

Avaliação do sensoriamento remoto aplicado à estimativa de estoque de carbono no manguezal do Parque Estadual do Cocó

Remote sensing-based assessment of carbon stock estimation in the mangroves of Cocó State Park

Mauricio Alejandro, Perea-Ardila (1)

Pertenencia institucional

(1) Doutorando em Geografia, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Ceará.

Correspondencia

mauricio.perea@alu.ufc.br

ORCID

Perea-Ardila
0000-0003-4561-0251

Resumen

O estudo avaliou a aplicação do sensoriamento remoto na estimativa das reservas de carbono nos manguezais do Parque Estadual do Cocó (PEC), um ecossistema costeiro urbano de alta relevância ecológica em Fortaleza. Os manguezais, reconhecidos como sumidouros de "carbono azul", desempenham um papel essencial na mitigação das mudanças climáticas. No entanto, sua degradação e fragmentação, associadas às pressões urbanas e aos incêndios florestais, ameaçam reverter essa função ecológica. A pesquisa integrou dados do Inventário Florestal Nacional do Brasil com imagens Landsat 8 processadas no Google Earth Engine. Aplicaram-se equações alométricas específicas para estimar a biomassa aérea (AGB) e subterrânea (BGB), e utilizou-se o NDVI para modelar a distribuição espacial do carbono. Os resultados mostraram maiores valores de biomassa nas zonas interiores estuarinas e menores nas interfaces urbano-mangue. As medições de campo estimaram um estoque médio de 28,85 Mg C ha, dominado por *R. mangle* (65,34%), enquanto o NDVI indicou 68,43 Mg C ha, superestimando em 2,37 vezes os dados in situ. Essa diferença é atribuída à saturação do NDVI e à falta de calibração local. Os resultados evidenciam o potencial do sensoriamento remoto para gerar estimativas espaciais contínuas, mas também a necessidade de validação com dados de campo para aprimorar a precisão e apoiar a gestão sustentável do PEC.

Palabras clave:

Carbono azul; Landsat 8; Mangue urbano; Mitigação climática

Abstract

The study evaluated the application of remote sensing for estimating carbon stocks in the mangroves of the Cocó State Park (PEC), an urban coastal ecosystem of high ecological significance in Fortaleza, Brazil. Mangroves, recognized as major "blue carbon" sinks, play a crucial role in mitigating climate change. However, their degradation and fragmentation, driven by urban pressures and forest fires, threaten to reverse this ecological function. The research integrated data from Brazil's National Forest Inventory with Landsat 8 imagery processed in Google Earth Engine. Species-specific allometric equations were applied to estimate aboveground (AGB) and belowground biomass (BGB), while the NDVI was used to model the spatial distribution of carbon. The results revealed higher biomass values in the inner estuarine zones and lower values along the urban-mangrove interfaces. Field measurements estimated an average carbon stock of 28.85 Mg C ha, dominated by *R. mangle* (65.34%), whereas NDVI-derived estimates reached 68.43 Mg C ha, overestimating field data by a factor of 2.37. This discrepancy is attributed to NDVI saturation in dense canopies and the lack of local calibration. The findings highlight the potential of remote sensing to produce spatially continuous estimates of carbon storage, while emphasizing the importance of field-based validation to enhance accuracy and support sustainable management of the PEC mangrove ecosystem.

Key words:

Blue carbon; Landsat 8; Urban mangrove; Climate mitigation

Avaliação do sensoriamento remoto aplicado à estimativa de estoque de carbono no manguezal do Parque Estadual do Cocó

Remote sensing-based assessment of carbon stock estimation in the mangroves of Cocó State Park

Nome autor, Afiliação (Centro de Investigação/Departamento, Universidade), País, e-mail

 ORCID

Resumo: O estudo avaliou a aplicação do sensoriamento remoto na estimativa das reservas de carbono nos manguezais do Parque Estadual do Cocó (PEC), um ecossistema costeiro urbano de alta relevância ecológica em Fortaleza. Os manguezais, reconhecidos como sumidouros de “carbono azul”, desempenham um papel essencial na mitigação das mudanças climáticas. No entanto, sua degradação e fragmentação, associadas às pressões urbanas e aos incêndios florestais, ameaçam reverter essa função ecológica. A pesquisa integrou dados do Inventário Florestal Nacional do Brasil com imagens Landsat 8 processadas no Google Earth Engine. Aplicaram-se equações alométricas específicas para estimar a biomassa aérea (AGB) e subterrânea (BGB), e utilizou-se o NDVI para modelar a distribuição espacial do carbono. Os resultados mostraram maiores valores de biomassa nas zonas interiores estuarinas e menores nas interfaces urbano-mangue. As medições de campo estimaram um estoque médio de 28,85 Mg C ha, dominado por *R. mangle* (65,34%), enquanto o NDVI indicou 68,43 Mg C ha, superestimando em 2,37 vezes os dados in situ. Essa diferença é atribuída à saturação do NDVI e à falta de calibração local. Os resultados evidenciam o potencial do sensoriamento remoto para gerar estimativas espaciais contínuas, mas também a necessidade de validação com dados de campo para aprimorar a precisão e apoiar a gestão sustentável do PEC.

Palavras-chave: Carbono azul, Landsat 8, Mangue urbano, Mitigação climática.

