

UMA VISÃO PANORÂMICA DOS ESTOQUES DE CARBONO NOS SOLOS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

UM ATIVO AMBIENTAL ESTRATÉGICO

inea instituto estadual
do ambiente

Secretaria do
Ambiente e
Sustentabilidade



GOVERNO DO ESTADO
RIO DE JANEIRO

Embrapa
Solos

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA E
PECUÁRIA

GOVERNO DO
BRASIL
DO LADO DO POVO BRASILEIRO



GOVERNO DO BRASIL

Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa)

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)

Embrapa Solos

GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade (SEAS)

Subsecretaria de Mudanças do Clima

e Conservação da Biodiversidade (SUBCLIM)

Superintendência de Mudanças do Clima e Florestas (SUPCLIF)

Instituto Estadual do Ambiente (INEA)

UMA VISÃO PANORÂMICA DOS ESTOQUES DE CARBONO NOS SOLOS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

UM ATIVO AMBIENTAL ESTRATÉGICO

COORDENAÇÃO EDITORIAL

Gerência de Publicações e Acervo Técnico
Tania Machado

REVISÃO

Tania Machado
Karin Thiele Dracxler
Maria Eduarda Mendes Laguardia
Vitor Costa

PROJETO GRÁFICO

Jhenifer Martins Magalhães
Marcus Vinicius Reis Gama

DIAGRAMAÇÃO

Marcus Vinicius Reis Gama
Bruna Albuquerque de Lima

O livro “Uma Visão Panorâmica dos Estoques de Carbono nos Solos do Estado do Rio de Janeiro - Um Ativo Ambiental Estratégico” é fruto do Projeto “Carbono no Solo no estado do Rio de Janeiro - Alternativa para uma trajetória sustentável” aprovado e financiado pelo Climate Group na chamada 2022 do Future Fund, desenvolvido com recursos da Carteira de Doações do Fundo da Mata Atlântica (FMA) do estado do Rio de Janeiro, a partir de um Acordo de Cooperação Técnica entre a Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade com a Embrapa Solos.

Processo: SEI-070026/000736/2023

Disponível em <https://www.inea.rj.gov.br/publicacoes/publicacoes-inea/livros/> e <https://geoportal.inea.rj.gov.br/portal/apps/sites/#/portal-de-mudancas-climaticas-do-estado-do-rio-de-janeiro/pages/acervo>

Direitos desta edição da Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade (SEAS)

Subsecretaria de Mudanças do Clima e Conservação da Biodiversidade (SUBCLIM)

Av. Venezuela, 110 – 5º andar – Saúde, CEP 20081-312 – Rio de Janeiro – RJ
Qualquer parte desta publicação pode ser reproduzida, desde que citada a fonte.

Como citar:

RIO DE JANEIRO (Estado). Secretaria do Ambiente e Sustentabilidade; EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Uma visão panorâmica dos estoques de carbono nos solos do estado do Rio de Janeiro**: um ativo ambiental estratégico. Organização: Telmo Borges Silveira Filho, Fabiano de Carvalho Balieiro. Rio de Janeiro: INEA, 2025. 78 p.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do Inea

R585a Rio de Janeiro (Estado). Secretaria do Ambiente e Sustentabilidade.

Uma visão panorâmica dos estoques de carbono nos solos do estado do Rio de Janeiro: um ativo ambiental estratégico / Secretaria do Ambiente e Sustentabilidade, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; Organização: Telmo Borges Silveira Filho, Fabiano de Carvalho Balieiro. – Rio de Janeiro: INEA, 2025. 78 p.: il. color.

Projeto aprovado pelo Climate Group na chamada 2022 do Future Fund.

Inclui bibliografia.
ISBN: 978-65-983314-7-4.

1. Solo – Fatores ambientais – Rio de Janeiro (Estado). 2. Captação de carbono – Rio de Janeiro (Estado). 3. Efeito estufa – Rio de Janeiro (Estado). I. Título. II. Silveira Filho, Telmo Borges. III. Balieiro, Fabiano de Carvalho. IV. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. V. Instituto Estadual do Ambiente (RJ).

CDU 574.1(815.3)

UMA VISÃO PANORÂMICA DOS ESTOQUES DE CARBONO NOS SOLOS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

UM ATIVO AMBIENTAL ESTRATÉGICO

Organização:

Telmo Borges Silveira Filho, superintendente de Mudanças do Clima e
Florestas (SEAS)

Fabiano de Carvalho Balieiro, pesquisador da Embrapa Solos

Rio de Janeiro, novembro de 2025

SECRETARIA DE ESTADO DO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE (SEAS)

Coordenação Geral:

Telmo Borges Silveira Filho - Engenheiro Florestal – D.Sc, Superintendente de Mudanças do Clima e Florestas – Subsecretaria de Mudanças do Clima e Conservação da Biodiversidade

Apoio à Coordenação Geral do Projeto:

Monise Aguillar Faria Magalhães - Engenheira Florestal – M.Sc, Superintendência de Mudanças do Clima e Florestas – Subsecretaria de Mudanças do Clima e Conservação da Biodiversidade

Apoio técnico:

Mariana da Motta - Bióloga - Assistente de Projetos

Geovane Barbosa - Engenheiro Florestal - Elaboração da Figura 1 do capítulo 5.

Juliana Vasconcellos - Bióloga, D.Sc - Elaboração das figuras 2 e 3 do capítulo 1.

EMBRAPA SOLOS - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA)

Coordenação Técnica e Científica:

Gustavo de Mattos Vasques - Engenheiro Florestal, D.Sc - Pesquisador (Mapeamento digital de solos, pedometria e sensores geofísicos)

Fabiano de Carvalho Balieiro - Engenheiro Agrônomo, D.Sc - Pesquisador (Ciclagem de C e nutrientes em florestas e agroecossistemas)

Rachel Bardy Prado - Bióloga, D.Sc - Pesquisadora (Sustentabilidade de paisagens rurais e serviços ecossistêmicos)

Apoio técnico:

Fernando Teixeira Samary - Engenheiro Agrônomo - D.Sc Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, analista (Relações institucionais e transferência de tecnologia)

Ricardo de Oliveira Dart - Geógrafo - M.Sc Geografia - Analista (Pedometria e geoprocessamento)

Bolsistas:

Bárbara Coelho de Andrade - Geóloga

Lygia Crespo dos Santos Roque - licenciada em Ciências Biológicas e Gestora Ambiental

AGRADECIMENTOS

A elaboração deste livro foi possível graças ao:

Serviço Florestal Brasileiro, que cedeu gentilmente as amostras e os dados de solos obtidos em campo.

Ao apoio institucional disponibilizado por meio do Acordo de Cooperação Técnica número 25100.23/0109-8, entre a Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade do Rio de Janeiro e a Embrapa Solos, e pelo projeto Embrapa número 20.24.00.027.00.00.

Ao Climate Group Under2 Coalition Future Fund e ao Fundo Mata Atlântica pelo suporte financeiro.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio do Programa PIBIC-Embrapa Solos de iniciação científica, pelo auxílio prestado no desenvolvimento do trabalho.

À The Nature Conservancy, pelas contribuições técnicas nas discussões durante o desenvolvimento do projeto.



APRESENTAÇÃO

A publicação *Uma Visão Panorâmica dos Estoques de Carbono nos Solos do Estado do Rio de Janeiro - Um Ativo Ambiental Estratégico*, que a Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade (SEAS) em parceria com a Embrapa Solos ora disponibiliza ao público, revela-se como uma contribuição e um esforço de difundir informações sobre o que está diariamente sob os nossos pés - os solos!

Solos são responsáveis por abrigar grande diversidade de fauna, são substrato principal da flora e garantem nossa segurança alimentar, além de serem agentes filtrantes das impurezas das águas, funcionando como uma verdadeira “peneira” para purificar as águas que infiltram no lençol freático.

Desta forma, as informações presentes nesta publicação jogam luz sobre a contribuição dos solos na mitigação das emissões dos gases de efeito estufa, bem como, apontam a necessidade de agirmos localmente para garantir um futuro mais sustentável.

O Estado do Rio de Janeiro, por meio da Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade (SEAS) e demais parceiros locais e internacionais, vêm contribuindo com as metas nacionais e globais acordadas nas Convenções sobre Mudanças Climáticas e Conservação da Diversidade Biológica.

Os recursos disponibilizados pelo Future Fund, Climate Group e Coalizão Under2 e, viabilizados pelo Fundo Estadual da Mata Atlântica (FMA), possibilitaram realizar e aprofundar as análises dos dados de solos do Inventário Florestal Nacional no Estado do Rio de Janeiro, dimensionando a contribuição dos estoques de carbono nos solos e traçar cenários futuros no território estadual. As informações obtidas servem de base para esse estudo inédito, que colabora com o aprimoramento de políticas públicas voltadas à conservação e restauração da Mata Atlântica e à valorização dos serviços ecossistêmicos prestados nas regiões rurais do estado do Rio de Janeiro.

Aos nossos leitores desejamos que desfrutem destas informações e possamos traçar juntos uma trajetória mais sustentável.

#SOMOS TODOS MATA ATLÂNTICA!

BERNARDO ROSSI

Secretário de Estado do Ambiente e Sustentabilidade (SEAS)



PREFÁCIO

O solo é um recurso vital, embora muitas vezes invisível aos olhos da sociedade. Além de sustentar a produção de alimentos e fibras, ele atua como um dos maiores reservatórios de carbono do planeta, desempenhando papel estratégico no enfrentamento das mudanças climáticas.

Este livro reúne cinco capítulos que, em conjunto, oferecem um panorama aplicado sobre os estoques de carbono nos solos do estado do Rio de Janeiro e suas possibilidades de manejo sustentável. Elaborado pela Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade (SEAS) e pela Embrapa Solos, os capítulos apresentam de forma inovadora resultados de análises, mapeamento e geração de cenários futuros sobre o estoque de carbono no solo, em função do uso da terra nas diferentes regiões administrativas do Rio de Janeiro.

O primeiro capítulo apresenta um breve **diagnóstico socioambiental do estado do Rio de Janeiro**, de forma a contextualizar seu histórico de ocupação e o atual uso da terra, e percorre pelos remanescentes florestais e usos silvipastoris, e a atual cobertura vegetal e os estoques de carbono na biomassa vegetal.

O segundo capítulo apresenta **mapas de estoques de carbono no solo**, elaborados com base em técnicas modernas de mapeamento digital de solos. Os resultados revelam as regiões do estado com maior capacidade de estocagem de carbono, como serras e manguezais, e destacam áreas críticas, como planícies costeiras e zonas de uso agrícola intensivo. Essas informações são fundamentais para orientar políticas públicas, projetos de conservação e práticas agrícolas mais sustentáveis.

No terceiro capítulo, os autores introduzem a **biblioteca espectral de solos do Rio de Janeiro**, construída por meio de análises de espectroscopia de refletância no visível e infravermelho próximo. Essa tecnologia inovadora permite estimar o teor de carbono do solo de forma rápida, precisa e com baixo custo, abrindo caminho para diagnósticos ágeis, inventários ambientais e, quiçá, alavancar potenciais mecanismos de compensação baseados em boas práticas de manejo que incorporam matéria orgânica aos solos fluminenses.

O quarto capítulo é dedicado aos **cenários de sequestro de carbono** obtidos a partir da adoção de boas práticas agrícolas e de iniciativas de restauração ecológica. Os resultados mostram que áreas degradadas, especialmente sob pastagens, podem se tornar significativos sumidouros de carbono, desde que haja incentivos adequados e políticas públicas eficazes. Ao mesmo tempo, os autores reforçam a importância de políticas públicas e instrumentos de incentivo econômico que viabilizem a transição para sistemas produtivos mais sustentáveis.

Por fim, o capítulo 5 traz **um futuro plano de negócios voltado para a valoração do carbono no solo** no território fluminense a partir da definição de premissas e diretrizes que fundamentam o potencial do carbono no solo como ativo econômico. Apesar dos desafios da comercialização desse ativo, os autores destacam o papel do agricultor que cuida do seu solo, o que resulta não só no aumento dos índices de produtividade, como também na oferta de produtos mais saudáveis e na entrega de inúmeros serviços ecossistêmicos que extrapolam suas cercas e que beneficiam toda a sociedade. Fica entendido, portanto,

que o carbono do solo é “mais um produto” da cesta de produtos agropecuários e que, sem dúvida, a sociedade deve reconhecer e/ou recompensar o agricultor pelo importante papel que ele presta.

Pretende-se, com os dados apresentados neste livro o subsídio necessário para o desenvolvimento de políticas públicas focadas na análise da saúde do solo e dos ecossistemas presentes no território estadual, em escala de paisagem, visando acompanhar os impactos da restauração florestal e contabilização do carbono orgânico do solo.

Mais do que um compêndio técnico, este livro é um convite à ação. Ele demonstra como a ciência, a gestão pública, a agricultura e as florestas podem se integrar e caminhar juntas na construção de paisagens rurais mais multifuncionais e resilientes frente às mudanças climáticas.

