

Estimativa do potencial de carbono azul no parque estadual do Cocó: Uma aproximação por meio de produtos de sensoriamento remoto

Estimating blue carbon potential in Cocó state park: An approach using remote sensing products

Perea-Ardila, Mauricio Alejandro (1)

Pertenencia institucional

(1) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.

Correspondencia

mauricio.perea@alu.ufc.br

ORCID

Perea-Ardila
0000-0003-4561-0251

Resumen

No contexto da emergência climática, os manguezais urbanos constituem ecossistemas estratégicos para a mitigação, embora sua gestão seja limitada pela escassez de dados quantitativos sobre seus estoques de carbono. Este estudo estima o potencial de Carbono Azul e a distribuição espacial dos estoques no Parque Estadual do Cocó (PEC), em Fortaleza, Brasil, durante o período de 2010 a 2022. Para isso, empregaram-se técnicas de geoprocessamento e a integração de produtos de sensoriamento remoto de escala global da (ESA CCI) e regional (MapBiomass, considerando a camada de solo até 30 cm de profundidade), com o objetivo de quantificar a biomassa e o carbono orgânico do solo (COS). Os resultados revelam que os manguezais do PEC atuaram como um sumidouro ativo, com incremento de 11,3% em sua extensão e aumento de 21,5% no estoque total de carbono, passando de 45988,9 MgC em 2010 para 55871,9 MgC em 2022. O componente edáfico representou o principal reservatório, correspondendo a 69,5% do estoque total e apresentando elevada estabilidade temporal. A análise espacial identificou uma dualidade funcional, com um setor ocidental dinâmico, caracterizado por maior ganho de biomassa, e um setor oriental que atua como reservatório estável de COS. Com uma capacidade de armazenamento de até 205049,8 Mg de CO₂ equivalente ao final do período, confirma-se a resiliência do parque frente à pressão urbana, fornecendo uma linha de base quantitativa fundamental para as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) e para estratégias de financiamento climático.

Palabras clave:

Carbono azul; Estoque de carbono; Manguezais urbanos; Mitigação climática

Abstract

In the context of the climate emergency, urban mangroves constitute strategic ecosystems for climate change mitigation, although their management is constrained by the scarcity of quantitative data on their carbon stocks. This study estimates the Blue Carbon potential and the spatial distribution of carbon stocks in the Cocó State Park (PEC), Fortaleza, Brazil, over the period 2010–2022. To this end, we employed geoprocessing techniques and integrated global-scale remote sensing products from the ESA Climate Change Initiative (ESA CCI) with regional datasets from MapBiomass (considering the soil layer down to 30 cm depth), in order to quantify biomass and soil organic carbon (SOC). The results reveal that the PEC mangroves functioned as an active carbon sink, with an 11.3% increase in areal extent and a 21.5% increase in total carbon stock, rising from 45,988.9 MgC in 2010 to 55,871.9 MgC in 2022. The edaphic component represented the dominant reservoir, accounting for 69.5% of the total stock and exhibiting high temporal stability. Spatial analysis identified a functional duality, with a dynamic western sector characterized by greater biomass gains, and an eastern sector acting as a stable SOC reservoir. With a storage capacity of up to 205,049.8 Mg of CO₂ equivalent by the end of the study period, the park's resilience to urban pressure is confirmed, providing a fundamental quantitative baseline for Nationally Determined Contributions (NDCs) and climate finance strategies.

Key words:

Blue carbon; Carbon stock; Urban mangroves; Climate change mitigation

Estimativa do potencial de Carbono Azul no Parque Estadual do Cocó: Uma aproximação por meio de produtos de sensoriamento remoto

Estimating Blue Carbon potential in Cocó State Park: An approach using remote sensing products

Mauricio Alejandro Perea-Ardila

Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil, mauricio.perea@alu.ufc.br

RESUMO

No contexto da emergência climática, os manguezais urbanos constituem ecossistemas estratégicos para a mitigação, embora sua gestão seja limitada pela escassez de dados quantitativos sobre seus estoques de carbono. Este estudo estima o potencial de Carbono Azul e a distribuição espacial dos estoques no Parque Estadual do Cocó (PEC), em Fortaleza, Brasil, durante o período de 2010 a 2022. Para isso, empregaram-se técnicas de geoprocessamento e a integração de produtos de sensoriamento remoto de escala global da (ESA CCI) e regional (MapBiomass, considerando a camada de solo até 30 cm de profundidade), com o objetivo de quantificar a biomassa e o carbono orgânico do solo (COS). Os resultados revelam que os manguezais do PEC atuaram como um sumidouro ativo, com incremento de 11,3% em sua extensão e aumento de 21,5% no estoque total de carbono, passando de 45988,9 MgC em 2010 para 55871,9 MgC em 2022. O componente edáfico representou o principal reservatório, correspondendo a 69,5% do estoque total e apresentando elevada estabilidade temporal. A análise espacial identificou uma dualidade funcional, com um setor ocidental dinâmico, caracterizado por maior ganho de biomassa, e um setor oriental que atua como reservatório estável de COS. Com uma capacidade de armazenamento de até 205049,8 Mg de CO₂ equivalente ao final do período, confirma-se a resiliência do parque frente à pressão urbana, fornecendo uma linha de base quantitativa fundamental para as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) e para estratégias de financiamento climático.

Palavras-chave: Carbono Azul; Estoque de Carbono; Manguezais Urbanos; Mitigação Climática.

ABSTRACT

In the context of the climate emergency, urban mangroves constitute strategic ecosystems for climate change mitigation, although their management is constrained by the scarcity of quantitative data on their carbon stocks. This study estimates the Blue Carbon potential and the spatial distribution of carbon stocks in the Cocó State Park (PEC), Fortaleza, Brazil, over the period 2010–2022. To this end, we employed geoprocessing techniques and integrated global-scale remote sensing products from the ESA Climate Change Initiative (ESA CCI) with regional datasets from MapBiomass (considering the soil layer down to 30 cm depth), in

order to quantify biomass and soil organic carbon (SOC). The results reveal that the PEC mangroves functioned as an active carbon sink, with an 11.3% increase in areal extent and a 21.5% increase in total carbon stock, rising from 45,988.9 MgC in 2010 to 55,871.9 MgC in 2022. The edaphic component represented the dominant reservoir, accounting for 69.5% of the total stock and exhibiting high temporal stability. Spatial analysis identified a functional duality, with a dynamic western sector characterized by greater biomass gains, and an eastern sector acting as a stable SOC reservoir. With a storage capacity of up to 205,049.8 Mg of CO₂ equivalent by the end of the study period, the park's resilience to urban pressure is confirmed, providing a fundamental quantitative baseline for Nationally Determined Contributions (NDCs) and climate finance strategies.