Abstract: The study evaluated the application of remote sensing for estimating carbon stocks in the mangroves of the Cocó State Park (PEC), an urban coastal ecosystem of high ecological significance in Fortaleza, Brazil. Mangroves, recognized as major “blue carbon” sinks, play a crucial role in mitigating climate change. However, their degradation and fragmentation, driven by urban pressures and forest fires, threaten to reverse this ecological function. The research integrated data from Brazil's National Forest Inventory with Landsat 8 imagery processed in Google Earth Engine. Species-specific allometric equations were applied to estimate aboveground (AGB) and belowground biomass (BGB), while the NDVI was used to model the spatial distribution of carbon. The results revealed higher biomass values in the inner estuarine zones and lower values along the urban–mangrove interfaces. Field measurements estimated an average carbon stock of 28.85 Mg C ha, dominated by *R. mangle* (65.34%), whereas NDVI-derived estimates reached 68.43 Mg C ha, overestimating field data by a factor of 2.37. This discrepancy is attributed to NDVI saturation in dense canopies and the lack of local calibration. The findings highlight the potential of remote sensing to produce spatially continuous estimates of carbon storage, while emphasizing the importance of field-based validation to enhance accuracy and support sustainable management of the PEC mangrove ecosystem.

Keywords: Blue carbon, Landsat 8, Urban mangrove, Climate mitigation.

Introdução

Os manguezais são ecossistemas costeiros tropicais e subtropicais de importância global vital devido aos múltiplos serviços ecossistêmicos que proporcionam, incluindo

a proteção costeira, a manutenção da biodiversidade e, de forma crucial, a mitigação das mudanças climáticas (Donato et al., 2011; Hamilton & Friess, 2018). Esses bosques são amplamente reconhecidos como reservatórios de “carbono azul”, pois sequestram e armazenam carbono em sua biomassa aérea e subterrânea, bem como em seus solos, em taxas que podem superar em até cinco vezes as de outros tipos de florestas terrestres, podendo manter esse carbono fixado por milênios (Donato et al., 2011; Macreadie et al., 2019). De fato, estima-se que os manguezais do mundo armazenem o equivalente a mais de 21 gigatoneladas de CO₂ (Leal & Spalding, 2024). Apesar de seu valor insubstituível, os manguezais são altamente vulneráveis ao desmatamento, à degradação e aos efeitos das mudanças climáticas, o que ameaça liberar para a atmosfera o carbono armazenado, intensificando o aquecimento global (Hamilton & Friess, 2018). Portanto, a quantificação precisa dos estoques de carbono nesses ecossistemas constitui um requisito fundamental para o planejamento efetivo de estratégias de conservação, manejo sustentável e implementação de mecanismos financeiros, como os projetos de carbono azul (Simpson & Smart, 2024).

O Brasil abriga extensos e diversos ecossistemas de manguezais, distribuídos ao longo de sua costa atlântica, especialmente em regiões como Amapá, Maranhão, Pará e Bahia, formando um dos maiores corredores de manguezais do mundo (Rovai et al., 2021). Esses ecossistemas costeiros são de extrema importância, pois desempenham funções ecológicas essenciais para a conservação da biodiversidade, a proteção da linha costeira e a mitigação das mudanças climáticas (Goldberg et al., 2020). Estudos anteriores realizados em manguezais brasileiros relatam estoques médios de carbono variando entre 250 e 500 Mg C ha⁻¹, dependendo do tipo de floresta e das condições hidrológicas locais (Hatje et al., 2021; Kauffman et al., 2020).

O Parque Estadual do Cocó (PEC) constitui uma área de conservação que abriga manguezais responsáveis por importantes serviços ecossistêmicos na região de Fortaleza. No entanto, assim como em muitos manguezais urbanos, as informações quantitativas e espacialmente detalhadas sobre seus estoques de carbono são limitadas ou fragmentadas. Portanto, torna-se necessário estimar as reservas de carbono no PEC, especialmente considerando que o parque tem sido afetado por incêndios florestais que impactaram significativamente a cobertura vegetal (Perea-Ardila et al., 2023; Perea-Ardila & Muñoz, 2024), o que pode transformar esses ecossistemas de sumidouros em fontes de gases de efeito estufa, reforçando a relevância de gerar dados específicos para ecossistemas urbanos como o PEC.

Tradicionalmente, a estimativa dos estoques de carbono tem se baseado em medições de campo, um método rigoroso, porém frequentemente oneroso e limitado quanto à cobertura espacial e temporal. A tecnologia de sensoriamento remoto surgiu como uma ferramenta inovadora e eficiente para superar essas limitações, possibilitando o monitoramento e a estimativa da biomassa e do carbono armazenado em diferentes escalas espaciais (Cardona Lindo et al., 2019). O uso de imagens de satélite e índices espectrais, em conjunto com modelos matemáticos, tem demonstrado alta precisão na classificação da cobertura de manguezais e na predição da biomassa aérea, especialmente quando complementado por dados de campo

(Mariano Neto et al., 2024). No entanto, esse tipo de abordagem ainda não foi amplamente testado em contextos urbanos ou em manguezais sujeitos a fortes pressões antrópicas, nos quais a heterogeneidade estrutural e as alterações na cobertura vegetal podem afetar a resposta espectral e a precisão dos modelos de estimativa (Hamilton & Friess, 2018). Nesse sentido, os manguezais urbanos do Brasil, como os do Parque Estadual do Cocó, oferecem uma oportunidade valiosa para avaliar a capacidade dos sensores orbitais de estimar os estoques de carbono em ambientes costeiros dinâmicos, onde a interação entre processos naturais e humanos determina a estrutura e a funcionalidade do ecossistema.

Portanto, o objetivo deste estudo é avaliar a aplicação do sensoriamento remoto por meio do uso de imagens de satélite Landsat 8 para a estimativa dos estoques de carbono (biomassa aérea e subterrânea) nos manguezais do PEC. Espera-se que esta pesquisa forneça informações valiosas para a gestão e conservação do parque, contribuindo para as estratégias de mitigação das mudanças climáticas em nível local e regional.