MARIE IKEMOTO

Subsecretária de Mudanças do Clima e Conservação da Biodiversidade

CLAUDIA POZZI JANTALIA

Chefe Adjunta de Pesquisa e Desenvolvimento da Embrapa Solos



SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

Rio de Janeiro: uma análise sobre
o uso do solo e as mudanças climáticas _____ **12**

CAPÍTULO 2

Mapas de Estoque de Carbono do Solo para o estado
do Rio de Janeiro: subsídios para oportunidades em mercado de carbono _____ **24**

CAPÍTULO 3

Biblioteca Espectral e Quantificação do Teor
de Carbono do Solo para o estado do Rio De Janeiro _____ **34**

CAPÍTULO 4

Cenários do Armazenamento de Carbono no Solo a partir
da Mudança de Uso, Cobertura e Manejo da Terra
no estado do Rio de Janeiro _____ **40**

CAPÍTULO 5

Por uma Estratégia Jurisdicional de Carbono no Solo no Território
Estadual: ampliando a cesta de produtos sustentáveis nas propriedades
rurais fluminenses _____ **64**





CAPÍTULO 1

RIO DE JANEIRO: UMA ANÁLISE SOBRE O USO DO SOLO E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Telmo B. Silveira Filho, Fabiano C. Balieiro, Monise A. F. Magalhães



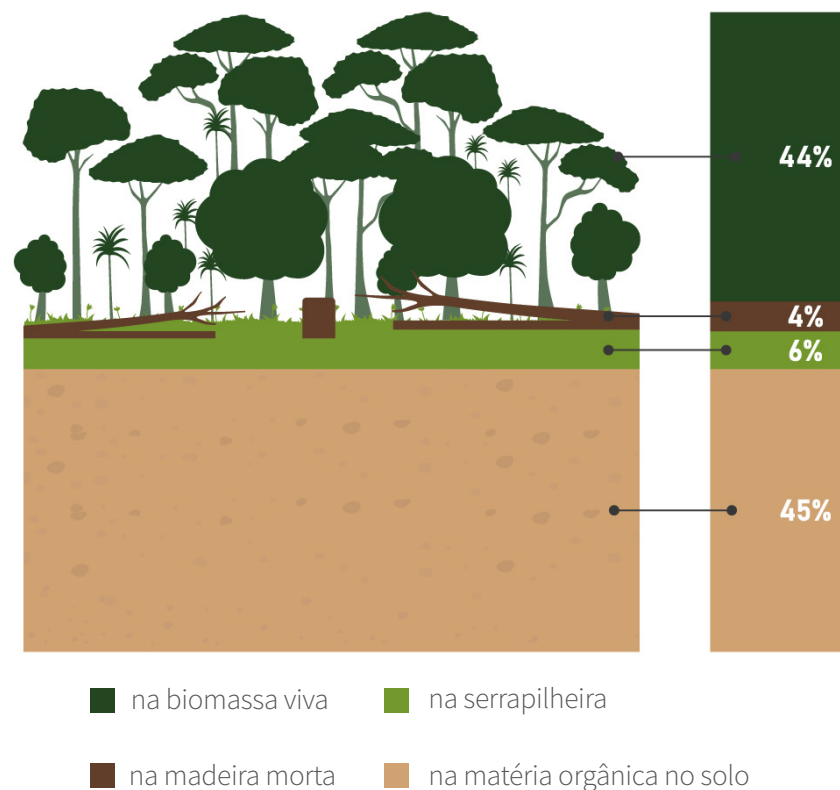
Os desafios impostos pelas mudanças climáticas, que já são uma realidade em muitos aspectos do cotidiano, requerem um diálogo multissetorial e estratégias distintas de ações já abordadas por diversos atores da sociedade, sobretudo os cientistas, formuladores de políticas, empresas e investidores. As ações de mitigação das emissões de gases do efeito estufa (GEE) dependem de uma contribuição substancial dos ecossistemas florestais, especialmente das florestas tropicais. Além disso, soma-se o fato de que as ações de adaptação são cruciais para minimizar os riscos das populações diante dos desafios atuais, em que mais uma vez as Soluções baseadas na Natureza (SbN) se apresentam como grandes aliadas.

Dessa forma, os ecossistemas florestais que muitas vezes foram e ainda são observados como obstáculo ao “desenvolvimento”, como reflexo de atraso à modernidade, se apresentam como a principal estratégia para mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Porém, esses mesmos ecossistemas, sua biodiversidade e funcionalidade são afetados pelas mudanças climáticas. Por isso, é necessário reforçar a aliança global pelo monitoramento, conservação e restauração dos ecossistemas florestais, que têm o solo como seu substrato principal.

Os ecossistemas terrestres armazenam grandes quantidades de carbono (C) nas plantas e no solo, desempenhando um papel importante na regulação climática global, que sofre rápidas mudanças em função das ações antrópicas, com destaque para a dinâmica do uso da terra (Heimann; Reichstein, 2008; Harris *et al.*, 2021). De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, 2020), a maior parte do carbono florestal é encontrada na biomassa viva (44%) e na matéria orgânica do solo (45%), com o restante na madeira morta e na serrapilheira (Figura 1).

FIGURA 1. Proporção dos estoques de carbono nos compartimentos

Proporção de reservatórios florestais de carbono (2020)



Fonte: Adaptada pelos autores de FAO (2020).

Devido à importância dos ecossistemas na regulação do clima, políticas públicas e práticas sustentáveis baseadas em evidências científicas devem ser almejadas pelas sociedades, governantes e instituições oficialmente constituídas. Dessa forma, a tomada de decisões sobre gestão florestal, em nível regional, nacional e internacional, visando ações de conservação da biodiversidade e manutenção dos serviços florestais, necessita de informações florestais consistentes e atualizadas (Nesha *et al.*, 2022).

Sendo assim, acreditamos que nas regiões tropicais é imprescindível a criação ou reforço das capacidades locais e regionais de copilar, recopilar e analisar dados para gerar e difundir informações, em especial sobre os ativos florestais e sua biodiversidade, a fim de suprir as necessidades e especificidades de diversos públicos.

Considerando os efeitos das mudanças climáticas, os inventários florestais em larga escala tornam-se essenciais para avaliar, desenvolver cenários e contribuir para políticas de adaptação e mitigação dos impactos já instaurados. Nesse sentido, enquanto a biomassa viva aérea total é uma característica florestal de interesse particular, a contribuição do solo fica pouco visibilizada. Os solos florestais e a biomassa lenhosa detêm a maior parte do carbono da biomassa terrestre do planeta Terra (Houghton, 1999).

Mudanças no uso do solo causados pela ação antrópica em ecossistemas terrestres, principalmente nos ecossistemas florestais, como queimadas ou desmatamentos para a agropecuária e a mineração, podem compor de 15 a 40% do valor anual das emissões de GEE.

Tais mudanças no uso do solo exerceram e continuam a exercer grande pressão sobre a Mata Atlântica, formação florestal mais antiga do Brasil. Segundo Paduá (2004), esse bioma foi alvo de várias “culturas esgotadoras”, e há relatos do século XIX de mais de 300 anos de ação humana de negação da generosidade e dos benefícios da natureza brasileira. As marcas desse passado persistem e dificultam os processos de recuperação das áreas degradadas.

O território do estado do Rio de Janeiro é coberto integralmente pela Mata Atlântica, a qual foi estabelecida há cerca de 50 e 70 milhões de anos, quando três fatores passaram a ocorrer paralelamente: i) formação do Oceano Atlântico; ii) formação de sistemas de montanhas na borda atlântica da América do Sul; e iii) aumento da temperatura na Terra (Marques *et al.*, 2016; Leitão-Filho, 1987). Esta evolução garantiu a formação de regiões geomorfológicas distintas e diversos ambientes de formação de solos no diminuto território do estado. Com uma área de 4.378.158 ha, a superfície do estado corresponde a 0,5% do território nacional, e teve seu patrimônio natural dilapidado quase em sua totalidade. Como consequência da ocupação e do uso do solo, a cobertura florestal no território estadual foi gradativamente reduzida, e atualmente tem pouco mais de 15% do original, embora ainda resguarde cerca de 33% de cobertura florestal em diversos estágios sucessionais, com os maiores remanescentes recobrando os maciços serranos (Figura 2).



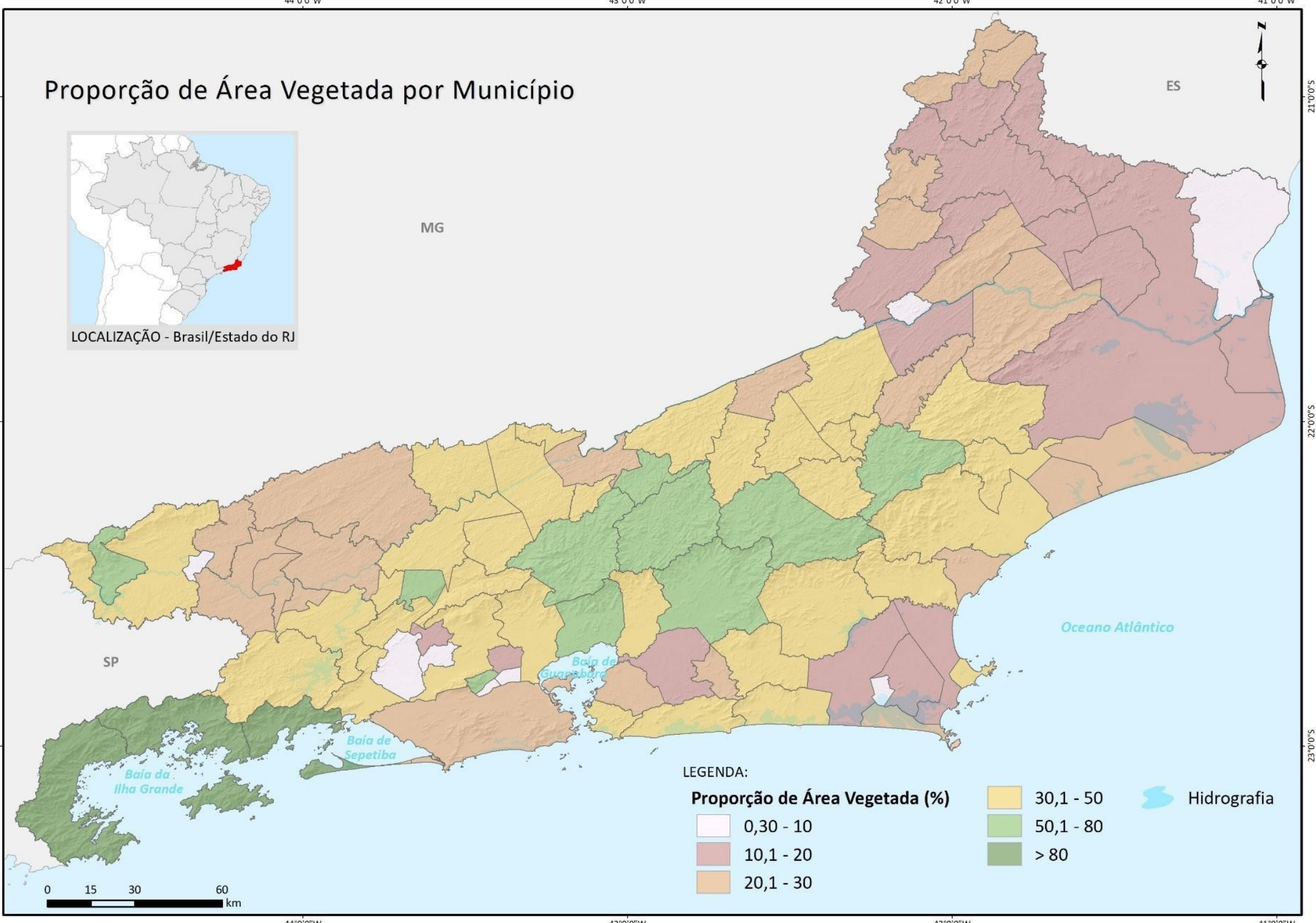
FIGURA 2. Proporção de área vegetada pelo bioma Mata Atlântica nos municípios do estado do Rio de Janeiro
Ano-base 2013, escala de mapeamento 1:25.000.

Fonte: Silveira-Filho (2024).

Proporção de Área Vegetada por Município



LOCALIZAÇÃO - Brasil/Estado do RJ



LEGENDA:

Proporção de Área Vegetada (%)

- 0,30 - 10
- 10,1 - 20
- 20,1 - 30

- 30,1 - 50
- 50,1 - 80
- > 80

Hidrografia

0 15 30 60 km

Este riquíssimo patrimônio natural tem uma diversidade de habitats, desde restingas e manguezais nas planícies costeiras e fluviais, florestas de baixadas, maciços serranos, até os campos de altitude a cerca de 2.790 metros no Pico das Agulhas Negras (Figura 3). Essa ampla variação altitudinal em um território relativamente pequeno, associada à geomorfologia, ao clima e a outros fatores, é responsável por grande diversidade de fauna e flora, reconhecidas como uma das mais ricas do país; o estado é inclusive considerado uma importante região de endemismo da biodiversidade (Silveira-Filho; Rambaldi, 2018).

Abrigando 8% da população brasileira em seus 92 municípios, um total de mais de 16 milhões de habitantes, o Rio de Janeiro é um dos estados mais densamente populosos do país – tem a segunda maior densidade demográfica (365,23 hab/km²) –, com cerca de 90% da população vivendo em ambientes urbanos (IBGE, 2024). Uma das primeiras regiões do país ocupada pelos colonizadores, o Rio de Janeiro é um estado cuja secular atividade humana modificou profundamente sua paisagem, constituída atualmente por um mosaico de áreas naturais e seminaturais cercadas por zonas urbanizadas.

Em seu ambiente rural, o estado do Rio de Janeiro conta com um universo de aproximadamente 65 mil estabelecimentos, sendo que 43.599 (cerca de 66,8%) são propriedades de agricultura familiar (EMATER-RIO, 2024). Sob a perspectiva de módulos fiscais, cerca de 88% dos imóveis rurais estão classificados em até 4 (quatro) módulos, indicando a necessidade premente de um olhar e estratégias que convirjam em ações conservacionistas de manejo do solo.

Os solos apresentam grande variabilidade de características e propriedades em virtude de seu ambiente de formação e das modificações

antrópicas (Figura 4). O solo pode ser conceituado como a cobertura superficial da crosta terrestre, constituída por material mineral e orgânico, com capacidade de armazenar água e ar e de fornecer suporte ao crescimento de plantas e de outros organismos do solo. Como meio de crescimento para as plantas, o solo tem quatro principais funções: i) dar suporte ao crescimento das raízes; ii) armazenar água e suprir as plantas desse elemento; iii) armazenar ar para as raízes das plantas; e iv) fornecer nutrientes para as plantas (Anjos; Pereira, 2013). Ou seja, os solos são responsáveis por sustentar a vida, as florestas e a segurança alimentar, provendo serviços ecossistêmicos múltiplos.