Keywords: Blue Carbon; Carbon Stock; Urban Mangroves; Climate Change Mitigation.

INTRODUÇÃO

No contexto da emergência climática global, os ecossistemas costeiros vegetados, conhecidos coletivamente como Carbono Azul, têm adquirido um papel central nas estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas (Macreadie et al., 2019). Entre eles, os bosques de manguezal destacam-se por sua elevada capacidade de sequestrar dióxido de carbono (CO₂) atmosférico e armazená-lo a longo prazo, principalmente em seus solos anóxicos, nos quais as taxas de acumulação e conservação de carbono superam amplamente aquelas observadas na maioria das florestas tropicais terrestres (Donato et al., 2011; Atwood et al., 2017). Essa elevada densidade de carbono posiciona os manguezais como ativos naturais estratégicos para o cumprimento das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) no âmbito do Acordo de Paris (Rovai et al., 2022).

O Brasil abriga a segunda maior extensão de manguezais em escala global, representando cerca de 9% do total mundial (Rovai et al., 2022). Entretanto, uma fração significativa desses ecossistemas encontra-se submetida a intensa pressão antrópica, especialmente em regiões costeiras urbanizadas (Wei et al., 2024). Os manguezais urbanos constituem sistemas socioecológicos particularmente complexos, expostos simultaneamente a processos de fragmentação, alterações hidrológicas, contaminação e expansão da infraestrutura urbana (Cavalcante et al., 2009; Branoff, 2017). Apesar dessas pressões, diversos estudos indicam que os manguezais urbanos podem manter e, em alguns casos, ampliar sua capacidade de provisão de serviços ecossistêmicos essenciais, incluindo a regulação microclimática, a proteção costeira e o armazenamento de carbono (Goldberg et al., 2020; Wei et al., 2024).

Nesse contexto, os manguezais urbanos localizados em regiões semiáridas representam um caso ainda pouco explorado. As condições climáticas restritivas, caracterizadas por marcada sazonalidade hídrica e elevadas temperaturas, podem limitar a produtividade vegetal, mas também favorecer a acumulação e a preservação do carbono nos solos em função de dinâmicas hidrológicas e geoquímicas particulares (Osland et al., 2018). No entanto, o conhecimento acerca de como esses fatores interagem com a urbanização para avaliar a distribuição espacial e a dinâmica temporal dos estoques de carbono azul permanecem

limitado, especialmente em escalas locais relevantes para a gestão ambiental (Hatje et al., 2021).

Adicionalmente, a gestão eficaz desses ecossistemas é dificultada pela escassez de dados quantitativos, espacialmente explícitos e temporalmente consistentes sobre suas reservas de carbono (M. Wang et al., 2025). Os inventários florestais tradicionais e a amostragem de solos, embora precisos, tendem a ser onerosos e logisticamente complexos, o que restringe sua aplicação sistemática em ambientes urbanos (Hoyos-Santillan et al., 2025). No caso do Parque Estadual do Cocó (PEC), um dos maiores parques urbanos da América Latina e localizado no Brasil, a ausência histórica de uma linha de base robusta de carbono azul tem limitado a incorporação dos manguezais em estratégias de conservação, financiamento climático e planejamento territorial.

Nas últimas décadas, os avanços em sensoriamento remoto e modelagem geoespacial possibilitaram o desenvolvimento de produtos satelitais capazes de estimar a biomassa aérea (BA) e o carbono orgânico do solo (COS) em ecossistemas de manguezal em escalas regionais e globais (Sanderman et al., 2018; Santoro et al., 2021; Simard et al., 2019). Embora esses modelos apresentem incertezas inerentes quando aplicados em escalas locais, sua integração oferece uma oportunidade valiosa para avaliar tendências, identificar padrões espaciais e estabelecer linhas de base custo-efetivas em áreas com limitada informação in situ (Tang et al., 2018; Mariano Neto et al., 2024). Em particular, a combinação de produtos globais e regionais permite explorar a diferenciação funcional entre os reservatórios de carbono na biomassa e no solo, um aspecto fundamental para compreender a resiliência dos manguezais frente à urbanização, uma vez que estudos recentes têm demonstrado que os diferentes componentes de carbono em manguezais evoluem de forma diferenciada e que seu monitoramento integrado por meio de sensoriamento remoto aprimora a compreensão de sua dinâmica temporal e espacial (Z. Wang et al., 2025).

