

## **ESTIMATIVAS DOS ESTOQUE DE CARBONO EM ECOSISTEMA DE MANGUEZAL NO BRASIL: UMA REVISÃO**

Manoel **Mariano Neto**<sup>1</sup>, Janaína Barbosa **da Silva**<sup>2</sup>

(1 – Universidade Federal de Alagoas (UFAL), [marianop.paiva2@gmail.com](mailto:marianop.paiva2@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-3106-1012>; 2 – Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), [janainasimov@yahoo.com.br](mailto:janainasimov@yahoo.com.br), <https://orcid.org/0000-0001-6366-2165>)

**Resumo:** Esta pesquisa objetivou compreender a formação dos estoques de carbono no ecossistema de manguezal no Brasil, de modo a elucidar os fatores intervenientes, de origem biótica, abiótica e antrópica. Para tanto, realizou-se uma revisão de literatura que abordou 113 artigos científicos, dos quais 21 estudavam áreas de mangues brasileiros. O estoque global estimado pela literatura varia entre 4,19 Pg C e 6,6 Pg C e o valor médio calculado corresponde a 5,34 Pg C. Ao tratar das especificidades dos estoques presentes no Brasil, os valores registrados variam entre 358,79 Mg C/ha e 1.851 Mg C/ha, de modo que o estoque médio corresponde a 709,36 Mg C/ha. Os principais fatores bióticos que condicionam os estoques de carbono são, a composição estrutural da vegetação, os compartimentos vegetais, a diversidade de espécies, as características fisiográficas e as condições de manejo. Quanto aos fatores abióticos, destaca-se a salinidade, o gradiente topográfico, a granulometria do sedimento, a profundidade do solo, a concentração de nutrientes e fatores bioclimáticos. Ademais, cita-se as mudanças de uso e ocupação do solo.

**Palavras-chave:** Carbono azul, Serviços ecossistêmicos, Sensoriamento remoto.

### **ESTIMATES OF CARBON STOCKS IN A MANGROVE ECOSYSTEM IN BRAZIL: A REVIEW**

**Abstract:** This work aimed to understand the formation of carbon stocks in the mangrove ecosystem in Brazil, to elucidate the intervening factors, of biotic, abiotic and anthropic origin. To this end, a systematic review was carried out covering 113 scientific articles, 21 of which studied Brazilian mangrove areas. The global stock estimated by the literature varies between

4.19 Pg C and 6.6 Pg C and the average value calculated corresponds to 5.34 Pg C. When dealing with the specificities of the stocks present in Brazil, the values recorded vary between 358.79 Mg C/ha and 1,851 Mg C/ha, so that the average stock corresponds to 709.36 Mg C/ha. The main biotic factors that condition carbon stocks are the structural composition of vegetation, plant compartments, species diversity, physiographic characteristics and management conditions. As for abiotic factors, salinity and topographic gradient, sediment granulometry and soil depth, nutrient concentration and bioclimatic factors stand out. Furthermore, changes in land use and occupation.

**Keywords:** Blue carbon, Ecosystem services, Remote sensing.

## **ESTIMACIONES DE RESERVAS DE CARBONO EN UN ECOSISTEMA DE MANGLARES EN BRASIL: UNA REVISIÓN**

**Resumen:** Esta investigación tiene como objetivo comprender la formación de reservas de carbono en el ecosistema de manglar en Brasil, con el fin de dilucidar los factores intervinientes, de origen biótico, abiótico y antrópico. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica que abordó 113 artículos científicos, de los cuales 21 estudiaron áreas de manglares brasileños. El stock global estimado por la literatura varía entre 4,19 Pg C y 6,6 Pg C, por lo que el valor medio calculado corresponde a 5,34 Pg C. 358,79 Mg C/ha y 1.851 Mg C/ha y el stock medio corresponde a 709,36 Mg C/ha. Los principales factores bióticos que condicionan las reservas de carbono son la composición estructural de la vegetación, los compartimentos vegetales, la diversidad de especies, las características fisiográficas y las condiciones de manejo. En cuanto a los factores abióticos, destacan la salinidad, el gradiente topográfico, la granulometría de los sedimentos y la profundidad del suelo, la concentración de nutrientes y los factores bioclimáticos. Además, se mencionan los cambios en el uso y ocupación del suelo.

**Palabras clave:** Carbono azul, Servicios ecosistémicos, Teledetección.

### **Introdução**

Os manguezais são encontrados em substratos não-consolidados, nas zonas entre marés das regiões costeiras tropicais, subtropicais e temperadas, presentes em 118 países, distribuídos em todos os continentes. A vegetação de mangue pode suportar um amplo gradiente de salinidade, de águas doces a hipersalinas. Todavia, a ocorrência em zonas continentais é limitada, devido à competição estabelecida com outras espécies vegetais adaptadas ao ambiente terrestre (Estrada et al., 2017; Romañach et al., 2018).

Trata-se de um ecossistema reconhecido mundialmente pela ampla diversidade de serviços ecossistêmicos ofertados, de modo que desempenha funções ecológicas, econômicas, culturais e sociais (Estrada et al., 2017). Os serviços ecossistêmicos prestados incluem a formação de *habitats* para anfíbios, répteis, peixes, crustáceos e pequenos mamíferos; a consolidação de zonas para reprodução de espécies marinhas; a filtragem e retenção de nutrientes e poluentes; e a subsistência de comunidades tradicionais, através da disponibilidade de recursos pesqueiros, madeira e outros produtos florestais não-madeireiros (Van der Stocken et al., 2019; Mitra, 2020).

Os manguezais também são responsáveis por controlar o avanço de processos erosivos nas zonas costeiras; protegem a faixa litorânea da energia dos ventos e das ondas; acumulam grandes volumes de carbono, de modo a reduzir a concentração dos gases do efeito estufa na atmosfera; e permitem uma variedade de usos recreativos e culturais (Kelleway et al., 2017; Pham et al., 2019).

Nos últimos anos, nota-se, que a comunidade científica tem dado uma atenção especial à contribuição dos manguezais para regulação climática global. Esse fato é decorrente da alta produtividade e das condições anóxicas do solo, que reduzem a taxa de decomposição de matéria orgânica, resultando em uma alta capacidade de sequestro e armazenamento de carbono, que chega a ser de três a cinco vezes superior a outros ecossistemas vegetados (Friess et al., 2020).

Dada essa particularidade, as florestas de mangue, assim como, outros ecossistemas situados em áreas úmidas, a exemplo dos pântanos salgados e as áreas povoadas por ervas marinhas, são descritas como ecossistemas de “carbono azul”. Trata-se de sistemas valiosos e gerenciáveis, entretanto, claramente vulneráveis e frágeis, face às ações antrópicas (Thorhaug et al., 2020).

Estima-se que a vegetação de mangue ocupe uma área de aproximadamente 8.349.500 hectares em todo o Planeta (Hamilton & Casey, 2016). Contudo, 67% da vegetação de mangue global foi perdida (Yu et al., 2020). O Brasil, possui a segunda maior reserva florestal de mangue, com uma área total de 1.400.000 hectares e um percentual de supressão corresponde a 40% (ICMBio, 2018).

A perda global de manguezais está associada à expansão das atividades humanas na zona costeira. Dentre os aspectos específicos, cita-se, a urbanização, a agricultura, a carcinicultura, a modificações das condições hidrodinâmicas dos rios e a exploração da madeira (Bulmer et al., 2020; Eddy et al., 2021; Pérez et al., 2018; Sanderman et al., 2018). Ressalta-se

ainda que a remoção da vegetação de mangue libera quantitativos substanciais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para a atmosfera, fato que contribui para o agravamento das condições climáticas (Hamilton & Friess, 2018).

