



COLEÇÃO
ESTUDOS
CARIOCAS

Volume
14
Edição
1

*Autor(a) correspondente
beaamgarcia@ufrj.br

Submetido em 21 nov 2025

Aceito em 06 abr 2026

Publicado em 30 abr 2026

Como Citar?

OLIVEIRA, B. A. G.; MALUF,
V. B. V.; FEVRIER, P. V. R.
Unidades de Conservação
como Sumidouros de
Carbono no Município do
Rio de Janeiro: proposta
metodológica e aplicação do
modelo Carbon Storage and
Sequestration do software
InVEST 3.14. *Coleção
Estudos Cariocas*, v. 14, n.
1, 2026,
DOI: 10.71256/19847203.14.1.198.2026.

O artigo foi originalmente
submetido em
PORTUGUÊS.

As traduções para
outros idiomas foram
revisadas e validadas
pelos autores e pela
equipe editorial. No
entanto, para a
representação mais
precisa do tema abordado,
recomenda-se que os
leitores consultem o artigo
em seu idioma original.

OPEN ACCESS



Unidades de Conservação como sumidouros de carbono no Município do Rio de Janeiro: proposta metodológica e aplicação do modelo Carbon Storage and Sequestration do software InVEST 3.14

Protected Areas as carbon sinks in the Municipality of Rio de Janeiro: methodological proposal and application of the InVEST 3.14 carbon storage and sequestration model

Áreas Protegidas como sumideros de carbono en la ciudad de Río de Janeiro: propuesta metodológica y aplicación del modelo Carbon Storage and Sequestration del software InVEST 3.14

Beatriz Ambrosio Garcia de Oliveira¹, Victor Buznello de Vasconcelos Maluf², Paulo Vinicius Rufino Fevrier³

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Cidade Universitária, Rio de Janeiro/RJ, CEP: 21941-916, ORCID: 0000-0002-6264-4771, beaamgarcia@ufrj.br

²Instituto Estadual do Ambiente, Av. Marechal Floriano, 45, 11 andar, CEP: 20080-003, ORCID: 0000-0003-1323-2559, victormaluf@inea.rj.gov.br

³Instituto Estadual do Ambiente, Av. Marechal Floriano, 45, 11 andar, CEP: 20080-003, ORCID: 0000-0002-8854-7232, paulofevrier@inea.rj.gov.br

Resumo

Este estudo estimou os estoques de carbono em áreas protegidas no município do Rio de Janeiro por meio do modelo CSS-InVEST, utilizando mapas detalhados de uso e cobertura do solo, solos e fitofisionomias. A integração dessas bases aprimorou a precisão das estimativas nos quatro reservatórios de carbono. Os resultados indicam que manguezais e áreas úmidas concentram os maiores estoques, seguidos pelos maciços florestais. O trabalho evidencia o papel estratégico das áreas protegidas urbanas na mitigação das mudanças climáticas e no planejamento ambiental.

Palavras-chave: estoque de carbono, serviços ecossistêmicos; mitigação de mudanças climáticas; unidades de conservação urbanas.

Abstract

This study estimated carbon stocks in protected areas in the municipality of Rio de Janeiro using the CSS-InVEST model, based on detailed maps of land use and land cover, soils, and phytophysionomies. The integration of these datasets improved the accuracy of estimates across the four carbon pools. The results indicate that mangroves and wetlands hold the largest carbon stocks, followed by forested massifs. The study highlights the strategic role of urban protected areas in climate change mitigation and environmental planning.

Keywords: carbon stock; ecosystem services; climate change mitigation; urban protected areas.

Resumen

Este estudio estimó las reservas de carbono en áreas protegidas del municipio de Río de Janeiro mediante el modelo CSS-InVEST, utilizando mapas detallados de uso y cobertura del suelo, suelos y fitofisionomías. La integración de estas bases mejoró la precisión de las estimaciones en los cuatro reservorios de carbono. Los resultados indican que los manglares y las áreas húmedas concentran las mayores reservas de carbono, seguidos por los macizos forestales. El trabajo evidencia el papel estratégico de las áreas protegidas urbanas en la mitigación del cambio climático y en la planificación ambiental.

Palabras clave: reserva de carbono; servicios ecossistêmicos; mitigación climática; áreas protegidas urbanas.

1 Introdução

A intensificação do aquecimento global e o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera têm impulsionado governos e instituições científicas a buscarem estratégias eficazes de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Nesse contexto, florestas e outros ecossistemas naturais desempenham papel central como sumidouros de carbono, ao absorverem e armazenarem dióxido de carbono (CO₂) atmosférico em sua biomassa e nos solos, contribuindo para a regulação do clima global (IPCC, 2019).

No bioma Mata Atlântica, a literatura sobre o armazenamento de carbono apresenta avanços importantes, contemplando desde avaliações de compartimentos específicos até sínteses de dados em escala regional. D'Andrea *et al.* (2015) estimaram os estoques de carbono orgânico do solo em áreas de Restinga, considerando diferentes profundidades e aplicando métodos estatísticos para assegurar a confiabilidade amostral. Villanova *et al.* (2019) investigaram o estoque de carbono na necromassa em fragmentos de floresta secundária, enquanto Silva *et al.* (2021) analisaram o teor de carbono em folhas e lenho de espécies arbóreas como indicador de qualidade ambiental. Em escala mais ampla, Fonsêca *et al.* (2024) integraram dados publicados entre 2000 e 2021 por meio de modelos mistos e fatores de conversão padronizados, identificando padrões espaciais e climáticos que influenciam os estoques de carbono no bioma.

Apesar desses avanços, grande parte dos estudos concentra-se em compartimentos isolados ou em escalas locais, havendo ainda lacunas quanto à quantificação integrada do estoque total de carbono. Em especial, são limitadas as avaliações que consideram simultaneamente os diferentes compartimentos de carbono e sua distribuição espacial em áreas protegidas, dificultando comparações consistentes entre regiões e a compreensão do papel dessas áreas no contexto mais amplo da mitigação das mudanças climáticas. Além disso, a ausência de abordagens espacialmente explícitas restringe a aplicação dos resultados em processos de planejamento ambiental e políticas públicas baseadas em evidências.

Nesse sentido, em ambientes urbanos densamente ocupados, onde a cobertura vegetal tende a ser reduzida, fragmentada e submetida a pressões antrópicas constantes, os remanescentes florestais assumem importância estratégica. As Unidades de Conservação inseridas nesses contextos contribuem de forma significativa para a manutenção de serviços ecossistêmicos, ao preservar áreas de vegetação nativa capazes de atuar como sumidouros de carbono, além de desempenharem papel fundamental na regulação climática local e na melhoria da qualidade ambiental urbana (Amaral *et al.*, 2026).

O município do Rio de Janeiro, embora marcado por intensa urbanização, abriga diversos sistemas de áreas verdes (Pedreira; Andrade; Fico, 2017), grande parte protegidas por Unidades de Conservação municipais, estaduais e federais, como o Parque Nacional da Tijuca, o Parque Estadual da Pedra Branca e o Parque Natural Municipal de Marapendi. Esse contexto torna o município um caso exemplar para a avaliação do potencial das UC urbanas na provisão do serviço ecossistêmico de estoque de carbono, com implicações diretas para o planejamento territorial e a formulação de políticas públicas de mitigação das mudanças climáticas.

Modelos baseados em Sistemas de Informação Geográfica, como o InVEST (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*), têm sido amplamente empregados na avaliação de serviços ecossistêmicos por permitirem estimativas espacializadas, padronizadas e comparáveis entre diferentes áreas e escalas, subsidiando processos de tomada de decisão ambiental. Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo quantificar, de forma estimada, e analisar o serviço ecossistêmico de estoque de carbono total (ECT) em ecossistemas terrestres protegidos por Unidades de Conservação do município do Rio de Janeiro, utilizando o modelo *Carbon Storage and Sequestration* do InVEST (versão 3.14), a fim de compreender o papel dessas áreas como sumidouros de carbono.

2 Embasamento Teórico

2.1 A Compreensão do Ciclo do Carbono e seus Componentes

O ciclo do carbono compreende quatro principais reservatórios, sendo eles o carbono fóssil, a atmosfera, o oceano e a biosfera (IPCC, 2001; Schimel, 1995). A temática desse ciclo e sua ligação com as mudanças climáticas, especialmente em relação às fontes e sumidouros de CO₂ atmosférico, vem sendo discutida há décadas, de forma que a literatura produzida nesse campo de conhecimento é vasta.

Ainda na década de 1990, Schimel (1995) apontou para o fato de que o ciclo do carbono havia se tornado ponto focal na ecologia em função do drástico aumento observado da concentração de CO₂ atmosférico, causada pelo aumento das emissões globais. Ao avaliar os principais resultados do Relatório do Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas (IPCC) de 1994, o autor ressalta que os ecossistemas terrestres e sua capacidade de regulação do ciclo do carbono receberam grande atenção de pesquisadores à época, destacando a necessidade de melhor compreensão dos mecanismos de estocagem. Estes, por sua vez, envolvem interações complexas entre clima (temperatura, umidade e radiação), vegetação (fotossíntese e respiração), solo e uso do solo (Schimel, 1995).

Na mesma conjuntura, Houghton (1995) alertou para o fato de que as alterações no uso da terra em ecossistemas terrestres ocorridas entre 1850 e 1980 haviam se tornado a segunda maior fonte de emissões de CO₂, atrás apenas da queima de combustíveis fósseis. Ainda, o autor ressaltou que tal fenômeno havia desacelerado nas regiões temperadas e boreais do hemisfério norte no século XX, porém havia rapidamente se intensificado nas regiões tropicais por meio da conversão de florestas em áreas de pasto e agricultura, o que apontou a tendência de liberação de CO₂ por parte de ecossistemas terrestres (Houghton, 1995).

Em 2006, foi definido pelo IPCC que o carbono circula por três sumidouros (*pools*) principais na biosfera terrestre: biomassa, matéria orgânica morta e solos (IPCC, 2006; 2019). O primeiro compreende a biomassa acima do solo, composta por toda a biomassa viva arbórea, herbácea e arbustiva, e a biomassa abaixo do solo, que abarca raízes vivas acima de 2 mm de diâmetro. Já a matéria orgânica morta inclui biomassa lenhosa morta, em pé ou caída, na superfície com diâmetro acima de 10 cm, bem como serrapilheira. No solo, o carbono assume a forma de carbono orgânico, que é função direta da matéria orgânica viva e não viva em sua matriz.

Além disso, é preciso separar mecanismos de sequestro e de estoque de carbono, uma vez que consistem em processos complementares, porém distintos de assimilação do carbono atmosférico. Segundo o IPCC (2001), sequestro de carbono é o processo de aumento da quantidade de carbono em um reservatório que não seja a atmosfera. No caso de mecanismos biológicos, como a fotossíntese, é a retirada direta de CO₂ atmosférico pela biosfera. Por outro lado, o órgão define estoque como a quantidade absoluta de carbono retida em um reservatório, em um momento específico (IPCC, 2001).

