

MANGUEZAIS COMO ESTOQUES DE CARBONO: BIOMASSA ACIMA DO SOLO E O POTENCIAL ECONÔMICO DESSE ESTOQUE NA FLORESTA DE MANGUE DO RIO PACOTI, CEARÁ

Mangroves as carbon stocks: above-ground biomass and the economic potential of this stock in the mangrove forest of the Pacoti River, Ceará

Magda Marinho Braga

Bióloga, Mestranda em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal do Ceará, Brasil
euoumagda@yahoo.com.br

Jader Oliveira Santos

Professor do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Ceará, Brasil
jadersantos@gmail.com

Marcelo Freire Moro

Professor do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, Brasil
marcelomoro@ufc.br

Mário Sérgio Duarte Branco

Mestre em Medicina Tropical, Biólogo da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil
mariosdbranco@hotmail.com

Recebido: 05.12.2023

Aceito: 08.03.2024

Resumo

Os manguezais são ecossistemas reconhecidos por sua grande capacidade de captação e armazenamento de carbono, tendo um papel relevante no combate aos efeitos das mudanças climáticas. Contudo, o dimensionamento do estoque de carbono na biomassa viva desse ecossistema é algo pouco documentado no Brasil. O presente trabalho teve como objetivo calcular a quantidade de carbono armazenado na vegetação do manguezal presente na Área de Proteção Ambiental (APA) do Rio Pacoti, localizada no estado do Ceará, e o potencial econômico desse carbono por meio do Mercado de Crédito de Carbono. Para tal, foram selecionadas 3 áreas ao longo do estuário do rio Pacoti e realizado o inventário das árvores de mangue presente nessas parcelas. Depois, usamos equações de regressão para estimar a biomassa de cada indivíduo e com essa informação estimar a biomassa total das árvores do estuário do Pacoti. Em seguida, foi calculado o estoque de carbono presente nessa biomassa e o seu equivalente em CO₂. Por fim, realizou-se a análise econômica deste estoque, utilizando a média do preço do crédito de carbono (que equivale a 1 tonelada de CO₂) negociado na bolsa de valores. Os resultados indicaram que o mangue da APA do Rio Pacoti é capaz de armazenar 101,77 toneladas de CO₂ por hectare, o que somam 71.545,93 tCO₂ no estuário como um todo, que valem R\$ 7.043.696,80 no mercado voluntário, e € 6.587.949,23 milhões de euros no mercado regulado europeu. Isso demonstra que o manguezal apresenta um grande potencial para estocar carbono e um valor pecuniário relevante, que se for bem aproveitado, pode trazer benefícios para a conservação e recuperação dessa, e de outras áreas de mangue no estado.

Palavras-chave: Manguezal, Carbono, Mercado de Crédito de Carbono.

Abstract

Mangroves are ecosystems recognized for their great capacity to capture and store carbon, playing an important role in combating the effects of climate change. However, the dimension of the carbon stock in this ecosystem's living biomass is little documented in Brazil. The present work aimed to calculate the amount of carbon stored in the mangrove vegetation in the Pacoti River Environmental Protection Area (APA), located in the state of Ceará and the economic potential of this carbon through the Carbon Credit Market. To this end, three areas were selected along the Pacoti River estuary, and an inventory of mangrove trees was carried out on these plots. Then, we used regression equations to estimate the biomass of each individual and, with this information, estimate the total biomass of trees in the Pacoti estuary. Then, the carbon stock present in this biomass and its CO₂ equivalent were calculated. Finally, an economic analysis of this stock was carried out using the average carbon credit price (equivalent to 1 ton of CO₂) traded on the stock exchange. The results indicated that the Pacoti River APA mangrove is capable of storing 101,77 tons of CO₂ per hectare, which adds up to 71,545.93 t CO₂ in the estuary as a whole, worth R\$ 7,043,696.80 on the voluntary market, and € 6,587,949.23 million in the European regulated market. It demonstrates that the mangrove has great potential for storing carbon. It has a relevant financial value, which, if well used, can benefit the conservation and recovery of this and other mangrove areas in the state.

Keywords: Mangrove, Carbon, Carbon Credit Market.

1. INTRODUÇÃO

O ecossistema manguezal é de extrema importância tanto do ponto de vista ecológico como econômico, pois fornece diversos serviços essenciais para o homem e a natureza, como alimento, combustível, locais para reprodução e forrageamento de peixes, mamíferos, crustáceos e demais espécies da fauna semiterrestre e aquática além de atuar como depósito para sedimentos reduzindo a erosão e protegendo a costa (Alongi, 2012). Esses serviços ecossistêmicos trazem benefícios ambientais, sociais e econômicos e dentre eles, um dos mais destacados atualmente é a sua capacidade de sequestro e estoque de carbono, que contribui na mitigação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e no combate às mudanças climáticas (Dinilhuda *et al.*, 2020; Rovai *et al.*, 2015).

O manguezal é definido como um ecossistema de transição encontrado nas regiões costeiras, que se localiza entre os ambientes terrestre e marinho, e é caracterizado por uma vegetação típica lenhosa associada a outros elementos de fauna e flora, ambos adaptados às condições ambientais muito específicas e limitantes como: elevada salinidade, substrato inconsolidado, pouco oxigenado e sob influência direta das marés (Estrada *et al.*, 2014). Em relação a sua flora, no Brasil são encontradas seis espécies chamadas “típicas de mangue”, além de algumas espécies ditas de “transição” que

ocupam áreas mais altas dificilmente atingidas pelas marés. Já no Ceará, as principais espécies típicas de mangue encontradas são: a *Rhizophora mangle*, conhecida como Mangue-vermelho, a *Avicennia schaueriana* e a *Avicennia germinans*, conhecidas como Mangue-preto e a *Laguncularia racemosa*, chamada de Mangue-branco, além de algumas consideradas de transição, como a *Conocarpus erectus*, também chamada de Mangue-de-botão (ICMBio, 2018).

No manguezal o carbono é adquirido pelas plantas de mangue, por algas presentes sobre raízes e no solo e por fontes adjacentes, tais como a água do rio e do mar que banham essas áreas, no entanto, o maior fluxo de carbono se dá entre as árvores e a atmosfera (Alongi, 2012). Nesse fluxo o carbono é sequestrado pelas plantas que absorvem o dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera e fixam-no na sua biomassa por meio da fotossíntese (Oliveira *et al.*, 2016). Esse potencial de sequestro e armazenamento de carbono é tão relevante que ganhou uma nomenclatura própria chamada “Carbono Azul”. Carbono azul é o termo utilizado para designar o carbono sequestrado, armazenado e liberado pelos ecossistemas costeiros, dentre eles o manguezal, que é um dos que possui maior capacidade de sequestro e estoque de carbono, sendo capaz de retirar da atmosfera cerca de 22,8 milhões de toneladas de CO₂ por ano (Santos; Beltrão; Trindade, 2019).