Essa discussão torna-se especialmente relevante para o Brasil, uma vez que, nas últimas três décadas, aproximadamente 50 mil hectares de mangue foram destruídos (Romañach et al., 2018). É notório o esforço realizado pelas comunidades tradicionais, instituições acadêmicas, organizações governamentais e não-governamentais e agências de fomento, em prol da conservação. Diante disso, o ICMBio (2018) mostra que o país possui 120 unidades de conservação com manguezais no interior, que cobrem uma área de 1.211.444 hectares, o que representa 87% de todo ecossistema. No entanto, ainda há uma ausência de políticas de conservação e boas práticas de manejo.

Assim, este trabalho objetivou compreender a formação dos estoques de carbono no ecossistema de manguezal no Brasil, de modo a elucidar os fatores intervenientes, de origem biótica, abiótica e antrópica. Dessa maneira, em um primeiro momento discute-se as estimativas de estoques em escala global. Posteriormente, analisa-se os principais resultados obtidos para os manguezais situados no Brasil, com ênfase nos fatores que condicionam a formação dos reservatórios.

## **Metodologia**

A revisão de literatura baseou-se exclusivamente em artigos publicados em periódicos, sendo desconsideradas teses, dissertações, artigos publicados em anais de eventos e em outros meios de divulgação. As buscas foram realizadas a partir das seguintes combinações de palavras-chave, consorciadas à palavra “*Mangrove*”: “*Carbon stock*”, “*Carbon sequestration*” e “*Blue carbon*”. Nesta etapa utilizou a plataforma da *Web of Science*. A busca foi realizada em 21 de janeiro de 2022, foi utilizado todo o intervalo temporal disponibilizado pelas bases citadas, até o ano de 2021. Os idiomas empregados foram o inglês, português e espanhol.

A pesquisa resultou em 1.375 artigos, inicialmente. Foram removidos os títulos repetidos, de modo que o novo quantitativo correspondeu a 958 trabalhos, dos quais 334 foram selecionados após a leitura preliminar dos títulos e do resumo. Após a leitura completa, foram selecionados 113 manuscritos, dentre eles, 21 abordavam manguezais no Brasil. Nessa etapa, foram eliminados os trabalhos que abordavam o estoque de carbono exclusivamente em outros ecossistemas, assim como, aqueles que tratavam exclusivamente de créditos de carbono.

Realizou-se a segregação dos artigos que apresentavam estimativas para os estoques de carbono em manguezais em escala global, o que possibilitou compreender como os montantes se distribuem espacialmente e por compartimento ambiental (solo e biomassa). No caso dos trabalhos que abordam o Brasil, foram analisadas as localidades estudadas, os estoques descritos, os métodos empregados e os fatores condicionantes para o armazenamento do carbono.

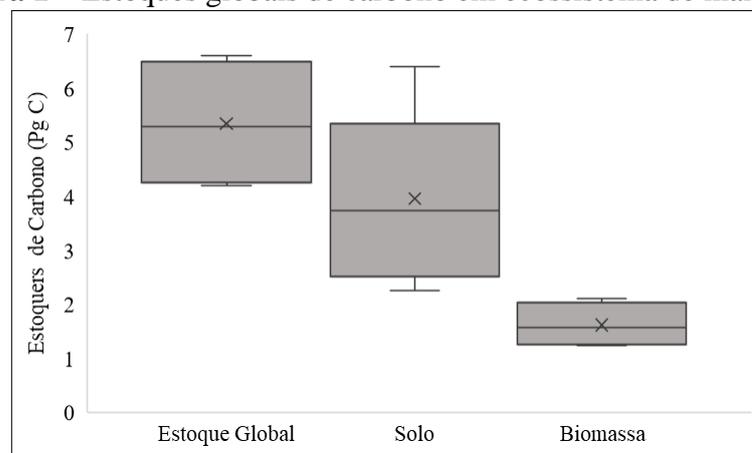
## Resultados e discussão

### *Estoques globais de carbono*

O carbono azul corresponde ao carbono armazenado em ecossistemas costeiros, como, pântanos salgados, prados de ervas marinhas e manguezais. O armazenamento ocorre no solo, sob a forma de sedimentos e matéria orgânica em decomposição (raízes mortas e serapilheira), na biomassa acima (caules, galhos e folhas) e abaixo do solo (raízes) (Howard et al., 2014).

Ao analisar as estimativas de estoque de carbono em escala global, considerando as frações presentes no solo e na biomassa, percebeu-se que os valores registrados variam entre 4,19 Pg e 6,6 Pg, de modo que o valor médio corresponde a 5,34 Pg (Figura 1). Alongi (2020) apresenta um valor correspondente a 6,17 Pg, enquanto Siikamäki et al. (2013) afirmam que o quantitativo é de 6,5 Pg. Os menores valores foram estimados por Hamilton e Friess (2018), e Atwood et al. (2017), correspondendo a 4,19 Pg e 4,4 Pg, respectivamente.

**Figura 1** – Estoques globais de carbono em ecossistema de manguezal



Fonte: Atwood et al. (2017); Hamilton e Friess (2018); Jardine e Siikamäki (2014); Rovai et al. (2018); Sanderman et al. (2018); Siikamäki et al. (2013). Elaborado pelos autores (2022).

Em escala continental, verifica-se que os maiores valores estão dispostos na Oceania (1.141,2 Mg C/ha) e no Sudeste Asiático (1.016,5 Mg C/ha), seguidos pelas Américas (850,9 Mg C/ha) e África Ocidental (800,7 Mg C/ha) (Boone Kauffman et al., 2020).

Ao tratar dos compartimentos isoladamente, verifica-se que, os maiores depósitos estão presentes no solo. Siikamäki et al. (2013) estimam que o montante aprisionado no primeiro metro de profundidade é de aproximadamente 4,5 Pg. Hamilton e Friess (2018), assim como, Rovai et al. (2018), trazem valores significativamente inferiores, correspondentes a  $2,96 \pm 0,53$  Pg e 2,26 Pg. Tais quantitativos também são próximos ao que foi calculado por Atwood et al. (2017), de 2,6 Pg.

Os maiores valores foram estimados por Jardine e Siikamäki (2014), equivalente a  $5,00 \pm 0,94$  Pg, e por Sanderman et al. (2018), cujos montantes registrados correspondem a 6,4 Pg, para o primeiro metro, e 12,6 Pg para os dois primeiros metros de profundidade. Os principais fatores que justificam as discrepâncias entre os valores estimados para o estoque de carbono em escala global são as diferenças dos métodos utilizados e os dados empregados para fundamentar os modelos.

Também foram observadas amplas variações na taxa média global para o primeiro metro (Tabela 1). Ao considerar os dois primeiros metros de profundidade, Adame et al. (2021) estimam que o valor corresponde a  $646,7 \pm 150,6$  (408,6 – 975,9) Mg C/ha. Do montante global de carbono retido no solo, aproximadamente 80,5% estão distribuídos em apenas 20 países, dos quais destacam-se a Indonésia, com 20,5% ( $1,02 \pm 0,03$  Pg C), quantitativo associado às maiores reservas de mangue do mundo; seguido pelo Brasil, com 7,4% ( $0,37 \pm 0,02$  Pg C); e a Austrália, com 6,5% ( $0,33 \pm 0,02$  Pg C) (Jardine & Siikamäki, 2014).