Para o caso específico do sumidouro do solo, Don *et al.* (2023), ao revisarem 100 publicações científicas entre abril e outubro de 2022, identificaram confusão na utilização de ambos os termos e sua relação com a mitigação das mudanças climáticas, ressaltando a necessidade de padronização conceitual. Os autores propuseram que o termo estoque de carbono se refira especificamente à quantidade ou conteúdo de carbono orgânico no solo, sendo sinônimo de armazenamento de carbono orgânico, expresso em unidades de massa por área (ex: MgC.ha⁻¹ ou TonC.ha⁻¹). O sequestro de carbono, por sua vez, deve se referir ao processo de transferência do carbono da atmosfera, via atividades metabólicas de autótrofos e posterior produção de matéria orgânica, para o solo, onde é retido como carbono orgânico. Esse fluxo deve ser expresso em unidades de massa por área por período de tempo (ex: MgC.ha⁻¹.ano⁻¹ ou TonC.ha⁻¹.ano⁻¹).

Ainda, Don et al. (2023) reiteram que o sequestro somente resulta em aumento, ou acumulação, do estoque de carbono no solo caso os ganhos advindos da retirada de CO₂ da atmosfera superem as perdas de carbono por respiração de organismos na decomposição da matéria orgânica. Dessa forma, a proteção de grandes estoques de carbono orgânico no solo é uma medida de mitigação de mudanças climáticas no sentido de impedir que tal carbono seja novamente liberado para a atmosfera. Nesse caso, o carbono orgânico, conforme definido pelo IPCC (2006), pode ser armazenado em quatro diferentes reservatórios: no solo; e na biomassa, sendo ela dividida em biomassa aérea/acima do solo, biomassa subterrânea/abaixo do solo, e biomassa morta/matéria morta/serrapilheira.

Com relação à retenção de carbono no solo, Antunes *et al.* (2025), em revisão de literatura ainda mais recente, apontam que a matéria orgânica, matéria-prima para o carbono orgânico, deriva da deposição de resíduos de plantas e animais diretamente na superfície (serrapilheira), que são posteriormente transformados em compostos orgânicos e transportados para camadas mais profundas do solo, onde são retidos via mecanismos físico-químicos.

Nesse sentido, os autores ressaltam que a fração fina da mineralogia dos solos, especialmente argila, tem um papel importante na formação de agregados na presença de matéria orgânica. Esses minerais possuem capacidade de reter água e componentes orgânicos e inorgânicos, bem como adsorver matéria orgânica dissolvida em função de sua área específica e capacidade de troca catiônica. Através de associações e agregações com compostos minerais e orgânicos, a matéria orgânica é estabilizada, evitando que suas moléculas sejam mineralizadas ou oxidadas, de modo que permanece retida no solo (Antunes *et al.*, 2025).

Dessa forma, neste trabalho é considerada a definição dada pela *Food and Agriculture Organization* (FAO), onde o estoque de carbono do solo é a massa de carbono orgânico contida em uma amostra de densidade aparente conhecida, geralmente expresso em toneladas ou megagramas por hectare para uma determinada profundidade, que deve reportada a até 30 cm, de acordo com as recomendações do IPCC (IPCC, 2006; FAO, 2019).

Utilizando tais recomendações, Bernoux *et al.* (2002) quantificaram e mapearam o estoque de carbono em solos brasileiros a partir de perfis de solo coletados durante o projeto RADAMBRASIL, do mapa digital de solos elaborado pela FAO (2019) e de informações de cobertura vegetal nativa. Os autores observaram que os maiores estoques de carbono ocorreram nas regiões com maior presença de solos úmidos, como o Pantanal, e solos de mangue, enquanto os menores estoques foram observados em solos arenosos em clima semiárido, como no nordeste brasileiro.

Com relação à biomassa, esta engloba todo material orgânico, como galhos, tronco e folhas (biomassa aérea), raízes (biomassa subterrânea), matéria morta e serrapilheira (necromassa). Fonsêca *et al.* (2024) revisaram 46 publicações no período de 2000 a 2021 que trataram do estoque de carbono na biomassa do ecossistema Mata Atlântica, considerando florestas maduras e secundárias, bem como sua diversidade fitofisionômica. Segundo os autores, a biomassa possui três vezes menos capacidade de estocar carbono em comparação com o solo e, entre seus distintos reservatórios, a biomassa aérea (arbórea) representa a fração mais considerável nos ecossistemas florestais maduros em relação às florestas secundárias.

Ainda segundo Fonsêca *et al.* (2024), o carbono estocado na biomassa aérea pode chegar até 202.8 MgC.ha⁻¹, com variações significativas entre florestas maduras e secundárias, e até 31 MgC.ha⁻¹ na necromassa. Dessa forma, ressalta-se a importância de esforços de conservação de remanescentes de florestas maduras no bioma Mata Atlântica, uma vez que um hectare de floresta em estágio sucessional avançado pode estocar o dobro do que uma floresta em regeneração. Ademais, os autores apontam que fatores climáticos como precipitação e temperatura afetam diretamente a capacidade de estoque, em que florestas sujeitas

a regimes pluviométricos mais elevados mostraram maiores estoques de carbono.

No entanto, essa capacidade não é uniforme, sendo suscetível a variações ambientais e antrópicas. A sazonalidade constitui um fator ambiental importante, uma vez que a conversão da biomassa aérea em necromassa implica em liberação gradual do carbono que não é retido pelo solo de volta para a atmosfera devido a decomposição (Veiga, 2008).

Por fim, é necessário frisar que mudanças no uso e cobertura do solo alteram, há décadas, o estoque de carbono na biomassa e no solo (Houghton, 1995; Houghton, 2009). O desmatamento constitui como fator antrópico, no qual o corte raso, seguido da queima para limpeza do terreno, promove a liberação total do carbono previamente armazenado para a atmosfera (Gameiro *et al.*, 2025). A perda de carbono pela conversão de ecossistemas florestais de Mata Atlântica em pastagem e áreas agrícolas é de 65% (Fonseca *et al.*, 2024).

2.2 Usos e Coberturas do Solo e a Capacidade de Estocagem de Carbono

A compreensão do estoque de carbono por classe de uso e cobertura do solo requer uma análise detalhada das características físicas, químicas, morfológicas e biológicas do ambiente. Essa abordagem permite compreender o funcionamento dos mecanismos de estocagem de carbono nas diferentes coberturas, desconsiderando-se a influência de fatores antrópicos. Segundo as diretrizes do IPCC (2006), podem ser identificadas três categorias principais:

i. Classes com estocagem de carbono desprezível

As áreas urbanas, os solos expostos e as áreas de mineração configuram usos da terra de caráter antrópico que apresentam capacidade desprezível de armazenamento de carbono orgânico, em função da ausência ou extrema limitação de cobertura vegetal e de matéria orgânica no solo. São, portanto, associadas a estoque de carbono nulo. De forma semelhante, os afloramentos rochosos e os corpos d'água, embora naturais, apresentam restrições metodológicas à quantificação de estoques de carbono no contexto de inventários territoriais, em razão da escassez de dados empíricos consolidados na literatura (BRASIL, 2024).

ii. Classes com capacidade de estocagem de carbono, mas com alta dinamicidade

As pastagens, os cultivos agrícolas e as silviculturas configuram-se como áreas antrópicas dinâmicas, sujeitas à sazonalidades e períodos de colheita e corte, e cujo potencial de armazenamento de carbono depende tanto das características do solo quanto do tipo de manejo empregado (Phukubye *et al.*, 2022; Beillouin *et al.*, 2022). Dessa forma, a capacidade de estocagem nessas classes está diretamente relacionada a fatores como práticas agropecuárias e uso do solo. Em virtude dessa dinamicidade, a estimativa do estoque de carbono apresenta maior complexidade e incerteza, variando consideravelmente entre diferentes regiões e até mesmo dentro de um mesmo Estado.

iii. Classes com capacidade de estocagem de carbono, mas com baixa dinamicidade

As áreas de vegetação natural, como florestas, manguezais, restingas e áreas úmidas, caracterizam-se por uma dinâmica relativamente estável às mencionadas anteriormente, o que as torna menos suscetíveis a variações significativas no estoque de carbono. Nesses casos, foram consideradas as estimativas provenientes de estudos nacionais (BRASIL, 2020).

2.3 Modelagem Espacial

A modelagem espacial tem se consolidado como uma ferramenta fundamental para o estudo do ciclo do carbono, especialmente no que se refere à estimativa de estoques e fluxos em diferentes usos e coberturas da terra. Atualmente, diversos softwares têm sido desenvolvidos com essa finalidade, entre os quais se destaca o *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs* (InVEST), amplamente utilizado pela comunidade acadêmica. O modelo *Carbon Storage and Sequestration* (InVEST-CSS) possibilita a estimativa do estoque de carbono para os quatro reservatórios, associados a classes específicas de uso e cobertura da terra. Adicionalmente, o modelo permite a realização de balanços de sequestro e emissão de carbono com base na comparação entre mapas de uso da terra de diferentes anos, bem como a valoração econômica do carbono armazenado ou sequestrado.

Nogueira Júnior (2023) aplicou o InVEST-CSS para o mapeamento e a valoração econômica do carbono na Amazônia, utilizando dados secundários de solo e biomassa (acima e abaixo do solo) integrados a mapas de uso e cobertura da terra. Os resultados destacaram o elevado potencial de estocagem de carbono em sistemas agroflorestais e florestas secundárias, além de evidenciar a capacidade do modelo em estimar o valor monetário do carbono sequestrado, considerando tanto o custo social do carbono quanto cenários de crédito de mercado.

He *et al.* (2023) acoplaram o modelo de simulação *Future Land Use Simulation* (FLUS) ao InVEST com o objetivo de projetar os estoques de carbono no município de Guilin, China, até o ano de 2035, sob quatro cenários alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Os autores observaram que, embora o processo de urbanização tenha resultado em perdas significativas de carbono no período entre 2005 e 2020, o cenário de “prioridade ecológica” projetado para 2035 apresentou o maior potencial de armazenamento de carbono, superando os cenários orientados predominantemente pelo crescimento econômico.

De forma semelhante, Zafar *et al.* (2024) integraram o modelo CA-Markov para a simulação de cenários futuros (2025 e 2030) ao InVEST-CSS, avaliando a dinâmica dos estoques de carbono no Paquistão ao longo de três décadas. Os resultados indicaram um aumento modesto (0,5%) no estoque total de carbono até 2030, impulsionado principalmente pela expansão de áreas florestais e terras cultivadas, sendo o carbono orgânico do solo responsável por aproximadamente 94% do estoque total estimado.

Apesar de sua ampla aplicabilidade e facilidade de uso, Wang *et al.* (2024) apontaram que, em ambientes urbanos complexos e altamente fragmentados, o desempenho espacial do InVEST pode ser inferior ao de outros modelos, como o *Carnegie–Ames–Stanford Approach* (CASA), uma vez que a abordagem baseada em densidades fixas de carbono não representa adequadamente a dinâmica sazonal da vegetação. Em contrapartida, Nwaogu *et al.* (2025) destacaram o potencial do InVEST para integrar estoques de carbono provenientes de diferentes compartimentos do solo e subsidiar a formulação de políticas públicas. De modo complementar, Sharma *et al.* (2024) ressaltaram a robustez do modelo ao oferecer um método simples e consistente para a construção de linhas de base em escala urbana, contribuindo para o planejamento territorial sustentável.