1. O Parque Estadual do Cocó - PEC

está localizado no município de Fortaleza, estado do Ceará, Nordeste do Brasil, entre as coordenadas aproximadas de 3°45'–3°46' S e 38°29'–38°30' O, abrangendo uma área de aproximadamente 1.571 ha (Pasquini, 2020). O parque constitui o principal corredor ecológico urbano de Fortaleza e representa uma das maiores áreas verdes de manguezal em contexto metropolitano no Brasil (Do Carmo, 2020). O relevo predominante corresponde a planícies flúvio-marinhas e tabuleiros costeiros de baixa altitude (Farias et al., 2018). O rio Cocó forma um estuário tropical dominado por manguezais e vegetação de restinga adaptada a condições de salinidade variável e alagamento periódico (Maia, 2016).

O clima da região é tropical quente semiárido de transição, com temperatura média anual entre 26,5 e 27,5 °C, umidade relativa superior a 70% e precipitação média anual variando de 1.200 a 1.600 mm, concentrada entre fevereiro e maio (Pasquini, 2020). A vegetação do PEC inclui espécies típicas de manguezal, como *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* e *Laguncularia racemosa*, além de comunidades de restinga e fragmentos de mata de tabuleiro (Maia, 2016). Do ponto de vista ecológico, o PEC desempenha funções essenciais na regulação microclimática urbana, no armazenamento de carbono azul, no controle de inundações e no suporte à biodiversidade, abrigando mais de 130 espécies de aves, 20 de peixes e 15 de mamíferos, além de uma importante macrofauna bentônica (Pasquini, 2020).

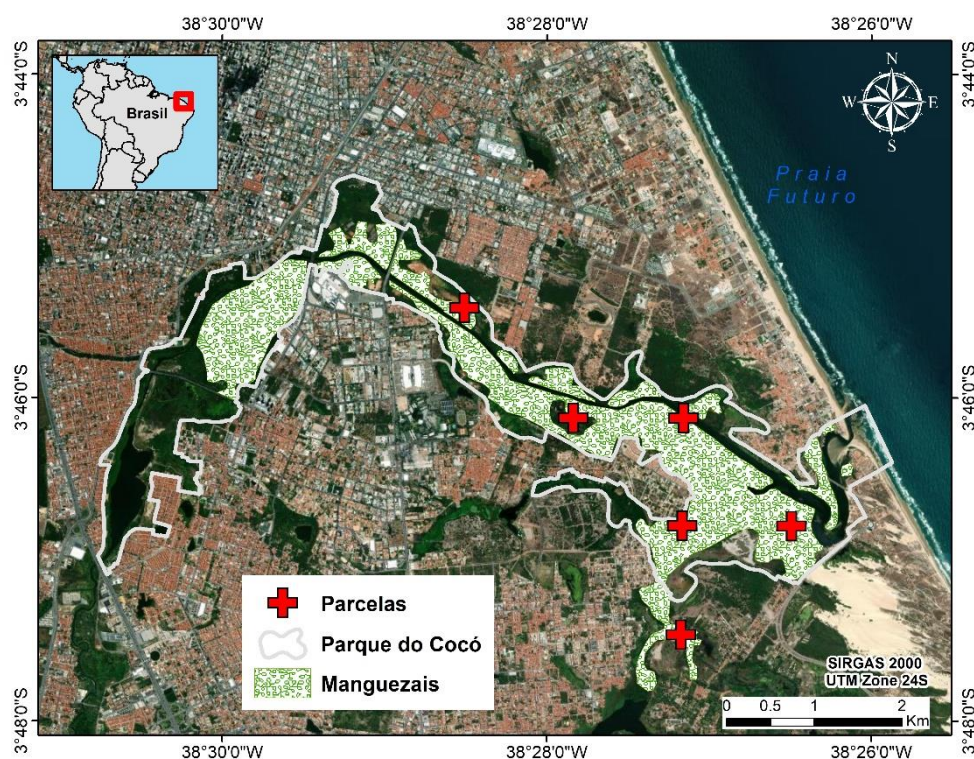


Figura 1: Localização do Parque Estadual do Cocó, Fortaleza. Nota: A imagem apresenta o Trecho 1 do PEC.

2. Estrutura florestal e estoques de carbono na biomassa

Foram utilizados dados de acesso aberto provenientes do Inventário Florestal Nacional (IFN) do Brasil, referentes ao levantamento realizado em 2014, com o objetivo de caracterizar os recursos de manguezal presentes na área de estudo (Serviço Florestal Brasileiro [SFB], 2025) (<https://snif.florestal.gov.br/pt-br/temas-florestais/ifn>). As informações utilizadas derivaram de seis conglomerados de amostragem, cada um composto por quatro parcelas de 20 × 50 m, nas quais foi registrada a presença de formações de manguezal dentro do PEC.

Em cada parcela, foram inventariados os indivíduos com diâmetro à altura do peito (dap) ≥ 10 cm, seguindo os protocolos estabelecidos pelo IFN para a caracterização estrutural de florestas tropicais e costeiras (MMA, 2016). Os principais dados registrados incluíram a identificação taxonômica das espécies e o DAP, variáveis fundamentais para o cálculo da biomassa aérea (AGB), biomassa abaixo do solo (BGB) e dos estoques de carbono em ecossistemas de manguezal.