Cerca de 10% do carbono armazenado no mundo estão nos manguezais, e essa porcentagem sobe para 25% quando falamos sobre os estoques de carbono nos ambientes costeiros (Dinilhuda *et al.*, 2020). Segundo Rovai *et al.* (2022), o Brasil possui em média 81% dos estoques de carbono orgânicos de manguezais do mundo, o que equivale a 0,32 GtC, ou seja 320 milhões de toneladas de carbono. Se considerarmos apenas o que está na vegetação acima do solo, temos 50 milhões de toneladas de carbono armazenado nos mangues. Já no que diz respeito ao estoque de carbono por área, os números também são significativos, pois quando somado o carbono presente na biomassa e no solo, os manguezais armazenam 341 toneladas de carbono por hectare, um número bem maior do que o encontrado nos outros biomas brasileiros, e de 15% a 30% maior que as estimativas globais mais recentes. Essa capacidade de guardar grandes quantidades de carbono no solo por um longo período de tempo, torna esse ecossistema um importante sumidouro de CO₂, contribuindo na redução das emissões de GEE (Atwood *et al.*, 2017).

O Brasil possui uma elevada produtividade de biomassa em seus diversos biomas e um grande potencial de sequestro de carbono por meio de sua vegetação (Martins, 2004).

Esse potencial de fixação de CO₂ atmosférico, torna-se ainda mais relevante, quando essa vegetação está inserida em áreas legalmente protegidas, como as Unidades de Conservação (UCs). Isso porque, as UCs são áreas que têm seu uso restrito e regulamentado, o que permite a conservação desta vegetação e o desenvolvimento dos ecossistemas e da diversidade biológica que compõem essas regiões (Nogueira *et al.*, 2018). Até 2018, o Brasil possuía 120 Unidades de Conservação (UCs) que continham manguezais, (55 federais, 46 estaduais e 19 municipais), das quais 17% estavam na categoria de proteção integral e 83% de uso sustentável. Isso representa uma área de 1.211.444 hectares, que equivale a 87% de toda a área de manguezal presente no país (ICMBio, 2018).

Estudos já demonstraram a importância dos manguezais brasileiros no combate às mudanças climáticas, sendo fundamental ações que protejam e promovam a restauração dessas áreas (Rovai *et al.*, 2022). Estima-se que de todo o manguezal presente no Brasil, cerca de 25% já tenha sido devastado desde o início do século XX, tendo as regiões Sudeste e Nordeste os maiores índices de degradação, com cerca de 40% de área de manguezal perdida ao longo deste último século (ICMBio, 2018). A falta de conhecimento real a respeito do valor dos serviços ecossistêmicos prestados pelos manguezais e da magnitude dos impactos das atividades humanas sobre essas áreas são fatores que contribuem para o aumento da degradação desse ecossistema (Grasso; Schaeffer-Novelli, 1999) reduzindo sua função como sumidouro de carbono e muitas vezes invertendo esse papel, levando a emissão do carbono que já estava armazenado nele (Spalding; Kainuma; Collins, 2010).

Nesse sentido, a utilização de UCs da zona costeira, em especial as compostas por manguezais, como áreas armazenadoras de carbono é um importante meio de, não apenas proteger a biodiversidade local, mas também minimizar os efeitos do aquecimento global e agregar valor econômico a essas relevantes regiões, por meio da comercialização dos créditos de carbono produzidos por esse ecossistema.

O mercado de carbono surgiu a partir do Protocolo de Quioto, elaborado em 1997, como uma forma de criar ferramentas que estimulassem a mitigação das mudanças climáticas e de seus efeitos a nível mundial (Silveira; Oliveira, 2021). Nele foram estabelecidos 3 mecanismos de flexibilização para ajudar os países signatários a alcançar suas metas de redução de emissões de GEE e que se tornaram a base para o surgimento do mercado de carbono, que são: Comércio de Emissões – CE, Implementação Conjunta – IC e Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL (Souza; Alvarez; Andrade, 2013).

Por meio desses mecanismos, os países desenvolvidos podem optar por financiar a redução de suas emissões fora de seus territórios, geralmente em países em desenvolvimento, onde os custos para essa redução são menores. Isso é feito mediante Certificados de Redução de Emissões (CREs), que são documentos emitidos por organizações credenciadas que atestam que determinado projeto promoveu o sequestro de CO₂. Esses Certificados dão origem às Reduções Certificadas de Emissões (RCEs) também conhecidas como “Créditos de Carbono” que correspondem a 1 tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e) (Maciel *et al.*, 2009; Prolo *et al.*, 2021).

De modo geral existem dois tipos de mercados voltados para a negociação de créditos de carbono: o Mercado Regulado e o Mercado Voluntário. No primeiro os créditos são negociados com o objetivo de reduzir as emissões de GEE dos países com metas no Protocolo de Quioto e mais recentemente, do Acordo de Paris (Martins *et al.*, 2014; Prolo *et al.*, 2021). Já no Mercado Voluntário, as negociações têm por objetivo o abatimento de metas estabelecidas voluntariamente por empresas ou governos locais, fora do Protocolo de Quioto (Martins *et al.*, 2014). E para alcançá-las eles compram créditos gerados por outras empresas e indivíduos por meio de projetos.

Em 2005 a B3 S. A - Bolsa Brasil Balcão, começou a participar do sistema de registro de atividades e projetos, (públicos e privados) voltados para a geração de créditos de carbono que são comercializados no mercado voluntário, e nesse período o Brasil estabeleceu alguns temas e projetos prioritários, como: fontes renováveis de energia, reflorestamento e estabelecimento de novas florestas, aterros sanitários e projetos agropecuários (Oliveira; Silva, 2016). Nesse mercado, o preço médio por crédito cresceu 82%, passando de U\$ 4,04 dólares por tonelada em 2021 para U\$ 7,37 em 2022 e gerando um total de U\$ 1,9 bilhões de dólares em volume negociado (Donofrio; Procton, 2023).