3 Área de Estudo

O município do Rio de Janeiro localiza-se na região Sudeste do Brasil, entre os paralelos 22°46'1.84"S e 23°4'56.56"S e os meridianos 43°6'37.85"O e 43°47'42.59"O, com área aproximada de 1.200 km² (IBGE, 2022). Apresenta clima tropical úmido e relevo diversificado, marcado pela presença de maciços costeiros, planícies litorâneas e sistemas lagunares, elementos que condicionam a distribuição dos ecossistemas naturais e dos solos no território municipal (Ab'Sáber, 2003).

O município abriga um conjunto expressivo de unidades de conservação (UC)

públicas das esferas municipal, estadual e federal, que protegem remanescentes significativos de Mata Atlântica, manguezais, restingas e áreas úmidas. Tais áreas protegidas representam aproximadamente 30% da área total do município, configurando-se como elementos estruturantes da paisagem urbana e periurbana e desempenhando papel fundamental na provisão de serviços ecossistêmicos, especialmente na regulação climática e no estoque de carbono, mesmo em um contexto de elevada urbanização e fragmentação ambiental (Mendonça-Santos *et al.*, 2003).

As informações relativas ao limite territorial, categoria e esfera administrativa dessas unidades foram obtidas a partir de bases de dados oficiais, incluindo registros institucionais e bases cartográficas disponibilizadas por órgãos ambientais e plataformas públicas de dados geoespaciais, tais como o Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (MMA, 2026), e o *Geoinea* (INEA, 2018). A relação das unidades de conservação consideradas no estudo e sua distribuição espacial encontram-se apresentadas na Figura 1 e na Tabela 1.

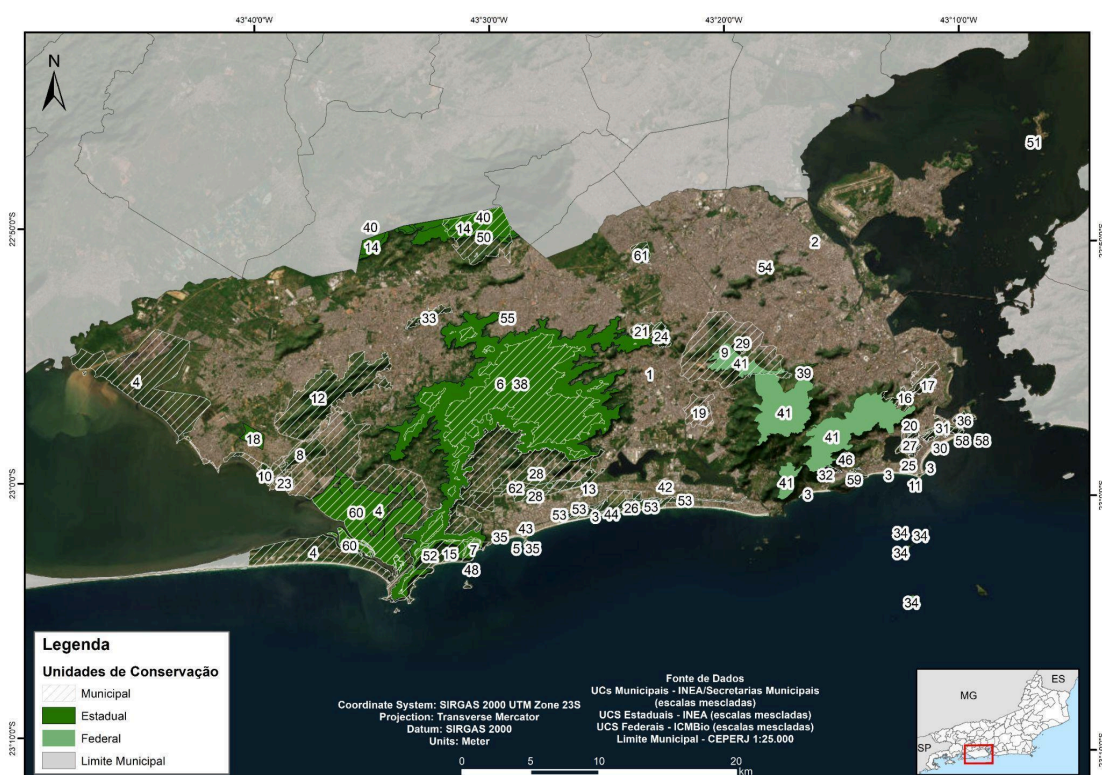


Figura 1: Unidades de Conservação públicas municipais, estaduais e federais inseridas no município do Rio de Janeiro.

Fonte: Autores

Tabela 1: Lista das Unidades de Conservação públicas do Rio de Janeiro.

ID	Nome da UC ¹	Esfera	Cód. CNUC	Área (ha)
1	APA da Fazenda da Taquara	Municipal	0455.33.1783	8,69
2	APA da Fazendinha da Penha	Municipal	Não consta	13,24
3	APA da Orla Marítima	Municipal	0455.33.1793	127,98
4	APA da Orla Marítima da Baía de Sepetiba	Municipal	0455.33.1777	11.297,83
5	APA da Paisagem e do Areal da Praia do Pontal	Municipal	0455.33.1791	16,06
6	APA da Pedra Branca	Municipal	0455.33.1795	5.386,73
7	APA da Prainha	Municipal	0455.33.1796	150,27
8	APA da Serra da Capoeira Grande	Municipal	0455.33.1764	478,88
9	APA da Serra dos Pretos Forros	Municipal	0455.33.1797	2.715,13
10	APA das Brisas	Municipal	0455.33.1767	100,43
11	APA das Pontas de Copacabana e Arpoador e Seus Entorno	Municipal	0455.33.1824	16,16
12	APA das Serras de Inhoaíba, Cantagalo E Santa Eugênia	Municipal	0455.33.4378	2.227,73
13	APA das Tabebuias	Municipal	0455.33.1787	61,75
14	APA de Gericino-Mendanha	Estadual	0000.33.0735	1.490,04
15	APA de Grumari	Municipal	0455.33.1823	928,61
16	APA de Santa Teresa	Municipal	Não consta	515,72
17	APA de São José	Municipal	0455.33.1825	108,89
18	APA de Sepetiba li	Estadual	0000.33.1837	171,61
19	APA do Bairro da Freguesia	Municipal	0455.33.1784	379,49
20	APA do Morro da Saudade	Municipal	0455.33.1817	59,47
21	APA do Morro do Cachambi	Municipal	Não consta	142,41
22	APA do Morro do Leme	Municipal	0455.33.1799	48,74
23	APA do Morro do Silvério	Municipal	0455.33.1766	150,12
24	APA do Morro do Valqueire	Municipal	0455.33.1782	166,08
25	APA do Morro dos Cabritos	Municipal	0455.33.1816	135,46
26	APA do Parque Municipal Ecológico de Marapendi	Municipal	0455.33.1788	938,42
27	APA do Sacopã	Municipal	0455.33.1820	248,55
28	APA do Sertão Carioca	Municipal	0455.33.4295	3.247,43
29	APA do Várzea Country Club	Municipal	0455.33.1822	10,30
30	APA dos Morros da Babilônia E de São João	Municipal	0455.33.1798	112,67

¹ Categorias do SNUC - APA: Área de Proteção Ambiental; ARIE: Área de Relevante Interesse Ecológico; MONA: Monumento Natural; PE: Parque Estadual; PN: Parque Nacional; PNM: Parque Natural Municipal; REVIS: Refúgio da Vida Silvestre; REBIO: Reserva Biológica.

ID	Nome da UC	Esfera	Cód. CNUC	Área (ha)
31	APA Paisagem Carioca	Municipal	0455.33.2903	160,89
32	ARIE de São Conrado	Municipal	0455.33.1826	82,27
33	ARIE Floresta da Posse	Municipal	0455.33.4379	171,56
34	MONA do Arquipélago das Ilhas Cagarras	Federal	0000.00.0034	76,47
35	MONA do Recreio dos Bandeirantes	Municipal	4557.33.4879	62,75
36	MONA dos Morros do Pão de Açúcar e Urca	Municipal	0455.33.1811	86,42
37	PE da Chacrinha	Estadual	Não consta	3,71
38	PE da Pedra Branca	Estadual	0000.33.1478	12.491,72
39	PE do Grajaú	Estadual	Não consta	54,73
40	PE do Mendanha	Estadual	0000.33.2904	967,11
41	PN da Tijuca	Federal	0000.00.0154	3.958,39
42	PN Bosque da Barra	Municipal	0455.33.1786	54,40
43	PNM Chico Mendes	Municipal	0455.33.1790	40,65
44	PNM da Barra da Tijuca Nelson Mandela	Municipal	Não consta	162,65
45	PNM da Catacumba	Municipal	0455.33.1763	97,66
46	PNM da Cidade	Municipal	0455.33.1802	46,65
47	PNM da Freguesia	Municipal	0455.33.1785	29,22
48	PNM da Prainha	Municipal	0455.33.1803	141,27
49	PNM da Serra da Capoeira Grande	Municipal	0455.33.1765	20,99
50	PNM da Serra do Mendanha	Municipal	0455.33.1769	1.390,31
51	PNM Darke de Mattos	Municipal	0455.33.1801	5,10
52	PNM de Grumari	Municipal	0455.33.1827	775,82
53	PNM de Marapendi	Municipal	0455.33.1789	155,61
54	PNM do Jardim do Carmo	Municipal	0455.33.1814	2,55
55	PNM Fazenda do Viegas	Municipal	0455.33.1778	8,49
56	PNM Fonte da Saudade	Municipal	0455.33.1807	2,22
57	PNM José Guilherme Merquior	Municipal	0455.33.1805	8,29
58	PNM Paisagem Carioca	Municipal	0455.33.2868	138,10
59	PNM Penhasco Dois Irmãos - Arq. Sérgio Bernardes	Municipal	0455.33.1800	36,91
60	REBIO Estadual de Guaratiba	Estadual	0000.33.1482	2.815,68
61	REVIS da Floresta do Camboatá	Municipal	0455.33.4351	171,58
62	REVIS dos Campos de Sernambetiba	Municipal	0455.33.4350	556,97

Fonte: Autores.

4 Materiais e Métodos

O presente estudo utilizou como ferramenta o modelo *Carbon Storage and Sequestration*, disponível publicamente na plataforma InVEST (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*), desenvolvido pelo *Natural Capital Alliance* (NCA, 2016). Esse modelo tem como objetivo estimar a quantidade de carbono armazenado nos quatro reservatórios: biomassa acima do solo; biomassa abaixo do solo; biomassa morta; e no solo propriamente dito.

O modelo necessita de dois dados de entrada principais: um mapa em formato *raster* do uso e cobertura do solo da área de estudo; e uma tabela biofísica em formato *csv* na qual são armazenadas informações de estoque de carbono para cada classe do mapa de entrada nos quatro reservatórios. Entretanto, o caráter simplificado do modelo demanda que os dados de entrada sejam bem detalhados, robustos e consistentes, de modo a representar adequadamente a complexidade da paisagem.

Para tanto, foi criado um mapa de unidades da paisagem por meio do cruzamento dos mapas de uso e cobertura do solo, tipos de solo e vegetação potencial da área de estudo. O resultado dessa etapa foi denominado de Uso-Solo-Vegetação (USV), em que para cada unidade individual foram associados os potenciais de estoque de carbono dos dados de entrada originais.