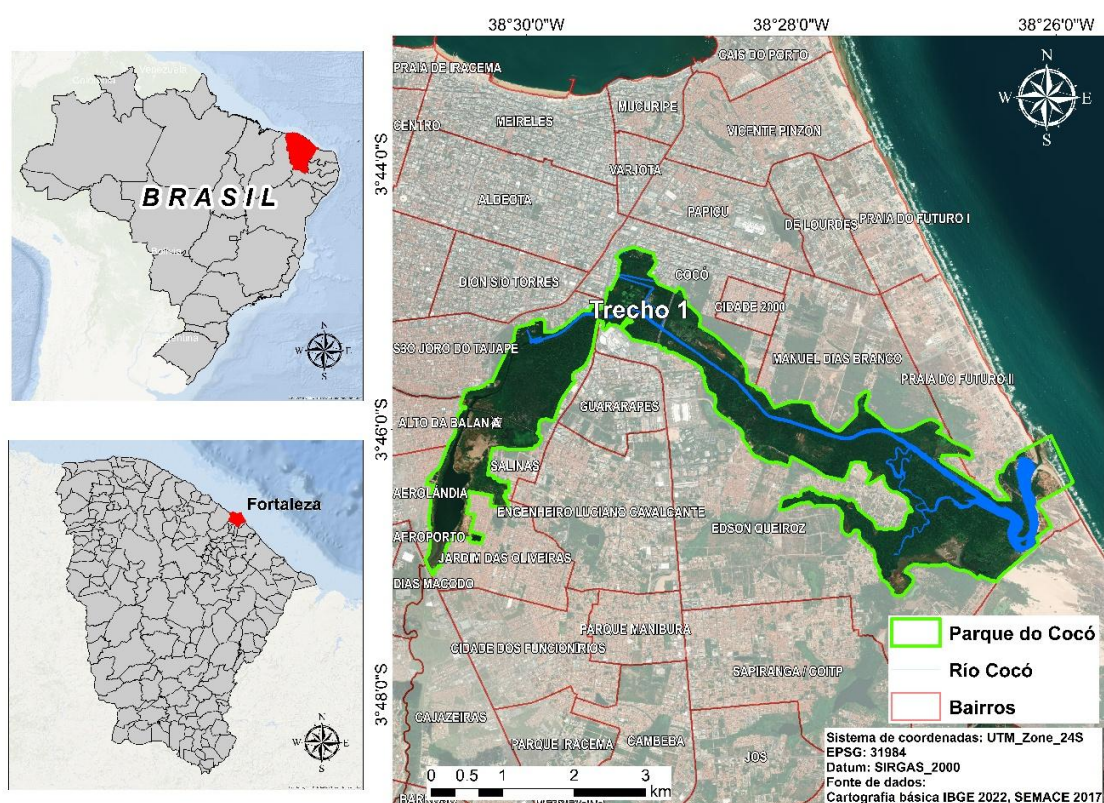
Diante disso, este estudo parte da hipótese de que os manguezais urbanos do PEC operam sob uma dinâmica dual de reservatórios de carbono, na qual a biomassa vegetal atua como um sumidouro ativo e dinâmico, sensível aos processos de expansão e regeneração, enquanto o solo funciona como um reservatório dominante e relativamente estável, armazenando carbono acumulado a longo prazo. Sob esse marco conceitual, o objetivo da pesquisa é estimar o potencial de carbono azul do PEC e analisar sua distribuição espacial e dinâmica temporal durante o período de 2010 a 2022, por meio da integração de produtos de sensoriamento remoto de BA e COS. Ao estabelecer a primeira linha de base geoespacial dos estoques de carbono do parque, este trabalho busca identificar zonas de armazenamento (hotspots), avaliar a resiliência do ecossistema frente à pressão urbana e fornecer informações-chave para a gestão ambiental, o desenho de políticas públicas e a incorporação dos manguezais urbanos em estratégias de mitigação climática em escala local e nacional no Brasil.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo concentrou-se no Parque Estadual do Cocó (PEC), uma unidade de conservação localizada na cidade de Fortaleza, estado do Ceará, no nordeste do Brasil (coordenadas centrais 3°46' S, 38°29' O). O PEC é um dos maiores parques urbanos da América Latina, protegendo um ecossistema de manguezal estuarino inserido em uma matriz urbana densa (Do Carmo, 2020) (Figura 1). O clima da região é tropical semiárido, o que influencia diretamente a fisionomia da vegetação, caracterizada principalmente por espécies de *Rhizophora mangle*, *Avicennia* sp. e *Laguncularia racemosa* (MMA, 2016).

Figura 1. Localização da área de estudo



Fonte: O autor.

A estimativa do potencial de carbono azul do PEC baseou-se em uma abordagem geoespacial orientada à reconstrução da dinâmica temporal e espacial dos principais reservatórios de carbono do ecossistema. Adotou-se uma estratégia de integração de produtos de sensoriamento remoto validados em escalas global e regional, com resolução temporal anual, priorizando a identificação de tendências, padrões espaciais e contrastes funcionais, em detrimento da obtenção de valores absolutos destinados à certificação de créditos de carbono.

Todo o processo de aquisição, processamento e análise dos dados foi realizado na plataforma de computação em nuvem Google Earth Engine (GEE), complementado por análises geoespaciais no ArcGIS 10.8, o que assegura a reprodutibilidade, a rastreabilidade e a escalabilidade do fluxo de trabalho.

Aquisição e pré-processamento dos dados de biomassa aérea

Para a estimativa da biomassa aérea (BA) foi utilizado o produto ESA CCI Biomass, versão 6, desenvolvido pela Agência Espacial Europeia (Santoro et al., 2021). Esse conjunto de dados fornece estimativas anuais de biomassa aérea expressas em Mg de matéria seca por hectare, derivadas da integração de sensores ópticos e de radar, e tem sido amplamente validado para análises de tendências temporais em escalas regional e global.

Considerando que a resolução espacial nativa do produto (~100 m) difere daquela dos dados edáficos utilizados, foi aplicado um procedimento de harmonização espacial por meio de reamostragem para 30 m utilizando o método do vizinho mais próximo (*nearest neighbor*). Esse procedimento não introduz nova informação espacial, mas permite a coerência geométrica entre as camadas para a análise pixel a pixel. Tal abordagem foi adotada exclusivamente para fins de integração multifuente e análise de padrões espaciais, reconhecendo-se explicitamente as limitações inerentes à escala original do produto.

Estimativa do carbono na biomassa aérea e subterrânea

A conversão da biomassa aérea em carbono (C_{BA}) foi realizada mediante a aplicação de um fator estequiométrico de 0,47, recomendado para biomassa lenhosa tropical (Cifuentes-Jara et al., 2018). Esse valor é consistente com estudos prévios em manguezais e permite uma estimativa conservadora do teor de carbono.

A biomassa subterrânea (BS), não observável diretamente por sensores remotos, foi estimada por meio da aplicação de uma relação raiz–parte aérea (root-to-shoot ratio) de 0,49, valor amplamente validado para florestas de manguezal tropicais e empregado em avaliações regionais e nacionais de carbono azul (Komiyama et al., 2008; Rovai et al., 2022). Esse procedimento assume uma proporcionalidade estrutural constante em escala de paisagem, adequada para análises de tendência e comparações espaciais.

Estimativa do carbono orgânico do solo (COS)

O componente edáfico foi estimado utilizando a coleção MapBiomas Solo (Coleção 3), um produto regional calibrado especificamente para os biomas brasileiros e baseado em trajetórias de cobertura e uso do solo. Diferentemente de modelos globais estáticos, o MapBiomas Solo fornece estimativas anuais dinâmicas do estoque de COS, o que permite capturar variações associadas à expansão ou regeneração dos manguezais.

Foram extraídos os valores de COS correspondentes ao horizonte superficial (0–30 cm), expressos em $MgC\ ha^{-1}$. Essa profundidade foi adotada como uma estimativa conservadora, amplamente utilizada em avaliações comparativas, reconhecendo-se que os manguezais podem armazenar quantidades substancialmente maiores de carbono em maiores

profundidades. Ainda assim, o enfoque é adequado para análises temporais consistentes e para a identificação de contrastes espaciais no interior do ecossistema.