Já no mercado regulado, atualmente, o valor da tonelada de carbono negociado no mercado europeu, está subindo em virtude da expectativa em torno da redução dos limites para emissões de GEE por parte dos países da Europa. A perspectiva mais recente para este mercado é que em 2030 o preço dos créditos chegue a €149 por tonelada de CO₂, valor bem acima dos € 85 atuais, o que mostra uma tendência de valorização desse ativo (Machado, 2023). Já em termos de volume negociado, o crescimento do mercado em 2020 foi de 68% em relação a 2019. Em 2020 o mercado de crédito de carbono movimentou € 229 bilhões de euros pelo mundo, 90% desse valor apenas na Europa (Bethônico, 2021; Del Caro, 2021).

Iniciativas como estas mostram a importância da temática climática e devem dar novo impulso às transações com créditos de carbono. E é nesse aspecto que o manguezal pode se inserir, contribuindo para a redução da concentração de GEE na atmosfera e para a aquisição de recursos financeiros que podem por exemplo, beneficiar as comunidades que dele sobrevivem. Entretanto, nem sempre a importância múltipla desse ecossistema é compreendida pelos governos e instituições públicas como estratégia de mitigação das mudanças climáticas e de geração de renda, aumentando assim a vulnerabilidade desses ambientes que já são frágeis.

Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo calcular a quantidade de carbono armazenado na vegetação do manguezal presente na da APA do Rio Pacoti, localizada no estado do Ceará, e o potencial econômico desse carbono por meio do mercado de crédito de carbono demonstrando assim, a relevância que esse ecossistema possui tanto no aspecto ambiental quanto econômico.

2. METODOLOGIA

O presente trabalho se dividiu em 3 etapas principais: inventário fitossociológico; estimativa da biomassa florestal acima do solo e determinação do estoque de carbono na vegetação da área do estudo; e cálculo da quantidade de CO₂ estocado na APA do Rio Pacoti e seu valor no mercado de crédito de carbono.

2.1. Caracterização da Área do Estudo

O presente estudo foi realizado na Área de Proteção Ambiental (APA) do Rio Pacoti entre os municípios de Eusébio, Aquiraz e Fortaleza, estado do Ceará (Figura 1). A APA do Rio Pacoti é uma UC de Uso Sustentável instituída pelo Decreto 25.778 de 2000, com uma área de 2.914,93 ha, no qual predomina o ecossistema manguezal, com espécies de mangue vermelho, mangue preto, mangue branco e mangue-de-botão (Ceará, 2020). Além do manguezal, a APA do Rio Pacoti também é composta por outros tipos de vegetação, como os campos e arbustais praianos, as vegetações de dunas, floresta de tabuleiro, dentre outras que ocupam a planície litorânea, os tabuleiros costeiros e as planície flúvio-marinha (Moro *et al.*, 2015).

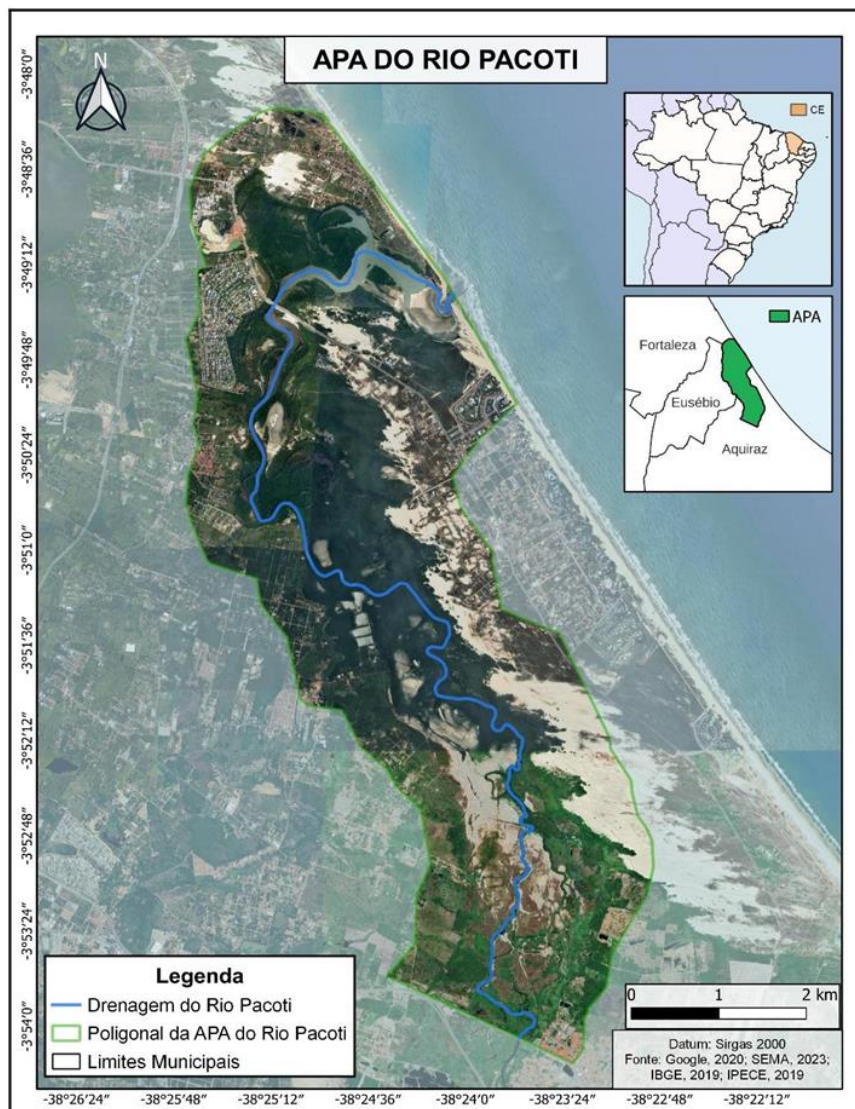


Figura 1 - Mapa de localização da Área da APA do Rio Pacoti.

Fonte: Elaborado pelo autor.

I - Estimativa da biomassa florestal da área do estudo

O inventário de biomassa é o requisito básico e a primeira etapa para a mensuração do estoque de carbono em florestas. A metodologia que foi utilizada para a estimar a biomassa arbórea acima do solo da vegetação inserida na área em estudo e seu respectivo estoque de carbono, seguiu os preceitos estabelecidos no Protocolo de Medição e Estimativa de Biomassa e Carbono Florestal (Higa *et al.*, 2014), Metodologia para Estimar o Estoque de Carbono em Diferentes Sistemas de Uso da Terra (Arevalo; Alegre; Vilcahuaman, 2002) e no Guia para Determinação de Carbono em Pequenas Propriedades Rurais (Rügnitz; Chacón; Porro, 2009).