A biomassa aérea (BA) foi estimada aplicando-se equações alométricas específicas para cada espécie de manguezal registrada, que incorporam o dap de cada indivíduo, seguindo metodologias amplamente utilizadas em ecossistemas costeiros (Cifuentes-Jara et al., 2018; Howard et al., 2014). Da mesma forma, a biomassa subterrânea (BS) foi estimada a partir da relação alométrica proposta por Komiyama et al. (2008), a qual permite obter uma estimativa do componente abaixo da superfície do solo com base no dap e na densidade da madeira (Tabela I).

O carbono total foi calculado assumindo um fator de conversão padrão de 47% da biomassa (IPCC, 2013). Por fim, os valores de carbono foram convertidos em carbono

equivalente (CO₂e) utilizando o fator estequiométrico de 3,67, que corresponde à relação entre as massas moleculares do CO₂ e do C (IPCC, 2006). Esse procedimento permitiu quantificar, de forma padronizada, os estoques de carbono aéreo e subterrâneo, bem como seu potencial de mitigação climática.

Tabela I. Equações alométricas para o cálculo da biomassa aérea

Espécie	Equação	ρ (g/m ³)	R ²
<i>Avicennia germinans</i>	BA = 0,14 dap ^{2,4}	0,75	0,97
<i>Laguncularia racemosa</i>	BA = 0,1023 dap ^{2,5}	0,62	0,97
<i>Rhizophora mangle</i>	BA = 0,1282 dap ^{2,6}	0,89	0,92
Biomassa subterrânea	BS = 0,199(p*(dap ^{2,22}))	-	0,71

Onde: BA: biomassa aérea (kg indivíduo); BS: biomassa subterrânea; dap: diâmetro à altura do peito (cm); p: densidade da madeira.

2.1. Estimativa da biomassa e do carbono com sensoriamento remoto

Foi utilizada uma imagem de satélite Landsat 8 OLI/TIRS (Nível 2, Coleção 2) correspondente a 5 de agosto de 2014, que fornece valores de reflectância de superfície corrigidos atmosféricamente e ortorretificados. O processamento foi realizado no ambiente do Google Earth Engine (GEE), onde as bandas espectrais foram calibradas aplicando-se os fatores de escala fornecidos pelo USGS, com o objetivo de obter valores de reflectância de superfície normalizados (faixa 0–1).

Em seguida, foi calculado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para a área de cobertura de manguezal do Parque Estadual do Cocó (PEC), cuja extensão aproximada é de 529,61 ha (IBAMA, 2021). Esse índice permitiu caracterizar a condição espectral e o vigor vegetativo do manguezal, constituindo uma variável-chave para a estimativa indireta da biomassa e do carbono.

Posteriormente, foi empregada a equação alométrica proposta por Mariano Neto et al. (2024) para estimar a biomassa aérea (BA) a partir dos valores de NDVI. Essa equação foi desenvolvida especificamente para ecossistemas de manguezal do rio Gramame, localizado entre os municípios de Conde e João Pessoa, no estado da Paraíba, Brasil, sob condições ambientais e estruturais semelhantes às do Parque Estadual do Cocó (PEC).

$$NDVI_{mb} = 39,659 * \left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED} \right)^{12,646} \quad R^2 = 0,90$$

Onde:

NDVI_{mb} = Biomassa aérea.

NIR: Banda infravermelha do Landsat 8 (banda 5).

RED: Banda vermelha do Landsat 8 (banda 4).

O uso desse modelo empírico permitiu estabelecer uma relação funcional entre o vigor espectral e a biomassa, proporcionando uma estimativa não destrutiva e espacialmente contínua dos estoques de carbono nos manguezais da área de estudo.

3. Resultados

3.1. Determinação de atributos estruturais e carbono na biomassa

Os valores de DAP confirmam a presença de povoamentos de manguezal maduros (dap > 12 cm), constituindo um indicador essencial da biomassa individual. Os estoques de carbono na biomassa dos manguezais da área de estudo apresentaram marcada heterogeneidade espacial entre os conglomerados avaliados (Tabela II). O carbono total na vegetação variou de um mínimo de 0,09 MgC/ha no conglomerado CE_70_Q4 até um máximo de 11,79 MgC/ha no CE_70_Q15.

Essa disparidade esteve fortemente associada à densidade de árvores; os conglomerados CE_70_Q15 (230 árvores) e CE_70_P2 (194 árvores) concentraram os maiores estoques de carbono, resultando nos maiores valores de CO₂ equivalente, com 43,27 Mg/ha e 37,03 Mg/ha, respectivamente.

Tabla II. Estructura forestal y reservas de carbono en biomazas

Parcela	dap médio	Densidade (Nº de árvores)	Carbono na biomassa (MgC/ha)			CO ₂ eq (Mg/ha)
			AGB	BGB	Carbono na vegetação	
CE_70_P2	17,92	194	6,5	3,59	10,09	37,03
CE_70_Q15	17,89	230	7,69	4,1	11,79	43,27
CE_70_Q4	12,4	5	0,06	0,03	0,09	0,33
CE_CO36_P43	18,42	47	1,87	1,1	2,97	10,90
CE_CO36_Q182	13,44	37	0,57	0,28	0,85	3,12
CE_CO36_Q183	16,82	69	1,9	1,15	3,05	11,19

A quantificação dos estoques de carbono na biomassa dos manguezais por espécie evidenciou a dominância ecológica e funcional de *Rhizophora mangle* (Tabela III). Do total de carbono armazenado na vegetação, essa espécie contribuiu com 65,34% (18,85 MgC/ha). A alta capacidade de sequestro de carbono de *R. mangle* está correlacionada à combinação do maior DAP médio (18,09 cm) e da maior densidade de indivíduos (339). No total, o estoque de carbono na vegetação do manguezal alcança 28,85 MgC/ha, equivalente a 105,88 Mg/ha de CO₂ capturado.