**Tabela 1** – Taxas globais das concentrações médias de carbono estimadas para o primeiro metro de profundidade de solo

| <b>Autores</b>               | <b>Taxas de concentração médias de carbono</b> |
|------------------------------|--|
| Sanderman et al. (2018)      | 361 (94 – 628) Mg C/ha                         |
| Jardine e Siikamäki (2014)   | $369 \pm 6,8$ Mg C/há                          |
| Adame et al. (2021)          | $331,3 \pm 74,9$ (207,4 – 497,8) Mg C/ha       |
| Atwood et al. (2017)         | $283 \pm 193$ Mg C/há                          |
| Boone e Bhomia (2017)        | 885 Mg C/há                                    |
| Boone Kauffman et al. (2020) | $741 \pm 30$ MgC/há                            |

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Quanto ao estoque da biomassa, é substancialmente menor e a média dos valores analisados corresponde a 1,61 Pg (Tabela 2). A taxa média global é de  $101,2 \pm 93,5$  ( $9,9 - 466,0$ ) Mg C/ha (Adame et al., 2021).

Ao analisar a disposição, 66,67% estão distribuídas na fração acima do solo e 33,33% na biomassa abaixo do solo (Hamilton & Friess, 2018). Espacialmente, de maneira análoga ao que ocorre com o estoque presente no solo, a Indonésia armazena 26,52% do carbono da biomassa, seguida pelo Brasil (8,71%) e Austrália (5,53%) (Tang et al., 2018). Juntos, esses países comportam aproximadamente 40,76% dos estoques aprisionados na biomassa.

**Tabela 2** – Estoques globais de carbono na biomassa

| Autores                      | Estoques globais para a biomassa |
|------------------------------|----------------------------------|
| Tang et al. (2018)           | 1,32 Pg                          |
| Siikamäki et al. (2013)      | 2,1 Pg                           |
| Hamilton e Friess (2018)     | $1,23 \pm 0,06$ Pg               |
| Atwood et al. (2017)         | 1,8 Pg                           |
| Boone e Bhomia (2017)        | 885 Mg C/ha                      |
| Boone Kauffman et al. (2020) | $741 \pm 30$ MgC/ha              |

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

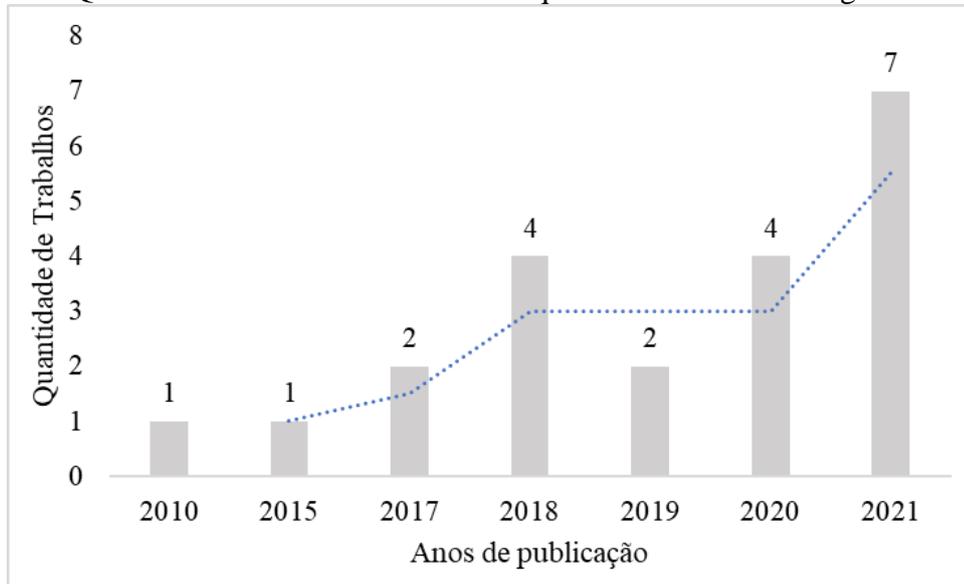
#### *Estimativas de estoque de carbono em manguezais do Brasil*

Os trabalhos que abordam a quantificação ou a estimativa dos estoques de carbono no Brasil são consideravelmente recentes, em sua maioria, publicados entre 2018 e 2021 (Figura 2). O registro mais antigo encontrado é de 2010, em 2018 e em 2020 foram publicados 4 artigos (19,05%) em cada ano. O ano com maior quantidade de estudos corresponde a 2021, com 7 trabalhos (33,34%). A média móvel indica que há tendência de aumento no quantitativo de trabalhos publicados anualmente.

Ao analisar a distribuição espacial, percebe-se que há lacunas, uma vez que, apenas oito estados são citados em publicações acerca do estoque de carbono em ecossistema de manguezal. Pará e Rio de Janeiro juntos concentram aproximadamente 43% (9) dos artigos, seguidos por São Paulo e Ceará, que juntos contabilizam 28% (6), Espírito Santo e Bahia registraram 4 pesquisas (19%), enquanto o Rio Grande do Norte e o Piauí possuem 2 estudos, um em cada Estado (9,5%) (Figura 3).

Dessa maneira, evidencia-se a necessidade de maiores esforços para alcançar a construção de um inventário do estoque de carbono em ecossistemas de mangues em nível nacional, especialmente, nas áreas que ainda não apresentam estudos, como é o caso dos estados do Amapá, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe Paraná e Santa Catarina.

**Figura 2** – Quantidades de trabalhos sobre estoque de carbono em manguezais no Brasil



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

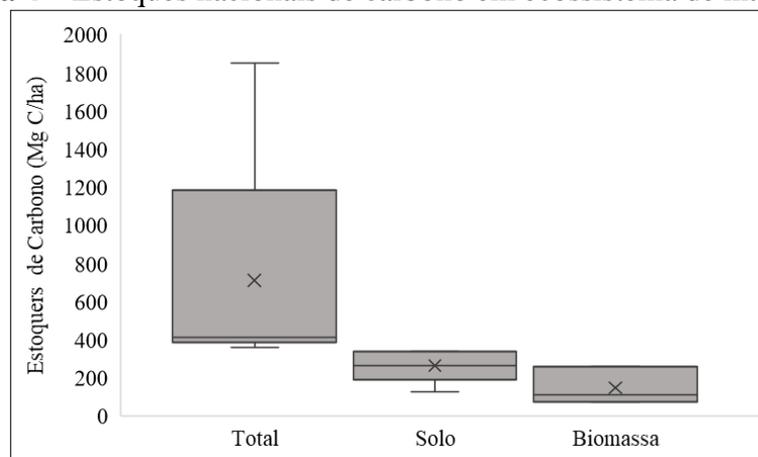
**Figura 3** – Distribuição espacial dos estudos sobre estoque de carbono em manguezais no Brasil



Fonte: IBGE (2019), IBAMA (2019), *Google Terrain*. Elaborado pelos autores (2022).

As estimativas de carbono em escala nacional variaram entre 358,79 Mg C/ha e 1.851 Mg C/ha, de modo, que o estoque médio corresponde a 709,36 Mg C/ha (Figura 4). Kauffman et al. (2018) registraram estoque médio de 511 Mg C/ha em manguezais amazônicos, com uma variação de variação de 362 Mg C/ha a 746 Mg C/ha. Já nos mangues do sistema estuarino Piraquê Açú-Mirim, no Espírito Santo, os estoques de carbono variaram de 1474 Mg C/ha a 1904 Mg C/ha (Gomes et al., 2021).

**Figura 4** – Estoques nacionais de carbono em ecossistema de manguezal



Fonte: (Gomes et al. (2021), Hatje et al. (2021), Kauffman et al. (2018), Kauffman et al. (2018), Leite et al. (2021), Pérez et al. (2018), Portela et al. (2020), Rovai et al. (2021), Santos-Andrade et al. (2021), Virgulino et al. (2020). Elaborado pelos autores (2022).