Sendo assim, para alcançar esse objetivo foram conduzidos os seguintes processos metodológicos:

- 1) Refinamento do mapeamento de uso e cobertura do solo tradicional por meio de técnicas de sensoriamento remoto e *Deep Learning*;
- 2) Criação de uma base de dados contendo os valores de ECT para cada uso e cobertura do solo do município do Rio de Janeiro, incluindo as variações fitofisionômicas da vegetação determinadas pelo mapa de vegetação potencial;
- 3) Cálculo do estoque de carbono a 30 cm para os tipos de solos do município do Rio de Janeiro a partir de perfis de solos de bases de dados públicas;
- 4) Criação de unidades de paisagem Solo-Uso-Vegetação por meio do cruzamento das camadas de uso e cobertura do solo, classes de solo e vegetação potencial;
- 5) Criação da tabela biofísica final a partir de dados da literatura referentes às biomassas acima e abaixo do solo e à matéria morta; valores estimados para o carbono do solo, obtidos por meio de cálculos diretos a partir dos perfis de solo disponíveis.

Os produtos finais consistiram em um mapa em formato *raster* que expressa a distribuição espacial do carbono total armazenado na paisagem, considerando a soma dos quatro reservatórios, e um mapa que demonstra o estoque de carbono por hectare (tonC/ha) em cada unidade de conservação pública inseridas no município.

4.1 Refinamento do mapa de Uso e Cobertura do Solo

O dado geoespacial em formato *raster* de uso e cobertura do solo utilizado neste estudo foi obtido a partir da coleção 9.1 da plataforma MapBiomass², correspondente ao ano de 2023. Nesse mapeamento, foram identificadas 14 classes de uso e cobertura presentes no município do Rio de Janeiro, conforme apresentado na Tabela 2.

² Projeto MapBiomass – Coleção 9.1 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, acessado em 2025, através do link: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>

Tabela 2: Classes de Uso e Cobertura do Solo

Classe	Área (ha)
Floresta	24.724,77
Mangue	3.062,45
Áreas Úmidas	3.166,73
Pastagem	5.830,30
Mosaico de Usos	18.537,76
Corpos Arenosos	378,22
Áreas Urbanas	57.002,36
Outras áreas não vegetadas	610,92
Afloramento Rochoso	135,68
Mineração	27,40
Aquicultura	14,68
Apicum	752,64
Corpos Hídricos	1.815,1
Restinga Arbórea	3.940,35

Fonte: MapBiomias

Para o refinamento na base de dados de uso e cobertura do solo foram realizados alguns procedimentos de geoprocessamento. Primeiramente, a classe de “Floresta” foi aprimorada a partir do mapeamento de vegetação em escala de maior detalhe efetuado pelo INEA (no prelo), no qual foram aplicados algoritmos de *Deep Learning* ao mosaico de imagens *Planet NCFI* para o mês agosto de 2024. Tal procedimento resultou em um mapa da vegetação existente no Estado do Rio de Janeiro no ano de 2024, em escala aproximada de 1:25.000. Essa base detalhada foi recortada para o município do Rio de Janeiro, e incorporada ao mapeamento do MapBiomias, o que permitiu a identificação de fragmentos de áreas verdes intraurbanas, ampliando a precisão da representação espacial da vegetação.

Seguidamente, a classe “Restinga Arbórea” passou por um processo de validação a partir da fotointerpretação e prévio conhecimento de sua distribuição espacial no município. Foi necessário realizar essa etapa uma vez que no mapeamento original do MapBiomias foram identificados erros de comissão em relação a essa cobertura vegetal. Durante essa etapa de checagem, também foram revisadas e corrigidas, também por meio da fotointerpretação, as classes de Mangue, Áreas Úmidas, Mosaico de Usos, e Pastagem. Ademais, foram identificadas áreas de agricultura que não haviam sido mapeadas originalmente pelo MapBiomias para o município.

Devido às duas etapas descritas acima, algumas classes sofreram redução em suas áreas. Por exemplo, a classe “Mosaico de Usos”, originalmente classificada pelo MapBiomias para áreas onde não foi possível a determinação precisa de sua cobertura, teve uma redução de 17 mil hectares. Dessa maneira, após o processo de refino, o mapeamento final de Uso e Cobertura do Solo passou a contemplar 15 classes, cujas respectivas áreas encontram-se apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Uso e Cobertura do Solo Refinado

Classe	Área (ha)	Diferença em relação a área original do MapBiomias (ha)
Floresta	42.096,96	+ 17.372,19
Mangue	4.941,70	+ 1.879,25
Áreas Úmidas	6.228,20	+ 3.063,36
Pastagem	3.379,54	- 2.447,14
Agricultura	885,77	+ 885,77
Mosaico de Usos	1.194,32	- 17.343,45
Corpos Arenosos	379,96	+ 1,74
Áreas Urbanas	55.812,94	- 1.189,41
Outras áreas não vegetadas	592,39	- 18,53
Afloramento Rochoso	129,13	- 6,55
Mineração	27,45	+ 0,05
Aquicultura	14,61	- 0,07
Apicum	759,84	+ 7,47
Corpos Hídricos	1.624,6	- 189,52
Restinga Arbórea	781,69	- 3.159,14

Fonte: Autores, adaptado de MapBiomias

4.1.1 Unidades de paisagem Uso-Solo-Vegetação

Compreendendo que o estoque de carbono está diretamente relacionado às características físicas, químicas e biológicas do ambiente, procedeu-se ao refinamento das classes de uso e cobertura do solo o processo de incorporação de informações sobre os tipos de solos e fitofisionomias potenciais da vegetação para o município. Para tanto, foram utilizadas camadas de dados geoespaciais provenientes de órgãos oficiais, nas melhores escalas disponíveis.

A camada referente aos tipos de solo foi derivada do Mapeamento Pedológico-Geotécnico do Município do Rio de Janeiro (Lumbreras; Gomes, 2004), na escala 1:75.000. As classes de solos foram agrupadas conforme a metodologia proposta por Bernoux *et al.* (2002), a qual considera parâmetros como atividade da argila, granulometria e teor de umidade para organizá-los conforme o potencial de armazenamento de carbono.

A Tabela 4 apresenta os tipos de solos identificados e seus respectivos grupos de classificação. A opção por trabalhar com grupos de solos, em vez de unidades pedológicas individuais, visou minimizar lacunas de levantamentos de campo relacionadas a determinados tipos de solo, seus atributos físico-químicos e aos usos da terra a eles associados.

Por fim, a base cartográfica de fitofisionomia foi obtida a partir do Mapeamento de Vegetação Potencial, em escala 1:100.000, para todo o estado do Rio de Janeiro no contexto da publicação "O Estado do Ambiente" (INEA, 2010). Apesar de existir o mapeamento da cobertura vegetal e uso do solo do município do Rio de Janeiro para o ano de 2018, em escala 1:10.000 (PCRJ, 2018), optou-se por utilizar a produção de INEA (2010) uma vez que as classes de vegetação estão padronizadas segundo Inventário Nacional (BRASIL, 2016), que, por sua vez, utiliza a metodologia do Manual Técnico da Vegetação Brasileira do IBGE (2012).

Tabela 4: Classes de solos agrupados

Grupo de Solos	Característica dos solos deste grupo	Solos pertencentes ao grupo
HAC Soils	Solos não latossólicos que possuem alta atividade de argila (Ta)	Cambissolo, Chernossolo, Luvisso
LAC non-Latossolos	Solos não latossólicos que possuem baixa atividade de argila (Tb)	Argissolo, Cambissolo, Neossolo lítico, Nitossolo
LAC Latossolos	Solos latossólicos (naturalmente baixos em atividade de argila)	Latossolo
Sandy Soils	Solos arenosos	Espodossolo, Neossolo Quartzarênico
Wet Soils	Solos úmidos, alagados	Gleissolo, Cambissolo flúvico, neossolo flúvico, Plintossolo
Other Soils	Outros, que não se encaixam nas categorias anteriores	Gleissolo Salino, Planossolo
Organossolos	Solos ricos em matéria orgânica	Organossolo
Solos Indiscriminados de Mangue	Solos de ambientes estuarinos; manguezais	Solos Indiscriminados de Mangue

Fonte: Adaptado de Bernoux *et al.* (2002)

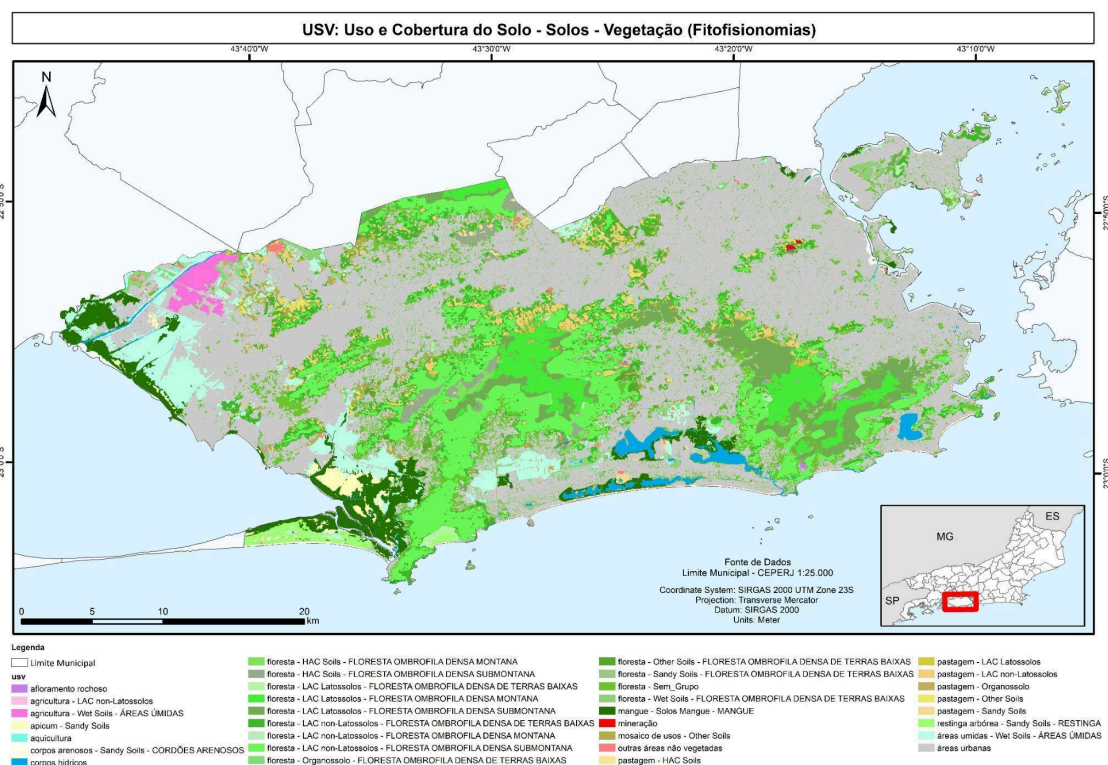


Figura 2 - Unidades de paisagem Uso-Solo-Vegetação no município do Rio de Janeiro

Fonte: Autores

Em razão das diferenças de escala entre as bases utilizadas, o cruzamento dos três conjuntos de dados demandou ajustes cartográficos para garantir a consistência topológica. Nos casos em que ocorreram polígonos inconsistentes após o processo de interseção, foi empregada a ferramenta *Eliminate*, disponível no *software* ArcGIS

Pro, a qual remove polígonos selecionados conforme a regra do vizinho mais próximo de maior área. O produto final resultou em 33 unidades de paisagem USV, representadas na Figura 2 e na Tabela 5.