Tabla III. Reservas de carbono en la biomasa en términos de especie

Especies	dap (médio)	Densidade (Nº de árvores)	Carbono na biomassa (MgC/ha)			Estoque de Carbono	CO ₂ eq (Mg/ha)
			AGB	BGB	Carbono na vegetação		
<i>R. mangle</i>	18,09	339	11,78	7,07	18,85	65,34%	69,18
<i>L. racemosa</i>	16,46	138	3,71	1,59	5,3	18,37%	19,45
<i>A. germinans</i>	16,87	105	3,11	1,59	4,7	16,29%	17,25
<i>Total</i>	-	582	18,6	10,25	28,85	100%	105,88

A estimativa dos estoques de biomassa e carbono por sensoriamento remoto com imagens Landsat 8 revelou uma distribuição espacial altamente variável (Tabela IV). A biomassa total por pixel variou entre 0 Mg/pixel (indicando áreas sem cobertura florestal) e um máximo de 51,27 Mg/pixel, com valor médio de 13,10 Mg/pixel. O

carbono médio na vegetação foi estimado em 6,16 MgC/píxel, com valor máximo de 24,10 MgC/píxel.

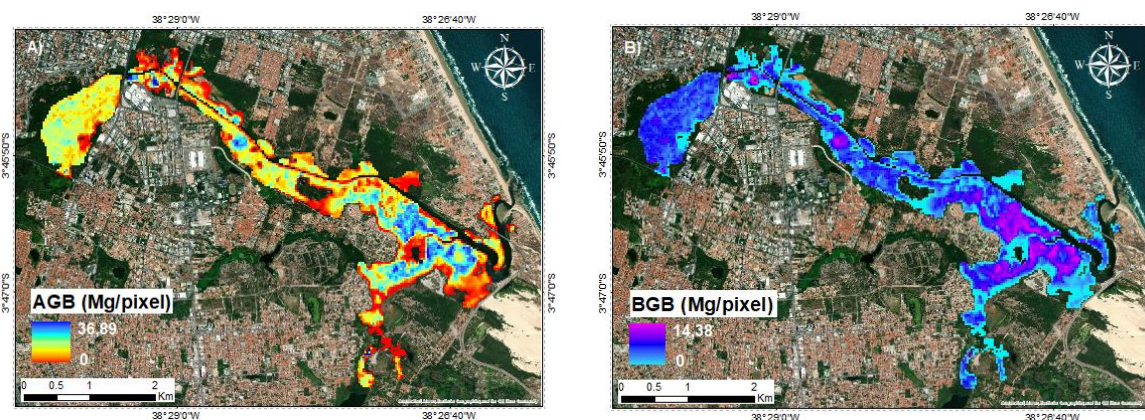
Observou-se uma marcada heterogeneidade nos estoques, evidenciada pelo alto desvio padrão da biomassa aérea (AGB 5,54 Mg/píxel), o que sugere grandes variações na densidade e altura do dossel ao longo da área de estudo. A análise em nível de píxel indicou que a biomassa aérea (AGB 8,89 Mg/píxel) contribuiu de forma predominante para o armazenamento total de biomassa, representando consistentemente a maior fração em comparação com a biomassa subterrânea (BGB 3,67 Mg/píxel).

Tabela IV. Estatísticas de biomassa e carbono estimadas por sensoriamento remoto

Landsat 8	AGB (Mg/píxel)	BGB (Mg/píxel)	Biomassa total (Mg/píxel)	Carbono na vegetação (MgC/píxel)
Mín	0	0	0	0
Máx	36,89	14,38	51,27	24,10
Média	8,89	3,67	13,10	6,16
Sd	5,54	1,16	4,13	1,94

A distribuição espacial do carbono na vegetação, obtida por meio da aplicação do modelo de NDVI, confirmou a alta heterogeneidade estrutural do manguezal. Os mapas mostram que as maiores concentrações de AGB de até 36,89 Mg/píxel, estão localizadas predominantemente nas áreas internas do estuário e na borda ocidental, enquanto as zonas próximas à foz e à interface urbano-mangue apresentam valores baixos ou nulos (Figura 2A).

Essa tendência também se refletiu na distribuição da biomassa subterrânea (BGB) e da biomassa total (BT), sugerindo que as condições internas, possivelmente associadas a menor perturbação e melhores condições hidrológicas favorecem o desenvolvimento dos manguezais (Figuras 2B e 2C). Em contraste, o estoque de carbono (24,10 MgC/píxel) apresentou os valores mais baixos nas áreas com impacto urbano e fragmentação, confirmando que a integridade estrutural do ecossistema é o fator dominante na capacidade de armazenamento de carbono (Figura 2D). Portanto, os valores máximos de reservas de carbono se localizam nas porções interiores mais bem conservadas, enquanto a periferia e as zonas perturbadas atuam como sumidouros de carbono significativamente menores.