Outros casos analisados dizem respeito ao sistema estuarino da Lagoa da Cananéia-Iguapé, no estado de São Paulo, onde o estoque médio é de 358,79 Mg C/ha (Rovai et al., 2021); e os manguezais dos estuários dos rios Jaguaribe e Acaraú, no Ceará, que constituem uma paisagem semiárida tem-se 413 Mg C/ha (Kauffman et al., 2018).

Quanto às reservas de carbono por compartimento, o solo apresenta os maiores estoques, quando em comparação à biomassa. Os valores analisados variaram entre 126,34 Mg C/ha e 336,30 Mg C/ha, com valor médio de 261,79 Mg C/ha (Tabela 3).

**Tabela 3** – Estoques de carbono no solo, no Brasil

| Localidades                        | Autores                      | Estoques de carbono |
|------------------------------------|------------------------------|---------------------|
| Baía de Todos os Santos – Bahia    | Hatje et al. (2021)          | 263 Mg C/ha         |
|                                    | Santos-Andrade et al. (2021) | 336 Mg C/ha         |
| Baía da Guanabara – Rio de Janeiro | Pérez et al. (2018)          | 126,34 Mg C/ha      |
| Lagoa da Cananéia – São Paulo      | Rovai et al. (2021)          | 248,79 Mg C/ha      |
| Rios Jaguaribe e Acaraú – Ceará    | Kauffman et al. (2018)       | 334,53 Mg C/ha      |

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Os estoques de carbono retidos na biomassa, por sua vez, são substancialmente menores, variando entre 72,93 Mg C/ha e 258,34 Mg C/ha, com uma média de 147,09 Mg C/ha. O menor e o maior valor foram registrados por Virgulino et al. (2020), na Península de Ajuruteua, Pará, e Portela et al. (2020), no Delta do Rio Parnaíba, Piauí, respectivamente. Rovai et al. (2021) também quantificaram o estoque na biomassa, na Lagoa da Cananéia, equivalente a 110 Mg C/ha.

Considerando os subcompartimentos da biomassa, isto é, as frações acima e abaixo do solo, os estoques médios são de 80 Mg C/ha e 47,32 Mg C/ha, respectivamente. Já os estoques aprisionados na biomassa abaixo do solo, nas raízes da vegetação de mangue, apresentam uma média de 70,18 Mg C/ha. Os teores de carbono acima do solo quantificados no manguezal do Rio Jaguaribe, em Natal, Rio Grande do Norte foram de 43,67 Mg C/ha (A. C. Ferreira et al., 2019); nos mangues do Pará, os valores registrados variam entre 38,98 Mg C/ha e 159 Mg C/ha (Kauffman et al., 2018; Virgulino et al., 2020); no Espírito Santo, Gomes et al. (2021) e Leite et al. (2021) quantificaram 129 Mg C/ha e 41,4 Mg C/ha, respectivamente; e no Ceará, o valor obtido foi de 70 Mg C/ha (Kauffman et al., 2018).

Já os estoques na biomassa abaixo do solo, nas raízes da vegetação de mangue, apresentam uma média de 70,18 Mg C/ha. Virgulino et al. (2020) quantificaram 35,5 Mg C/ha e Santos et al. (2017)  $104,41 \pm 20,73$  Mg C/ha, na Baía de Sepetiba, Rio de Janeiro.

#### *Aspectos intervenientes nos estoques de carbono*

Acerca dos fatores que condicionam os estoques de carbono no ecossistema de manguezal, citados nos estudos desenvolvidos no Brasil, estes podem ser agrupados em três categorias distintas: bióticos, abióticos e antrópicos (Quadro 1).

**Quadro 1** – Aspectos intervenientes nos estoques de carbono em manguezal

| <b>Categoria</b> | <b>Aspectos</b>  |
|------------------|--|
| Biótica          | Estrutura da vegetação, compartimento vegetal, diversidade de espécies, características fisiográficas e condições de manejo. |
| Abiótica         | Salinidade, topografia, granulometria do sedimento; profundidade do solo, concentração de nutrientes e clima.                |
| Antrópica        | Mudança de uso e ocupação do solo e poluição.  |

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Em relação aos aspectos de ordem biótica, dar-se destaque às características estruturais, especialmente à altura da árvore e ao diâmetro à altura do peito (DAP), de modo que ambos os parâmetros, estabelecem uma relação de proporcionalidade com os estoques de carbono na

biomassa. Estudos realizados no estuário do Rio Piraquê-Açu, no Espírito Santo, estimam que o carbono acima do solo corresponde a 1,46 t C/ha, sendo esse baixo quantitativo associado às condições estruturais da vegetação, uma vez que, a média da altura das árvores foi de apenas 4,1 m com DAP de 3,8 cm (da Motta Portillo et al., 2017).

A diversidade de espécies influencia diretamente na formação dos estoques, dada a predominância de espécies em detrimento às demais no ecossistema e, ao teor de carbono associado a cada espécie. Ainda no Piraquê-Açu, a *L. racemosa* (0,89 t C/ha) foi a espécie com a maior biomassa e carbono, seguido por *R. mangle* (0,34 t C/ha) e *A. schaueriana* (0,23 t C/ha) (da Motta Portillo et al., 2017). Acerca do teor de carbono, Rodrigues et al. (2015) mostram que o percentual médio para a *A. schaueriana* e *L. racemosa* é de 44%, enquanto a *R. Mangle* apresenta 44,1%.

Acerca dessa questão, nota-se que diversidade também determina os estoques no solo, visto que, florestas mistas apresentam maiores estoques nesse compartimento quando em comparação a bosques monoespecíficos (Tinh et al., 2020). Esse aspecto está relacionado à maior taxa de produtividade primária por área, resultando em uma maior produção de serrapilheira e, por consequência, na formação do carbono autóctone.

Quando às condições fisiográficas, nota-se que, as áreas de franja tendem a apresentar maiores reservas de carbono quando em comparação com as áreas de interior. No sistema Lagunar da Cananéia, foi observado que os estoques acima do solo, em áreas de franja ( $75,31 \pm 7,46$  Mg C/ha) representavam mais que o dobro dos valores quantificados nas zonas interioranas ( $30,17 \pm 2,95$  Mg C/ha), aspecto relacionado com a predominância de árvores com DAP maior que 10 cm em manguezais de franja, enquanto nos locais interiores os DAP variavam entre 2,5 cm e 10 cm. Nesta mesma localidade, o estoque de carbono no solo foi estimado em  $81,95 \pm 8,11$  Mg C/ha e  $32,83 \pm 3,21$  Mg C/ha, para manguezais de franja e interior, respectivamente (Rovai et al., 2021).

Estrada et al. (2017) afirmam se tratar de um padrão localmente observado nos manguezais da Índia, do Pacífico Ocidental e Oriental, e do Atlântico. Essa diferença revela a importância de fatores locais, como as inundações por maré, entrada de água doce e disponibilidade de nutrientes para a determinação do estoque de carbono.

Os compartimentos vegetais, isto é, as partes lenhosas, como troncos e galhos; o sistema radicular; e as partes verdes (folhas e partes reprodutivas), também são importantes para determinar os teores de carbono, dada a diferença significativa existentes entre as concentrações de carbono (Tabela 4). Para as espécies amplamente distribuídas nos mangues brasileiros, a

contração de carbono nas partes da árvore variou entre 34,1% e 47,3%, com média geral de  $43,4 \pm 2,0\%$  (Rodrigues et al., 2015).

Estudos desenvolvidos em outras regiões demonstraram resultados semelhantes para espécies distintas. Observou-se que as concentrações de carbono variaram significativamente de acordo com as partes da árvore (folhas, galhos, caule e cascas), para a espécie *Excoecaria agallocha*, de modo que a maior concentração (45,95% – 48,60%) de carbono foi observada nas partes lenhosas (Hossain et al., 2015).