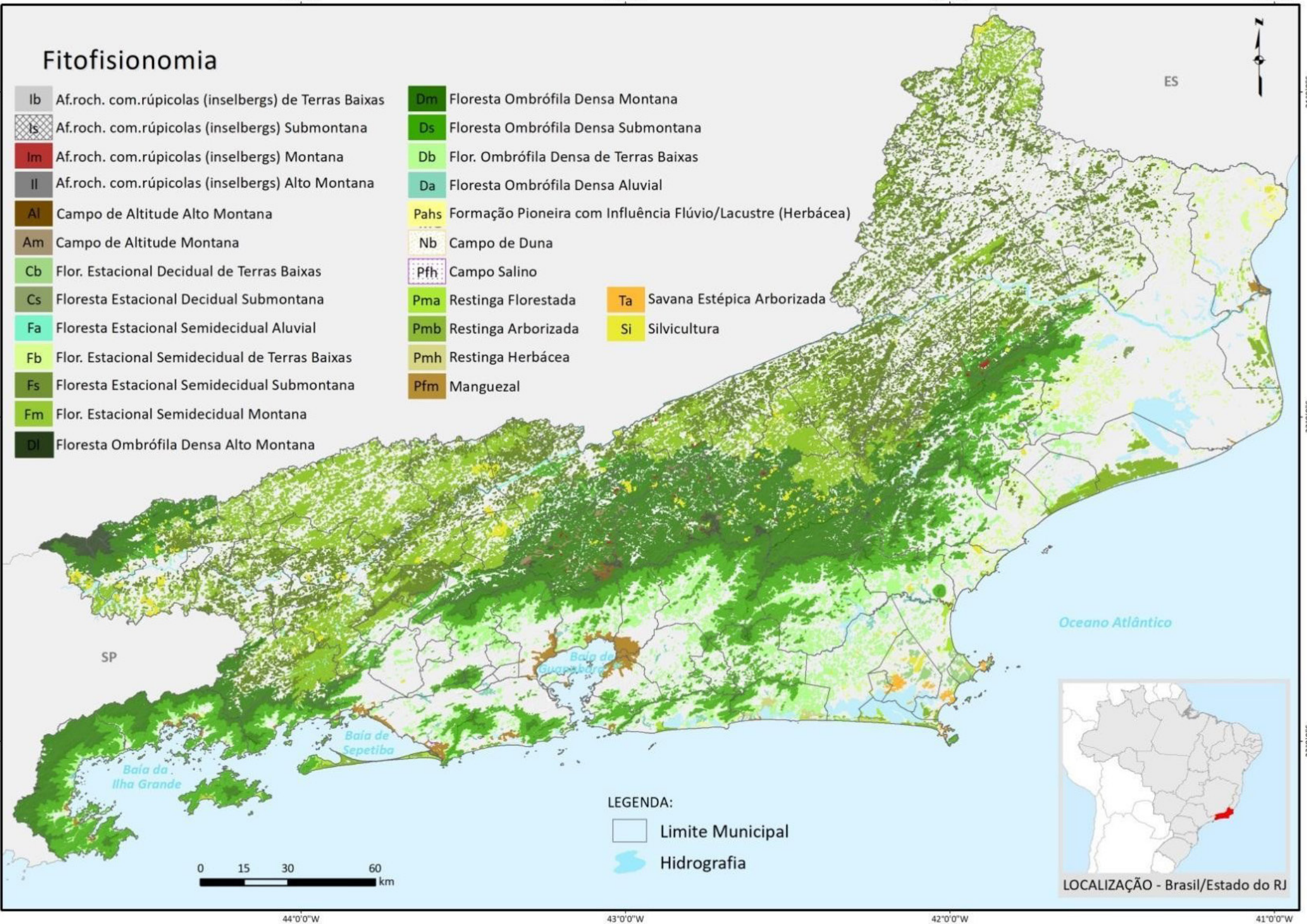


FIGURA 3. Classes de cobertura vegetal no estado do Rio de Janeiro Ano-base 2013, escala de mapeamento 1:25.000.

Fonte: Silveira-Filho (2024).

Fitofisionomia

Ib	Af.roch. com.rúpicolas (inselbergs) de Terras Baixas	Dm	Floresta Ombrófila Densa Montana
Is	Af.roch. com.rúpicolas (inselbergs) Submontana	Ds	Floresta Ombrófila Densa Submontana
Im	Af.roch. com.rúpicolas (inselbergs) Montana	Db	Flor. Ombrófila Densa de Terras Baixas
Il	Af.roch. com.rúpicolas (inselbergs) Alto Montana	Da	Floresta Ombrófila Densa Aluvial
Al	Campo de Altitude Alto Montana	Pahs	Formação Pioneira com Influência Flúvio/Lacustre (Herbácea)
Am	Campo de Altitude Montana	Nb	Campo de Duna
Cb	Flor. Estacional Decidual de Terras Baixas	Pfh	Campo Salino
Cs	Floresta Estacional Decidual Submontana	Pma	Restinga Florestada
Fa	Floresta Estacional Semidecidual Aluvial	Pmb	Restinga Arborizada
Fb	Flor. Estacional Semidecidual de Terras Baixas	Pmh	Restinga Herbácea
Fs	Floresta Estacional Semidecidual Submontana	Pfm	Manguezal
Fm	Flor. Estacional Semidecidual Montana	Ta	Savana Estépica Arborizada
DI	Floresta Ombrófila Densa Alto Montana	Si	Silvicultura



LEGENDA:

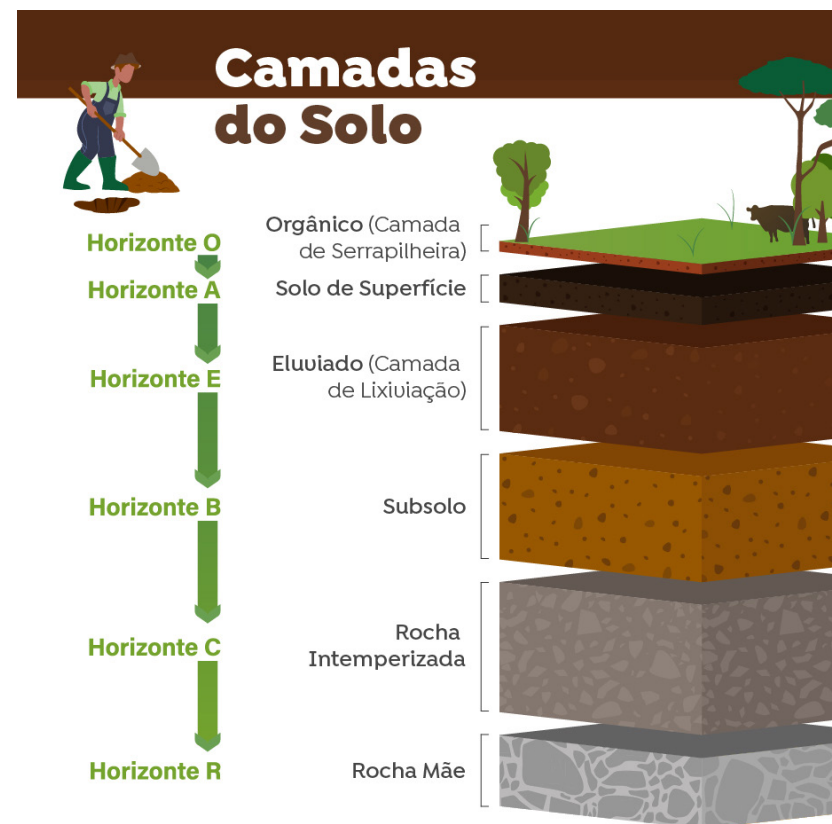
- Limite Municipal
- Hidrografia



Dentre as principais atividades e usos alternativos do solo no ambiente rural do estado do Rio de Janeiro, destacam-se, a partir da importância na economia agropecuária: i) a bovinocultura, presente em 89 municípios, com áreas de pastagem presentes em todos os 92 municípios, ocupando 52% do território estadual; ii) a olericultura, presente em 85 municípios; iii) a criação de pequenos e médios animais, principalmente avicultura de corte, a apicultura (encontrada em 77 municípios) e a avicultura de postura (encontrada em 76 municípios); iv) a fruticultura atividade de maior importância econômica do setor agrícola estadual, especialmente as culturas do abacaxi, citrus e banana; e v) outras culturas seculares como cana-de-açúcar, mandioca, milho e café. Podemos também incluir a cultura de louro (*Laurus nobilis* - *Lauraceae*), espécie nativa da região Sul do Mediterrâneo, e o urucum (*Bixa orellana* – *Bixaceae*), espécie nativa de ampla distribuição no Brasil. Por fim, com menos expressão econômica, mas não menos importante, estão presentes a floricultura, a pesca artesanal, a silvicultura e os cereais (EMATER-RIO, 2024).

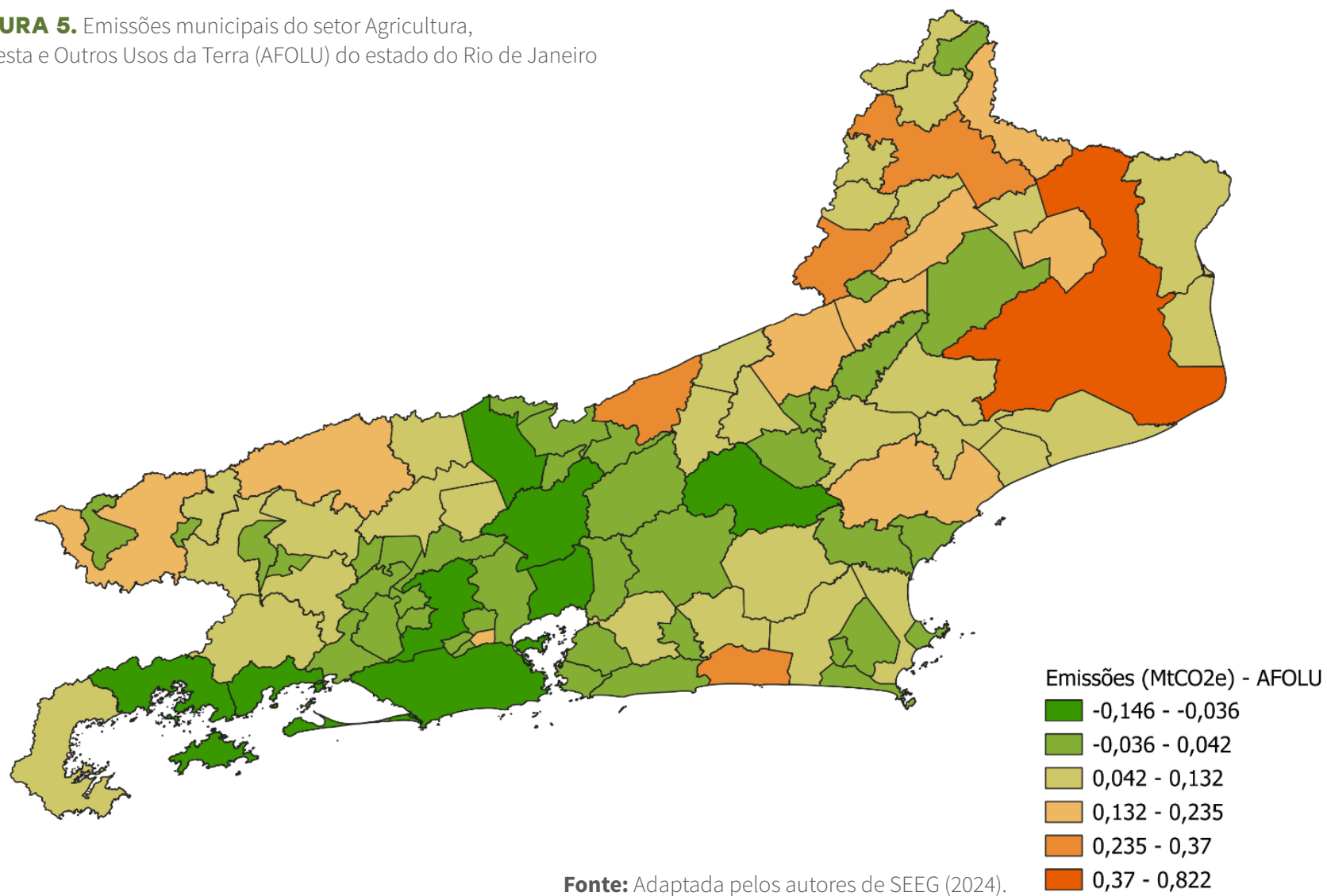
Diante deste cenário, o estado do Rio de Janeiro tem um grande potencial para contribuir na mitigação das emissões de GEE e para fomentar práticas conservacionistas que garantam a segurança hídrica, alimentar e demais serviços ecossistêmicos.