Para a obtenção da estimativa de biomassa de uma determinada área, é necessário primeiro instalar parcelas, cuja vegetação inserida nelas são amostras para a obtenção

dos dados necessários ao estudo. Para a estimativa de biomassa viva acima do solo do ecossistema de manguezal, usamos o método de parcelas fitossociológicas (Moro; Martins, 2011). Inicialmente, foram utilizadas imagens do Google Earth, em conjunto com visitas nas áreas de estudo para o estabelecimento das parcelas. Três parcelas de 30 x 30 m (900 m² cada uma) foram estabelecidas ao longo da calha do rio Pacoti. Uma parcela de 30 x 30 m foi colocada próximo da foz, em Fortaleza, outra no médio estuário, em Eusébio, e outra no alto estuário, também no Eusébio, conforme ilustrado na Figura 2. Cada parcela foi subdividida em nove parcelas de 10 x 10 m (100 m² cada), totalizando 27 parcelas de 10 x 10 m (0,27 hectares amostrados no total).



Figura 2 - Localização das parcelas ao longo do rio Pacoti.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em virtude de questões metodológicas, para esse trabalho foi calculado o carbono presente apenas na biomassa viva arbórea acima do solo. Em cada parcela, todas as árvores com tamanho mínimo de 1,3 m de altura foram registradas (Figura 3). De cada árvore, anotamos a espécie, a altura total do indivíduo e o diâmetro na altura do peito (DAP - 1,3 m de altura). Quando o tronco principal estava dividido em ramos distintos abaixo de 1,3 m, anotamos os diâmetros de todos os ramos. Quando havia a emissão de uma raiz-escora a 1,3 m, a medição foi feita logo acima da emissão da raiz.



Figura 3 - Imagens da coleta de dados para o inventário de biomassa.

Fonte: Autores.

Com esses dados, utilizou-se equações alométricas de referência para estimar a biomassa florestal de cada espécie analisada e a partir desses resultados, foi calculado o volume total de biomassa das referidas espécies (Higa *et al.*, 2014). Para tal, empregamos equações alométricas específicas para cada espécie, conforme disposto no Quadro 1.

Quadro 1: Equações alométricas utilizadas para cada espécie.

Espécie	Equação	Referência
<i>Rhizophora mangle</i>	$427.26*(dbh^2) - 544.45*(dbh) + 994.63$	Ferreira <i>et al</i> , 2015
<i>Laguncularia racemosa</i>	$299,3(dbh^2) - 486,06(dbh) + 393,04$	Ferreira <i>et al</i> , 2015
<i>Avicennia schaueriana</i> <i>Avicennia germinans</i>	$0.2309(D)^{2.0685}$	Medeiros & Sampaio, 2008
<i>Conocapus erectus</i>	$0,168*p*(dbh)^{2,47}$	Chave <i>et al.</i> , 2005

Onde: (dbh) e (D) se referem ao diâmetro à altura do peito (DAP); ρ é a densidade da madeira (g /cm³).

II - Determinação do estoque de carbono na vegetação da área do estudo

A quantidade de carbono estocada em determinada área florestal pode ser calculada a partir da quantidade de biomassa existente naquela região (Lana, 2017). Os tecidos das plantas de um modo geral possuem cerca de 45% a 50% de carbono em sua composição, e por essa razão a fração de carbono para biomassa viva lenhosa recomendada pelo IPCC (2014) e utilizada neste trabalho para o cálculo do carbono na biomassa foi de 45,1%. Para o cálculo do carbono total utilizamos a seguinte fórmula (Rügnitz; Chacón; Porro, 2009):

$\Delta CBA = (BA * CF)$

Onde:

ΔCBA = quantidade de carbono na biomassa acima do solo inserida nas parcelas (t C);

BA = biomassa arbórea acima do solo (t M.S);

CF = fração de carbono (t C /t M.S.), que foi 0,451.

Em seguida para calcularmos o valor de carbono armazenado por hectare ($\Delta C/ha$), dividimos a quantidade de carbono na biomassa (ΔCBA) pela área total das parcelas, que no caso é de 0,27 ha, conforme descrito abaixo:

$\Delta C/ha = \Delta CBA / 0,27$

Após determinar a quantidade de carbono armazenado por hectare, multiplicamos esse valor pela área com vegetação de mangue da APA do Rio Pacoti, que segundo Ceará (2021) corresponde a 703,016 ha. Dessa forma, temos a quantidade total de carbono armazenada na vegetação da APA do Rio Pacoti (ΔTC).

$\Delta TC = \Delta C/ha * 703,016$

Por fim, convertamos esse valor de carbono em dióxido de carbono (CO₂) que é o gás de efeito estufa de referência utilizado como base dos trabalhos e estudos sobre mudança climática. Para isso, utilizou-se 3,67 como fator para a conversão de estoque de carbono (tC/ha) em dióxido de carbono (t CO₂/ha). O valor do fator de conversão é obtido por meio da razão entre a massa molecular do dióxido de carbono que é 44 e a massa atômica do carbono que é 12. Ou seja, isso significa que uma tonelada de carbono armazenado na biomassa, equivale a 3,67 toneladas de CO₂ atmosférico (Rügnitz; Chacón; Porro, 2009).

III - Cálculo do valor do carbono no mercado de crédito de carbono

O serviço ambiental que foi valorado é o de fixação de carbono que tem um impacto de longo prazo e constante, pois ele está sempre sendo prestado pelo manguezal. Após a obtenção das informações referentes a quantidade de CO₂ (t CO₂/ha) estocado pela vegetação de mangue da APA do Rio Pacoti, foi possível calcular o valor financeiro desse serviço ambiental.

Para tal, foi utilizado o método de Valoração Monetária por meio da abordagem de Preferência Revelada, no qual a técnica empregada foi a Análise de Preço de Mercado, já que o objeto valorado, no caso o carbono estocado, possui um mercado próprio no qual ele é comercializado, que é o mercado de crédito de carbono.

Para estimar o valor monetário do estoque de carbono, foi utilizado o preço médio mensal do crédito de carbono praticado na B3 S.A, já que no Brasil as operações de compra e venda de crédito de carbono são realizadas por esta entidade financeira, que realiza a venda direta do crédito ou a faz por meio de leilões eletrônicos agendados a pedido de agentes (públicos ou privados) que queiram ofertar seus créditos de carbono no mercado (Alves; Oliveira; Lopes, 2013). O preço de referência utilizado para a obtenção do valor total dos créditos de carbono da APA do Rio Pacoti, foi a média dos preços praticados no mês anterior à consolidação dos dados de estoque de carbono, que no caso foi fevereiro de 2023.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Quantidade de Biomassa, Carbono e CO₂

Ao todo foram medidos 1.119 indivíduos arbóreos nos 0,27 hectares amostrados. As plantas registradas pertenciam a cinco diferentes espécies: *Rhizophora mangle* (865

indivíduos), *Avicennia schaueriana* (44 indivíduos), *Avicennia germinans* (21 indivíduos), *Laguncularia racemosa* (147 indivíduos), e *Conocarpus erectus* (42 indivíduos), dispostas nas 3 parcelas analisadas ao longo do estuário do rio Pacoti.