Tabela 5: Unidades de Paisagem Uso-Solo-Vegetação

Código	Unidade de Paisagem	Área (ha)
1	Afloramento rochoso	129,12
2	Agricultura - LAC non-Latossolos	12,69
3	Agricultura - Wet Soils	872,75
4	Apicum - Sandy Soils	759,88
5	Aquicultura	14,6
6	Áreas úmidas - Wet Soils	6.228,20
7	Áreas urbanas	55.806,41
8	Corpos arenosos - Sandy Soils	379,9
9	Corpos hídricos	1.624,69
10	Floresta - HAC Soils - Floresta Ombrófila Densa Montana	151,1
11	Floresta - HAC Soils - Floresta Ombrófila Densa Submontana	939,8
12	Floresta - LAC Latossolos - Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas	483,12
13	Floresta - LAC Latossolos - Floresta Ombrófila Densa Montana	3.937,57
14	Floresta - LAC Latossolos - Floresta Ombrófila Densa Submontana	5.688,43
15	Floresta - LAC non-Latossolos - Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas	7.215,84
16	Floresta - LAC non-Latossolos - Floresta Ombrófila Densa Montana	79,47
17	Floresta - LAC non-Latossolos - Floresta Ombrófila Densa Submontana	12.317,5
18	Floresta - Organossolo - Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas	859,05
19	Floresta - Other Soils - Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas	526,83
20	Floresta - Sandy Soils - Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas	231,75
21	Floresta - Sem grupo de solos (áreas urbanas)	9.230,17
22	Floresta - Wet Soils - Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas	427,82
23	Mangue - Solos Indiscriminados de Mangue - Mangue	4.940,29
24	Mineração	27,45
25	Mosaico de usos - Other Soils	1.194,01
26	Outras áreas não vegetadas	575,76
27	Pastagem - HAC Soils	78,52
28	Pastagem - LAC Latossolos	335,73
29	Pastagem - LAC non-Latossolos	2.370,52
30	Pastagem - Organossolo	118,07
31	Pastagem - Other Soils	391,90
32	Pastagem - Sandy Soils	84,1
33	Restinga arbórea - Sandy Soils - Restinga	781,45

Fonte: Autores

4.2 Estoque de carbono nos quatro reservatórios de carbono

Para a estimativa do estoque de carbono nos reservatórios de biomassa acima do solo, biomassa abaixo do solo e matéria morta/serrapilheira, foram utilizados valores de referência obtidos em artigos científicos, inventários e relatórios nacionais (BRASIL, 2016; BRASIL, 2020; Zanatta *et al.*, 2020; Mendonça-Santos *et al.*, 2003; Santos, 2015; Mello *et al.*, 2006), com ênfase no estado do Rio de Janeiro e no bioma Mata Atlântica.

Já no caso da determinação dos valores de referência de estoque de carbono no solo, ressalta-se que o método de aquisição de dados por revisão bibliográfica apresentou limitações, uma vez que a obtenção desses valores requer coleta de amostras e o cálculo de múltiplos parâmetros laboratoriais, o que restringe a disponibilidade de dados consistentes. Diante dessa limitação, adotou-se uma abordagem alternativa para estimar o carbono estocado nas classes de solo consideradas neste estudo.

Para cada tipologia de solo encontrada no Mapeamento Pedológico-Geotécnico do Município do Rio de Janeiro (Lumbreras; Gomes, 2004) houve a necessidade de associar valores de estoque de carbono, como parte da metodologia de detalhamento dos dados de entrada do modelo. Isso foi feito através do cálculo de estoque de carbono para os perfis de solo levantados no município do Rio de Janeiro, compilados por Lumbreras e Gomes (2004) e disponíveis publicamente no Banco de Dados de Solos (BD Solos) de EMBRAPA SOLOS (2014).

Os perfis foram selecionados seguindo os critérios de consistência dos dados e profundidade suficiente para o cálculo, de forma que foram utilizados, ao todo, 57 perfis de solo, além de três valores de referência obtidos em Santos (2015), Stam (2021) e Gomes (2023) para os solos associados a mangues e apicuns. No entanto, a tabela original apresentou uma despadronização das informações relacionadas a Uso da Terra, bem como diversas lacunas de informações nas informações referentes a Uso da Terra, Atividade de Argila e Densidade. Com isso, foi necessário padronizar e complementar para permitir o posterior cálculo de ECT.

Em relação às lacunas referentes ao uso da terra no ponto e data de coleta das amostras, foi utilizado o método da fotointerpretação de imagens Landsat de 1985, acessadas via Google Earth Pro, complementadas pelas descrições detalhadas dos locais de coleta. A escolha desse ano se deu pela proximidade temporal com a coleta original dos perfis (ano de 1974).

Para as lacunas de informação referentes a densidade aparente, foi utilizado a função de pedotransferência sugerida por Benites *et al.* (2007), em seu Modelo 4, ilustrado na equação (1):

$$Db = 1.66141 - (0.12455 * N) - (0.00042 * Clay) + (0.10622 * SB) \quad (1) \\ - (0.000059 * Fe_2O_3) - (0.00328 * C:N) + (0.00011 * WDC) \\ + (0.00041 * Al_2O_3) - (0.09597 * (Ca + Mg))$$

Sendo:

Db = Densidade aparente do solo

N = Nitrogênio

Clay = Argila

SB = Soma de cátions básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , e K^+)

Fe_2O_3 = óxido de ferro

C: N = relação Carbono/Nitrogênio

WDC = Argila dispersível em água

Al_2O_3 = óxido de alumínio

$Ca + Mg$ = Cálcio somado ao Magnésio

Por fim, para as lacunas referentes a atividade de argila, foi utilizado a fórmula apresentada em Ronquim (2010), na qual a CTC é calculada a partir da soma das bases, a pH 7,0 (2):

$$CTC = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+ + H^+ + Al^{3+} \quad (2)$$

Sendo:

CTC = Capacidade de Troca Catiônica

Ca^{2+} = íons Cálcio

Mg^{2+} = íons Magnésio

K^+ = íons Potássio

Na^+ = íons de Sódio

H^+ = íons Hidrogênio

Al^{3+} = íons Alumínio

Para os resultados maiores ou igual a $24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, foi atribuído Ta , referente a alta atividade de argila, e valores menores de $24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ como Tb . O parâmetro de $24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ foi usado para concordar com a metodologia utilizada por Bernoux *et al.* 2002.

Em seguida, os solos foram distribuídos nos grupos sugeridos por Bernoux *et al.* (2002), apresentados anteriormente na Tabela 4, os quais levam em consideração, principalmente, a atividade de argila em cada perfil, expressa em Ta (alta) e Tb (baixa), que influencia diretamente a capacidade de estoque de carbono.

Com todas as lacunas preenchidas, o cálculo do ECT foi efetuado para cada horizonte de cada perfil de solo utilizando os parâmetros de teor de carbono orgânico, densidade aparente e espessura do horizonte (Fidalgo *et al.*, 2007), considerando a espessura máxima padrão de 30 cm de profundidade. A adoção dessa profundidade seguiu as diretrizes metodológicas do IPCC (2006) e reflete, principalmente, limitações na disponibilidade e padronização de dados pedológicos em escala municipal. Contudo, reconhece-se que essa escolha implica uma subestimação sistemática do estoque real de carbono no solo, sobretudo em ambientes como florestas ombrófilas densas, manguezais e áreas úmidas, onde uma parcela significativa do carbono encontra-se armazenada em profundidades superiores. O ECT foi calculado segundo a equação:

$$C_t = \frac{(C \times DS \times E)}{100} \quad (3)$$

Sendo:

C_t = carbono total no horizonte em kg m^{-2} ,

C = conteúdo de carbono orgânico em g kg^{-1} ,

DS = densidade do solo estimada segundo a equação (1) em g cm^{-3} , e

E = espessura do horizonte em cm.

4.3 Integração com as Unidades de Conservação

Por fim, as análises junto às Unidades de Conservação se deram na última etapa, após a rodagem do modelo e obtenção do mapa final da estimativa de estoque de carbono total, a uma profundidade de 30 cm. As UC das três esferas foram agrupadas em uma única camada geoespacial vetorial, que serviu como máscara para a execução de estatística zonal visando obter o acumulado de carbono armazenado nas UC como um todo.

Assim, as análises se deram utilizando toneladas por hectare (tC/ha) como unidade de medida, a fim de normalizar a relação da densidade de carbono em cada área protegida e eliminar o fator de área total, o que poderia conferir viés aos resultados. Primeiramente, foi calculado o valor de ECT de cada UC (tonC total) por meio da soma de todos os pixels de estoque de carbono dentro de seu respectivo território. Seguidamente, o valor obtido foi dividido pela área de cada UC, de forma a obter a média de estoque de carbono por hectare por UC (tonC/ha).

Por fim, foram extraídas métricas estatísticas de mínimo, máximo, mediana e desvio padrão para avaliar a distribuição do armazenamento do carbono nas UC inseridas no município do Rio de Janeiro. Outrossim, os valores de estoque de carbono por hectare por UC foram agrupados por quebras naturais para possibilitar a elaboração de histograma de frequência e seus acumulados.

5 Resultados e Discussões

A Figura 3 apresenta o mapa final da estimativa de ECT, considerando os quatro reservatórios em toneladas por pixel para a cidade do Rio de Janeiro. Ressalta-se que cada pixel do raster final possui aproximadamente 30m x 30m, ou seja, cerca de 900 m², o que permite melhor visualização para o território do Rio de Janeiro.