FIGURA 4. Diagrama das camadas do solo



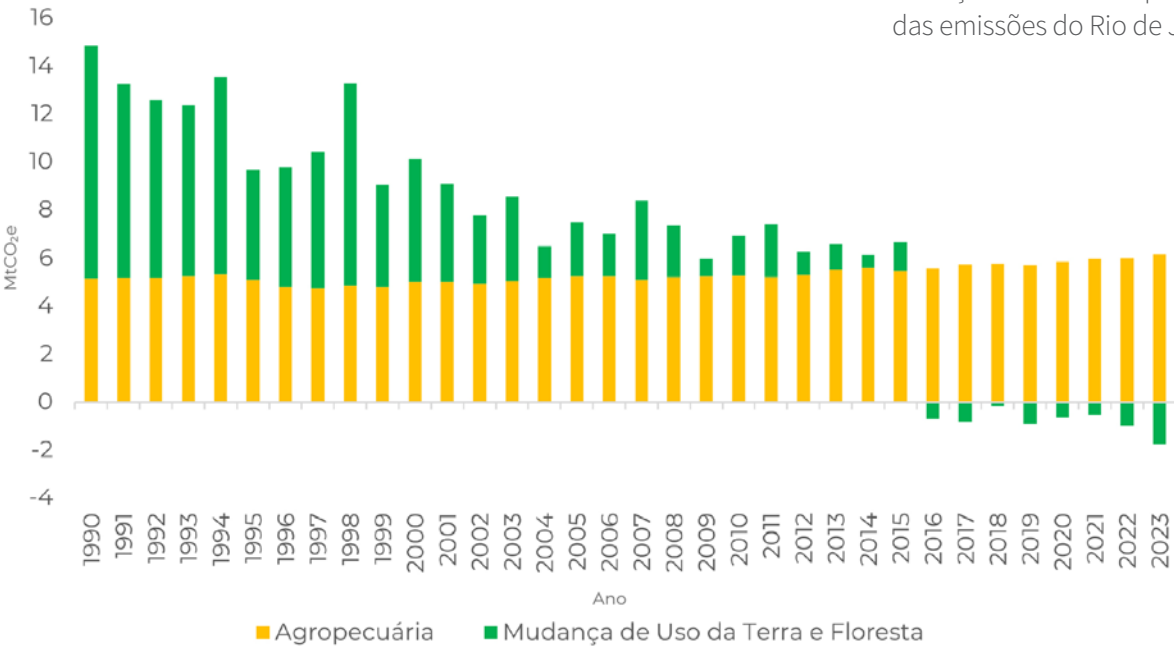
Fonte: Adaptada pelos autores de FAO (2020).

FIGURA 5. Emissões municipais do setor Agricultura, Floresta e Outros Usos da Terra (AFOLU) do estado do Rio de Janeiro



Os municípios e regiões de governo que se destacaram como principais emissores do setor de AFOLU, em 2023, encontram-se no Norte e Noroeste do estado do Rio de Janeiro. Seus municípios apresentam as menores taxas de cobertura de Mata Atlântica, resultante do histórico de mudança do uso e degradação do solo, sendo na maior parte vinculadas às atividades agropecuárias (Figura 5).

FIGURA 6. Série histórica das emissões decorrentes desagregadas para agropecuária e mudanças de uso da terra para o estado do Rio de Janeiro



Diferente do perfil nacional de emissões de GEE, na qual o setor de Agricultura, Floresta e Outros Usos da Terra (em inglês, *Agriculture, Forestry and Other Land Use* – AFOLU), que em 2023 correspondeu a 27,4% (SEEG, 2024) no estado do Rio de Janeiro, no mesmo período, a agropecuária e as Mudanças de Uso da Terra e Floresta (MUT) representaram as menores participações no cenário de emissões do estado, com emissões totais estimadas em 6,17 e -1,75 MtCO₂e, respectivamente (Figura 6). No cenário de emissões líquidas, o setor da Agropecuária representa 9,2% das emissões totais, e as emissões negativas do setor de MUT representam 2,61% das emissões positivas do estado. Ou seja, no cenário atual, a remoção de carbono proveniente do setor já representa 2,61% do total das emissões do Rio de Janeiro (SEEG, 2024).

Fonte: Adaptada pelos autores de SEEG (2024).

Conforme a Figura 6, as emissões do subsetor de Mudanças de Uso da Terra (MUT) tendem a diminuir ao longo dos próximos anos. Isso decorre da redução das emissões provenientes das categorias de desmatamento, outras mudanças de uso da terra e restauração florestal. É possível observar, a partir de análises mais acuradas, o aumento da remoção das emissões promovida pela conservação da vegetação nativa. Diante do panorama de uso do solo e sua relação com as emissões de GEE apresentados até aqui, algumas iniciativas no âmbito da política pública estadual visando o combate ao desmatamento e às queimadas, bem como à criação e gestão de Unidades de Conservação (UCs) e incentivos à restauração florestal, para a redução das emissões de GEE, destacam-se: Programa Olho no Verde, Programa de Apoio à Criação e Gestão de Unidades de Conservação Municipais (PROUC), Programa Estadual de Apoio às Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPNs), Programa Replantando Vidas da CEDAE e Programa Florestas do Amanhã.

Tais contribuições podem ser mais significativas desde que o monitoramento, a avaliação e a contabilidade do carbono nos solos em escala de paisagem sejam aplicados às práticas sustentáveis, como, por exemplo, a Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), além das ações de ampliação da restauração da Mata Atlântica com base na adequação das propriedades rurais.



A manutenção dos solos saudáveis e funcionais contribuem para o objetivo 15 dos ODS da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), que é “Proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres”, com o objetivo de combater a desertificação, a degradação do solo e a perda de biodiversidade, garantindo a gestão sustentável das florestas e ecossistemas de água doce e a conservação das montanhas e zonas áridas.

REFERÊNCIAS

ANJOS, L. H. C.; PREREIRA, M. G. Principais classes de solo do estado do Rio de Janeiro. In: FREIRE, L. R. (coord.). **Manual de calagem e adubação do estado do Rio de Janeiro**. Brasília, DF: Embrapa; Seropédica, RJ: Ed. Universidade Rural, 2013. p. [37]-68.

EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Relatório anual de atividades 2023**. Niterói, RJ: EMATER-RIO, 2024. 166 f.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Global Forest Resources Assessment 2020**: main report. Rome: FAO, 2020. 164 p. DOI: <https://doi.org/10.4060/ca9825en>. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/items/d6f0df61-cb5d-4030-8814-0e466176d9a1>. Acesso em: 01 out. 2025.

HARRIS, N. L. *et al.* Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. **Nature Climate Change**, v. 11, p. 234-240, 21 Jun. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41558-020-00976-6>. Acesso em: 26 set. 2024.

HEIMANN, M.; REICHSTEIN, M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. **Nature**, v. 451, p. 289-292, 16 Jan. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature06591>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature06591>. Acesso em: 26 set. 2024.

HOUGHTON, R. A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990. **Tellus**, v. 51, n. 2, p. 298-313, 1999.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2022. [Rio de Janeiro: IBGE, 2024]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em: 01 fev. 2024.

LEITÃO-FILHO, H. F. Considerações sobre a florística de florestas tropicais e sub-tropicais do Brasil. **IPEF**, n. 35, p. 41-46, abr. 1987.

MARQUES, M. C. M.; SILVA, A. C. L.; RAJÃO, H.; ROSADO, B. H. P.; BARROS, C. F.; OLIVEIRA, J. A.; FINOTTI, R.; NECKEL-OLIVEIRA, S.; AMORIM, A.; CERQUEIRA, R.; BERGALLO, H. G. Mata Atlântica: o desafio de transformar um passado de devastação em um futuro de conhecimento e conservação. In: PEIXOTO, A. L.; LUZ, J. R. P.; BRITO, M. A. (org.). **Conhecendo a biodiversidade**. Brasília: MCTIC: CNPq: PPBio, 2016. p. 51-67.

NESHA, K.; HEROLD, M.; DE SY, V.; BRUIN, S.; ARAZA, A.; MÁLAGA, N.; GAMARRA, J. G. P.; HERGOUALC'CH, K.; PEKKARINEN, A.; RAMIREZ, C.; MORALES-HIDALGO, D.; TAVANI, R. Exploring characteristics of national forest inventories for integration with global space-based forest biomass data. **Science of the Total Environment**, v. 850, 1 Dec. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157788>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722048872>. Acesso em: 26 set. 2024.

SILVEIRA-FILHO, T. B. **Flora, biomassa e carbono da Floresta Atlântica no estado do Rio de Janeiro**: um retrato do primeiro ciclo do Inventário Florestal Nacional (2013-2016). 2024. 202 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

SILVEIRA-FILHO, T. B.; RAMBALDI, D. M. A contribuição do estado do Rio de Janeiro para a conservação de plantas no Brasil. *In*: MARTINELLI, G.; MARTINS, E.; MORAES, M.; LOYOLA, R.; AMARO, R. (org.). **Livro vermelho da flora endêmica do estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: CNCFlora, 2018. p. 20-24.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. Emissões de GEE (2023) Rio de Janeiro/RJ. Piracicaba, SP: SEEG, 2024. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/territorio/rj-rio-de-janeiro> SEEG. Acesso em: 01 out. 2025.

SOBRE OS AUTORES

Telmo Borges Silveira Filho

É Engenheiro Florestal, Mestre em Ciências Ambientais e Florestais pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) e Doutor em Ciências Ambientais e Florestais pela mesma universidade. Possui experiência em gestão florestal e atua como servidor público desde 2006. Superintendente de Mudanças do Clima e Florestas na Subsecretaria de Mudanças do Clima e Conservação da Biodiversidade da Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade do Rio de Janeiro (SEAS). (telmoborges.florestal@gmail.com).

Fabiano de Carvalho Balieiro

É Engenheiro Agrônomo, Mestre em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) e Doutor em Ciência do Solo, pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). É Pesquisador da Embrapa Solos desde 2007 e Professor Permanente do Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambientais e Florestas da UFRRJ (desde 2019). Atua nas áreas de ciclagem de nutrientes e dinâmica da matéria orgânica em florestas naturais e plantadas, e outros agroecossistemas. (fabiano.balieiro@embrapa.br).

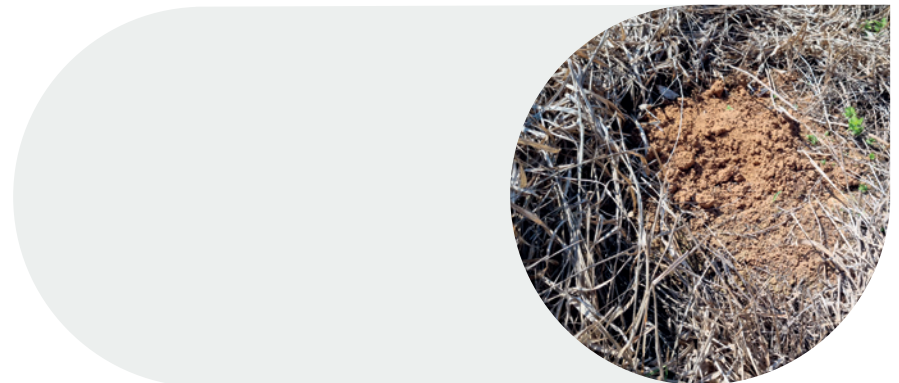
Monise Aguillar Faria Magalhães

É Engenheira Florestal, Mestre em Ciências Ambientais e Florestais pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), com especialização em Unidades de Conservação (UCs). Possui experiência em gestão de projetos ambientais e florestais e políticas públicas. Atua na área há mais de 15 anos. Hoje trabalha para a Superintendência de Mudanças do Clima e Florestas na Subsecretaria de Mudanças do Clima e Conservação da Biodiversidade da Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade do Rio de Janeiro (SEAS). (monise.seas@gmail.com).

CAPÍTULO 2

MAPAS DE ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO PARA O ESTADO DO RIO DE JANEIRO: SUBSÍDIOS PARA OPORTUNIDADES EM MERCADO DE CARBONO

Gustavo M. Vasques, Fabiano C. Balieiro, Telmo B. Silveira Filho, Monise A. F. Magalhães, Ricardo O. Dart, Adinan M. M. Martins, Bárbara C. Andrade, João Pedro N. C. Pedreira, Rachel B. Prado



A mitigação das mudanças climáticas e seus impactos negativos requer múltiplas estratégias complementares. Uma delas consiste em sequestrar carbono no solo e manter o carbono sequestrado a longo prazo. Isso pode ser feito aumentando a matéria orgânica do solo por meio da adoção de práticas conservacionistas de manejo do solo, da restauração de solos e paisagens degradadas, e da intensificação de sistemas agrícolas, para citar algumas. Essas estratégias podem ser combinadas com programas e acordos de compensação de emissões de carbono mediante a venda de créditos de carbono sequestrado pelo solo ou estratégias de pagamento por serviços ambientais.

Para que os programas de compensação de carbono sejam eficazes, é necessário um valor inicial de estoque de carbono do solo, o qual servirá de base para calcular a quantidade de carbono sequestrado no solo após um período de avaliação. Por extensão, as avaliações regionais de estoque de carbono do solo exigem igualmente valores de base regionais desse estoque. Este capítulo objetiva caracterizar a distribuição regional desse recurso natural e mostrar como a heterogeneidade ambiental influencia a sua distribuição espacial. Os mapas subsidiam inventários de carbono e decisões políticas em larga escala, além de servirem como ponto de partida para avaliar o potencial de sequestro de carbono do solo, fomentando programas de compensação de carbono do solo.

Os mapas de estoque de carbono do solo para o estado do Rio de Janeiro foram obtidos em duas camadas, 0-20 e 30-50 cm, com resolução espacial de 30 m (tamanho do *pixel*), o que equivale à escala aproximada de 1:100.000. Os valores de estoque de carbono do solo foram calculados a partir de amostras de solo obtidas pelo Inventário Florestal Nacional do estado do Rio de Janeiro (SFB, 2018), realizado entre 2013 e 2016. Amostras de solo foram coletadas em 188 pontos amostrais distribuídos por todo o

estado em uma grade de aproximadamente 20 x 20 km. Os teores de carbono do solo foram medidos nessas amostras por combustão a seco em um analisador elementar CHNS 2400 (Perkin Elmer, Waltham, EUA).

Os mapas foram gerados por meio do mapeamento digital de solos (McBratney *et al.*, 2003). O método de regressão multivariada utilizado foi floresta randômica quantílica (Meinshausen, 2006), implementado no *software* R (The Comprehensive R Archive Network, 2024), utilizando o pacote *quantregForest* (Meinshausen, 2017). Modelos de predição do estoque de carbono do solo foram derivados para as duas camadas (0-20 e 30-50 cm), utilizando os valores de estoque de carbono do solo obtidos em campo como variável-alvo e um conjunto de covariáveis geoespaciais, em formato *raster*, como variáveis preditoras. Os mapas de estoque de carbono do solo foram produzidos aplicando-se os modelos de predição gerados para toda a extensão do estado do Rio de Janeiro.