Tabela 1: Quantidade de Biomassa (kg), Carbono (t) e CO₂ (t) das espécies de mangue analisadas.

Espécies	Biomassa (kg)	Carbono (t)	CO ₂ (t)
<i>Rhizophora mangle</i>	11.785,52	5,31	19,51
<i>Laguncularia racemosa</i>	2.894,72	1,31	4,79
<i>Avicennia schaueriana</i> <i>Avicennia germinans</i>	1.497,42	0,68	2,48
<i>Conocarpus erectus</i>	420,52	0,19	0,70
Total	16.598,18	7,49	27,48

Utilizando as equações específicas para cada espécie, obtivemos o valor de 16,60 toneladas de biomassa viva acima do solo (ABG) armazenadas nas 1.119 plantas analisadas. Considerando que esses 1.119 indivíduos estavam em 0,27 ha, totalizam-se 61,48 toneladas de biomassa lenhosa acima do solo por hectare. A espécie com maior quantidade de biomassa foi a *Rhizophora mangle*, que representou cerca de 71% da massa total encontrada. Isso se deu, em virtude da presença de uma quantidade maior de árvores dessa espécie (865 árvores) nas parcelas trabalhadas, que equivale a 77,30% do total de indivíduos analisados, além do grande porte que parte deles possuem.

Em relação ao total de carbono armazenado na biomassa, considerando uma fração de 45,1% de carbono, para cada kg de biomassa foi de 7,49 toneladas nas parcelas (27,73 t/ha). Convertendo esse total de carbono para CO₂, temos que 27,48 toneladas de CO₂ estão retidas na biomassa das plantas analisadas. Observa-se que os valores de carbono são proporcionais à quantidade de biomassa de cada espécie. Sendo assim, a *Rhizophora mangle* também obteve o maior estoque de carbono, correspondendo a cerca de 70% da quantidade de carbono armazenada na vegetação de manguezal analisada. Na Tabela 1 encontram-se os dados referentes aos valores de biomassa, carbono e CO₂ armazenados nas espécies mangue presentes nas parcelas inseridas na APA do Rio Pacoti. O Gráfico 1 mostra os dados de carbono estocado para cada espécie de mangue.

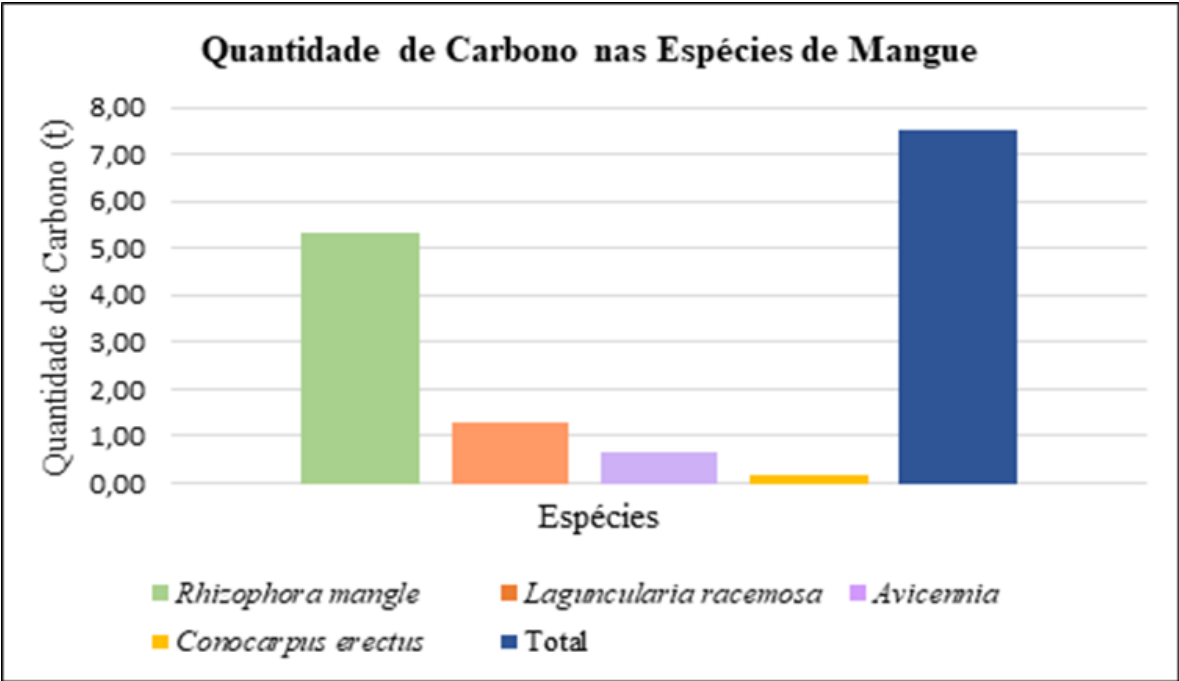


Gráfico 1 - Quantidade de carbono nas espécies de mangue da APA do Rio Pacoti.
Fonte: Gráfico elaborado pelo autor.

Em relação ao valor total de carbono e CO₂ armazenados por hectare, temos que a vegetação de manguezal da APA do Rio Pacoti contém 27,73 tC e 101,77 t CO₂ por hectare. Isso multiplicado pela área total com vegetação de mangue da APA que é de 703,016 ha, nos dá um valor de 19.494,63 tC e 71.545,93 t CO₂ que estão armazenados nas partes aéreas das árvores de mangue da APA do Rio Pacoti. Os resultados podem ser vistos no Quadro 2:

Quadro 2: Quantidade de carbono e CO₂ no mangue da APA do Rio Pacoti.

Quantidade de carbono por hectare (t/ha)	Quantidade de CO ₂ por hectare (t/ha)	Quantidade total de carbono (t)	Quantidade total de CO ₂ (t)
27,73	101,77	19.494,63	71.545,93

3.2. Valor do estoque de carbono no Mercado de Crédito de Carbono

O ativo utilizado como referência nesta análise foi o do CBIO (Crédito de Descarbonização de Biocombustíveis), criado em 2017 pelo Ministério de Minas e Energia (MME) ele faz parte do Renovabio, programa desenvolvido após a COP 21 e que tem por objetivo promover a descarbonização do setor de energia incentivando a utilização de matrizes renováveis (Anbima, 2020). Os CBIOs são transacionados na B3 que é a entidade responsável pelo ambiente de negociação desses títulos no Brasil. No Gráfico 2 temos os preços do CBIO praticados ao longo de fevereiro de 2023 (B3, 2023).