Cálculo do estoque total de carbono e análise temporal

O estoque total de carbono azul (C_{Total}) para cada pixel e para cada ano de análise (t) foi calculado por meio da soma dos três reservatórios:

$$C_{Total} = C_{BA_t} + C_{BS_t} + C_{OS_t}$$

A partir dessa estimativa, foram gerados mapas anuais de densidade de carbono ($MgC\ ha^{-1}$) e calculados os estoques totais integrados para todo o ecossistema. A dinâmica temporal foi avaliada por meio do balanço líquido de carbono entre pares de anos consecutivos e entre o início e o final do período de estudo:

$$\Delta C = C_{Total_{t2}} - C_{Total_{t1}}$$

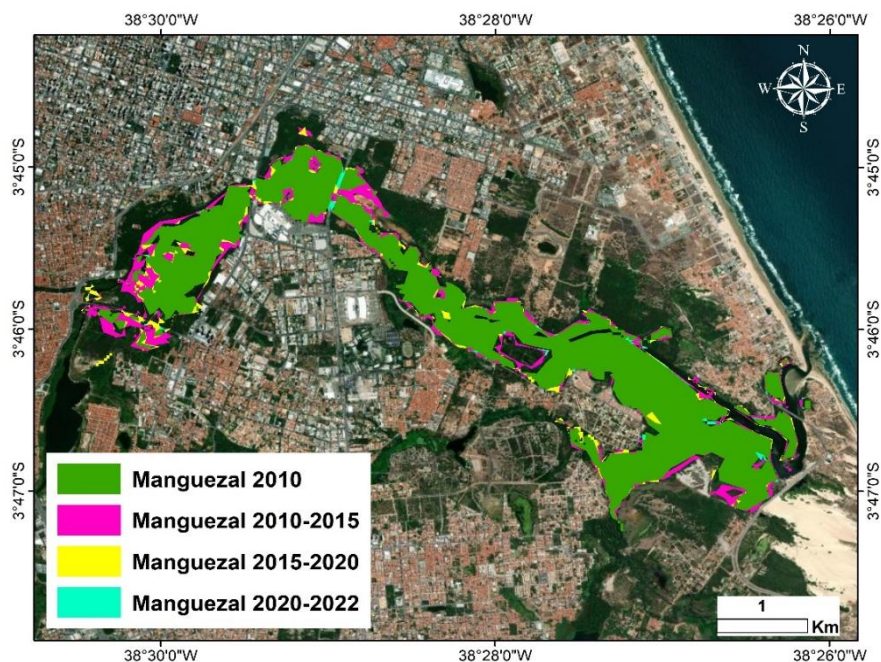
Essa análise permitiu identificar áreas de ganho líquido (sumidouros ativos), estabilidade e perda de carbono, bem como avaliar a resiliência espacial do manguezal frente à pressão urbana.

RESULTADOS

A análise da cobertura de manguezal evidenciou uma expansão contínua da área florestal ao longo do período de estudo (2010–2022). A extensão do manguezal aumentou de 523,49 ha no ano base para 582,98 ha em 2022, representando um ganho líquido acumulado de 59,49 ha ($\approx 11,3\%$ de incremento total).

Adicionalmente, a expansão do ecossistema não ocorreu de forma uniforme, mas por meio de um processo de densificação das bordas e recolonização de áreas periféricas adjacentes à matriz urbana (Figura 2). A classe base de 2010 (em verde) indica a presença de um núcleo florestal consolidado ao longo do canal principal. As áreas de ganho, representadas pelas transições cromáticas, evidenciam uma recuperação progressiva nas margens do estuário. Em particular, as expansões correspondentes aos períodos de 2010–2015 (magenta) e 2020–2022 (ciano) sugerem uma dinâmica de preenchimento em zonas que anteriormente apresentavam descontinuidade da cobertura vegetal, fortalecendo a conectividade ecológica do corredor em meio à pressão antrópica circundante.

Figura 2. Evolução do bosque de manguezal no Parque do Cocó, período 2010–2022.



Fonte: O autor.

A análise temporal dos reservatórios de carbono entre 2010 e 2022 evidenciou uma dinâmica diferenciada entre os componentes de biomassa vegetal e o solo (Tabela 1). A biomassa aérea (BA) e a biomassa subterrânea (BS) apresentaram uma tendência de crescimento sustentado ao longo do período de estudo. A média de carbono armazenado na BA aumentou de 13,8 MgC ha⁻¹ em 2010 para 19,6 MgC ha⁻¹ em 2022, enquanto a BS incrementou de 6,8 para 9,6 MgC ha⁻¹ no mesmo intervalo temporal, o que representa uma recuperação progressiva da cobertura vegetal.

Em contraste, o carbono orgânico do solo (COS) manteve-se como o reservatório predominante, representando a maior proporção do estoque total (69,5%), com valores médios estáveis situados entre 66,6 e 68,8 MgC ha⁻¹. Destaca-se ainda o aumento da desviação-padrão da biomassa ao final do período, indicando uma maior heterogeneidade espacial na acumulação de carbono nos anos mais recentes.

Tabela 1. Dinâmica temporal dos estoques de carbono nos manguezais do PEC

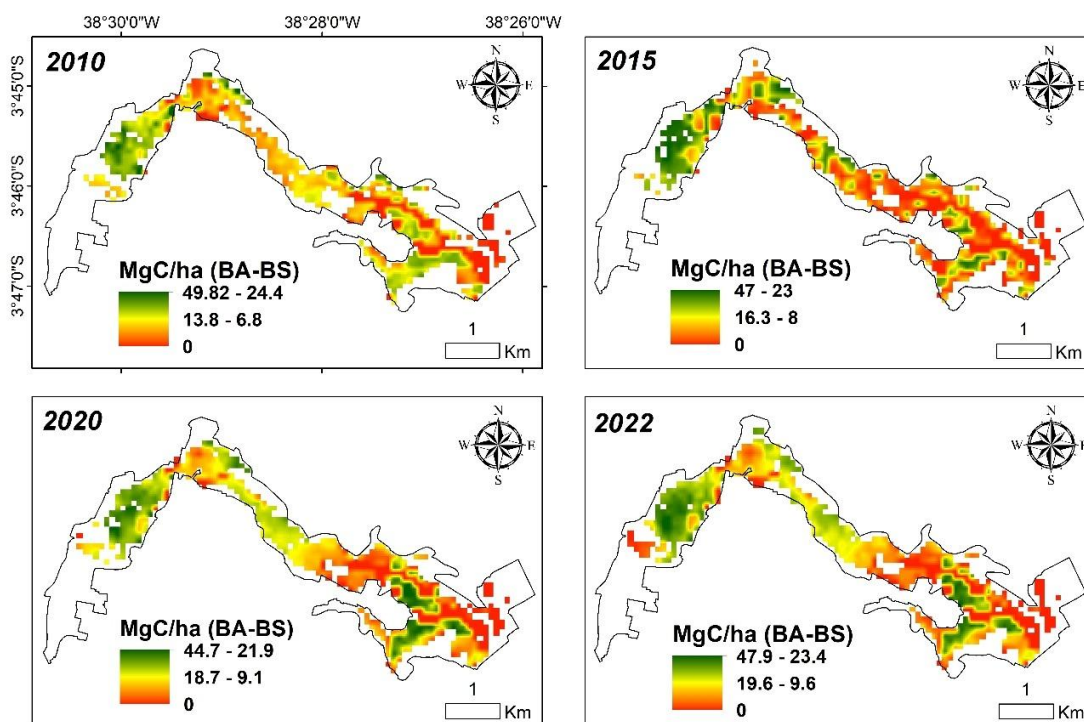
Ano	BA (MgC/ha)				BS (MgC/ha)				COS (MgC/ha)			
	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP
2010	0	49,8	13,8	9,8	0	24,4	6,8	4,8	0	130	67,3	19,5
2015	0	47	16,3	15,9	0	23	8	7,8	0	131	68,2	19,4
2020	0	44,7	18,7	13,9	0	21,9	9,1	6,8	0	132	68,8	19,4
2022	0	47,9	19,6	15	0	23,4	9,6	7,3	0	134	66,6	18,9