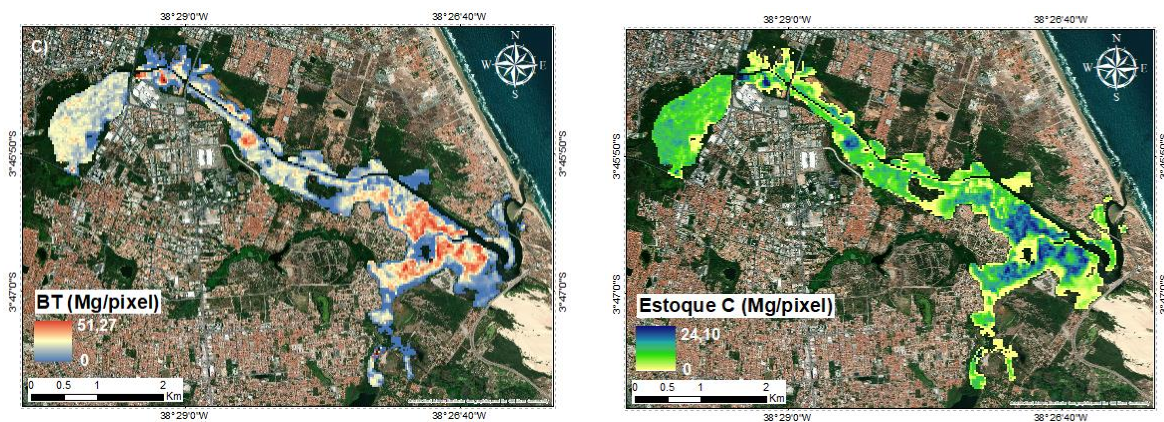


Figura 2: Variação espacial da biomassa e do carbono na vegetação do mangue

A comparação do estoque total de carbono obtido por meio da medição direta em parcelas com a estimativa por sensoriamento remoto com o Landsat 8 (utilizando o NDVI) revelou uma discrepância significativa entre ambas as metodologias (Figura 3). O estoque médio de carbono estimado por hectare a partir das parcelas foi de 28,85 MgC/ha, enquanto o modelo baseado no Landsat 8 apresentou um valor consideravelmente maior, de 68,43 MgC/ha.

Essa diferença, equivalente a 2,37 vezes, resultou em uma superestimação das reservas totais de carbono na área de estudo; o sensoriamento remoto estimou 36,24 Gg C (equivalente a 133,02 Gg CO₂), mais do que o dobro dos valores obtidos nas medições de campo.

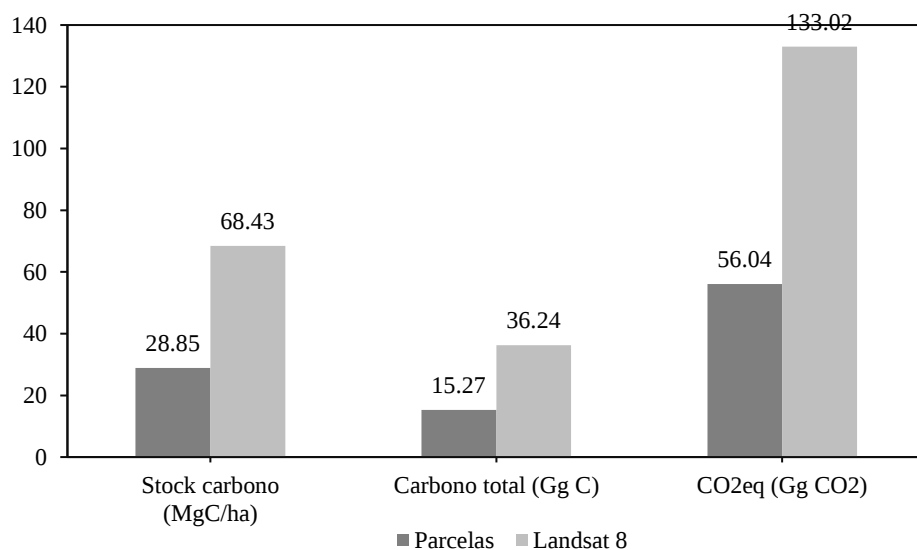


Figura 3: Comparação das reservas de carbono e biomassa

4. Discussão

A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto, especificamente o uso de imagens Landsat 8 e do NDVI, para estimar as reservas de carbono nos manguezais do PEC, forneceu dados valiosos sobre a distribuição espacial e a magnitude dos depósitos de carbono azul em um ecossistema costeiro urbano. Os resultados estimaram uma AGB

de 8,89 Mg por pixel e uma BGB de 3,67 Mg por pixel por meio do sensoriamento remoto, o que corresponde a um estoque total de carbono vegetal de 68,43 Mg C ha. Por outro lado, as medições em campo, derivadas dos dados do Inventário Florestal Nacional e de equações alométricas, estimaram um estoque total de carbono menor, de 28,85 Mg C ha⁻¹, com *R. mangle* dominando com 65,34% do carbono armazenado. Essa discrepância, na qual o sensoriamento remoto superestima em aproximadamente 2,37 vezes, evidencia tanto o potencial quanto as limitações dos índices derivados de satélites para a quantificação do carbono em sistemas de manguezais heterogêneos.

Vários fatores podem contribuir para essas divergências metodológicas. A resolução espacial de 30 m do Landsat 8 pode agregar sinais espectrais de pixels mistos, incorporando áreas sem vegetação ou zonas de transição, resultando em valores inflacionados do NDVI e consequente superestimação da biomassa (Mariano Neto et al., 2024). A saturação do NDVI é outro problema crítico; em copas densas, como as dos manguezais maduros (dap > 12 cm, conforme observado), o índice se estabiliza, reduzindo a sensibilidade às variações na densidade da biomassa (Huete et al., 2002). O modelo alométrico empregado para o sensoriamento remoto, adaptado de Mariano Neto et al. (2024) para um manguezal semelhante na Paraíba, pode não considerar plenamente as condições locais do PEC, como a salinidade variável e as inundações periódicas, que influenciam a densidade da madeira (ρ) e a arquitetura das raízes (Komiya et al., 2008).