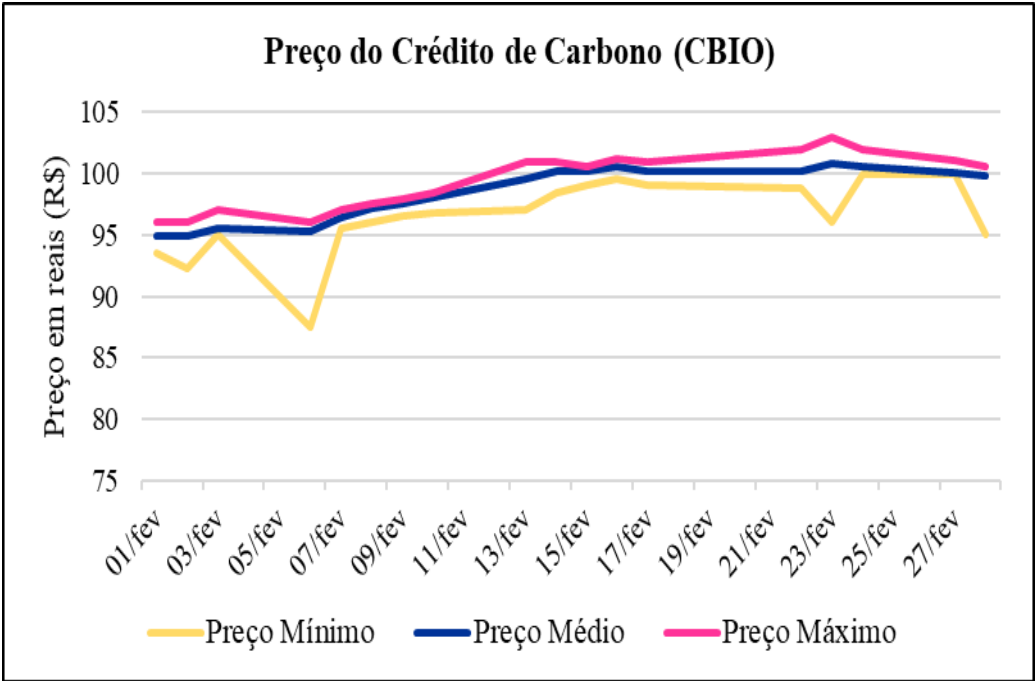


Gráfico 2 - Preço do Crédito de Carbono (CBIO).
Fonte: Gráfico elaborado pelo autor.

Após analisar os preços da tonelada de CO₂ comercializados na B3 no mês de fevereiro de 2023, temos que a média dos valores foi de R\$ 98,45 reais por crédito de carbono. Considerando, a quantidade de CO₂ que está armazenada na vegetação da APA do Rio Pacoti (71.545,93 tCO₂) e o valor do crédito de carbono obtido, temos que esse carbono estocado vale R\$ 7.043.696,80 milhões.

Caso esse crédito fosse vendido no mercado regulado europeu, considerando o preço médio praticado em fevereiro de 2023 de € 92,08 euros, o total de CO₂ armazenado na APA do Rio Pacoti valeria € 6.587.949,23 milhões de euros ou R\$ 35.574.925,86 milhões, conforme disposto no Quadro 3 abaixo:

Quadro 3 - Valor do CO₂ armazenado no mangue da APA do Rio Pacoti.

Quantidade de tCO ₂	Mercado Voluntário	Mercado Regulado Europeu
71.545,93	R\$ 7.043.696,80	R\$ 35.574.925,86*
	€ 1.304.388,29*	€ 6.587.949,23

*considerando o euro a R\$ 5,40

Fonte: B3 (2023); Investing (2023).

No final de 2023, foi aprovado na Câmara dos Deputados o Projeto de Lei nº 2148/15 que cria o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), que estabelece limites para emissões de GEE para alguns setores

econômicos e cria um mercado de venda de títulos. Nesse mercado os créditos gerados poderão ser comercializados, vendidos pelas empresas que ficaram abaixo de suas metas e comprados pelas que precisam compensar suas emissões. Além disso, o projeto prevê outras formas para a produção desses créditos e dentre elas estão os créditos gerados por APPs, por áreas de reserva legal e pelas unidades de conservação integral ou de uso sustentável com plano de manejo (Siqueira, 2023). E é nesse contexto, que entram os potenciais créditos gerados pela APA do Rio Pacoti, que após a criação do SBCE poderão ser comercializados tanto dentro do próprio país, por meio do seu mercado regulado, como no exterior através do mercado voluntário.

4. CONCLUSÃO

Determinar o valor econômico de um recurso ambiental é fazer uma estimativa do valor monetário deste bem em relação a outros bens e serviços disponíveis na economia (Motta, 1997). Saber quanto vale a natureza e inserir esse valor nos parâmetros econômicos é uma tentativa de compensar e corrigir os prejuízos ambientais oriundos do sistema de livre mercado em que boa parte da economia atual se baseia (Mattos, *et al.*, 2005). No entanto, valorar economicamente um serviço ambiental nem sempre é tarefa fácil, e apesar de existirem diversos métodos e técnicas que podem ser utilizadas para fazer a valoração monetária do meio ambiente, assim como para calcular os custos da sua degradação, ainda existem divergências quanto a classificação desses métodos, o que demonstra a complexidade da valoração ambiental (Nogueira; Medeiros; Arruda, 2000). Além disso, dar valor a algo que muitas vezes é intangível como a beleza cênica de uma paisagem, serviços ambientais, ou a importância cultural pode ser eticamente questionado por vários grupos.

Por outro lado, se bem utilizada, a valoração ambiental pode ser uma ferramenta muito eficiente para demonstrar a importância que um dado serviço prestado pela natureza possui, assim como, conscientizar uma determinada parcela da sociedade que não se interessa pelas questões ecológicas ou socioambientais, mas que enxerga e valoriza o retorno econômico que se pode obter com elas. No caso do serviço de captura e armazenamento de carbono realizado pelo mangue, o retorno econômico que essa atividade é capaz de trazer, pode ser um forte incentivo para a sua preservação, tanto por parte do poder público como da sociedade civil.