As covariáveis geoespaciais representam fatores de formação do solo, os quais podem explicar a distribuição espacial do estoque de carbono do solo no estado do Rio de Janeiro. Elas foram obtidas de fontes públicas e são apresentadas a seguir:

- Solo: ordem e subordem taxonômicas do solo (Carvalho Filho *et al.*, 2003);
- Clima (1981-2010): temperatura média anual e médias mensais de precipitação, evaporação, evapotranspiração potencial e número de horas ensolaradas (INMET, 2025);
- Uso e cobertura da terra: uso e cobertura da terra de 2016 (Projeto MapBiomas, 2023), bandas (verde, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas) e índices derivados (índice de vegetação por

diferença normalizada e índice de óxidos de ferro) do sensor Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) (Eros, 2023);

- Relevo: altitude (IBGE, 2023), posição na encosta, área de contribuição modificada, índice multirresolução de planicidade de vale, altura normalizada, índice de umidade do SAGA, altura da encosta, altura padronizada, área de superfície, profundidade do vale e medida vetorial de rugosidade; e
- Material de origem: era geológica e litologia (Heilbron *et al.*, 2016).

As covariáveis geoespaciais foram processadas no R, ArcGIS (ESRI, Redlands, EUA) e SAGA GIS (Conrad *et al.*, 2015). As variáveis climáticas foram interpoladas por krigagem ordinária a partir de 54 estações climáticas localizadas a uma distância de até 100 km da fronteira do estado. O modelo digital de elevação (*raster* de altitude) foi gerado a

partir de um mapa altimétrico na escala 1:25.000 (IBGE, 2023), usando o algoritmo ANUDEM (Hutchinson, 2011) a partir da ferramenta *Topo to Raster* no ArcGIS, e usado como mapa de entrada para gerar todas as covariáveis de relevo no SAGA GIS. Os *rasters* de solo e material de origem foram gerados, primeiro, reduzindo o número de categorias de cada variável e, em seguida, convertendo os *shapefiles* para *raster*. A projeção geográfica usada foi a cônica conforme de Lambert e a resolução espacial (tamanho do *pixel*) foi de 30 m.

Os estoques de carbono do solo no estado do Rio de Janeiro somam, aproximadamente, 189 milhões de toneladas (189 Tg; 1 Tg = 10^{12} g) a 0-20 cm e 119 milhões de toneladas (119 Tg) a 30-50 cm. Os valores mínimo, máximo e médio do estoque de carbono do solo são 9,1, 44,5 e 96,7 Mg ha⁻¹ a 0-20 cm e 7,0, 28,0 e 63,8 Mg ha⁻¹ a 30-50 cm (Figuras 1 e 2).

FIGURA 1. Estoque de carbono do solo de 0 a 20 cm no estado do Rio de Janeiro

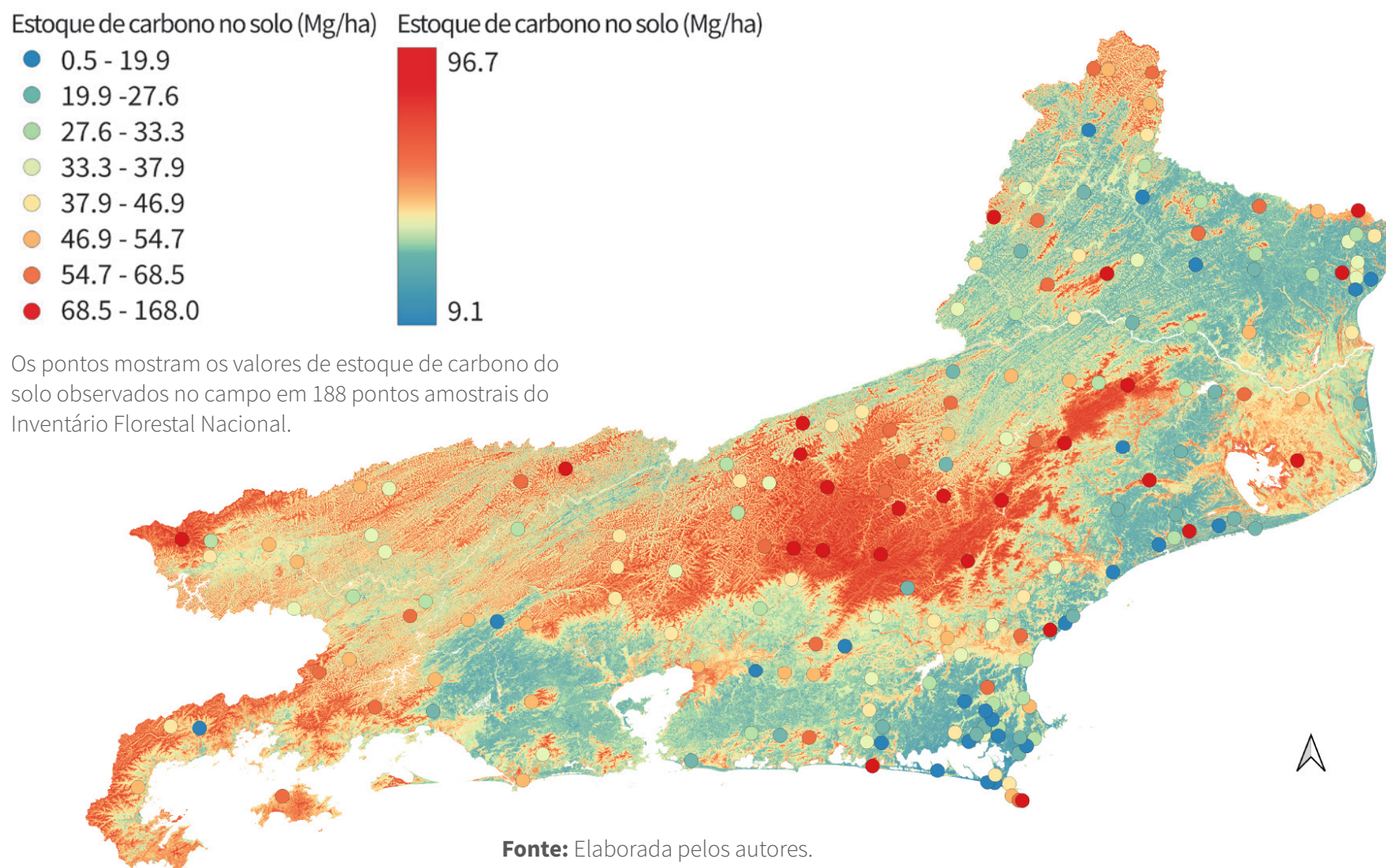
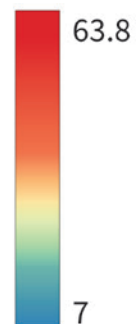


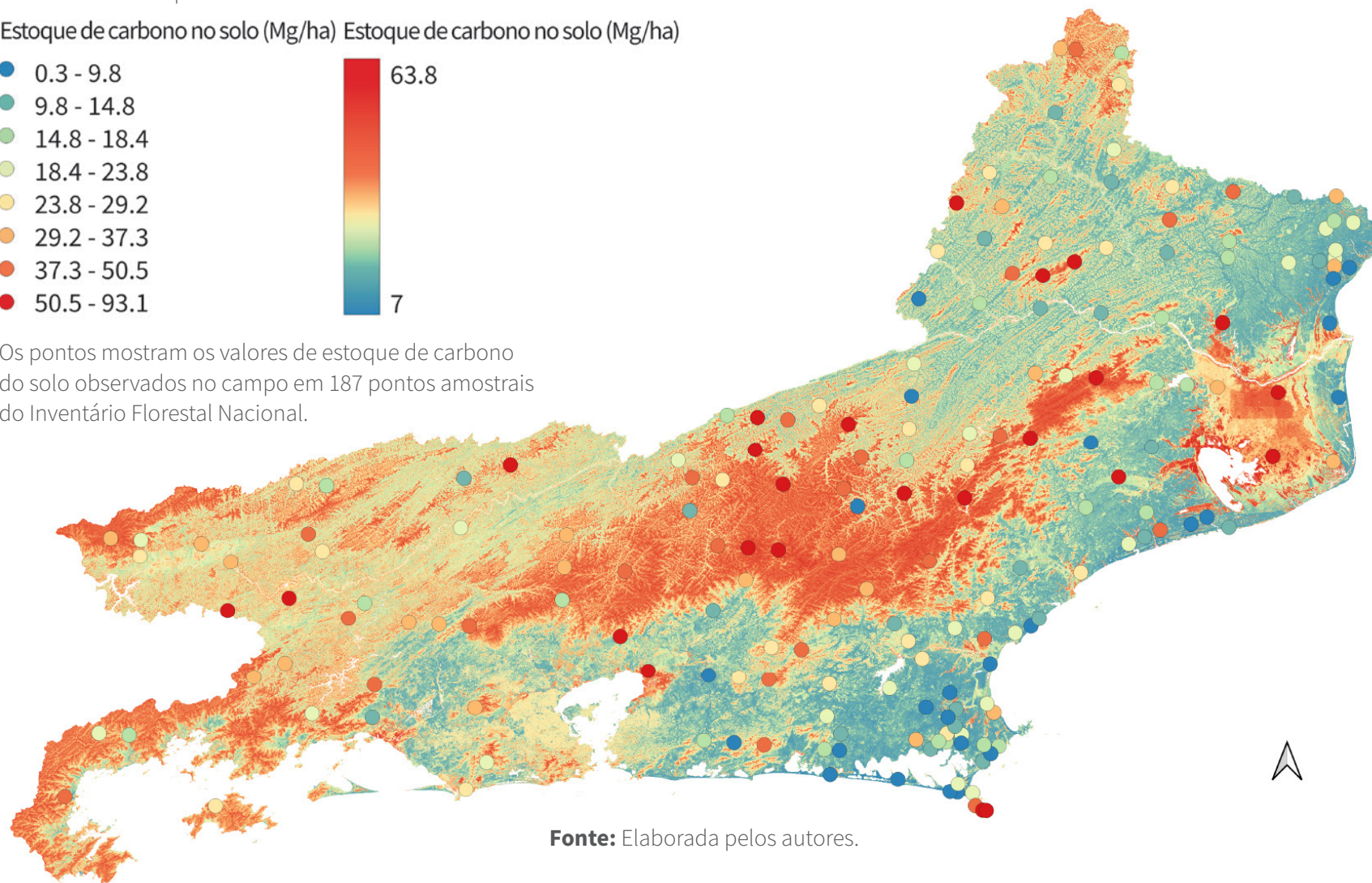
FIGURA 2. Estoque de carbono do solo de 30 a 50 cm no estado do Rio de Janeiro

Estoque de carbono no solo (Mg/ha) Estoque de carbono no solo (Mg/ha)

- 0.3 - 9.8
- 9.8 - 14.8
- 14.8 - 18.4
- 18.4 - 23.8
- 23.8 - 29.2
- 29.2 - 37.3
- 37.3 - 50.5
- 50.5 - 93.1



Os pontos mostram os valores de estoque de carbono do solo observados no campo em 187 pontos amostrais do Inventário Florestal Nacional.

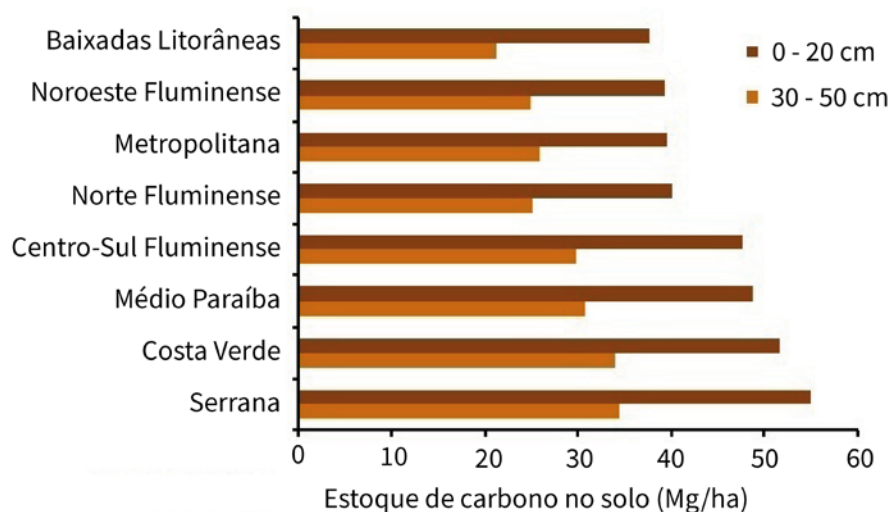


Fonte: Elaborada pelos autores.

Os mapas de estoque de carbono do solo gerados mostram valores mais altos em regiões montanhosas e de elevadas altitudes do estado, como nas Serras do Mar (nas Regiões Serrana e Costa Verde) e da Mantiqueira (na Região do Médio Paraíba), bem como nos manguezais próximos à costa, principalmente no delta do Rio Paraíba do Sul, na divisa leste do estado, na Região Norte Fluminense (Figuras 1 e 2 e Gráfico 1). Baixos estoques são encontrados nas planícies costeiras (Região das Baixadas Litorâneas), na porção sudeste do estado, no norte-nordeste do estado (Região Noroeste Fluminense) e na Região Metropolitana, ao redor da Baía de Guanabara.

Em altitudes elevadas, a temperatura mais baixa favorece o acúmulo de carbono no solo devido à atividade biológica mais lenta. Além disso, existem muitas áreas protegidas em altitudes elevadas, com vegetação e solos preservados, incluindo solos profundos, como Latossolos (Ferralsols), Argissolos (Luvisols, Acrisols) e Cambissolos (Cambisols). Esses locais apresentam alta produtividade primária, contribuindo com grande quantidade de resíduos para o solo, que se acumulam e se estabilizam como matéria orgânica ao longo do tempo, aumentando o estoque de carbono no solo (Gráfico 1).

GRÁFICO 1. Estoque de carbono do solo médio a 0-20 e 30-50 cm nas mesorregiões do estado do Rio de Janeiro



Fonte: Elaborado pelos autores.