**Tabela 4** – Concentrações de carbono por compartimento vegetal

| Espécies                                   | Compartimentos  | Concentrações      |
|--|-----------------|--------------------|
| <i>A. schaueriana</i> e <i>L. racemosa</i> | Raízes          | $42,6\% \pm 2,6\%$ |
| <i>R. mangle</i>                           |                 | $40,0\% \pm 2,1\%$ |
| Todas as espécies                          | Partes lenhosas | $44,1\% \pm 1,4\%$ |
| <i>A. schaueriana</i> e <i>L. racemosa</i> | Partes verdes   | $42,6\% \pm 1,4\%$ |
| <i>R. mangle</i>                           |                 | $44,9\% \pm 4,5\%$ |

Fonte: Rodrigues et al. (2015). Elaborado pelos autores (2022)

Para a *Avicennia marina* subsp. *Australásica*, a concentração média de carbono dos diferentes componentes acima do solo foi de  $40,5\% \pm 0,4\%$  para o tronco;  $41,5\% \pm 0,3\%$  para galhos; e  $42,3\% \pm 0,3\%$  para folhas (Bulmer et al., 2016). No caso da *Rhizophora apiculata*, os teores de carbono apresentam pequenas variações por compartimento, com os troncos contendo 44,60%, os galhos 42,59%, as raízes 43,77% e as folhas 42,30%, resultando em um fator de conversão genérico de  $44,09 \pm 1,37\%$  (Vinh et al., 2019).

O termo condições de manejo diz respeito às formas de conservação e regeneração do ecossistema, sendo assim, considera-se a ocorrência de áreas intactas ou preservadas, naturalmente regeneradas e recuperadas por intervenção antrópica. Ao comparar as três condições, Ferreira et al. (2019) constataram que, após 5 anos de manejo, o estoque de carbono correspondeu a 26,59 Mg C/ha e, em 10 anos, alcançou 42,28 Mg C/ha, no manguezal do Rio Jaguaribe e Rio Grande do Norte. Para a mesma área, o estoque em ambientes naturalmente regenerados foi 8 Mg/ha e 22,39 Mg C/ha, para os intervalos de 5 e 10 anos, respectivamente, enquanto o estoque de carbono da área preservada foi de 43,67 Mg C/ha.

No estuário do Rio Cocó, no Ceará, o teor médio de carbono do mangue maduro ( $1,49\% \pm 0,18\%$ ) foi significativamente superior ao registrado em duas áreas de plantio ( $0,86 \pm 0,24\%$  e  $0,79 \pm 0,42\%$ ) e na área degradada ( $0,40 \pm 0,09\%$ ) (Jimenez et al., 2021). Na Lagoa de Itaipu, Rio de Janeiro, os estoques de carbono acima do solo foram significativamente diferentes entre manguezais plantados e áreas preservadas, com valores mais altos para as parcelas naturais

(41,4 ± 9,1 Mg C/ha) do que para o local plantado (17,2 ± 4,6 Mg C/ha). No mesmo sentido, a biomassa radicular foi significativamente maior nas parcelas naturais (1,6 ± 0,3 Mg C/ha) do que nas parcelas plantadas (1,1 ± 0,2 Mg C/ha) (Leite et al., 2021).

É pertinente enfatizar que outros fatores bióticos, para além dos que foram mencionados neste trabalho, podem interferir nos estoques de carbono, a exemplo da idade da vegetação e do estágio sucessional do ecossistema (Estrada et al., 2017). Pesquisas desenvolvidas na China mostram que os estoques de carbono, presentes no solo e na biomassa, estabelecem relações positivas com a idade do bosque (Yu et al., 2020).

Ao tratar dos fatores abióticos, percebe-se que a salinidade aumenta concomitantemente ao gradiente topográfico e reduz os estoques de carbono acima e abaixo do solo (Kandasamy et al., 2021; Virgulino et al., 2020). Tal fenômeno ocorre devido ao elevado estresse que o aumento do sal proporciona à vegetação, mesmo, tratando-se de espécies adaptadas aos ambientes salinos. Com isso, a vegetação tende a apresentar modificações estruturais, que consistem na redução da altura, do diâmetro e da densidade de indivíduos, formando bosques com características arbustivas.

O aumento de salinidade mostra-se de forma acentuada em áreas degradadas, especialmente após a construção de viveiros para carcinicultura. Neste sentido, na Indonésia, os valores registrados para a água intersticial coletada em áreas de mangue variaram entre 10 ppt e 25 ppt, com média de 17 ppt, enquanto os locais que caracterizam viveiros abandonados, tiveram uma salinidade de 10 ppt a 30 ppt, com média de 20 ppt, aspecto que dificulta o repovoamento (Arifanti et al., 2019).

Outro fator que controla o estoque de carbono no solo é a dimensão dos grãos do sedimento. Em manguezais situados no Ceará, Jimenez et al. (2021) constataram a correlação positiva e significativa entre partículas de solo mais finas, isto é, silte e argila, com o carbono total, fato que sugere a ocorrência de interação organomineral. De maneira semelhante, pesquisas desenvolvidas na Índia indicam que o carbono tende a aumentar com o aumento dos níveis de argila e silte, e com o aumento dos nutrientes e a umidade do solo. No entanto, o aumento dos níveis de temperatura do solo, densidade aparente e teor de areia reduzem a concentração de carbono (Kandasamy et al., 2021).

A textura do solo e o teor de nutrientes, especialmente o nitrogênio, também foram citados como fatores que controlam os estoques de carbono, em estudos desenvolvidos em mangues da Bahia (Santos-Andrade et al., 2021). Matos et al. (2020) relatam que a capacidade de sequestrar e armazenar carbono aumentou com a elevação das taxas de fósforo total e

nitrogênio total, em manguezais paraenses. O principal aspecto que explica essa condição é a relação estabelecida entre os nutrientes e a matéria orgânica (Cabaniss et al., 2005).

O gradiente de profundidade do solo configura outro aspecto interveniente nos estoques de carbono, uma vez que, em mangues do estado de São Paulo, o carbono orgânico total possui padrões espaciais claros e diferenças relacionadas à profundidade, de modo que, os maiores teores estão presentes nas camadas superficiais, enquanto as camadas mais profundas possuem contrações reduzidas (Ferreira et al., 2010).

De maneira semelhante, em manguezais situados no Vietnã, observou-se que, o teor de carbono no solo de mangue diminuiu de 2,03% na profundidade de 30 cm para apenas 0,61% na profundidade de 100 cm. A profundidade também é determinante para os estoques presentes na biomassa abaixo do solo, visto que, o estoque de carbono nas raízes aumentou rapidamente de 0,98 mg C/cm<sup>3</sup> nos 10 cm superiores para 2,53 mg C/cm<sup>3</sup> entre 20 e 30 cm de profundidade e diminuiu acentuadamente para 0,24 mg C/cm<sup>3</sup> a 100 cm de profundidade (Ha et al., 2018).

Na costa sudoeste da Índia, a densidade aparente e o armazenamento de carbono orgânico nos sistemas de mangue foram inversamente correlacionados e o teor de carbono do solo de mangue nos 30 cm superiores foi comparativamente maior do que nas camadas inferiores (Harishma et al., 2020).

Em Moçambique, o teor médio de carbono no solo, com profundidade entre de até 100 cm, foi de 160 Mg C/ha, das quais 53,32 Mg C/ha estavam concentrados entre 0 cm e 30 cm, 45,76 Mg C/ha entre 30 e 60 cm e 60,90 Mg C/ha entre 60 cm e 100 cm (Siteo et al., 2014). Tal comportamento revela que ocorrem exceções quanto a distribuição do carbono ao longo do perfil vertical do solo.