Fonte: O autor.

A distribuição espacial da densidade de carbono na biomassa revelou uma heterogeneidade estrutural pronunciada ao longo do perfil longitudinal do ecossistema (Figura 3). As maiores concentrações de carbono (representadas em verde) agrupam-se de forma consistente no setor ocidental e no setor central superior do parque, indicando a presença de povoamentos mais maduros e estruturalmente mais desenvolvidos.

Em contraste, o setor oriental, próximo à desembocadura, apresenta valores predominantemente baixos (tonalidades vermelhas e alaranjadas), sugerindo uma vegetação de menor porte ou em estágios sucessionais iniciais. Esse padrão de distribuição espacial manteve-se estável ao longo de todo o período de estudo (2010–2022), evidenciando que, apesar do aumento da extensão da área, a estrutura interna dos estoques de carbono conserva sua zonificação histórica.

Figura 3. Distribuição da densidade de carbono armazenado na biomassa viva.

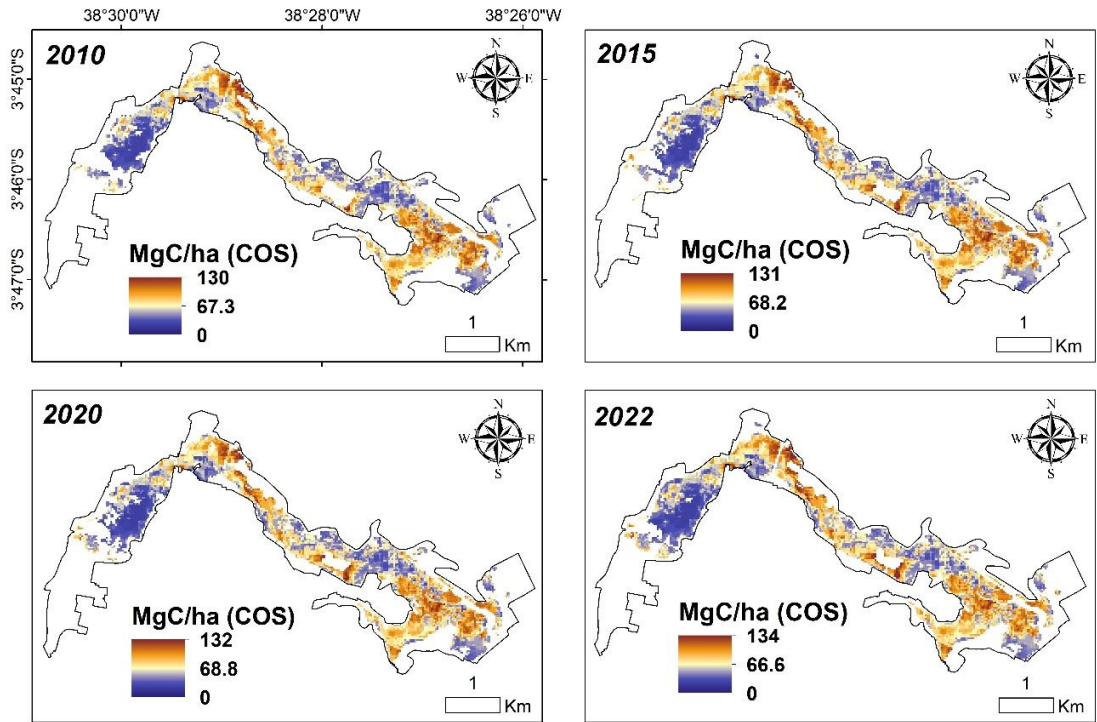


Fonte: O autor.

Por outro lado, identificou-se um marcado gradiente longitudinal, no qual as maiores reservas de COS concentram-se no setor oriental e nas margens do sistema estuarino, alcançando densidades máximas que aumentaram de 130 MgC ha^{-1} em 2010 para 134 MgC ha^{-1} em 2022 (tonalidades castanhas). Em contraste, o setor ocidental, apesar de sustentar a vegetação de maior porte estrutural, apresenta os níveis mais baixos de acumulação no solo (tonalidades azuis) (Figura 4). Sob uma perspectiva temporal, a distribuição do COS exibiu elevada estabilidade ao longo do período analisado, reafirmando a função do componente edáfico

como o principal reservatório de carbono do ecossistema, superando de forma significativa a biomassa viva em termos de densidade de armazenamento.

Figura 4. Distribuição da densidade de carbono armazenado no solo



Fonte: O autor.

Os resultados indicaram que o ecossistema funcionou como um sumidouro ativo e contínuo ao longo do período de 2010 a 2022, incrementando seu estoque total de carbono em 21,5%, ao passar de 45.988,9 MgC para 55.871,9 MgC (Tabela 2). Essa acumulação resulta da sinergia entre a recuperação da área de manguezal e a maturação estrutural dos povoamentos existentes. Em termos de impacto atmosférico, a capacidade de armazenamento do parque atingiu um máximo em 2022, com 205.049,8 Mg de CO₂ equivalente. Cabe destacar que, embora a densidade média de carbono tenha apresentado uma leve estabilização no período mais recente provavelmente em função da incorporação de áreas em regeneração inicial com menor biomassa, o balanço global do ecossistema manteve sua tendência positiva de captura.

Tabela 2. Dinâmica temporal dos serviços de sequestro de carbono e mitigação climática.