Os métodos de campo, embora precisos em escala de parcela (20×50m), são suscetíveis a vieses de amostragem em ambientes espacialmente heterogêneos, podendo resultar em sub-representação de florestas de alta densidade. Além disso, a exclusão do carbono orgânico do solo em ambos os métodos, que se concentram apenas na biomassa vegetal, limita a comparabilidade, já que os solos frequentemente representam entre 50% e 90% do carbono azul dos manguezais (Donato et al., 2011). Em comparação, as reservas de carbono derivadas em campo (28,85 Mg C ha) coincidem com as estimativas mais baixas para os manguezais brasileiros, onde autores como Hatje et al. (2021) relataram valores de carbono vegetal variando entre 20 e 100 Mg C ha na Baía de Todos os Santos (BA), destacando a variabilidade espacial impulsionada pelos regimes de maré e pressões antrópicas.

Contudo, ao incluir o carbono do solo, Kauffman et al. (2020) documentaram reservas totais de carbono do ecossistema entre 250 e 500 Mg C ha em amplos manguezais do Brasil, ressaltando que o contexto urbano do PEC pode reduzir os estoques devido à fragmentação e aos incêndios registrados (Perea-Ardila et al., 2023). Em escala global, os manguezais tropicais apresentam médias mais elevadas; Donato et al. (2011) estimaram 1023 Mg C ha nos sistemas do Índico-Pacífico, com uma contribuição vegetal entre 20% e 30%, enquanto Macreadie et al. (2019) destacaram o papel do carbono azul na mitigação das mudanças climáticas, apontando que as taxas de sequestro são até cinco vezes maiores que as das florestas terrestres. Avaliações recentes, como a de Leal & Spalding (2024), quantificam o carbono global dos manguezais em mais de 21 Gt CO₂e, sublinhando a contribuição do PEC para as reservas regionais de carbono azul diante das pressões atuais.

Os avanços recentes em sensoriamento remoto oferecem caminhos para reconciliar essas discrepâncias. Por exemplo, os modelos de altura do dossel derivados do

LiDAR, integrados a dados ópticos, aprimoram as previsões de biomassa ao mitigar a saturação do NDVI; Wang et al. (2020) reduziram o esforço de amostragem de campo em aproximadamente 39% no nordeste da ilha de Hainan (China) utilizando a integração UAV-LiDAR. O radar de abertura sintética (SAR) do Sentinel-1 oferece penetração sob quaisquer condições meteorológicas em copas densas, permitindo melhor estimativa da BGB por meio da retroespalhamento das estruturas radiculares (Ghorbanian et al., 2021). Essas ferramentas, combinadas com algoritmos de aprendizado de máquina (por exemplo, Random Forest), têm aprimorado conjuntos de dados globais como o armazenamento de carbono de manguezais em grade de 1 km entre 2000 e 2020, estimando declínios de 5–10% devido à mudança no uso do solo (Wang et al., 2025).

Do ponto de vista ecológico, a heterogeneidade espacial observada, com AGB maior nas zonas estuarinas internas (até 36,89 Mg/pixel) e menor nas interfaces urbanas, reflete gradientes de perturbação, onde incêndios e urbanização transformam os manguezais de sumidouros em fontes de gases de efeito estufa (Perea-Ardila & Muñoz, 2024). Isso está em consonância com as implicações mais amplas para manguezais urbanos, que fornecem serviços ecossistêmicos críticos, como proteção costeira e apoio à biodiversidade (Pasquini, 2020). Esses resultados servem como base para projetos de carbono azul, permitindo monetizar emissões evitadas. Simpson & Smart (2024) reconhecem que o sensoriamento remoto integrado em sistemas de manguezais permite priorizar áreas com altos estoques, como as florestas dominadas por *R. mangle* no PEC. No entanto, a superestimação identificada pode inflar créditos de carbono, exigindo abordagens híbridas para validar e refinar os resultados do sensoriamento remoto.

Embora o sensoriamento remoto amplie a escalabilidade das avaliações de carbono em manguezais urbanos como o PEC, persistem desafios de calibração, resolução e integração com a verificação em campo. As oportunidades residem na fusão multissensorial (por exemplo, Sentinel–LiDAR–SAR) e em modelos baseados em inteligência artificial, capazes de alcançar margens de erro inferiores a 10% (Maung et al., 2025). Os tomadores de decisão devem aproveitar essas ferramentas para promover uma conservação orientada por dados empíricos, incorporando o carbono azul no planejamento urbano para proteger os ecossistemas diante das ameaças climáticas. Pesquisas futuras devem priorizar a criação e calibração de modelos locais de estimativa e a inclusão do carbono do solo, a fim de aumentar a precisão e promover a gestão sustentável do PEC.

Conclusões

Este estudo avaliou a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto, utilizando imagens de satélite Landsat 8 e o índice NDVI, para estimar as reservas de carbono na biomassa aérea e subterrânea dos manguezais do Parque Estadual do Cocó (PEC), um ecossistema costeiro urbano fundamental em Fortaleza, Brasil. Os resultados revelaram uma heterogeneidade espacial significativa nas reservas de carbono, com valores estimados por sensoriamento remoto atingindo uma média de 68,43 Mg C ha, superando em aproximadamente 2,37 vezes as medições de campo (28,85 Mg C ha), dominadas pela espécie *R. mangle* (65,34% do carbono total). Essa discrepância evidencia o potencial do sensoriamento remoto para fornecer estimativas espacialmente contínuas e escaláveis, mas também suas limitações, como a

saturação do NDVI em coberturas densas, a agregação de pixels mistos e a necessidade de calibração local com dados de campo para aprimorar a precisão.