Quanto aos aspectos bioclimáticos, destaca-se a influência da variação precipitação e ocorrência de eventos de seca. (Kauffman et al. (2018) indicam correlação significativa dos estoques de carbono e o aumento das chuvas, uma vez que, em mangues amazônicos, onde a precipitação média anual é de 2.300 mm, foi registrado 511 Mg C/ha, enquanto os manguezais situados no Ceará, com uma precipitação de 1.024 mm, o estoque de carbono médio é de 413 Mg C/ha.

No tocante às secas, constata-se que a ocorrência de eventos intensos propicia a mortalidade da vegetação, fator que impacta diretamente os estoques presentes tanto na biomassa quanto no solo. Após a ocorrência de uma seca de três anos no Espírito Santo, constatou-se que a mortalidade das árvores culminou em uma diminuição de 64% do carbono acima do solo. As perdas no solo variaram entre 17% e 40,4% nas camadas superficiais (0-30

cm), totalizando uma redução de 14,6%, aproximadamente 270,5 Mg C/ha, no estoque total (Gomes et al., 2021).

Os aspectos antrópicos relacionados às alterações dos estoques de carbono relatados nos estudos que abordam os mangues brasileiros dizem respeito, principalmente, às mudanças de uso e ocupação do solo, com destaque às atividades da carcinicultura e desmatamento; e a ocorrência de poluição, sobretudo, devido ao lançamento de esgotos não-tratados (Kauffman et al., 2018; Pérez et al., 2018; Santos-Andrade et al., 2021).

Na Baía da Guanabara-RJ é perceptível os impactos que a supressão vegetal propicia ao ecossistema. Nesse sentido, a taxa de acumulação de sedimentos foi de 0,24 cm/ano, valor inferior ao que foi medido em áreas não-perturbadas, e que está associado ao desmatamento. Com isso, as taxas de acumulação de carbono calculada para todo o registro sedimentar, correspondem a  $61,7 \pm 10,2$  g C/m<sup>2</sup>·ano, quase três vezes menor do que a média global atual para ecossistemas de mangue (Pérez et al., 2018).

Ao analisar essa questão em outras regiões, verifica-se que, na Indonésia, entre 1985 e 2020, a maior perda de manguezais foi causada pelo desmatamento (3.693 ha). Além disso, as maiores emissões de carbono do desmatamento de mangue foram de 3,42 Mt CO<sub>2</sub>, ocorrendo durante 2000 e 2020 (Eddy et al., 2021).

A carcinicultura, por sua vez, se caracteriza na atualidade como uma das atividades mais danosas aos ecossistemas de mangue, devido às abruptas modificações na cobertura do solo e à geração de efluentes com elevado potencial poluidor/degradador. Em manguezais no Ceará, constatou-se que as reservas de carbono em áreas de viveiros abandonados eram de 37 Mg C/ha, o que representou uma perda de 72% do estoque de carbono do ecossistema em comparação com o mangue adjacente. Dessa maneira, estima-se que a emissão potencial cumulativa média da conversão do mangue para os viveiros de camarão foi de 1.371 Mg CO<sub>2</sub>/ha (Kauffman et al., 2018).

Na Baía de Todos os Santos-BA, o teor de carbono no solo foi significativamente maior nas áreas de controle (4% - 11%) e em solos de mangue impactados por esgoto doméstico (4% - 8%) do que em solos de viveiros de camarão (0,3% - 1,4%). Logo, os estoques do solo, em áreas ocupadas por viveiros de camarão foram 97% menores do que os de manguezais de controle intocados, o que pode ter resultado na emissão de até 1.200 Mg CO<sub>2</sub>/ha. As perdas ocorreram, principalmente, no primeiro metro superior dos solos, mas, perdas nas camadas mais profundas do solo também foram observadas em solos de mangue que receberam efluentes de carcinicultura (Santos-Andrade et al., 2021).

### Considerações finais

- Ao abordar o sequestro e estoque de carbono, o ecossistema de manguezal ganha relevância global, uma vez que, se faz presente em todos os continentes, sendo responsável por aprisionar elevados montantes, reduzindo a disponibilidade de gases do efeito estufa na atmosfera.
- O estoque global estimado pela literatura varia entre 4,19 Pg C e 6,6 Pg C, de modo que, o valor médio calculado corresponde a 5,34 Pg C, quantitativo presente em regiões específicas, como a Indonésia, o Brasil e Austrália. Destaca-se ainda que, as reservas do solo são substancialmente elevadas, quando em comparação aos estoques presentes na biomassa, devido ao elevado tempo de retenção e ao acúmulo.
- Ao tratar das especificidades dos estoques presentes no Brasil, é pertinente enfatizar a existência de poucos trabalhos, aspecto que dificulta a construção de um inventário representativo em escala nacional. Os valores registrados nos manguezais brasileiros variam entre 358,79 Mg C/ha e 1.851 Mg C/ha, de modo que, o estoque médio corresponde a 709,36 Mg C/ha. Análogo ao que ocorre em escala global, percebe-se que, o solo concentra maiores quantidade de carbono quando em comparação à biomassa.
- Os principais fatores de ordem biótica que condicionam os estoques de carbono nos mangues do Brasil são a composição estrutural da vegetação, os compartimentos vegetais (raízes, partes lenhosas e partes verdes), a diversidade de espécies, as características fisiográficas e as condições de manejo. Quanto aos fatores abióticos, destaca-se a salinidade e o gradiente topográfico, a granulometria do sedimento e a profundidade do solo, a concentração de nutrientes e fatores bioclimáticos. Ademais, as mudanças de uso e ocupação do solo, assim como, a poluição, são os principais elementos antrópicos citados na literatura.

### Referências

Adame, M. F., Connolly, R. M., Turschwell, M. P., Lovelock, C. E., Fatoyinbo, T., Lagomasino, D., Goldberg, L. A., Holdorf, J., Friess, D. A., Sanderman, J., Sievers, M., Buelow, C., Boone Kauffman, J., Bryan-Brown, D., & Brown, C. J. (2021). Future carbon emissions from global mangrove forest loss. *2856 | Wileyonlinelibrary.Com/Journal/Gcb Glob Change Biol*, 27, 2856–2866. <https://doi.org/10.1111/gcb.15571>