O Brasil é o segundo país em área de manguezal do mundo, possuindo cerca de 9% de todos os mangues do planeta, contudo apesar desse número, ainda faltam estudos

que identifiquem as taxas de sequestro e armazenamento de carbono dessas regiões (Rovai *et al.*, 2022). Com este trabalho foi possível demonstrar que a APA do Rio Pacoti apresenta um grande potencial como sumidouro de carbono, estocando mais de 71 mil toneladas de CO₂ somente em sua vegetação de mangue, o que equivale ao dobro das emissões de energia dos setores de comércio e serviços públicos no Ceará no ano de 2021 (Seeg, 2022).

Além disso, se considerarmos o valor monetário do serviço ambiental de armazenamento de carbono, prestado pelos manguezais, a sua importância passa a ser não apenas climática, mas também econômica, já que o valor desse carbono armazenado pode ultrapassar os R\$ 7 milhões de reais ou € 1.304.388,29 de euros. Esse recurso se fosse obtido pelo Estado, responsável pela gestão da APA, poderia ser revertido em ações de preservação e recuperação desse manguezal, produzindo assim um ciclo virtuoso de conservação ambiental. Ademais, com a publicação da Lei nº 18.427 de 2023 que institui a Política Estadual sobre Pagamento por Serviços Ambientais do Ceará, o sequestro, a conservação, a manutenção e o aumento do estoque de carbono passam a ser considerados legalmente serviços ambientais, o que permite que os proprietários de terras ocupadas por manguezais se tornem provedores desses serviços podendo receber o pagamento pela conservação e preservação dessas áreas.

Ao constatar com este estudo, que o manguezal conservado pode trazer benefícios financeiros, também procura-se contribuir para que velhos paradigmas que pregam a ideia de que a floresta só pode dar lucro se for derrubada, sejam revistos. Com isso, as atividades econômicas muitas vezes predatórias, que são desenvolvidas e estimuladas nos manguezais poderiam ser alteradas, pois, considerando o valor do estoque de carbono presente neste ambiente, o custo de oportunidade de manter o manguezal conservado seria bem maior que o de degradá-lo, estimulando assim o desenvolvimento de projetos de conservação que pudessem gerar créditos de carbono para serem posteriormente comercializados.

É importante ressaltar que a presente pesquisa analisou somente o carbono armazenado na biomassa viva arbórea da vegetação de mangue, o que representa apenas uma parcela de todo o carbono existente no manguezal, que também está presente nas raízes dessa vegetação e na própria matéria orgânica presente no solo, fatores que fazem dos manguezais grandes sumidouros de carbono.

Ademais, o estudo considerou o valor desse estoque apenas sob o ponto de vista da sua comercialização em um mercado tradicional, porém ele também poderia ser analisado

a partir dos prejuízos oriundos da degradação do manguezal e da consequente perda dos serviços ecossistêmicos produzidos por ele, ou do custo para recuperar esses serviços, o chamado custo de reposição. Outro ponto importante é que o trabalho não teve como foco desenvolver um projeto para a venda do carbono armazenado na APA do Rio Pacoti, mas demonstrar que existe um estoque de carbono na referida UC e que ele possui um valor no mercado de crédito de carbono.

Por fim, espera-se que este trabalho estimule pesquisas semelhantes nos manguezais, uma vez que o potencial para a mitigação das mudanças climáticas e obtenção de recursos financeiros, tornam essas áreas ainda mais relevantes tanto sob o ponto de vista ecológico, como social, mostrando assim que conservação ambiental e ganhos econômicos podem ser conciliados.

AGRADECIMENTOS

O(s) autor(es) agradecem à equipe do Laboratório de Biogeografia e Estudos da Vegetação (BIOVEG) do Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR), à equipe do Laboratório de Geoprocessamento e Cartografia Social (LABOCART) do Departamento de Geografia da UFC, ao PELD Costa Semiárida do Brasil-CSB (CNPq/FUNCAP Nº 442337/2020-5) e PROEX/CAPES, processo nº 0348/2021/23038.008387/2021-53: Programa de Excelência Acadêmica.

REFERÊNCIAS

ALONGI, D. M. Carbon sequestration in mangrove forests. **Carbon Management**, v. 3, n. 3, p. 313-322, 2012.

ALVES, R. S.; OLIVEIRA, L. A.; LOPES, P. L. Crédito de Carbono: o mercado de crédito de carbono no Brasil. In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 10., 2013, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: FDB, 2013.

AREVALO, L. A.; ALEGRE, J. C.; VILCAHUAMAN, L. J. M. **Metodologia para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra**. Colombo: Embrapa Florestas, 2002. 40p.

ANBIMA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS ENTIDADES DOS MERCADOS FINANCEIRO E DE CAPITAIS. **Guia de Operacionalização do CBIO**. Rio de Janeiro, 2020.

ATWOOD, T. B. *et al.* Global patterns in mangrove soil carbon stocks and losses. **Nature Climate Change**, v. 7, p. 523-528, 2017.

B3. CBIO - **Crédito de descarbonização**. Volume Negociado. São Paulo, 2023. Disponível em: <http://estatisticas.cetip.com.br>. Acesso em: 02 fev. 23.

BETHÔNICO, T. **China lança maior mercado de carbono do mundo, e Brasil fica para trás**: entenda como funciona o sistema. Folha de São Paulo. 2021. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2021/08>. Acesso em: 12 dez. 2022.

CEARÁ - SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. **Zoneamento Ecológico-Econômico da Zona Costeira do Ceará (ZEEC). Diagnóstico do Meio Físico**: Setores Ambientais Estratégicos. Fortaleza, v. 1, 2021. Disponível em: <https://www.sema.ce.gov.br/gerenciamento-costeiro/zoneamento-ecologico-economico-da-zona-costeira-zeec/documentos-previos-para-consulta-publica-do-zeec/>. Acesso em: 20 jan. 2023.

CEARÁ - SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. **Unidades de Conservação do Estado do Ceará**. Fortaleza: 2020. Disponível em: <https://www.sema.ce.gov.br/wp-content/uploads.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2021.

CHAVE, J. *et al.* Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia**, v. 145, p. 87-99, 2005.

DEL CARO, L. **Apostas em crédito de carbono animam o mercado**: Mercado europeu cresceu 68% em 2020 sobre 2019, com transações de US\$ 252 bilhões. O Valor. São Paulo. 2021. Disponível em: <https://valor.globo.com/publicacoes/suplemento.ghtml>. Acesso em: 20 jan. 2023.

DINILHUDA, A. *et al.* Potentials of mangrove ecosystem as storage of carbon for global warming mitigation. **Biodiversitas**, v. 21, n. 11, p. 5353-5362, 2020.