Ano	Manguezal (Ha)	Estoque médio total (MgC/ha)	Estoque total do manguezal (MgC)	CO ₂ eq (Mg)
2010	523,49	87,9	45988,9	168779,2
2015	547,74	92,5	50643	185859,8
2020	550,63	96,6	53203,9	195258,4

Ano	Manguezal (Ha)	Estoque médio total (MgC/ha)	Estoque total do manguezal (MgC)	CO ₂ eq (Mg)
2022	582,98	95,8	55871,9	205049,8

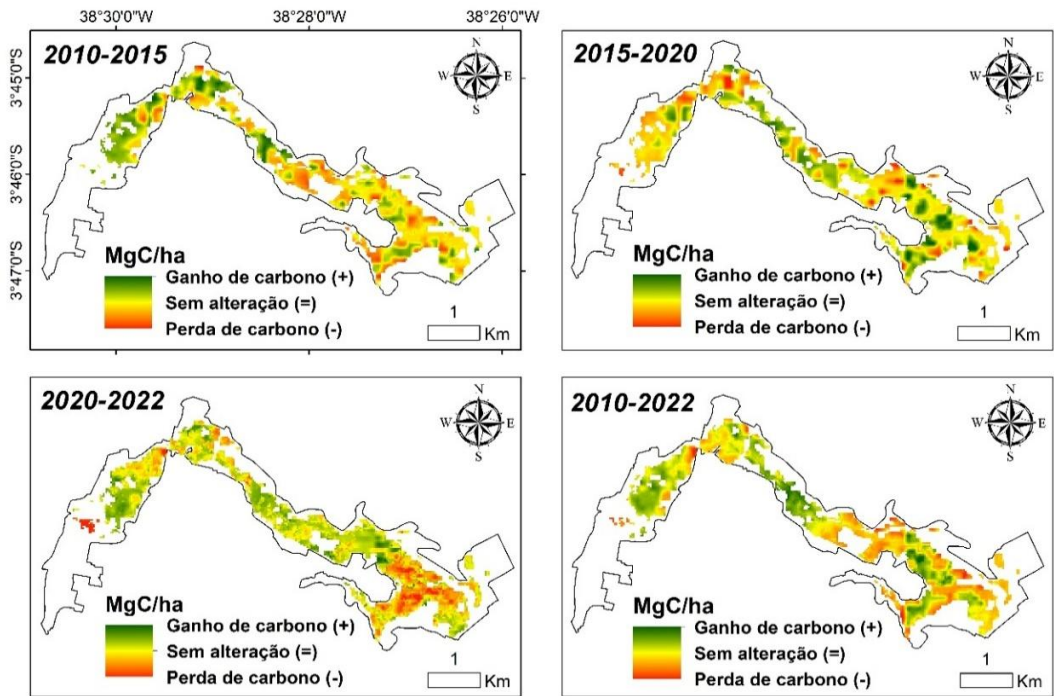
Fonte: O autor.

A análise das mudanças na densidade de carbono permite visualizar a dinâmica de acumulação do ecossistema em três etapas diferenciadas e um balanço acumulado (Figura 5). Durante o primeiro período (2010–2015), observou-se um predomínio generalizado de áreas de ganho de carbono (tonalidades verdes), concentradas principalmente no setor ocidental, o que é consistente com a fase de maior expansão territorial dos manguezais.

Em contraste, o intervalo intermediário (2015–2020) exibiu maior heterogeneidade espacial, caracterizada pelo aumento das zonas de estabilidade (amarelo) e pelo surgimento de focos dispersos de perda (vermelho), coincidindo com a desaceleração da taxa de crescimento do manguezal reportada. Posteriormente, o período de 2020–2022 mostrou uma reativação dos processos de sequestro nas bordas do ecossistema.

O balanço líquido acumulado (2010–2022) consolida a identificação de um padrão dual no ecossistema: um núcleo ocidental que funciona como um sumidouro ativo e contínuo, impulsionado pelo incremento de biomassa, e um setor oriental com uma dinâmica predominantemente estável, no qual as mudanças nos estoques de carbono são menos pronunciadas.

Figura 5. Dinâmica do fluxo de carbono e variabilidade temporal do manguezal.



Fonte: O autor.

DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo demonstram que o PEC funciona como um sumidouro ativo e resiliente de Carbono Azul em um contexto urbano e semiárido, contrastando com a tendência global de degradação e perda de manguezais associada à urbanização costeira (Branoff, 2017; Goldberg et al., 2020). O incremento líquido de 21,5% no estoque total de carbono entre 2010 e 2022, impulsionado tanto pela expansão da área de manguezal quanto pela maturação estrutural dos povoamentos existentes, evidencia que os manguezais urbanos não devem ser considerados ecossistemas marginais, mas sim componentes estratégicos das Soluções Baseadas na Natureza (SbN) para a mitigação climática (Wei et al., 2024).

A expansão territorial do manguezal (+11,3%) observada no PEC demonstra uma capacidade significativa de regeneração mesmo sob intensa pressão antrópica. Esse padrão está em consonância com estudos que documentam respostas positivas do crescimento de manguezais em ambientes urbanos quando as condições hidrológicas básicas se mantêm funcionais (Wei et al., 2024). No entanto, a desaceleração da acumulação de carbono registrada entre 2015 e 2020, acompanhada por maior heterogeneidade espacial e focos localizados de perda, indica que a capacidade de sequestro do ecossistema é sensível a estressores periódicos, possivelmente associados à variabilidade climática interanual, a eventos extremos ou a alterações hidrológicas locais (Osland et al., 2018). A reativação posterior do sequestro (2020–2022) reforça a hipótese de uma elevada resiliência ecológica do sistema, capaz de recuperar sua função de sumidouro após perturbações temporárias. Esse comportamento não linear ressalta a importância de avaliar a dinâmica do carbono sob uma perspectiva temporal e espacial, em vez de se basear exclusivamente em estimativas estáticas, particularmente em ecossistemas urbanos sujeitos a múltiplas pressões simultâneas (Lin et al., 2025).

Um dos achados centrais deste estudo é a clara diferenciação espacial e funcional entre os principais reservatórios de carbono do manguezal. Enquanto a BA e a BS atingiram suas maiores densidades no setor ocidental do parque caracterizado por povoamentos potencialmente mais maduros e estruturalmente desenvolvidos, as maiores concentrações de COS localizaram-se predominantemente no setor oriental e nas áreas próximas à desembocadura estuarina. Esse padrão valida a hipótese de uma dinâmica dual de reservatórios, na qual a biomassa vegetal atua como um sumidouro ativo e altamente dinâmico, sensível a processos de expansão, regeneração e distúrbio, enquanto o solo funciona como um reservatório dominante e relativamente estável, acumulando carbono em escalas temporais mais longas. Esse tipo de diferenciação funcional entre componentes de carbono tem sido documentado em diversos estudos globais sobre carbono do solo, que destacam diferenças espaciais e estruturais entre carbono orgânico do solo e biomassa (Sanderman et al., 2017).