Os achados destacam a importância dos manguezais do PEC como reservatórios de carbono azul, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas em contextos urbanos, embora afetados por perturbações como incêndios e urbanização, que reduzem sua capacidade de armazenamento nas zonas periféricas. Do ponto de vista da gestão ambiental, esses dados reforçam estratégias de conservação de carbono azul, a fim de priorizar áreas de alta integridade estrutural e promover a sustentabilidade do PEC frente às ameaças antrópicas e climáticas. Pesquisas futuras devem concentrar-se no desenvolvimento de modelos alométricos específicos para manguezais urbanos, na validação multissensorial e no monitoramento temporal para capturar variações associadas a eventos de degradação, com o objetivo de fortalecer a base científica para políticas eficazes de manejo ecossistêmico.

Agradecimentos

O autor principal agradece à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pela bolsa concedida no âmbito do doutorado do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará (UFC) e da chamada para a Primeira Edição do Programa de Mobilidade Internacional GCUB 001/2022.

Bibliografia

- Cardona Lindo, C. M., Garzón Barrero, J., & Jiménez Cleves, G. (2019). Estimación de la captura de carbono en un relicto de bosque urbano mediante técnicas de teledetección. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 19(37), 13–34. <https://doi.org/10.22395/rium.v19n37a1>
- 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. Turrialba: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- 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>
- Farias, I. F., Silva, C. R. M. da, Lima, D. S. V. R., Oliveira, L. V. C., & Fontenele, R. E. S. (2018). Valoração ambiental do Parque Ecológico do Rio Cocó. *Desenvolvimento Em Questão*, 16(45), 191–213. <https://doi.org/10.21527/2237-6453.2018.45.191-213>
- Ghorbanian, A., Zaghian, S., Asiyabi, R. M., Amani, M., Mohammadzadeh, A., & Jamali, S. (2021). Mangrove ecosystem mapping using sentinel-1 and sentinel-2 satellite images and random forest algorithm in google earth engine. *Remote Sensing*, 13(13), 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs13132565>
- Hamilton, S. E., & Friess, D. A. (2018). Global carbon stocks and potential emissions due to mangrove deforestation from 2000 to 2012. *Nature Climate Change*, 8(3), 240–244. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0090-4>

- 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), 321–334. <https://doi.org/10.1002/lno.11607>
- Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Pidgeon, E., & Telszewski, M. (2014). *Carbono azul: Métodos para evaluar las existencias y los factores de emisión de carbono en manglares, marismas y pastos marinos*. Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature. <https://www.thebluecarboninitiative.org/manual/>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. ., Gao, X., & Ferreira, L. . (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). (2021). *Vegetação de mangue brasileira*. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. <https://dadosabertos.ibama.gov.br/dataset/vegetacao-de-mangue-brasileira>
- IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories, prepared by the national greenhouse gas inventories programme. Japão: The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- IPCC. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis. contribution of working group to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kauffman, J. B., Adame, M. F., Arifanti, V. B., Schile-Beers, L. M., Bernardino, A. F., Bhomia, R. K., Donato, D. C., Feller, I. C., Ferreira, T. O., Jesus Garcia, M. del C., MacKenzie, R. A., Megonigal, J. P., Murdiyarso, D., Simpson, L., & Hernández Trejo, H. (2020). Total ecosystem carbon stocks of mangroves across broad global environmental and physical gradients. *Ecological Monographs*, 90(2), 1–18. <https://doi.org/10.1002/ecm.1405>
- 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>
- Leal, M., & Spalding, M. D. (Eds.). (2024). *The State of the World's Mangroves 2024*. Washington: Global Mangrove Alliance.
- Liza Goldberg, Lagomasino, D., Thomas, N., & Fatoyinbo, T. (2020). Global declines in human-driven mangrove loss. *Global Change Biology* 26, 5844–5855).
- 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>
- Maia, R. (2016). *Manguezais do Ceará*. Recife: Imprima.
- 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>
- Maung, W. S., Tsuyuki, S., Hiroshima, T., & Htay, S. S. (2025). Assessing above ground biomass of Wunbaik Mangrove Forest in Myanmar using machine learning and remote sensing data. *Discover Conservation*, 2(1), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s44353-025-00025-3>

- Ministério do Meio Ambiente (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>
- Pasquini, B. (2020). Plano de manejo do Parque Estadual do Cocó. https://www.sema.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/36/2021/03/PMPC_01.pdf
- Perea-Ardila, M. A., & Muñoz, S. I. (2024). Caracterização de uma nova queimada utilizando sensoriamento remoto do Parque Estadual do Cocó, Região Metropolitana de Fortaleza/CE, Brasil. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 14(1), 858–869. <https://doi.org/10.29150/jhrs.v14i1.261692>
- Perea-Ardila, M. A., Muñoz, S. I., & Sopchaki, C. H. (2023). Análise de áreas queimadas utilizando imagens Sentinel-2 no Parque Estadual do Cocó, Região Metropolitana de Fortaleza (Ceará). *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, 4(3), 67–83. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10440566>
- 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, southeastern Brazil. *Forest Ecology and Management*, 479, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118553>
- Serviço Florestal Brasileiro (SFB). (2025). Sistema Nacional de Informações Florestais. Serviço Florestal Brasileiro. https://dados.florestal.gov.br/pt_BR/dataset/dap-10-por-uf-ifn
- Simpson, S., & Smart, L. (2024). Guías de buenas prácticas científicas para proyectos de carbono terrestre. <https://www.nature.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/blue-carbon-scientific-best-practice-guide-ESPANOL.pdf>
- Wang, D., Wan, B., Liu, J., Su, Y., Guo, Q., Qiu, P., & Wu, X. (2020). Estimating aboveground biomass of the mangrove forests on northeast Hainan Island in China using an upscaling method from field plots, UAV-LiDAR data and Sentinel-2 imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 85, 101986. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101986>
- 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>
-