Em manguezais e outros ecossistemas inundáveis semelhantes, onde predominam Organossolos (Histosols) e Gleissolos (Gleysols), os resíduos vegetais são decompostos muito lentamente devido à falta de oxigênio. Assim como as florestas nas regiões de elevada altitude, essas áreas geralmente são protegidas, o que evita a degradação do solo e a perda de carbono. Esses fatores combinados favorecem o acúmulo de matéria orgânica no solo, e explicam os altos estoques de carbono no solo encontrados nesses locais.

Por outro lado, quando florestas são convertidas em pastagens ou áreas agrícolas, o carbono do solo é perdido ao longo do tempo, em maior ou menor grau, dependendo do manejo e da conservação do solo, os quais variam regionalmente de acordo com o tipo de solo, da paisagem e de fatores socioeconômicos. Isso explica os baixos estoques de carbono do solo encontrados nas planícies mais baixas do estado do Rio de Janeiro, visto que essas regiões são ocupadas principalmente por pastagens, agricultura e áreas antropizadas (Projeto MapBiomass, 2023). Alternativas para melhorar os estoques de carbono do solo nessas áreas são discutidas no Capítulo 4 (*Cenários do Armazenamento de Carbono no Solo a partir da Mudança de Uso, Cobertura e Manejo da Terra no estado do Rio de Janeiro*).

Os mapas de estoque de carbono do solo refletem os padrões espaciais das covariáveis geoespaciais usadas para a sua produção. O método de floresta randômica quantílica permite combinar múltiplas variáveis contínuas e categóricas harmoniosamente para explicar a variação espacial do estoque de carbono do solo em todo o estado. Ele lida com relações multifatoriais complexas e não-lineares, tanto entre as covariáveis e os estoques de carbono do solo quanto entre as próprias covariáveis. Assim, permite capturar padrões gerais de

estoque de carbono do solo em todo o estado, bem como padrões locais, produzindo mapas que mostram tendências consistentes tanto em nível estadual quanto local. As covariáveis geoespaciais mais importantes para prever os estoques de carbono do solo foram:

- A 0-20 cm: altitude, precipitação, altura padronizada, índice de umidade do SAGA e uso e cobertura da terra; e
- A 30-50 cm: altura padronizada, altitude, banda verde do sensor Landsat 8 OLI, índice multirresolução de planicidade de vale e índice de umidade do SAGA.

Os mapas de estoque de carbono do solo nas camadas 0-20 e 30-50 cm para o Rio de Janeiro fornecem uma primeira visão da distribuição espacial dos estoques de carbono do solo em todo o estado, mostrando seus padrões espaciais globais e locais, os quais podem ser relacionados e interpretados à luz da dinâmica de uso e cobertura da terra, bem como dos padrões ambientais que controlam ou afetam o carbono do solo. Os mapas retratam os estoques de carbono do solo de 2013 a 2016 e refletem os valores observados no Inventário Florestal Nacional durante esses anos. A segunda edição do Inventário Florestal Nacional do Rio de Janeiro está em andamento e seguirá os mesmos protocolos de amostragem e analíticos utilizados no primeiro inventário, o que representa uma excelente oportunidade para calcular as mudanças do carbono do solo no estado ao longo da década.

REFERÊNCIAS

CARVALHO FILHO, A.; LUMBERAS, J. F.; WITTERN, K. P.; LEMOS, A. L.; SANTOS, R. D.; CALDERANO FILHO, B.; CALDERANO, S. B.; OLIVEIRA, R. P.; AGLIO, M. L. D.; SOUZA, J. S.; CHAFFIN, C. E. Mapa de reconhecimento de baixa intensidade dos solos do estado do Rio de Janeiro (RJ) [CNPS]. *In*: GEOINFO. Brasília, DF: EMBRAPA, 2003. Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/dataset/1680>. Acesso em: 01 set. 2025.

CONRAD, O.; BECHTEL, B.; BOCK, M.; DIETRICH, H.; FISCHER, E.; GERLITZ, L.; WEHBERG, J.; WICHMANN, V.; BÖHNER, J. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4. **Geoscientific model development**, v. 8, n. 7, p. 1991-2007, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>. Disponível em: <https://gmd.copernicus.org/articles/8/1991/2015/>. Acesso em: 01 set. 2025.

GEOLOGICAL SURVEY (Estados Unidos). USGS EROS Archive - Landsat Archives - Landsat 8-9 OLI/TIRS Collection 2 Level-2 Science Products. *In*: USGS SCIENCE FOR A CHANGING WORLD. U. S. Geological Survey. [Washington, D. C.: United States Geological Survey], 2020. DOI: <https://doi.org/10.5066/P90-GBGM6>. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-8-9-olitirs-collection-2-level-2>. Acesso em: 01 set. 2025.

HEILBRON, M.; EIRADO, L. G.; ALMEIDA, J. Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Rio de Janeiro. *In*: RIGEO. Repositório Institucional de Geociências. Rio de Janeiro: CPRM, 2016. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/18458>. Acesso em: 01 set. 2025.

HUTCHINSON, M. F. **Anudem version 5.3**: user guide. Canberra: Australian National University, 2011. Disponível em: https://fennergchool.anu.edu.au/files/usedem53_pdf_16552.pdf. Acesso em: 01 set. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Base cartográfica contínua do estado do Rio de Janeiro, escala 1:25.000, versão 2018, na ET-EDGV 3.0**: nota técnica 01/2023. [Rio de Janeiro]: IBGE, 2023. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/bases_cartograficas_continuas/bc25/rj/versao2018_edgv_3.0/informacoes_tecnicas/NT01_2023_BC_RJ_20230623.pdf. Acesso em: 01 set. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (Brasil). **Normais climatológicas do Brasil**: Período: 1981-2010. Brasília, DF: INMET, 2025. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 01 set. 2025.

MAPBIOMAS. **Coleção 7.1 da série anual de mapas de cobertura e uso da terra do Brasil**. [São Paulo, SP]: MapBiomass, 2023. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas>. Acesso em: 01 set. 2025.

MCBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v. 117, n. 1-2, p. 3-52, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706103002234>. Acesso em: 01 set. 2025.

MEINSHAUSEN, N. Quantile regression forests. **Journal of Machine Learning Research**, v. 7, n. 35, p. 983-999, 2006. Disponível em: <https://jmlr.org/papers/v7/meinshausen06a.html>. Acesso em: 01 set. 2025.

MEINSHAUSEN, N. QuantregForest: quantile regression forests. Versão 1.3-7.1. In: THE COMPREHENSIVE R ARCHIVE NETWORK. [Viena, Áustria]: CRAN, 2017. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=quantregForest>. Acesso em: 01 set. 2025.

THE R PROJECT FOR STATISTICAL COMPUTING. **R**: A language and environment for statistical computing: reference index. [Viena, Áustria]: CRAN, 2024. Disponível em: <https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/fullrefman.pdf>. Acesso em: 01 set. 2025.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Inventário Florestal Nacional**: Rio de Janeiro: principais resultados. Brasília, DF: MMA, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/florestal/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/relatorios/relatorios-ifn/IFNRJprincipaisresultados.pdf>. Acesso em: 01 set. 2025.

SOBRE OS AUTORES

Gustavo de Mattos Vasques

É Engenheiro Florestal pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) e Doutor em Ciência do Solo pela Universidade da Flórida (UF). Possui experiência em ciência de dados, geofísica e geotecnologias aplicadas à ciência do solo. É Pesquisador da Embrapa Solos desde 2011. (gustavo.vasques@embrapa.br).

Fabiano de Carvalho Balieiro

É Engenheiro Agrônomo, Mestre em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) e Doutor em Ciência do Solo, pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). É Pesquisador da Embrapa Solos desde 2007 e Professor Permanente do Programa de Pós-

Graduação em Ciência Ambientais e Florestas da UFRRJ (desde 2019). Atua nas áreas de ciclagem de nutrientes e dinâmica da matéria orgânica em florestas naturais e plantadas, e outros agroecossistemas. (fabiano.balieiro@embrapa.br).

Telmo Borges Silveira Filho

É Engenheiro Florestal, Mestre em Ciências Ambientais e Florestais pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) e Doutor em Ciências Ambientais e Florestais pela mesma universidade. Possui experiência em gestão florestal e atua como servidor público desde 2006. Superintendente de Mudanças do Clima e Florestas na Subsecretaria de Mudanças do Clima e Conservação da Biodiversidade da Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade do Rio de Janeiro (SEAS). (telmoborges.florestal@gmail.com).

Monise Aguillar Faria Magalhães

É Engenheira Florestal, Mestre em Ciências Ambientais e Florestais pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), com especialização em Unidades de Conservação (UCs). Possui experiência em gestão de projetos ambientais e florestais e políticas públicas. Atua na área há mais de 15 anos. Hoje trabalha para a Superintendência de Mudanças do Clima e Florestas na Subsecretaria de Mudanças do Clima e Conservação da Biodiversidade da Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade do Rio de Janeiro (SEAS). (monise.seas@gmail.com).

Ricardo de Oliveira Dart

É Geógrafo pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC/RJ) e Mestre em Geografia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Possui experiência em geoprocessamento e trabalha como Analista da Embrapa Solos desde 2009. (ricardo.dart@embrapa.br).

Adinan Marzulo Maia Martins

É bacharel em Ciências Matemáticas e da Terra pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e mestre e doutorando em Geografia pela mesma instituição. Tem experiência em geoprocessamento e sensoriamento remoto. Desde 2023, é pesquisador e colaborador em projetos da Embrapa Solos/FAPED. (adinanmaia@gmail.com).

Bárbara Coelho de Andrade

É Geóloga pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) e Mestranda em Ciências Ambientais e Florestais pela mesma instituição. Possui experiência em geoprocessamento, análise e interpretação de dados ambientais. (barbaraumcoelho@gmail.com).

João Pedro das Neves Cardoso Pedreira

É bacharel em Ciências Matemáticas e da Terra pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e mestrando em Geografia na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Possui experiência em geoprocessamento e produção de indicadores ambientais. É pesquisador colaborador na Embrapa Solos/FINEP desde 2023. (neves.jope@gmail.com).

Rachel Bardy Prado

É Doutora em ciências da engenharia ambiental, é pesquisadora da Embrapa há 22 anos. Possui experiência em projetos nacionais e internacionais, atuando nas temáticas de sustentabilidade de paisagens rurais, manejo de bacias hidrográficas, serviços ecossistêmicos e políticas correlatas. (rachel.prado@embrapa.br).

**CÓDIGO QR PARA ACESSAR E BAIXAR
O MAPA DE ESTOQUE DE CARBONO DO
SOLO A 0-20 CM DO RIO DE JANEIRO NA
PLATAFORMA GEOINFO DA EMBRAPA**



**CÓDIGO QR PARA ACESSAR E BAIXAR
O MAPA DE ESTOQUE DE CARBONO DO
SOLO A 30-50 CM DO RIO DE JANEIRO NA
PLATAFORMA GEOINFO DA EMBRAPA**



CAPÍTULO 3

BIBLIOTECA ESPECTRAL E QUANTIFICAÇÃO DO TEOR DE CARBONO DO SOLO PARA O ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Gustavo M. Vasques, Levi B. Luz, Fabiano C. Balieiro, Monise A. F. Magalhães,
Telmo B. Silveira Filho, Tatiane Mesquita Araújo, Marcelo T. Andrade



O Inventário Florestal Nacional (IFN) é um programa fundamental para monitorar os recursos florestais do país, pois fornece dados que subsidiam políticas públicas no cumprimento de compromissos climáticos internacionais. Um componente fundamental do funcionamento e dinâmica das florestas é o carbono do solo. Para apoiar o IFN, o desenvolvimento de Bibliotecas Espectrais de Solo (BES), junto com modelos baseados em espectroscopia, permite estimar o conteúdo de carbono do solo de forma rápida e econômica, possibilitando calcular estoques de carbono e sua mudança ao longo do tempo.

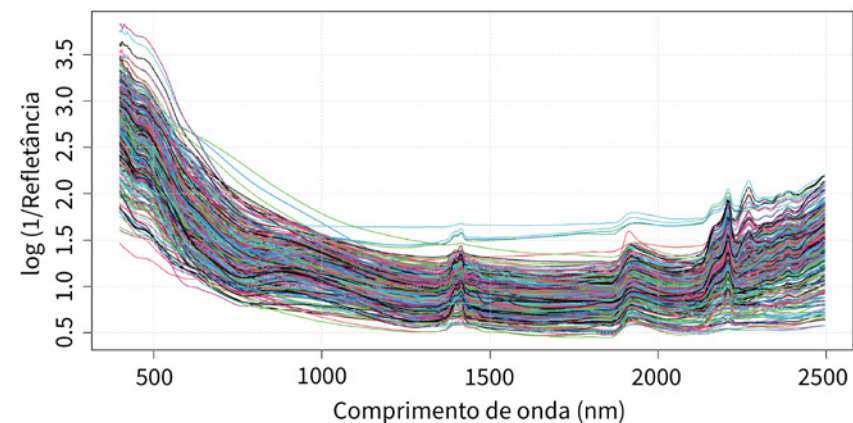
Com esse objetivo, uma BES na faixa do visível-infravermelho próximo (Vis-NIR) foi construída para o estado do Rio de Janeiro, e um modelo, a partir de espectroscopia Vis-NIR, foi produzido para estimar os teores de carbono em amostras de solo do IFN em todo o estado. A espectroscopia de Vis-NIR é uma abordagem não-destrutiva, rápida, barata e precisa, e tem sido usada para estimar diversas propriedades do solo, incluindo o carbono (Viscarra Rossel *et al.*, 2006; Demattê *et al.*, 2019).

Para produzir a BES, foram usadas amostras de solo das profundidades de 0-20 e 30-50 cm, obtidas do IFN do estado do Rio de Janeiro (SFB, 2018), realizado entre 2013 e 2016, utilizando uma amostragem sistemática em grade de 20 x 20 km, com um total de 251 sítios amostrais. No estudo, foram utilizadas um total de 355 amostras (174 na profundidade de 0-20 cm e 181 na profundidade de 30-50 cm). As amostras de solo do IFN foram moídas, peneiradas (2 mm) e secas à temperatura ambiente. Em seguida, o teor de carbono do solo foi medido por combustão a seco em um analisador elementar CHNS 2400 (Perkin Elmer, Waltham, EUA).