A predominância do COS, que representa aproximadamente 69,5% do estoque total, é coerente com estimativas globais em manguezais (Donato et al., 2011; Atwood et al., 2017), porém sua elevada estabilidade temporal em um ambiente urbano semiárido constitui um achado particularmente relevante na região. A dissociação espacial entre a estrutura florestal

visível e o armazenamento de carbono edáfico reforça a ideia de que a aparência do bosque não é um indicador suficiente de seu valor climático (Donato et al., 2011). Manguezais jovens, degradados ou de borda, frequentemente subvalorizados em esquemas de conservação, podem abrigar estoques significativos de carbono antigo em seus solos, cuja perda implicaria emissões substanciais de CO₂ (Cinco-Castro et al., 2023; Zhang et al., 2024).

A estimativa de uma capacidade de armazenamento de até 205049,8 Mg de CO₂ equivalente posiciona o PEC como um ativo climático de elevada relevância em escala municipal e estadual. No contexto das NDCs do Brasil e das estratégias subnacionais de mitigação, esses resultados fornecem uma base quantitativa para integrar explicitamente os manguezais urbanos nos inventários de gases de efeito estufa (Rovai et al., 2022). Sob uma perspectiva de gestão, a identificação de uma dualidade funcional nos reservatórios de carbono implica que as estratégias de conservação não devem se concentrar exclusivamente nos povoamentos de maior biomassa, mas também na proteção das áreas com elevados estoques edáficos, mesmo quando a cobertura vegetal aparente seja limitada. Alterações hidrológicas, aterros ou a remoção de sedimentos nessas áreas podem liberar grandes quantidades de carbono previamente estabilizado, convertendo um sumidouro histórico em uma fonte líquida de emissões (Atwood et al., 2017).

Além disso, a metodologia empregada oferece uma ferramenta para apoiar o planejamento territorial urbano, permitindo identificar áreas prioritárias para restauração, proteção ou monitoramento contínuo sem depender de inventários de campo de alto custo. Isso é particularmente relevante em contextos urbanos do sul global, onde os recursos para a gestão ambiental são frequentemente limitados (Simard et al., 2019; Worthington et al., 2020). Embora a abordagem baseada na integração de produtos de sensoriamento remoto globais e regionais tenha permitido estabelecer uma linha de base de Carbono Azul para o PEC, reconhecem-se as limitações inerentes ao uso de modelos generalizados e à ausência de validação *in situ*. Essas incertezas afetam principalmente a magnitude absoluta dos estoques estimados, mas têm impacto menor sobre a identificação de tendências temporais e padrões espaciais, que constituem o foco principal do estudo (Simard et al., 2019). Pesquisas futuras devem priorizar a instalação de parcelas permanentes de monitoramento que permitam calibrar e refinar as estimativas satelitais, bem como a realização de amostragens edáficas profundas (≥ 1 m) para capturar o estoque total de carbono acumulado nos sedimentos de manguezal, o qual pode superar significativamente as estimativas baseadas no horizonte superficial (Zhang et al., 2024). Ademais, a integração de variáveis climáticas, hidrológicas e de qualidade da água permitirá avaliar de forma mais direta a sensibilidade do sumidouro de carbono azul frente à variabilidade climática e às pressões antrópicas urbanas.

CONCLUSÕES

A presente pesquisa estabeleceu a primeira linha de base geoespacial dos estoques de carbono azul do PEC, confirmando o papel estratégico desse ecossistema urbano como um sumidouro ativo de carbono. Os resultados demonstram que, apesar da pressão antrópica circundante, o parque incrementou suas reservas totais em 21,5% durante o período de 2010–2022, alcançando uma capacidade de armazenamento de 205049,8 Mg de CO₂ equivalente. A

análise espacial revelou uma dualidade funcional crítica para o manejo da área: um setor ocidental dinâmico, responsável pela captura ativa de carbono por meio do crescimento da biomassa, e um setor oriental que atua como um reservatório estável de carbono orgânico do COS, abrigando em seus solos as maiores densidades de carbono do sistema. Esses achados não apenas validam a resiliência do manguezal frente à urbanização, como também fornecem a evidência quantitativa necessária para integrar explicitamente os manguezais urbanos às NDCs e aos inventários de gases de efeito estufa, bem como para o desenvolvimento de mecanismos de financiamento climático que garantam sua conservação em longo prazo. Em conjunto, este estudo reforça a necessidade de reconhecer e proteger os manguezais urbanos como ativos climáticos estratégicos, cuja conservação contribui não apenas para a mitigação das mudanças climáticas, mas também para a sustentabilidade ecológica e territorial das cidades costeiras.

REFERÊNCIAS

- Araya- Lopez, R., Duarte de Paula Costa, M., & Wartman, M. (2023). Trends in the application of remote sensing in blue carbon science. *Ecology and Evolution*, 13, 1–13.
- 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*, 7(7), 523–528. <https://doi.org/10.1038/nclimate3326>
- Bernardino, Â., & Copertino, M. (Eds.). (2025). Potencial das florestas de mangue para ações de mitigação e adaptação às mudanças climáticas no Brasil. Centro de Síntese em Mudanças Ambientais e Climáticas-SIMACLIM. <https://simaclim.com.br/relatorio-manguezais/>
- Branoff, B. L. (2017). Quantifying the influence of urban land use on mangrove biology and ecology: A meta-analysis. *Global Ecology and Biogeography*, 00, 1–18. <https://doi.org/10.1111/geb.12638>
- Cavalcante, R. M., Sousa, F. W., Nascimento, R. F., Silveira, E. R., & Freire, G. S. S. (2009). The impact of urbanization on tropical mangroves (Fortaleza, Brazil): Evidence from PAH distribution in sediments. *Journal of Environmental Management*, 91(2), 328–335. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.08.020>
- Cifuentes-Jara, M., Brenes, C., Leandro, P., Molina, O., Romero, T. E., Torres, D., & Velásquez, S. (2018). Manual centroamericano para la medición de carbono azul en manglares. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Cinco-castro, S., Herrera-silveira, J., Montero, J. L., Hernández-núñez, H., & Hernández, C. T. (2023). Carbon stock in different ecological types of mangroves in a karstic region (Yucatan, México): an opportunity to avoid site scale emissions. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1–14. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1181542>

Do Carmo, M. (2020). Antigas Salinas Urbanas e sua Oportunidade para promover Cidades Verdes: O Caso do Parque Estadual do rio Cocó em Fortaleza, Ceará, Brasil. *Cuadernos de Investigación Urbanística*, 129, 89. <https://doi.org/10.20868/ciur.2020.129.4407>

Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5), 293–297. <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>

Goldberg, L., Lagomasino, D., Thomas, N., & Fatoyinbo, T. (2020). Global declines in human-driven mangrove loss. *Global Change Biology*, 26(10), 5844–5855. <https://doi.org/10.1111/gcb.15275>

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), 321–334. <https://doi.org/10.1002/lno.11607>

Hoyos-santillan, J., Chavarría, J., Castillo-bethanco, L. M., Vargas, J. E., Sanj, A., Jorge, M., Brian, L., & Candanedo, I. (2025). Soil carbon stock densities in mangrove and forested wetland ecosystems of Panama. *Scientific Data*, 12(1605), 1–8.