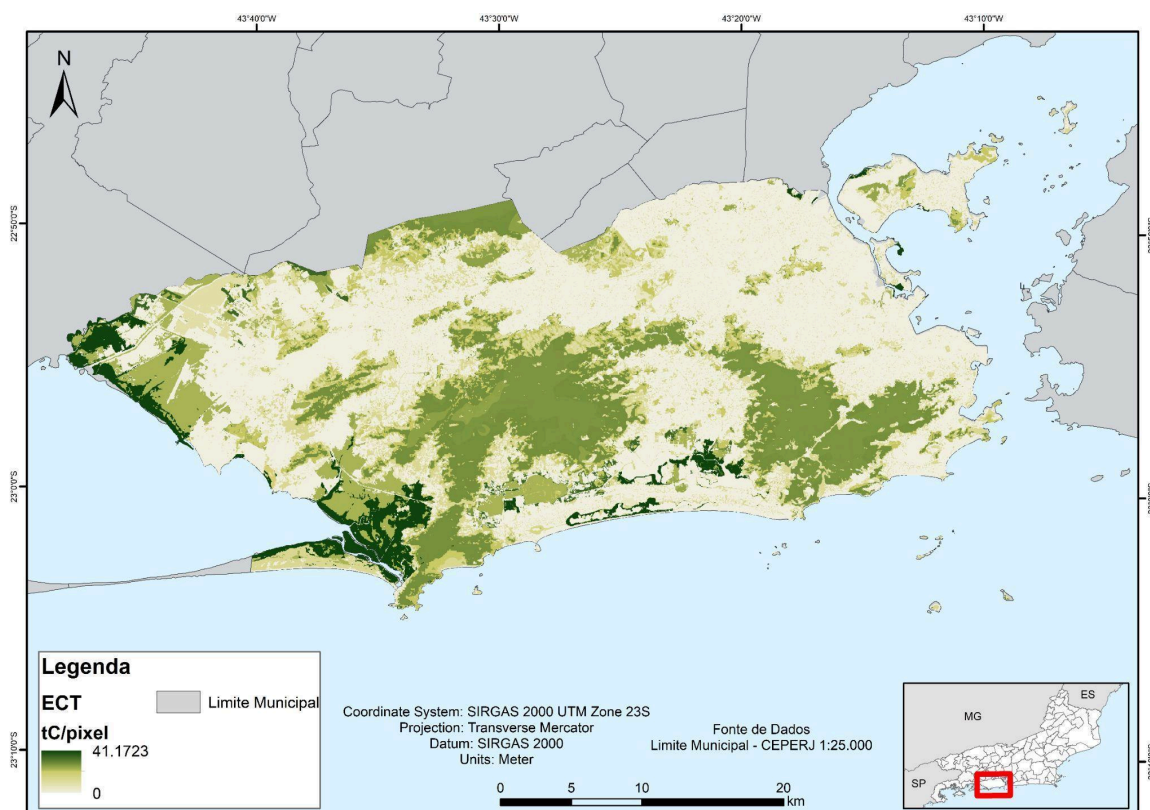


Figura 3: Estimativa de Estoque de Carbono Total do município do Rio de Janeiro.
Fonte: Autores

De forma geral, notou-se que os maiores valores ocorrem nas áreas de baixada onde se encontram coberturas de mangue e áreas úmidas, seguidas pelas áreas

florestadas nos maciços da Tijuca, Pedra Branca e Mendanha. O resultado obtido apresenta relevante destaque para algumas unidades de paisagem onde predominam coberturas vegetais naturais e solos com maior potencial de estocagem de carbono.

Dessa forma, constatou-se um valor máximo de ECT de 41,17 tC/pixel nas áreas de cobertura natural de manguezal e demais ambientes úmidos associados a solos hidromórficos (*wet soils*). Já as unidades de paisagem formadas por diferentes fitofisionomias de floresta apresentaram valor mínimo de ECT de 10,5 t/pixel nas áreas verdes intra urbanas, e máximo de 27,17 tC/pixel nas florestas ombrófilas densas de terras baixas associadas aos Organossolos.

Também destacaram-se as áreas de Apicum, cujo valor médio de estoque de carbono correspondeu a 18,40 tC/pixel, e Pastagens associadas aos Organossolos, que apresentou valor médio de 15,77 tC/pixel. As demais unidades de paisagem apresentaram valores variando entre 3 e 13 tC/pixel, correspondentes a unidades de paisagem com cobertura vegetal degradada e/ou solos de baixo potencial de armazenamento.

No que tange à capacidade de armazenamento nas áreas protegidas presentes no município, a Figura 4 representa espacialmente uma estatística zonal das UC em relação ao ECT, na unidade de toneladas por hectares. Já a Tabela 6 apresenta o rol dos valores encontrados ordenados do maior para o menor, associados às respectivas UC.

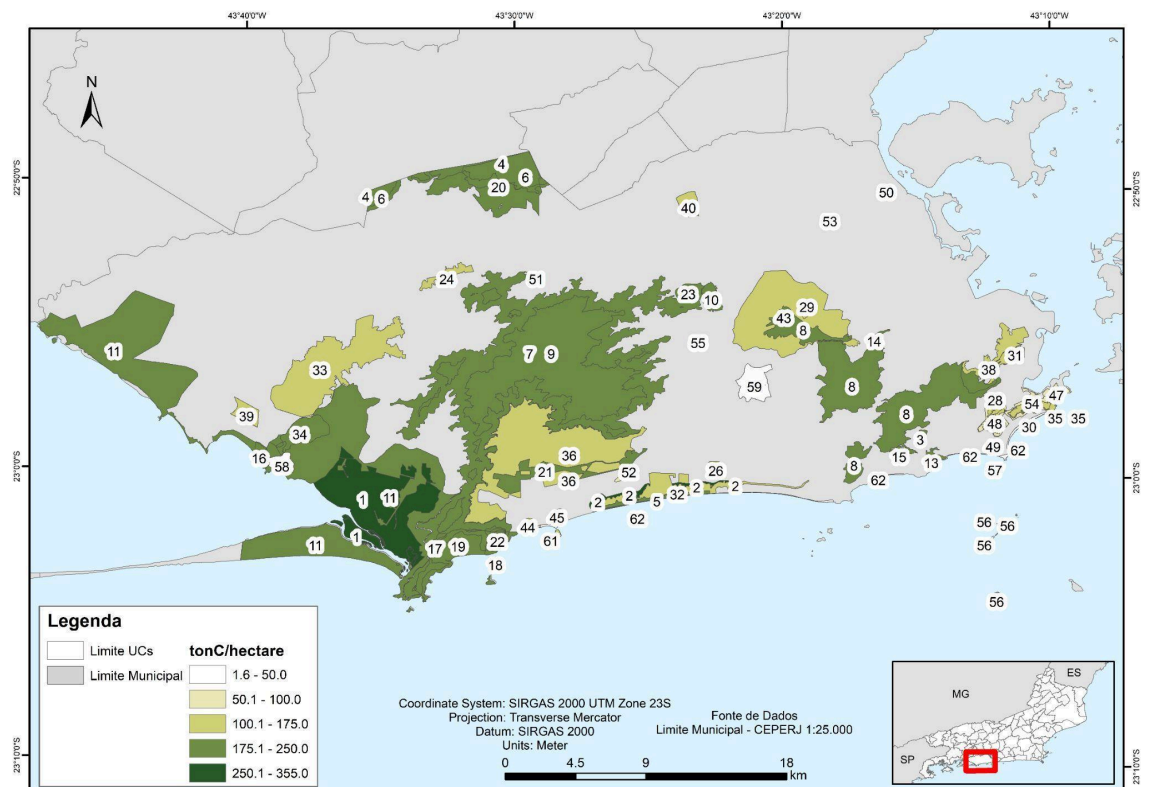


Figura 4: Estatística Zonal do Estoque de Carbono por Hectare nas UC e ranking das áreas protegidas.

Fonte: Autores

Tabela 6: Valores da Estatística Zonal do Estoque de Carbono Total nas UC.

Ranking	Nome da UC	Esfera	Área (ha)	TonC (total)	TonC/ha
1	REBIO Estadual de Guaratiba	Estadual	2,815.7	999,676.0	355.0
2	PNM de Marapendi	Municipal	155.6	53,058.9	341.0
3	PNM da Cidade	Municipal	46.6	11,387.8	244.1
4	PE do Mendanha	Estadual	967.1	230,813.3	238.7
5	PNM da Barra da Tijuca Nelson Mandela	Municipal	162.7	38,517.0	236.8
6	APA de Gericinó-Mendanha	Estadual	1,490.0	349,971.8	234.9
7	APA da Pedra Branca	Municipal	5,386.7	1,232,838.7	228.9
8	PN da Tijuca	Federal	3,958.4	903,921.5	228.4
9	PE da Pedra Branca	Estadual	12,491.7	2,772,495.5	221.9
10	APA do Morro do Valqueire	Municipal	166.1	36,545.4	220.0
11	APA da Orla Marítima da Baía de Sepetiba	Municipal	11,297.8	2,384,395.8	211.0
12	PE da Chacrinha	Estadual	3.7	776.6	209.2
13	PNM Penhasco Dois Irmãos	Municipal	36.9	7,698.1	208.6
14	PE do Grajaú	Estadual	54.7	11,234.9	205.3
15	ARIE de São Conrado	Municipal	82.3	16,752.9	203.6
16	APA da Brisas	Municipal	100.4	20,380.5	202.9
17	PNM de Grumari	Municipal	775,8	154.673,6	199,4
18	PNM da Prainha	Municipal	141,3	28.157,5	199,3
19	APA de Grumari	Municipal	928,6	182.604,4	196,6
20	PNM da Serra do Mendanha	Municipal	1.390,3	270.859,6	194,8
21	REVIS dos Campos de Sernambetiba	Municipal	557,0	108.374,4	194,6
22	APA da Prainha	Municipal	150,3	28.839,4	191,9
23	APA do Morro do Cachambi	Municipal	142,4	25.557,6	179,5
24	ARIE Floresta da Posse	Municipal	171,6	29.940,3	174,5
25	PNM Fonte da Saudade	Municipal	2,2	359,8	161,9
26	PNM Bosque da Barra	Municipal	54,4	8.521,0	156,6
27	PNM da Serra da Capoeira Grande	Municipal	21,0	3.224,8	153,6
28	APA do Morro da Saudade	Municipal	59,5	8.890,7	149,5
29	APA do Várzea Country Club	Municipal	10,3	1.523,9	148,0
30	APA dos Morros da Babilônia e de São João	Municipal	112,7	16.639,4	147,7
31	APA de São José	Municipal	108,9	15.835,3	145,4
32	APA do Parque Municipal	Municipal	938,4	135.738,9	144,6

Ranking	Nome da UC	Esfera	Área (ha)	TonC (total)	TonC/ha
	Ecológico de Marapendi				
33	APA da Serras de Inhoaíba Cantagalo e Santa Eugênia	Municipal	2.227,7	321.789,5	144,4
34	APA da Serra da Capoeira Grande	Municipal	478,9	69.032,1	144,2
35	PNM Paisagem Carioca	Municipal	138,1	19.193,3	139,0
36	APA do Sertão Carioca	Municipal	3.247,4	426.981,1	131,5
37	PNM da Freguesia	Municipal	29,2	3.800,7	130,1
38	APA de Santa Teresa	Municipal	515,7	66.968,0	129,9
39	APA de Sepetiba li	Estadual	171,6	21.430,7	124,9
40	REVIS da Floresta do Camboatá	Municipal	171,6	21.260,2	123,9
41	APA do Morro do Leme	Municipal	48,7	5.815,4	119,3
42	PNM José Guilherme Merquior	Municipal	8,3	977,1	117,9
43	APA da Serra dos Pretos Forros	Municipal	2.715,1	295.589,2	108,9
44	MONA do Recreio dos Bandeirantes	Municipal	62,7	6.645,2	105,9
45	PNM Chico Mendes	Municipal	40,6	4.271,6	105,1
46	PNM da Catacumba	Municipal	97,7	10.084,9	103,3
47	MONA dos Morros do Pão de Açúcar e Urca	Municipal	86,4	8.139,1	94,2
48	APA do Sacopã	Municipal	248,5	22.925,4	92,2
49	APA do Morro dos Cabritos	Municipal	135,5	12.369,8	91,3
50	APA da Fazendinha da Penha	Municipal	13,2	1.195,3	90,3
51	PNM Fazenda do Viegas	Municipal	8,5	705,4	83,1
52	APA da Tabebuias	Municipal	61,7	4.672,8	75,7
53	PNM do Jardim do Carmo	Municipal	2,5	176,4	69,2
54	APA Paisagem Carioca	Municipal	160,9	10.423,9	64,8
55	APA da Fazenda da Taquara	Municipal	8,7	548,7	63,1
56	MONA do Arquipélago da Ilhas Cagarras	Federal	76,5	3.607,9	47,2
57	APA da Pontas de Copacabana e Arpoador e seus entornos	Municipal	16,2	597,6	37,0
58	APA do Morro do Silvério	Municipal	150,1	5.386,8	35,9
59	APA do Bairro da Freguesia	Municipal	379,5	11.543,0	30,4
60	PNM Darke de Mattos	Municipal	5,1	86,9	17,0
61	APA da Paisagem e do Areal da Praia do Pontal	Municipal	16,1	88,2	5,5
62	APA da Orla Marítima	Municipal	128,0	212,0	1,65

Fonte: Autores

A partir da estatística zonal foi constatado que o valor médio de ECT foi de 147,7 tonC/ha, enquanto a mediana correspondeu a 145 tonC/ha, o que indicaria uma distribuição aproximadamente simétrica. Contudo, o desvio padrão encontrado foi de 74,1 tonC/ha, evidenciando uma heterogeneidade considerável nos valores de estoque de carbono das UC públicas no município do Rio de Janeiro.