Curvas espectrais do solo na faixa do Vis-NIR (350-2500 nm) foram obtidas em laboratório utilizando um espectrorradiômetro ASD FieldSpec 4 (Mal-

vern Panalytical, Malvern, Reino Unido), com média de 100 repetições por amostra, e Spectralon® (Labsphere, North Sutton, EUA) como referência branca. Antes da leitura, as amostras foram secas a 45 °C durante a noite para harmonizar a umidade do solo. Após a leitura, as curvas espectrais do solo foram transformadas para $\log(1/\text{refletância})$ (Figura 1).

FIGURA 1. Curvas espectrais do solo na faixa do visível-infravermelho transformadas para $\log(1/\text{refletância})$



Fonte: Elaborada pelos autores.

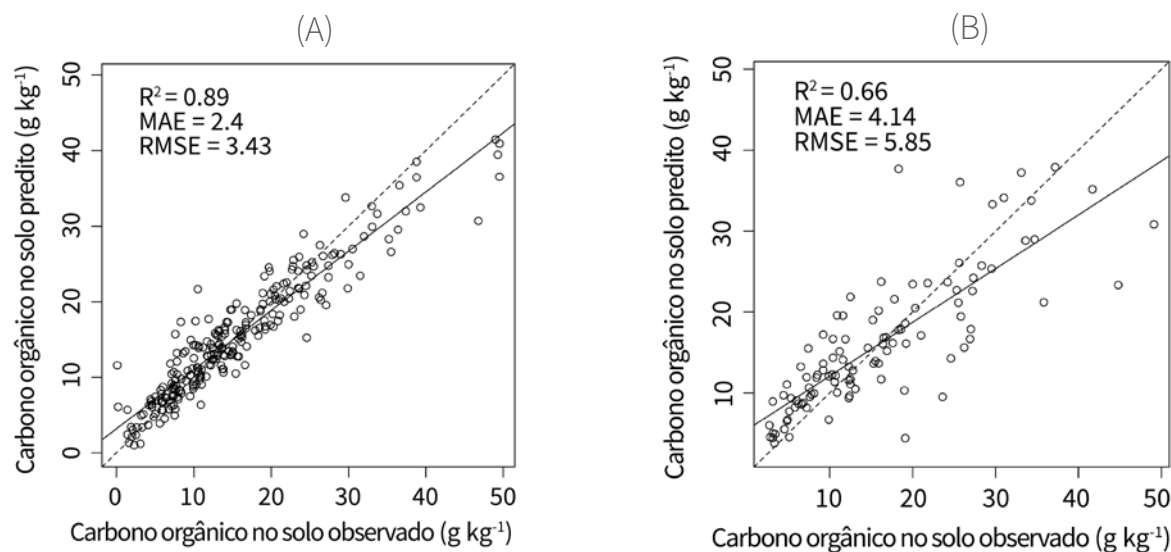
O modelo de predição do teor de carbono do solo foi construído a partir das curvas espectrais no Vis-NIR utilizando o método Cubist (Quinlan, 1993) por meio do pacote Cubist (Kuhn; Quinlan, 2024) no R (The Comprehensive R Archive Network, 2024). O Cubist é um método multivariado que combina modelagem baseada em árvore de decisão para dividir o conjunto de dados em subconjuntos homogêneos e regressão linear múltipla em cada subconjunto para, ao final, estimar a

variável-alvo. Este método tem sido utilizado com sucesso para estimar o carbono do solo em outras regiões do Brasil (Demattê *et al.*, 2019; Moura-Bueno *et al.*, 2021).

Antes da modelagem, as amostras foram divididas aleatoriamente em um conjunto de treinamento (248 amostras ~70%) e um conjunto de teste (107 amostras ~30%). As amostras de treinamento foram usadas exclusivamente para calibrar o modelo Cubist, enquanto o conjunto de teste serviu para validar as previsões de carbono do solo do modelo. Um comitê contendo cinco modelos Cubist foi usado para melhorar a acurácia das previsões.

Os teores de carbono do solo no IFN do Rio de Janeiro variam de 0,1 a 49,5 g kg⁻¹, com média, mediana e desvio padrão de 15,5, 13,2 e 9,9 g kg⁻¹, respectivamente. Os teores de carbono do solo preditos pelo modelo Cubist variam de 1,0 a 41,4 g kg⁻¹, com média, mediana e desvio padrão de 15,5, 14,1 e 8,2 g kg⁻¹, respectivamente. Os teores de carbono do solo observados e preditos foram altamente correlacionados, tanto no treinamento do modelo, com um R² de 0,89 e erro quadrático médio (RMSE) de 3,4 g kg⁻¹ (Figura 2A), quanto na validação, com um R² de 0,66 e RMSE de 4,1 g kg⁻¹ (Figura 2B).

FIGURA 2. Valores preditos versus observados do teor de carbono do solo nos conjuntos de: (A) treinamento do modelo; (B) validação externa



Onde: R² = Coeficiente de determinação;
MAE = Erro absoluto médio;
RMSE = Erro quadrático médio.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os modelos Cubist obtiveram predições do teor de carbono do solo com acurácia semelhante ou superior à de estudos anteriores em outras regiões (Moura-Bueno *et al.*, 2021) ou em todo o país (Demattê *et al.*, 2019). Regionalmente, Moura-Bueno *et al.* (2021) obtiveram RMSE de 5,3 a 6,6 g kg⁻¹ para a predição do carbono do solo a partir de dados Vis-NIR isoladamente ou combinados com classes espectrais ou covariáveis ambientais, enquanto Demattê *et al.* (2019) obtiveram um RMSE um pouco maior, de 6,9 g kg⁻¹.

Os modelos baseados em espectroscopia Vis-NIR para predição do teor de carbono do solo a 0-20 e 30-50 cm para o estado do Rio de Janeiro permitem avaliar os teores, estoques e mudanças de carbono do solo, apoiando as futuras campanhas do IFN em todo o estado. Outros projetos relacionados ao solo podem se beneficiar do modelo produzido por esse trabalho para agilizar a análise do solo. Dessa forma, modelos de predição baseados em BES e espectroscopia Vis-NIR podem ser adaptados para outras propriedades do solo, bem ajustados para outros estados e regiões do Brasil.

REFERÊNCIAS

DEMATTÊ, J. A. M. *et al.* The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): a general view, application and challenges. **Geoderma**, v. 354, p. 113793, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.043>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706118318548>. Acesso em: 01 set. 2025.

KUHN, M.; WESTON, S.; KEEFER, C.; COULTER, N.; QUINLAN, R. Cubist: rule- and instance-based regression modeling. Versão 0.5.0. *In*: THE COMPREHENSIVE R ARCHIVE NETWORK. [Viena, Áustria]: CRAN, 2024. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=quantregForest>. Acesso em: 01 set. 2025.

MOURA-BUENO, J. M.; DALMOLIN, R. S. D.; HORST-HEINEN, T. Z.; GRUNWALD, S.; TEN CATEN, A. Environmental covariates improve the spectral predictions of organic carbon in subtropical soils in southern Brazil. **Geoderma**, v. 393, p. 114981, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114981>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706121000550>. Acesso em: 01 set. 2025.

QUINLAN, J. S. Combining instance-based and model-based learning. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINE LEARNING, 10., 1993, Amherst. **Proceedings** [...]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114981>. Amherst: ACM, 1993. p. 236-243. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.5555/3091529.3091560>. Acesso em: 01 set. 2025.

THE R PROJECT FOR STATISTICAL COMPUTING. **R**: A language and environment for statistical computing; reference index. [Viena, Áustria]: CRAN, 2024. Disponível em: <https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/fullrefman.pdf>. Acesso em: 01 set. 2025.

ROSSEL, R. A. V.; WALVOORT, D. J. J.; MCBRATNEY, A. B.; JANIK, L. J.; SK-JEMSTAD, J. O. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**, v. 131, n. 1-2, p. 59-75, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706105000728>. Acesso em: 01 set. 2025.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Inventário Florestal Nacional**: Rio de Janeiro: principais resultados. Brasília, DF: MMA, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/florestal/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/relatorios/relatorios-ifn/IFNRJprincipaisresultados.pdf>. Acesso em: 01 set. 2025.

SOBRE OS AUTORES

Gustavo de Mattos Vasques

É Engenheiro Florestal pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) e Doutor em Ciência do Solo pela Universidade da Flórida (UF). Possui experiência em ciência de dados, geofísica e geotecnologias aplicadas à ciência do solo. Pesquisador da Embrapa Solos desde 2011. (gustavo.vasques@embrapa.br).

Levi Barreto da Luz

É graduando em Química Industrial pela Universidade Federal Fluminense (UFF). Atuou como colaborador na Embrapa Solos entre 2023 e 2025. (leviluz2000@gmail.com).

Fabiano de Carvalho Balieiro

É Engenheiro Agrônomo, Mestre em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) e Doutor em Ciência do Solo, pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). É Pesquisador da Embrapa Solos desde 2007 e Professor Permanente do Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambientais e Florestas da UFRRJ (desde 2019). Atua nas áreas de ciclagem de nutrientes e dinâmica da matéria orgânica em florestas naturais e plantadas, e outros agroecossistemas. (fabiano.balieiro@embrapa.br).

Monise Aguillar Faria Magalhães

É Engenheira Florestal, Mestre em Ciências Ambientais e Florestais pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), com especialização em Unidades de Conservação (UCs). Possui experiência em gestão de projetos ambientais e florestais e políticas públicas. Atua na área há mais de 15 anos. Hoje trabalha para a Superintendência de Mudanças do Clima e Florestas na Subsecretaria de Mudanças do Clima e Conser-

vação da Biodiversidade da Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade do Rio de Janeiro (SEAS). (monise.seas@gmail.com).

Telmo Borges Silveira Filho

É Engenheiro Florestal, Mestre em Ciências Ambientais e Florestais pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) e Doutor em Ciências Ambientais e Florestais pela mesma universidade. Possui experiência em gestão florestal e atua como servidor público desde 2006. Superintendente de Mudanças do Clima e Florestas na Subsecretaria de Mudanças do Clima e Conservação da Biodiversidade da Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade do Rio de Janeiro (SEAS). (telmoborges.florestal@gmail.com).

Tatiane Mesquita de Araujo

É estudante de graduação do curso bacharelado em Geologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Tem experiência em geoquímica do solo e pedometria. Bolsista estagiária da Embrapa Solos entre janeiro de 2023 a maio de 2025. (tatiane.araujo.7813@gmail.com).

Marcelo Teixeira de Andrade

É Químico com Atribuição Tecnológica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Mestre em Ciência pelo Instituto de Química pela mesma Universidade. Possui experiência em instrumentação analítica, química de produtos naturais, química analítica e química de solos. Analista da Embrapa desde 2006 e na Embrapa Solos desde 2008. (marcelo.andrade@embrapa.br).



CAPÍTULO 4

CENÁRIOS DO ARMAZENAMENTO DE CARBONO NO SOLO A PARTIR DA MUDANÇA DE USO, COBERTURA E MANEJO DA TERRA NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Fabiano C. Balieiro, Gustavo M. Vasques, Rachel B. Prado,
Telmo B. Silveira Filho, Monise A. F. Magalhães



1. INTRODUÇÃO

O solo é um grande reservatório de carbono da biosfera (FAO, 2018). As florestas ao redor do planeta estocam, em média, 45% do carbono no solo (até 1 m de profundidade) (Pan *et al.*, 2024). Com base em dados do Inventário Florestal Nacional (IFN), a equipe técnica da Embrapa Solos estimou que os solos das florestas acumulam 136 Tg (milhões de toneladas) de carbono (Capítulo 2 neste livro), o que equivale dizer que a maior parte do carbono dessas florestas está em seu solo. Essa elevada proporção de carbono no solo da Mata Atlântica, quando analisada em conjunto com o trabalho de Lima *et al.* (2020), demonstra que o solo é um reservatório persistente de carbono, pois apesar das perdas significativas de biomassa aérea, associada à perda da biodiversidade das últimas décadas, o solo do bioma ainda mantém um grande reservatório de carbono.

Partindo das premissas de que pelo menos 1/3 das pastagens do estado do Rio de Janeiro encontram-se em estado intermediário ou severo de degradação (Bolfe *et al.*, 2024), que as atividades agropecuárias são realizadas em ambientes de relevo acidentado, e que há um déficit significativo de Áreas de Preservação Permanente (~ 111 mil ha) e de Reserva Legal (~ 82 mil ha) no estado do Rio de Janeiro (Ribeiro *et al.*, 2021), esse capítulo apresenta um exercício teórico para avaliar o potencial (realístico) de sequestro ou de armazenamento de carbono no solo fluminense, caso ações de restauração ou de incentivo ao reflorestamento e de boas práticas agrícolas fossem fomentadas, bem como mecanismos de compensação econômicos implementados para cada região administrativa.

2. CARBONO NO SOLO: ESTOQUE ATUAL E O ALCANÇÁVEL

O potencial de acúmulo ou de estocagem de carbono nos solos em agroecossistemas é de difícil estimativa, considerando que estes ambientes podem estocar mais carbono que a vegetação nativa, a qual, muitas vezes, é utilizada como referencial de estocagem em projetos de sequestro de carbono.

O conceito de carbono alcançável do solo (C-alc) (Ingram; Fernandes, 2001) tem sido adotado como a capacidade do solo de ganhar carbono, caso a entrada de carbono seja irrestrita e o manejo das plantas e do solo incrementem o fluxo e a estabilização do carbono nas frações mais finas do solo. Ou seja, o conceito traz implícito os limites superiores que determinados solos e classes de uso e cobertura da terra (CUCT) podem alcançar, a partir da adoção de melhores práticas de manejo. Em outras palavras, solos com estoques baixos de carbono, menores do que os apontados como “alcançáveis”, proveriam maiores oportunidades de sequestro de carbono.

