.680.197.811	129.986.099.462

Apêndice AL- Valoração pela métrica CBIO (em dólar) para a Microrregião de Vale do Ipojuca

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	vazio	-	-	-	-
3	Formação florestal	403.587.298	502.473.552	551.506.442	522.145.627
4	Formação savântica	6.958.702.051	7.822.416.043	8.342.653.900	8.765.258.180
9	Silvicultura	-	-	-	-
12	Formação Campestre	116.899	2.076.621	4.868.893	3.689.448
15	Pastagem	4.416.919.333	3.661.818.798	3.392.987.996	3.281.677.268
20	Cana de açúcar	61.872.044	58.328.439	57.552.725	33.928.693
21	Mosaico de usos	269.586.369	472.673.324	378.720.683	313.859.755
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	159.279	19.901.940	44.970.800	-
48	Outras lavouras perenes	-	-	-	-
Total		12.110.943.277	12.539.688.720	12.773.261.441	12.920.558.975

Apêndice AM- Valoração pela métrica Mercado Internacional (em dólar) para a Microrregião de Vale do Ipojuca

lucode	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	vazio	-	-	-	-
3	Formação florestal	1.626.576.936	2.025.117.969	2.222.735.110	2.104.402.290
4	Formação savânica	28.045.640.438	31.526.664.898	33.623.378.302	35.326.599.335
9	Silvicultura	-	-	-	-
12	Formação Campestre	471.138	8.369.403	19.623.091	14.869.576
15	Pastagem	17.801.499.553	14.758.219.653	13.674.751.504	13.226.136.143
20	Cana de açúcar	249.362.755	235.080.973	231.954.612	136.742.733
21	Mosaico de usos	1.086.513.309	1.905.014.181	1.526.357.076	1.264.948.231
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	641.943	80.210.742	181.245.711	-
48	Outras lavouras perenes	-	-	-	-
Total		48.810.706.075	50.538.677.821	51.480.045.409	52.073.698.311

Apêndice AN- Valoração pela métrica CSC (em dólar) para a Microrregião de Vale do Ipojuca

lulc_code	lulc_name	1994	2008	2022	2050
0	vazio	-	-	-	-
3	Formação florestal	3.288.707.467	4.094.500.812	4.494.054.595	4.254.802.445
4	Formação savânica	56.704.300.339	63.742.437.225	67.981.693.834	71.425.364.777
9	Silvicultura	-	-	-	-
12	Formação Campestre	952.574	16.921.745	39.675.103	30.064.171
15	Pastagem	35.992.102.922	29.839.023.343	27.648.404.681	26.741.368.158
20	Cana de açúcar	504.176.062	475.300.328	468.979.272	276.474.378
21	Mosaico de usos	2.196.775.544	3.851.668.016	3.086.077.148	2.557.545.604
24	Área urbanizada	-	-	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-	-	-
30	Mineração	-	-	-	-
33	Rio, lago e oceano	-	-	-	-
41	Outras lavouras temporárias	1.297.919	162.174.724	366.453.077	-
48	Outras lavouras perenes	-	-	-	-
Total		98.688.312.830	102.182.026.196	104.085.337.713	105.285.619.536