- Alongi, D. M. (2020). Carbon Balance in Salt Marsh and Mangrove Ecosystems: A Global Synthesis. *Journal of Marine Science and Engineering* 2020, Vol. 8, Page 767, 8(10), 767. <https://doi.org/10.3390/JMSE8100767>
- Arifanti, V. B., Kauffman, J. B., Hadriyanto, D., Murdiyarso, D., & Diana, R. (2019). Carbon dynamics and land use carbon footprints in mangrove-converted aquaculture: The case of the Mahakam Delta, Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 432, 17–29. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2018.08.047>
- Atwood, T. B., Connolly, R. M., Almahasheer, H., Carnell, P. E., Duarte, C. M., Lewis, C. J. E., Irigoien, X., Kelleway, J. J., Lavery, P. S., Macreadie, P. I., Serrano, O., Sanders, C. J., Santos, I., Steven, A. D. L., & Lovelock, C. E. (2017). Global patterns in mangrove soil carbon stocks and losses. *Nature Climate Change* 2017 7:7, 7(7), 523–528. <https://doi.org/10.1038/nclimate3326>
- Boone, J. K., & Bhomia, R. K. (2017). Ecosystem carbon stocks of mangroves across broad environmental gradients in West-Central Africa: Global and regional comparisons. *PLOS ONE*, 12(11), e0187749. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0187749>
- Boone Kauffman, J., Fernanda Adame, M., Budi Arifanti, V., Schile-beers, L. M., Bernardino, A. F., Bhomia, R. K., Donato, D. C., Feller, I. C., Ferreira, T. O., Del Carmen Jesus Garcia, M., Mackenzie, R. A., Patrick Magonigal, J., Murdiyarso, D., Simpson, L., Hern Andez Trejo, H., Adame, M. F., Arifanti, V. B., Schile-Beers, L. M., Bernardino, A. F., ... Simpson, L. (2020). Total ecosystem carbon stocks of mangroves across broad global environmental and physical gradients. *Ecological Monographs*, 90(2), e01405. <https://doi.org/10.1002/ECM.1405>
- Bulmer, R. H., Schwendenmann, L., & Lundquist, C. J. (2016). Allometric Models for Estimating Aboveground Biomass, Carbon and Nitrogen Stocks in Temperate Avicennia marina Forests. *Wetlands*, 36(5), 841–848. <https://doi.org/10.1007/S13157-016-0793-0/METRICS>
- Bulmer, R. H., Stephenson, F., Jones, H. F. E., Townsend, M., Hillman, J. R., Schwendenmann, L., & Lundquist, C. J. (2020). Blue Carbon Stocks and Cross-Habitat Subsidies. *Frontiers in Marine Science*, 7, 380. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2020.00380/BIBTEX>

- Cabaniss, S. E., Madey, G., Leff, L., Maurice, P. A., & Wetzel, R. (2005). A stochastic model for the synthesis and degradation of natural organic matter. Part I. Data structures and reaction kinetics. *Biogeochemistry*, 76(2), 319–347. <https://doi.org/10.1007/S10533-005-6895-Z/METRICS>
- da Motta Portillo, J. T., Londe, V., & Moreira, F. W. A. (2017). Aboveground biomass and carbon stock are related with soil humidity in a mangrove at the Piraquê-Açu River, Southeastern Brazil. *Journal of Coastal Conservation*, 21(1). <https://doi.org/10.1007/s11852-016-0482-4>
- Eddy, S., Milantara, N., Sasmito, S. D., Kajita, T., & Basyuni, M. (2021). Anthropogenic Drivers of Mangrove Loss and Associated Carbon Emissions in South Sumatra, Indonesia. *Forests 2021, Vol. 12, Page 187, 12(2)*, 187. <https://doi.org/10.3390/F12020187>
- Estrada, G. C. D., Soares, M. L. G., Calderucio, G., & Estrada, D. (2017). Global patterns of aboveground carbon stock and sequestration in mangroves. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 89(2), 973–989. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720160357>
- Ferreira, A. C., Bezerra, L. E. A., & Matthews-Cascon, H. (2019). Aboveground carbon stock in a restored neotropical mangrove: influence of management and brachyuran crab assemblage. *Wetlands Ecology and Management*, 27(2–3). <https://doi.org/10.1007/s11273-019-09654-7>
- Ferreira, T. O., Otero, X. L., de Souza Junior, V. S., Vidal-Torrado, P., Macías, F., & Firme, L. P. (2010). Spatial patterns of soil attributes and components in a mangrove system in Southeast Brazil (São Paulo). *Journal of Soils and Sediments*, 10(6), 995–1006. <https://doi.org/10.1007/S11368-010-0224-4/METRICS>
- Friess, D. A., Yando, E. S., Alemu I, J. B., Wong, L. W., Soto, S. D., & Bhatia, N. (2020). Ecosystem services and disservices of mangrove forests and salt marshes. *Oceanography and Marine Biology*, 58. <https://doi.org/10.1201/9780429351495-3>
- Gomes, L. E. de O., Sanders, C. J., Nobrega, G. N., Vescovi, L. C., Queiroz, H. M., Kauffman, J. B., Ferreira, T. O., & Bernardino, A. F. (2021). Ecosystem carbon losses following a climate-induced mangrove mortality in Brazil. *Journal of Environmental Management*, 297, 113381. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.113381>

- Ha, T. H., Marchand, C., Aimé, J., Dang, H. N., Phan, N. H., Nguyen, X. T., & Nguyen, T. K. C. (2018). Belowground carbon sequestration in a mature planted mangroves (Northern Viet Nam). *Forest Ecology and Management*, 407, 191–199. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2017.06.057>
- Hamilton, S. E., & Casey, D. (2016). Creation of a high spatio-temporal resolution global database of continuous mangrove forest cover for the 21st century (CGMFC-21). *Global Ecology and Biogeography*, 25(6), 729–738. <https://doi.org/10.1111/GEB.12449>
- Hamilton, S. E., & Friess, D. A. (2018). Global carbon stocks and potential emissions due to mangrove deforestation from 2000 to 2012. *Nature Climate Change* 2018 8:3, 8(3), 240–244. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0090-4>
- Harishma, K. M., Sandeep, S., & Sreekumar, V. B. (2020). Biomass and carbon stocks in mangrove ecosystems of Kerala, southwest coast of India. *Ecological Processes*, 9(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/S13717-020-00227-8/TABLES/4>
- Hatje, V., Masqué, P., Patire, V. F., Dórea, A., & Barros, F. (2021). Blue carbon stocks, accumulation rates, and associated spatial variability in Brazilian mangroves. *Limnology and Oceanography*, 66(2). <https://doi.org/10.1002/lno.11607>
- Hossain, M., Siddique, M. R. H., Saha, S., & Abdullah, S. M. R. (2015). Allometric models for biomass, nutrients and carbon stock in *Excoecaria agallocha* of the Sundarbans, Bangladesh. *Wetlands Ecology and Management*, 23(4), 765–774. <https://doi.org/10.1007/S11273-015-9419-1/METRICS>
- Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Pidgeon, E., & Telszewski, M. (2014). Coastal Blue Carbon: Methods for Assessing Carbon Stocks and Emissions Factors in Mangroves, Tidal Salt Marshes, and Seagrass Meadows. *Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature. Arlington, Virginia, USA.*
- ICMBio. (2018). Atlas dos Manguezais do Brasil. In *Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade.*

- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2019). *Malhas territoriais / IBGE*. Retrieved May 11, 2023, from <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais.html>
- Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. (2019). *Vegetação de Mangue brasileira*. Retrieved May 11, 2023, from <https://dadosabertos.ibama.gov.br/nl/dataset/vegetacao-de-mangue-brasileira>
- Jardine, S. L., & Siikamäki, J. V. (2014). A global predictive model of carbon in mangrove soils. *Environmental Research Letters*, 9(10), 104013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/104013>
- Jimenez, L. C. Z., Queiroz, H. M., Otero, X. L., Nóbrega, G. N., & Ferreira, T. O. (2021). Soil Organic Matter Responses to Mangrove Restoration: A Replanting Experience in Northeast Brazil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(17). <https://doi.org/10.3390/IJERPH18178981>
- Kandasamy, K., Rajendran, N., Balakrishnan, B., Thiruganasambandam, R., & Narayanasamy, R. (2021). Carbon sequestration and storage in planted mangrove stands of *Avicennia marina*. *Regional Studies in Marine Science*, 43. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101701>
- Kauffman, J. B., Bernardino, A. F., Ferreira, T. O., Bolton, N. W., Gomes, L. E. de O., & Nobrega, G. N. (2018). Shrimp ponds lead to massive loss of soil carbon and greenhouse gas emissions in northeastern Brazilian mangroves. *Ecology and Evolution*, 8(11).
- Kauffman, J. B., Bernardino, A. F., Ferreira, T. O., Giovannoni, L. R., De Gomes, L. E. O., Romero, D. J., Jimenez, L. C. Z., & Ruiz, F. (2018). Carbon stocks of mangroves and salt marshes of the Amazon region, Brazil. *Biology Letters*, 14(9). <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0208>
- Kelleway, J. J., Cavanaugh, K., Rogers, K., Feller, I. C., Ens, E., Doughty, C., & Saintilan, N. (2017). Review of the ecosystem service implications of mangrove encroachment into salt marshes. *Global Change Biology*, 23(10), 3967–3983. <https://doi.org/10.1111/GCB.13727>