Komiyama, A., Ong, J. E., & Pongparn, S. (2008). Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany*, 89(2), 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.006>

Lin, Y., Liu, R., Shi, Y., Han, S., Zhao, H., & Peng, Z. (2025). Resilience of Mangrove Carbon Sequestration Under Typhoon Disturbance: Insights from Different Restoration Ages. *Forests*, 16, 1–20. <https://doi.org/10.3390/f16071165>

Macreadie, P. I., Anton, A., Raven, J. A., Beaumont, N., Connolly, R. M., Friess, D. A., Kelleway, J. J., Kennedy, H., Kuwae, T., Lavery, P. S., Lovelock, C. E., Smale, D. A., Apostolaki, E. T., Atwood, T. B., Baldock, J., Bianchi, T. S., Chmura, G. L., Eyre, B. D., Fourqurean, J. W., ... Duarte, C. M. (2019). The future of Blue Carbon science. *Nature Communications*, 10(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11693-w>

Macreadie, P. I., Costa, M. D. P., Atwood, T. B., Friess, D. A., Kelleway, J. J., Kennedy, H., Lovelock, C. E., & Serrano, O. (2021). Blue carbon as a natural climate solution. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2, 826–839.

Mariano Neto, M., da Silva, J. B., & de Brito, H. C. (2024). Carbon stock estimation in a Brazilian mangrove using optical satellite data. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(1), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12151-3>

MMA. (2016). Ceará: inventário florestal nacional, principais resultados. Ministério do Meio Ambiente. <https://www.fnds.gov.mz/mrv/index.php/documentos/relatorios/26-inventario-florestal-nacional/file>

Osland, M. J., Feher, L. C., López-portillo, J., Day, R. H., Sauman, D., Menéndez, J., & Rivera-monroy, V. H. (2018). Mangrove forests in a rapidly changing world: Global change

impacts and conservation opportunities along the Gulf of Mexico coast. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 214, 120–140. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.09.006>

Rovai, A. S., Twilley, R. R., Worthington, T. A., & Riul, P. (2022). Brazilian Mangroves: Blue Carbon Hotspots of National and Global Relevance to Natural Climate Solutions. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4, 1–11. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.787533>

Sanderman, J., Hengl, T., & Fiske, G. J. (2017). Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *PNAS*, 114(36), 9575–9580. <https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>

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), 1–12. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabe1c>

Santoro, M., Cartus, O., Carvalhais, N., Rozendaal, D. M. A., Avitabile, V., Araza, A., de Bruin, S., Herold, M., Quegan, S., Rodríguez-Veiga, P., Balzter, H., Carreiras, J., Schepaschenko, D., Korets, M., Shimada, M., Itoh, T., Moreno Martínez, Á., Cavlovic, J., Cazzolla Gatti, R., ... Willcock, S. (2021). The global forest above-ground biomass pool for 2010 estimated from high-resolution satellite observations. *Earth System Science Data*, 13, 3927–3950. <https://doi.org/10.5194/essd-13-3927-2021>

Simard, M., Fatoyinbo, L., Smetanka, C., Rivera-Monroy, V. H., Castañeda-Moya, E., Thomas, N., & Van der Stocken, T. (2019). Mangrove canopy height globally related to precipitation, temperature and cyclone frequency. *Nature Geoscience*, 12(1), 40–45. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0279-1>

Taillardat, P., Friess, D. A., & Lupascu, M. (2026). Mangrove blue carbon strategies for climate change mitigation are most effective at the national scale. *Biology Letters*, 14, 1–6. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0251/180212/rsbl.2018.0251.pdf>

Tang, W., Zheng, M., & Zhao, X. (2018). Big geospatial data analytics for global mangrove biomass and carbon estimation. *Sustainability*, 10(472), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su10020472>

Viana, M. C. (2003). Estudo da degradação no manguezal do Rio Cocó-Fortaleza/CE. *Revista Da Casa Da Geografia de Sobral*, 4(5), 55–65.

Wang, M., Zhang, T., Xie, Y., Zhang, Z., & Wu, X. (2025). Mapping accumulated carbon storage of global mangroves from 2000 to 2020 at a 1 km resolution. *Scientific Data*, 12(1), 552. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04881-5>

Wang, Z., Guo, F., Zeng, X., Huang, Z., Xie, H., & Ouyang, X. (2025). Trade-offs in aboveground and soil mangrove carbon stocks under species introduction: Remote Sensing Reveals Temporal Divergence in Restoration Trajectories. *Forests*, 16, 1–20. <https://doi.org/10.3390/f16111696>

Wei, S., Zhang, H., Xu, Z., Lin, G., Lin, Y., Liang, X., Ling, J., Wee, A. K. S., Lin, H., Zhou, Y., & Gong, P. (2024). Coastal urbanization may indirectly positively impact growth of mangrove forests. *Communications Earth and Environment*, 5(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01776-y>

Worthington, T. A., zu Ermgassen, P. S. E., Friess, D. A., Krauss, K. W., Lovelock, C. E., Thorley, J., Tingey, R., Woodroffe, C. D., Bunting, P., Cormier, N., Lagomasino, D., Lucas, R., Murray, N. J., Sutherland, W. J., & Spalding, M. (2020). A global biophysical typology of mangroves and its relevance for ecosystem structure and deforestation. *Scientific Reports*, 10(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71194-5>

Zhang, J., Gan, S., Yang, P., Zhou, J., Huang, X., Chen, H., He, H., Saintilan, N., Sanders, C. J., & Wang, F. (2024). A global assessment of mangrove soil organic carbon sources and implications for blue carbon credit. *Nature Communications*, 15(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-53413-z>