O valor máximo encontrado foi de 355 tonC/ha, relativo à Reserva Biológica Estadual de Guaratiba, mesmo possuindo uma menor dimensão territorial em comparação com as outras. Tal resultado encontra respaldo na literatura científica,

que demonstra que os manguezais brasileiros podem armazenar entre 2,2 e 4,3 vezes mais carbono no primeiro metro de solo em comparação a outros biomas vegetados do país (Rovai *et al.*, 2021). Resultados complementares indicam que os solos de manguezais apresentam os maiores estoques de carbono entre os biomas brasileiros, destacando-se como ambientes de elevada relevância para o ciclo do carbono (Camargo, 2022).

De maneira semelhante, o Parque Natural Municipal de Marapendi, composto majoritariamente por cobertura de manguezais, apresenta valor estimado em 341 tonC/ha. A sutil queda no ECT se deve ao fato de que essa UC também é formada por outros tipos de cobertura natural, como restingas, florestas e até parte da lagoa de Marapendi, o que reduz a média de toneladas de carbono acumuladas por hectare.

O Parque Nacional da Tijuca e o Parque Estadual da Pedra Branca, que são as maiores áreas verdes urbanas do município, apresentaram valor estimado de 228 e 222 tC/ha, respectivamente. Como ilustrado anteriormente, florestas tendem a estocar menos carbono que áreas úmidas e de manguezal. Contudo, nesse caso considera-se também o tipo de solo na capacidade de estocar carbono. Ambas as UC são compostas, majoritariamente, por solos latossólicos, que ocupam grande parte das UC e possuem menor capacidade de estocar carbono (Fidalgo *et al.*, 2007).

No que tange a análise agrupada por quebras naturais da distribuição dos valores de estoque de carbono por hectare, a Figura 5 mostra o histograma de frequência e o percentual acumulado por intervalo considerando os dados gerados pela estatística zonal.

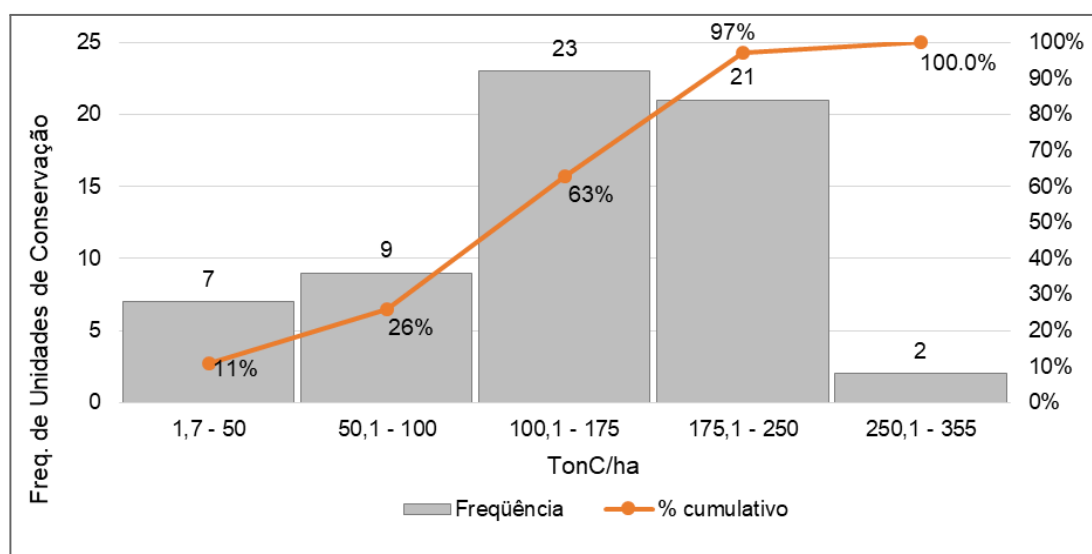


Figura 5: Histograma de frequência e frequência acumulada dos valores de estoque de carbono por hectare agrupados por quebras naturais.

Fonte: Autores

Foi possível observar que a maior parte dos dados está em valores intermediários, especialmente entre 100,1 e 250 tonC/ha, com poucas observações muito baixas ou muito altas. Essa concentração ilustra a maior quantidade de UC abrangendo as fitofisionomias de floresta ombrófila densa, especialmente as submontanas e montanas, associadas a solos de baixa atividade de argila. Entretanto, esse intervalo também contempla UC que contêm, em alguma proporção, florestas intra urbanas, áreas de pastagem sobre solos orgânicos, restingas e áreas úmidas.

Também foi possível observar uma assimetria positiva gerada pelas duas UC no intervalo dos valores mais altos que podem estar influenciando a média. Essas UC abrangem áreas de mangue e solos hidromórficos (*wet soils*), cuja capacidade de

estocagem de carbono ficou acima de 350 tonC/ha. Tal fato ressalta a necessidade de mais ações do poder público para conservar os remanescentes e restaurar áreas desse ecossistema para ampliar a estratégia de adaptação às mudanças climáticas.

6 Conclusão

A proposta metodológica, bem como sua aplicação, atenderam aos objetivos deste trabalho. A aplicação do modelo *Carbon Storage and Sequestration* do InVEST 3.14 aliado ao refinamento detalhado do mapeamento de uso e cobertura do solo para criação das unidades de paisagem Uso-Solo-Vegetação, permitiu representar, em detalhe, e com maior precisão, a heterogeneidade da paisagem. Aliado a isso, o refinamento da tabela biofísica a partir do cálculo dos perfis de solo associado a valores de referência nacionais permitiu a obtenção de um resultado satisfatório dentro das limitações existentes.

Os resultados evidenciam que a combinação entre tipos de vegetação e características pedológicas é determinante para precisar o potencial de estocagem de carbono, e que o detalhamento das bases de dados melhora substancialmente a acurácia dos modelos aplicados. Mesmo assim, limitações relacionadas à escala do mapeamento de solos e à ausência de dados específicos em áreas densamente urbanizadas indicam a necessidade de avanços em levantamentos pedológicos de maior resolução.

Constatou-se que ambientes úmidos e manguezais são os maiores responsáveis pelo acúmulo de carbono, destacando-se a Reserva Biológica Estadual de Guaratiba e o Parque Natural Municipal de Marapendi, cujos valores elevados evidenciam o papel estratégico da conservação desses ecossistemas na mitigação das mudanças climáticas. As Florestas Ombrófilas, embora apresentem valores menores quando comparadas a áreas de mangue, também se mostraram extremamente relevantes, sobretudo nos maciços do município, reforçando seu papel ecológico e climático.

No entanto, a interpretação dos resultados deve considerar certas limitações metodológicas. Primeiramente, a ausência de uma validação de campo direta (in situ) para o presente estudo implica que os resultados são estimativas modeladas baseadas em dados secundários robustos, mas não aferidos localmente para este fim específico. Isso significa que pode haver superestimação ou subestimação dos resultados.

Em segundo lugar, a fixação da profundidade do solo em 30 cm subestima o estoque total de carbono, especialmente nos solos indiscriminados de mangue. Segundo Donato *et al.* (2011) os manguezais contêm em média 1.023 tC/ha, no qual o compartimento do solo foi responsável por estocar de 49-98% do carbono, em profundidade variando de 0,5 a 3 metros. Portanto, os valores aqui apresentados devem ser vistos como um cenário base (conservador) para o município.

No mais, o estudo reafirma a importância das unidades de conservação como componentes essenciais da mitigação climática em grandes centros urbanos, além de propor uma base metodológica robusta de caráter replicável. A expansão de mapeamentos detalhados e a continuidade do monitoramento são fundamentais para aprimorar estimativas, orientar políticas públicas e fortalecer estratégias integradas de planejamento ambiental e climático no município do Rio de Janeiro.

Após a identificação das principais dificuldades e desafios metodológicos, as etapas subsequentes do estudo serão direcionadas ao seu aprimoramento e refinamento. Inicialmente, pretende-se reproduzir a análise com base nos dados da PCRJ (2018), com o objetivo de refinar a escala de trabalho. Paralelamente, será elaborado um planejamento estratégico para a realização de campanhas de campo voltadas à coleta de pontos amostrais distribuídos pelo território estadual, bem como à execução de medições in situ, em conformidade com a metodologia

proposta por Arévalo, Alegre e Vilcahuamán (2002).

Por fim, busca-se incorporar a variabilidade sazonal ao mapeamento de uso e cobertura da terra, considerando que determinadas classes, especialmente as áreas úmidas, apresentam variações expressivas em sua extensão ao longo do ano. Nesse sentido, a elaboração de mapeamentos distintos para diferentes períodos sazonais configura-se como estratégia relevante para identificar possíveis flutuações na capacidade de estocagem de carbono.

Referências

AB'SÁBER, Aziz. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

AMARAL, Felipe Gonçalves *et al.* Sistemas verdes urbanos no Rio de Janeiro: novas perspectivas a partir de multissensores e análise em micro escala. **Coleção Estudos Cariocas**, v. 13, n. 4, 2026. DOI:10.71256/19847203.13.4.200.2025.

ANTUNES, Melissa Casacchi; CAMPOS, Tácio Mauro Pereira de; ARARUNA JÚNIOR, José Tavares. Soil carbon storage and retention: a critical synthesis on concepts, research opportunities and sustainable application in environmental engineering. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, [S. l.], 2025. DOI: 10.5327/Z2176-94782704.

AREVALO, Luis Alberto; ALEGRE, Julio Cesar; VILCAHUAMAN, Luciano Javier Montoya. **Metodologia para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra**. Colombo: Embrapa Florestas, 2002. 41 p. (*Documentos*, 73).

BEILLOUIN, Damien *et al.* A global database of land management, land-use change and climate change effects on soil organic carbon. **Scientific Data**, v. 9, n. 228, 2022. DOI: 10.1038/s41597-022-01318-1.

BENITES, Vinícius de Melo *et al.* Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, v. 139, p. 90–97, 2007. DOI: 10.1016/j.geoderma.2007.01.005.

BERNOUX, Martial *et al.* Brazil's soil carbon stocks. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, p. 888–896, 2002.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Relatório de Referência**. Brasília, 2020. 314 p.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Relatório do Inventário Nacional das Emissões Antrópicas por Fontes e das Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa do Brasil: Primeiro Relatório Bienal de Transparência à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (Relatório do Inventário Nacional | 1990-2022)**. Brasília, 2024. 642 p.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima: volume III**. Brasília, 2016. 336 p.