- Leite, R. A., Nóbrega, G. N., Leal, L. R. Z. C., Kiefer, M. C., & Soares-Gomes, A. (2021). The colonization of a coastal lagoon by a mangrove ecosystem: Benefit or threat to the lagoon? *Aquatic Botany*, *171*, 103362. <https://doi.org/10.1016/J.AQUABOT.2021.103362>
- Matos, C. R. L., Berrêdo, J. F., Machado, W., Sanders, C. J., Metzger, E., & Cohen, M. C. L. (2020). Carbon and nutrient accumulation in tropical mangrove creeks, Amazon region. *Marine Geology*, *429*, 106317. <https://doi.org/10.1016/J.MARGE0.2020.106317>
- Mitra, A. (2020). Mangrove Forests in India. *Mangrove Forests in India*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-20595-9>
- Pérez, A., Machado, W., Gutiérrez, D., Borges, A. C., Patchineelam, S. R., & Sanders, C. J. (2018). Carbon accumulation and storage capacity in mangrove sediments three decades after deforestation within a eutrophic bay. *Marine Pollution Bulletin*, *126*, 275–280. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2017.11.018>
- Pham, T. D., Yokoya, N., Bui, D. T., Yoshino, K., & Friess, D. A. (2019). Remote sensing approaches for monitoring mangrove species, structure, and biomass: Opportunities and challenges. In *Remote Sensing* (Vol. 11, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/rs11030230>
- Portela, M. G. T., de Espindola, G. M., Valladares, G. S., Amorim, J. V. A., & Frota, J. C. O. (2020). Vegetation biomass and carbon stocks in the Parnaíba River Delta, NE Brazil. *Wetlands Ecology and Management*, *28*(4), 607–622. <https://doi.org/10.1007/S11273-020-09735-Y/METRICS>
- Rodrigues, D. P., Hamacher, C., Estrada, G. C. D., & Soares, M. L. G. (2015). Variability of carbon content in mangrove species: Effect of species, compartments and tidal frequency. *Aquatic Botany*, *120*(PB). <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2014.10.004>
- Romañach, S. S., DeAngelis, D. L., Koh, H. L., Li, Y., Teh, S. Y., Raja Barizan, R. S., & Zhai, L. (2018). Conservation and restoration of mangroves: Global status, perspectives, and prognosis. In *Ocean and Coastal Management* (Vol. 154). <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.01.009>
- Rovai, A. S., Coelho-Jr, C., de Almeida, R., Cunha-Lignon, M., Menghini, R. P., Twilley, R. R., Cintrón-Molero, G., & Schaeffer-Novelli, Y. (2021). Ecosystem-level carbon stocks and sequestration rates in mangroves in the Cananéia-Iguape lagoon estuarine system,

Rovai, A. S., Twilley, R. R., Castañeda-Moya, E., Riul, P., Cifuentes-Jara, M., Manrow-Villalobos, M., Horta, P. A., Simonassi, J. C., Fonseca, A. L., & Pagliosa, P. R. (2018). Global controls on carbon storage in mangrove soils. *Nature Climate Change* 2018 8:6, 8(6), 534–538. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0162-5>

Sanderman, J., Hengl, T., Fiske, G., Solvik, K., Adame, M. F., Benson, L., Bukoski, J. J., Carnell, P., Cifuentes-Jara, M., Donato, D., Duncan, C., Eid, E. M., Ermgassen, P. Z., Lewis, C. J. E., Macreadie, P. I., Glass, L., Gress, S., Jardine, S. L., Jones, T. G., ... Landis, E. (2018). A global map of mangrove forest soil carbon at 30 m spatial resolution. *Environmental Research Letters*, 13(5), 055002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AABE1C>

Santos, D. M. C., Estrada, G. C. D., Fernandez, V., Estevam, M. R. M., De Souza, B. T., & Soares, M. L. G. (2017). First Assessment of Carbon Stock in the Belowground Biomass of Brazilian Mangroves. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 89(3), 1579–1589. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720160496>

Santos-Andrade, M., Hatje, V., Arias-Ortiz, A., Patire, V. F., & da Silva, L. A. (2021). Human disturbance drives loss of soil organic matter and changes its stability and sources in mangroves. *Environmental Research*, 202, 111663. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2021.111663>

Siikamäki, J., Sanchirico, J. N., Jardine, S., McLaughlin, D., & Morris, D. (2013). Blue carbon: Coastal ecosystems, their carbon storage, and potential for reducing emissions. *Environment*, 55(6). <https://doi.org/10.1080/00139157.2013.843981>

Sitoe, A. A., Mandlate, L. J. C., & Guedes, B. S. (2014). Biomass and Carbon Stocks of Sofala Bay Mangrove Forests. *Forests* 2014, Vol. 5, Pages 1967-1981, 5(8), 1967–1981. <https://doi.org/10.3390/F5081967>

Tang, W., Zheng, M., Zhao, X., Shi, J., Yang, J., & Trettin, C. C. (2018). Big Geospatial Data Analytics for Global Mangrove Biomass and Carbon Estimation. *Sustainability* 2018, Vol. 10, Page 472, 10(2), 472. <https://doi.org/10.3390/SU10020472>

- Thorhaug, A., Gallagher, J. B., Kiswara, W., Prathep, A., Huang, X., Yap, T. K., Dorward, S., & Berlyn, G. (2020). Coastal and estuarine blue carbon stocks in the greater Southeast Asia region: Seagrasses and mangroves per nation and sum of total. *Marine Pollution Bulletin*, *160*, 111168. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2020.111168>
- Tinh, P. H., Hanh, N. T. H., van Thanh, V., Tuan, M. S., van Quang, P., Sharma, S., & MacKenzie, R. A. (2020). A comparison of soil carbon stocks of intact and restored mangrove forests in Northern Vietnam. *Forests*, *11*(6). <https://doi.org/10.3390/f11060660>
- Van der Stocken, T., Wee, A. K. S., De Ryck, D. J. R., Vanschoenwinkel, B., Friess, D. A., Dahdouh-Guebas, F., Simard, M., Koedam, N., & Webb, E. L. (2019). A general framework for propagule dispersal in mangroves. *Biological Reviews*, *94*(4), 1547–1575. <https://doi.org/10.1111/BRV.12514>
- Vinh, T. Van, Marchand, C., Linh, T. V. K., Vinh, D. D., & Allenbach, M. (2019). Allometric models to estimate above-ground biomass and carbon stocks in *Rhizophora apiculata* tropical managed mangrove forests (Southern Viet Nam). *Forest Ecology and Management*, *434*, 131–141. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2018.12.017>
- Virgulino, P. C. C., Carneiro, D. N., Nascimento, W. R., Cougo, M. F., & Fernandes, M. E. B. (2020). Biomass and carbon estimation for scrub mangrove forests and examination of their allometric associated uncertainties. *PLoS ONE*, *15*(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230008>
- Yu, C., Feng, J., Liu, K., Wang, G., Zhu, Y., Chen, H., & Guan, D. (2020). Changes of ecosystem carbon stock following the plantation of exotic mangrove *Sonneratia apetala* in Qi'ao Island, China. *Science of The Total Environment*, *717*, 137142. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.137142>