DONOFRIO, S.; PROCTON, A. **Paying for Quality**: State of the Voluntary Carbon Markets 2023. Washington: Forest Trends, 2023.

ESTRADA, G. C. D., *et al.* Allometric models for above-ground biomass estimation of the mangrove *Avicennia schaueriana*. **Hydrobiologia**, v. 734, p. 171-185, 2014.

FERREIRA, A. C., *et al.* Restoration versus natural regeneration in a neotropical mangrove: effects on plant biomass and crab communities. **Ocean & Coastal Management**, v. 110, p. 38-45, 2015.

GRASSO, M.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y. Economic valuation of mangrove ecosystems. In: MAY, P. H. (Org.) **Natural resource valuation and policy in Brazil**: methods and cases. Nova York: Columbia Univ. Press, 1999.

HIGA, R. C. V. *et al.* **Protocolo de medição e estimativa de biomassa e carbono florestal**. Colombo: Embrapa Florestas, 2014. 68p.

ICMBio - INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Atlas dos Manguezais do Brasil**. Brasília: ICMBio, 2018. 179p.

INVESTING. Crédito Carbono Futuros - **Dados Históricos**. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>. Acesso em: 27 fev. 2023.

LANA, M. D. **Carbono em vegetação lenhosa da caatinga e viabilidade econômica de manejo**. 2017. 142 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2017.

MACIEL, C. V. *et al.* Crédito de Carbono: comercialização e contabilização a partir de projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. **Revista de Informação Contábil**, v. 3, n. 1, p. 89-112, 2009.

MACHADO, N. **Mercados regulados de carbono devem atingir US\$ 800 bi em 2023**: O valor total dos principais mercados regulados de carbono deve ultrapassar US\$ 800 bilhões este ano, calcula BNEF. Agência EPBR. 2023. Disponível em: <https://epbr.com.br/mercados-regulados-de-carbono-devem-atingir-us-800-bi-em-2023/>. Acesso em: 20 nov. 2023.

MARTINS, L. B. B. *et al.* Processo de geração e negociação e forma de contabilização de créditos de carbono: um estudo de caso. **Custos e @gronegócio on line**, v. 10, n. 2, p. 205-228, 2014.

MARTINS, O. S. **Determinação do potencial de sequestro de carbono na recuperação de matas ciliares na região de São Carlos – SP**. 2004. 161 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

MATTOS, K. M. C. *et al.* Valoração econômica do meio ambiente dentro do contexto do desenvolvimento sustentável. **Revista Gestão Industrial**, v. 1, n. 2, p. 105-117, 2005.

MEDEIROS, T. C. C.; SAMPAIO, E. V. S. B. Allometry of above-ground biomasses in mangrove species in Itamaracá, Pernambuco, Brazil. **Wetlands Ecol Manage**, v. 16, p. 323-330, 2008.

MORO, M. F.; MARTINS, F. R. Métodos de levantamento do componente arbóreoarbusivo. In: FELFILI, J. M., *et al.* **Fitossociologia no Brasil: métodos e estudos de caso**. Viçosa: UFV, 2011.

MORO, M. F. *et al.* Vegetação, unidades fitoecológicas e diversidade paisagística do estado do Ceará. **Rodriguésia**, v. 66, n. 3, p. 717-743, 2015.

MOTTA, R. S. **Manual para valoração econômica de recursos ambientais**. Rio de Janeiro: IPEA/MMA/PNUD/CNPq, 1997. 210p.

NOGUEIRA, J. M.; MEDEIROS, M. A. A.; ARRUDA, F. S. T. Valoração econômica do meio ambiente: ciência ou empiricismo? **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 17, n. 2, p. 81-115, 2000.

NOGUEIRA, B. G. S. *et al.* **Introdução às Unidades de Conservação**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: <https://conservation.ufpr.br/wp-content/uploads/2018>. Acesso em: 24 nov. 2021.

OLIVEIRA, M. *et al.* Biomassa e estoques de carbono em diferentes sistemas florestais no sul do Brasil. **Perspectiva**, v. 40, n. 149, p. 9-20, 2016.

OLIVEIRA, M. R.; SILVA, G. H. Determinação da taxa de crescimento das cotações do volume de crédito de carbono praticado no Brasil. **Revista de Administração de Roraima**, Boa Vista, v. 6 n. 2, p. 415-429, 2016.

IPCC - PAINEL INTERGOVERNAMENTAL PARA AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. 2013. Wetlands: IPCC, 2014.

PROLO, C. D. *et al.* **Explicando os mercados de carbono na era do Acordo de Paris**. Rio de Janeiro: Instituto Clima e Sociedade, 2021. Disponível em: <https://laclima.org/files/explicando-mercados-rev.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2023.

ROVAI, A. S. *et al.* Brazilian Mangroves: Blue Carbon Hotspots of National and Global Relevance to Natural Climate Solutions. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 4, 2022.

ROVAI, A. S. *et al.* **Scaling mangrove above-ground biomass from site-level to continental-scale**. Global Ecology and Biogeography, 2015.

RÜGNITZ, M. T.; CHACÓN, M. L.; PORRO R. **Guia para determinação de carbono em pequenas propriedades rurais**. Belém: Centro Mundial Agroflorestal, 2009.

SANTOS, I. R.; BELTRÃO, N. E. S.; TRINDADE, A. R. Carbono “Azul” nos Manguezais Amazônicos: conservação e valoração econômica. **Revista Iberoamericana de Economia Ecológica**, v. 31, n. 1, p. 18-28, 2019.

SILVEIRA, C. S.; OLIVEIRA, L. Análise do mercado de carbono no Brasil: histórico e desenvolvimento. **Novos Cadernos NAEA**, Belém, v. 24, n. 3, p. 11-31, 2021.

SIQUEIRA, C. **Câmara aprova projeto que regulamenta o mercado de carbono no Brasil**. Agência Câmara de Notícias. 2023. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/1029046-camara-aprova-projeto-que-regulamenta-o-mercado-de-carbono-no-brasil-acompanhe/>. Acesso em: 05 jan. 2024.

SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG). **Observatório do Clima**. 2022. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br>. Acesso em: 04 mar. 2023.

SOUZA, A. L. R.; ALVAREZ, G.; ANDRADE, J. C. S. Mercado Regulado de Carbono no Brasil: um ensaio sobre divergências contábil e tributária dos créditos de carbono. **Organizações & Sociedade**, v. 20, n. 67, p. 675-697, 2013.

SPALDING, M.; KAINUMA, M.; COLLINS, L. **World atlas of mangroves**. London: Earthscan/James and James, 2010.

Recebido: 05.12.2023

Aceito: 08.03.2024