CAMARGO, Suzana. **Solo dos manguezais tem o maior estoque de carbono do Brasil**. *O Eco*, 2022. Disponível em: <https://oeco.org.br/reportagens/solo-dos-manguezais-tem-o-maior-estoque-de-carbono-do-brasil/>. Acesso em: 19 nov. 2025.

D'ANDREA, Alexandre Fonseca *et al.* Estoque de carbono orgânico do solo em remanescente de Floresta Alta de Restinga na Mata Atlântica setentrional. In: *Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, 35., 2015, Natal. **Anais... Natal**: SBCS, 2015.

DON, A. *et al.* Carbon sequestration in soils and climate change mitigation—definitions and pitfalls. **Global Change Biology**, [S. l.], e16983, 2023.

doi: 10.1111/gcb.16983.

DONATO, Daniel C. *et al.* Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. **Nature Geosci**, [S. l.], v. 4, p. 293–297, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema de Informação de Solos**. Brasília, 2014. Disponível em: https://www.bdsolos.cnptia.embrapa.br/consulta_publica.html. Acesso em: 12 nov. 2025.

FIDALGO, Elaine Cristina Cardoso *et al.* **Estoque de carbono nos solos do Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **The state of food and agriculture 2019: moving forward on food loss and waste reduction**. Rome: FAO, 2019.

FONSÊCA, Nathan C. *et al.* Carbon stock in aboveground biomass and necromass in the Atlantic Forest. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S. l.], v. 96, n. 1, e20220761, 2024.

GAMEIRO, Samuel *et al.* Quantifying terrestrial carbon in the context of climate change. **Carbon Balance and Management**, [S. l.], v. 20, n. 25, 2025. DOI: 10.1186/s13021-025-00316-1.

GOMES, Arthur Alves Prates. **Acúmulo e estoque de carbono na Manguezal de Atapuz, sistema estuarino de Itapessoca, Goiana (PE)**. 2023. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

HE, Y. *et al.* Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Guilin based on FLUS and InVEST models. **Remote Sensing**, v. 15, n. 5, art. 1445, 2023.

HOUGHTON, R. A.; HALL, F.; GOETZ, S. J. Importance of biomass in the global carbon cycle. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, G00E03, 2009.

HOUGHTON, R. A. Land-use change and the carbon cycle. **Global Change Biology**, v. 1, p 275 - 287, 1995.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Área territorial brasileira**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA). **O Estado do Ambiente - Indicadores Ambientais do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2010.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA). **Mapeamento da Vegetação no Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: INEA, *no prelo*.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA). **Portal GeoINEA – Informações geoespaciais do Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://geoportal.inea.rj.gov.br>. Acesso em: 04 fev. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2001: Synthesis Report**. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Editores: Watson, R. T. e Core Writing Team. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 398 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change and land**. Geneva, 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for national greenhouse gas inventories**. Geneva, 2006.

LUMBRERAS, J. F.; GOMES, J. B. V. **Mapeamento pedológico e interpretações úteis ao planejamento ambiental do município do Rio de Janeiro**. Rio de

Janeiro: Embrapa Solos, 2004.

MELLO, F. F. C. *et al.* Potential of soil carbon sequestration for the Brazilian Atlantic Region. In: LAL, R. *et al.* (ed.). **Carbon sequestration in soils of Latin America**. New York: The Haworth Press, 2006. p. 353–373.

MENDONÇA-SANTOS, Maria de Lourdes *et al.* **Quantificação e distribuição espacial do carbono orgânico na paisagem e em perfis de solos do Município do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 20 p. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 39).

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA (MMA). **Cadastro Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (CNUC)**. Brasília: MMA, 2026. Disponível em: <https://cnuc.mma.gov.br/>. Acesso em: mar. 2026.

NATURAL CAPITAL ALLIANCE (NCA). **InVEST 3.14.0**. Stanford University, University of Minnesota, Chinese Academy of Sciences, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, Stockholm Resilience Centre and the Royal Swedish Academy of Sciences, 2016. <https://naturalcapitalalliance.stanford.edu/software/invest>

NOGUEIRA JÚNIOR, Laura Rodrigues. Estoque e sequestro de carbono em florestas e sistemas de produção agrícola - Software InVEST. In: **Serviços ecossistêmicos e serviços ambientais de solo, água e carbono em sistemas de produção agrícola e florestal no bioma Amazônia**. Brasília, DF: Embrapa, 2023. cap. 6, p. 149-157.

NWAOGU, Chukwudi. *et al.* Three-decades assessment of land use changes and soil carbon stocks. **Environmental Research Communications**, v. 7, art. 055021, 2025.

PEDREIRA, Luiz Octavio Lima; ANDRADE, Felipe Noronha; FICO, Brasiliano Vito. **Índices de áreas verdes do município do Rio de Janeiro: nota técnica n. 37**. Rio de Janeiro: Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Brasiliano-Fico/publication/344000002_Nota_Tecnica_Indices_de_Areas_Verdes_do_Municipio_do_Rio_de_Janeiro_Nota_Tecnica_N_37_Indices_de_Areas_Verdes_do_Municipio_do_Rio_de_Janeiro/links/5f4d8a11458515a88ba0e512/Nota-Tecnica-Indices-de-Areas-Verdes-do-Municipio-do-Rio-de-Janeiro-Nota-Tecnica-N-37-Indices-de-Areas-Verdes-do-Municipio-do-Rio-de-Janeiro.pdf. Acesso em: abril de 2026.

PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO (PCRJ). **Uso do solo 2018**. Rio de Janeiro: Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, [2018]. Disponível em: <https://www.data.rio/datasets/PCRJ::uso-do-solo-2018/about>.

PHUKUBYE, K. *et al.* On the impact of grassland management on soil carbon stocks. **Geoderma Regional**, v. 28, 2022.

RONQUIM, Carlos Cesar. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. 26 p. (Embrapa Monitoramento por Satélite. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 8)

ROVAL, Andre S. *et al.* Brazilian mangroves: blue carbon hotspots of national and Global Relevance to Natural Climate Solutions. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 4, 2021.

SANTOS, Daniel Medina Corrêa. **Estoque de carbono na biomassa subterrânea de florestas de mangue**. 2015. Tese (Doutorado em Meio Ambiente) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SCHIMMEL, David S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. **Global Change Biology**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 77-91, 1995.

SHARMA, Richa *et al.* Spatio-Temporal Assessment of Urban Carbon Storage and Its Dynamics Using InVEST Model. **Land**, v. 13, n. 9, art. 1387, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land13091387>.

SILVA, Ane Cristine Fortes da *et al.* Carbon in forest species of the Atlantic Forest as an indicator of stocks and quality. **Floresta**, Curitiba, v. 51, n. 3, p. 630-638, jul./set. 2021

STAM, Gilberto. **Planícies associadas às florestas de mangue retiram carbono da atmosfera**. *Revista Pesquisa FAPESP*, São Paulo, 9 jun. 2021. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/planicies-associadas-as-florestas-de-mangue-retir-am-carbono-da-atmosfera/>

VEIGA, Larissa Giorgeti. **Variação do estoque de madeira morta em diferentes altitudes de Floresta Ombrófila Densa Atlântica**. 2008. Monografia (Graduação em Ciências Biológicas) – UNESP, Botucatu, 2008.

VILLANOVA, Paulo Henrique *et al.* Necromass Carbon Stock in a Secondary Atlantic Forest Fragment in Brazil. **Forests**, [S. l.], v. 10, n. 10, 833, 2019.

WANG, Rwei-Yuan. *et al.* Comparison of the CASA and InVEST models effects for estimating spatiotemporal differences in carbon storage of green spaces in megacities. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55399-x>

ZAFAR, Zeeshan *et al.* Predictive modeling of regional carbon storage dynamics in response to land use/land cover changes: An InVEST-based analysis. **Ecological Informatics**, [S. l.], v. 82, art. 102701, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102701>.

ZANATTA, Josiléia Acordi *et al.* **Índice de alteração do carbono no solo**. Colombo: Embrapa Florestas, 2020

Sobre os Autores

Beatriz Ambrosio Garcia de Oliveira é bacharel em Ciências Matemáticas e da Terra pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), e foi analista ambiental no Instituto Estadual do Ambiente, onde desenvolveu esta pesquisa. Atualmente, é mestranda em Geologia, e graduanda em Geografia, ambos pela mesma instituição.

Victor Buznello de Vasconcellos Maluf é mestre, licenciado, e bacharel em Geografia pela Universidade Federal Fluminense (UFF), e Especialista em Gestão Ambiental pela Escola Politécnica da UFRJ. Atualmente compõe corpo o técnico no Instituto Estadual do Ambiente do Rio de Janeiro, atuando como Chefe do Serviço de Gestão Ecológica.

Paulo Vinicius Rufino Fevrier é geógrafo pela Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), mestre em Geografia e especialista em Geologia do Quaternário, ambos pela UFRJ. Atualmente, ocupa o cargo de Gerente na Gerência de Gestão do Território e Informações Geoespaciais do INEA.

Contribuições dos Autores

Conceituação, [B.A.G.O, V.B.V.M]; metodologia, [B.A.G.O, V.B.V.M, P.V.R.F]; software, [B.A.G.O]; validação, [B.A.G.O, V.B.V.M]; análise formal, [B.A.G.O, V.B.V.M]; investigação, [B.A.G.O, V.B.V.M]; curadoria de dados, [B.A.G.O, V.B.V.M, P.V.R.F]; redação - preparação do rascunho original, [B.A.G.O]; redação - revisão e edição, [B.A.G.O, V.B.V.M]; supervisão, [V.B.V.M, P.V.R.F]. Todos os autores leram e concordam com a versão publicada do manuscrito.

Agradecimentos

Os autores reconhecem as contribuições do Instituto Estadual do Ambiente pelo incentivo ao uso do software InVEST por meio da realização de um curso de capacitação.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Sobre a Coleção Estudos Cariocas

A Coleção Estudos Cariocas (ISSN 1984-7203) é uma publicação de estudos e pesquisas sobre o Município do Rio de Janeiro, vinculada ao Instituto Pereira Passos (IPP) da Secretaria Municipal da Casa Civil da Prefeitura do Rio de Janeiro.

Seu objetivo é divulgar a produção técnico-científica sobre temas relacionados à cidade do Rio de Janeiro, bem como sua vinculação metropolitana e em contextos regionais, nacionais e internacionais. Está aberta a quaisquer pesquisadores (sejam eles servidores municipais ou não), abrangendo áreas diversas - sempre que atendam, parcial ou integralmente, o recorte espacial da cidade do Rio de Janeiro.

Os artigos também necessitam guardar coerência com os objetivos do Instituto, a saber:

1. Promover e coordenar a intervenção pública sobre o espaço urbano do Município;
2. Prover e integrar as atividades do sistema de informações geográficas, cartográficas, monográficas e dados estatísticos da Cidade;
3. Subsidiar a fixação das diretrizes básicas ao desenvolvimento socioeconômico do Município.

Especial ênfase será dada no tocante à articulação dos artigos à proposta de desenvolvimento econômico da cidade. Desse modo, espera-se que os artigos multidisciplinares submetidos à revista respondam às necessidades de desenvolvimento urbano do Rio de Janeiro.