Embora o termo “carbono alcançável” seja associado à fração mais fina do solo (< 60 µm ou 0,060 mm), também chamada de matéria orgânica associada aos minerais (MOAM) (Cambardella; Elliot, 1992; Six *et al.*, 2002; Cotrufo *et al.*, 2019), que é a fração da matéria orgânica do solo onde a maior parte do estoque de carbono do solo se encontra (Feller e Beare, 1997; Cotrufo *et al.*, 2019). Sendo assim, a mesma abordagem de Karunaratne *et al.* (2024) foi usada no presente estudo para estimar o déficit do carbono alcançável nos solos fluminenses.

Segundo essa abordagem, a diferença entre o estoque de carbono (Mg ha⁻¹) de determinado uso atual e o seu percentil 90% para as distintas regiões administrativas do estado ilustra o déficit de carbono alcançá-

vel, que indiretamente expressa o potencial de sequestro de carbono nos solos, e pode ser usada no direcionamento de esforços e políticas voltadas ao aumento do estoque deste ativo natural e fomentar mercados ou outros mecanismos de compensação econômica (Giorgiou *et al.*, 2022; Karunaratne *et al.*, 2024). Respeitando as limitações da metodologia adaptada e do conjunto de dados utilizados, vale ressaltar que o valor de C-alc define apenas um valor limite, mas não o ponto de saturação de carbono para os solos do estado. Ou seja, valores de estoque mais elevados podem ser alcançados nas diferentes regiões.

FIGURA 1. Relação teórica entre o estoque de carbono orgânico total (Mg ha^{-1}) ou estoque de carbono na fração fina (FF) do solo (mg g^{-1}) (eixo y), e o teor de FF (argila + silte) do solo (g kg^{-1}) (eixo x)



As linhas cheia e pontilhada indicam a relação geral entre o teor de FF do solo e o estoque de carbono orgânico atual (linha cheia) e estoque de carbono orgânico alcançável (linha pontilhada). O déficit de estoque de carbono alcançável é indicado pelas setas de cor laranja.

Fonte: Adaptada de Karunaratne *et al.* (2024).

O percentil 90%, adotado como referência teórica, evidencia, para cada macrorregião administrativa, o carbono alcançável para cada CUCT (neste caso, pastagem e formação florestal) representativo da região. Apesar de ser um conceito recente, advindo de estudos que contemplam frações mais finas da matéria orgânica do solo (Karunaratne *et al.*, 2024), ele ilustra, de forma compreensível, que os estoques de carbono no solo

podem ser aumentados até determinados valores reais, em um cenário mais viável de acúmulo, no tempo e no espaço. A Tabela 1 resume as estatísticas descritivas dos dados de estoque de carbono no solo (0-50cm), e fornece uma estimativa do déficit de carbono alcançável por hectare e o potencial de sequestro de carbono para cada região do estado.

TABELA 1. Valores médios e no percentil 90% de estoque de carbono (Mg ha^{-1}) no solo a 0-50 cm nas principais classes de uso e cobertura da terra do Inventário Florestal Nacional no estado do Rio de Janeiro

Região	Uso e cobertura	C médio (linha de base)	C no percentil 90% (C alcançável)	Número de amostras	Déficit de carbono alcançável	Potencial de sequestro de C
Baixas Litorâneas	Formação florestal	83,09	127,76	22	44,57	++
Baixas Litorâneas	Pastagem	67,88	91,32	9	23,44	+
Centro-Sul	Formação florestal	91,24	195,25	10	104,01	+++
Costa Verde	Formação florestal	86,44	110,69	4	24,25	++
Metropolitana	Formação florestal	87,30	114,46	14	27,16	++
Metropolitana	Pastagem	60,13	90,03	4	29,90	++
Médio Paraíba	Formação florestal	103,27	126,85	15	23,58	++
Norte Fluminense	Formação florestal	99,46	166,56	17	67,10	+++
Norte Fluminense	Pastagem	84,62	144,81	14	60,19	+++
Noroeste Fluminense	Formação florestal	107,01	194,56	7	87,55	+++
Noroeste Fluminense	Pastagem	64,67	95,19	16	25,52	++
Serrana	Formação florestal	115,61	184,33	19	68,72	+++
Serrana	Pastagem	100,02	157,64	5	57,62	++

Potencial de sequestro (Déficit de C alcançável / 30 anos): (+) 0.0-1.0 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$; (++) 1.0-2.0 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$; e (+++) 2.0 -3.0 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

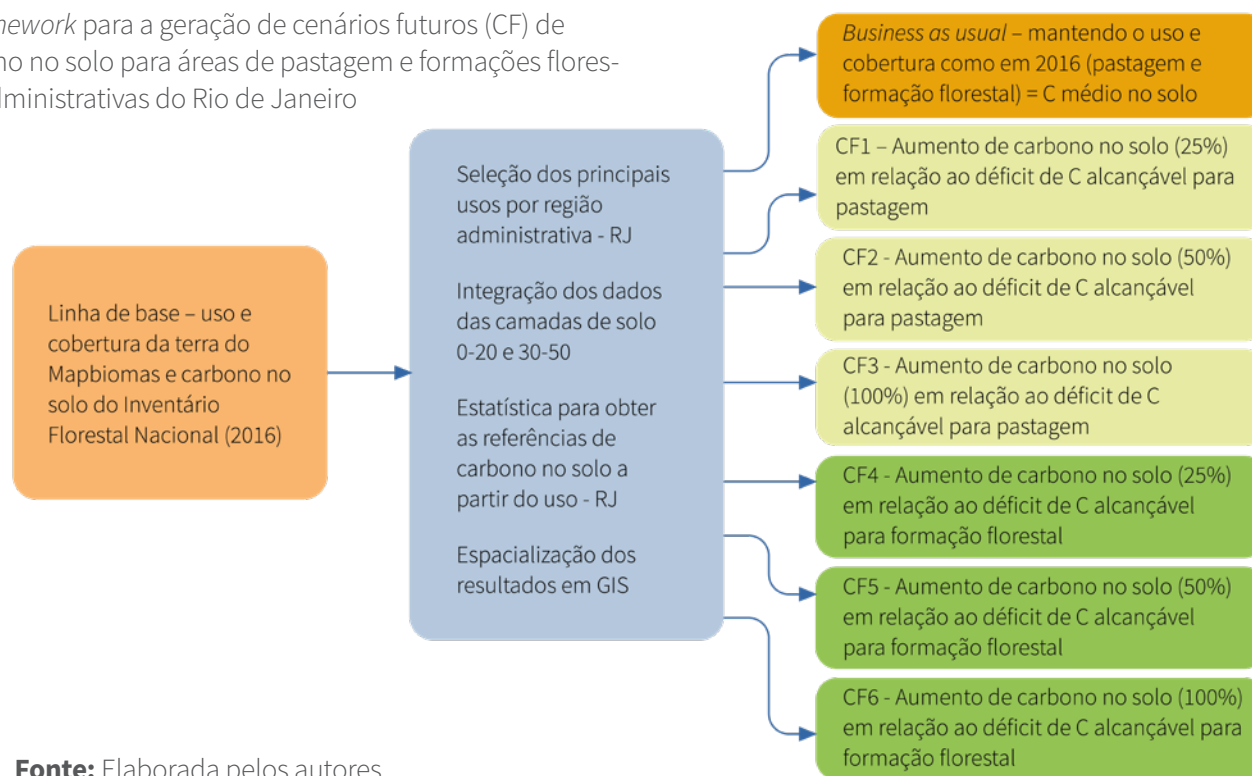
Fonte: Elaborada pelos autores.

3. CENÁRIOS DE ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO FLUMINENSE: ASPECTOS METODOLÓGICOS

Os valores de estoque de carbono foram medidos via combustão seca nas amostras de solo coletadas nas profundidades de 0-20 e 30-50 cm durante o primeiro ciclo do IFN (SFB, 2018) nos laboratórios da Embrapa Solos. Esses dados foram usados, juntamente com um mapa harmonizado de CUCT (MapBiomass, 2016), e mapas das regiões administrativas

e municípios do estado do Rio de Janeiro (CEPERJ, 2014), para gerar cenários de estoque de carbono no solo, em função da CUCT, para cada região administrativa do estado, considerando sua aptidão e prática histórica da agropecuária, conforme o *framework* apresentado na Figura 2.

FIGURA 2. *Framework* para a geração de cenários futuros (CF) de estoque de carbono no solo para áreas de pastagem e formações florestais nas regiões administrativas do Rio de Janeiro



Fonte: Elaborada pelos autores.

Em função da metodologia adotada pelo Serviço Florestal Brasileiro (SFB), foi necessária a integração dos valores de estoque de carbono a 0-20 e 30-50 cm para a camada 0-50 cm, em Mg ha^{-1} , utilizando a seguinte equação:

$$\text{Estoque de C (0-50 cm)} = [\text{Estoque de C (0-20 cm)} + \text{Estoque de C (30-50 cm)}] / 40 * 50$$

Utilizando uma planilha Excel, foram calculados: média, mínimo, percentil 90% e número de pontos amostrados no IFN para as CUCT em cada região administrativa (n), com base nos dados de estoque de carbono (0-50 cm) obtidos nos 168 pontos amostrais do IFN, para cada uso e cobertura da terra e região administrativa. O resultado dessa análise subsidiou a geração dos cenários, sendo considerados:

- Valor de linha de base do C para as CUCT e regiões: os estoques de carbono médio (Mg ha^{-1}) para CUCT e região administrativa, tidos como estoques reais, ou seja, aqueles que melhor representam os valores de estoque de carbono no solo nas CUCTs daquela região;
- Valor de C alcançável para as CUCT e regiões: os valores de estoque de carbono (Mg ha^{-1}) do percentil 90% das CUCT de maior representatividade no IFN (florestas e pastagens), utilizados como referência do quanto o carbono pode realisticamente ser estocado no solo, caso boas práticas de manejo e de conservação forem adotadas; e
- Déficit de C alcançável para as CUCT e regiões: diferença entre os valores de estoque de carbono alcançável e de linha de base, por CUCT e região administrativa (quanto maior a diferença entre

a linha de base e o carbono alcançável, maior o déficit de carbono alcançável, ou seja, maior o potencial de sequestro de carbono no solo para aquela CUCT e região administrativa.

De posse destes dados, foi possível estimar cenários de incremento do carbono no solo equivalentes a 25, 50 e 100% do déficit de carbono até o valor alcançável. Novamente, estes valores definem apenas um limite, mas não o valor de saturação de carbono para os solos do estado do Rio de Janeiro, podendo ser consideradas estimativas conservadoras do potencial de sequestro de carbono pelo solo fluminense. A partir dos valores estimados, foi possível elaborar mapas para os seguintes cenários:

- *Business as usual*: manutenção dos valores de linha de base do estoque de C (estoque de C médio) do solo nas formações florestais e pastagens por 30 anos;
- CF1: linha de base do estoque de C (estoque de C médio) + incremento de 25% do déficit de carbono alcançável nas pastagens;
- CF2: linha de base do estoque de C (estoque de C médio) + incremento de 50% do déficit de carbono alcançável nas pastagens;
- CF3: linha de base do estoque de C (estoque de C médio) + incremento de 100% do déficit de carbono alcançável nas pastagens;
- CF4: linha de base do estoque de C (estoque de C médio) + incremento de 25% do déficit de carbono alcançável nas formações florestais;
- CF5: linha de base do estoque de C (estoque de C médio) + incremento de 50% do déficit de carbono alcançável nas formações florestais; e

• CF6: linha de base do estoque de C (estoque de C médio) + incremento de 100% do déficit de carbono alcançável nas formações florestais.

Também foi realizado um exercício teórico complementar, focando o déficit de áreas de Reserva Legal do estado. De forma a contribuir com estimativas de potencial de acúmulo de carbono no solo por meio de ações de restauração, foi utilizada as diferenças entre os valores mé-

dios de estoque de carbono (em Mg ha⁻¹) entre as formações florestais e as pastagens foram calculadas para cada região, considerando a conversão de áreas de pastagens com baixo potencial produtivo para floresta. O potencial de acúmulo de carbono no solo nessas áreas convertidas, em Mg ha⁻¹, foi então calculado na conversão de 25% e 50% das áreas de pastagens de cada região. O tempo necessário para que os valores de referência sejam alcançados é de cerca de 20 a 30 anos de restauração.

TABELA 2. Estoque de carbono total do solo a 0-50 cm (Mg) por região administrativa do estado do Rio de Janeiro, em pastagens e formações florestais, estimados pelos diferentes cenários

Região	Uso e cobertura	Estoque C (Mg) por uso x região (área)								
		Área (ha)	C Business as usual (C médio)	CF1	CF1	CF2	CF2	CF3	CF3	CF4
				Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Formação florestal
				(25% do déficit do alc.)	(C médio + 25% do déficit do alc.)	(50% do déficit do alc.)	(C médio + 50% do déficit do alc.)	(100% do déficit do alc.)	(C médio + 100% do déficit do alc.)	(25% do déficit do alc.)
Baixas Litorâneas	Formação florestal	85.095,92	5.776.311,19							948.181,31
Baixas Litorâneas	Pastagem	169.837,39	11.528.562,00	995.247,10	12.523.809,10	1.990.494,21	13.519.056,21	3.980.988,41	15.509.550,41	
Centro - Sul	Formação florestal	89.829,35	8.196.029,77							2.335.787,63
Costa Verde	Formação florestal	169.216,04	14.627.034,87							1.025.872,27
Metropolitana	Formação florestal	211.661,93	18.478.086,15							1.437.184,47
Metropolitana	Pastagem	172.053,45	10.345.574,21	1.286.099,57	11.631.673,78	2.572.199,14	12.917.773,35	5.144.398,29	15.489.972,50	
Médio Paraíba	Formação florestal	205.639,64	21.236.406,18							1.212.245,71
Norte Fluminense	Formação florestal	123.496,55	12.282.967,24							2.071.654,69
Norte Fluminense	Pastagem	478.299,19	40.473.677,66	7.197.207,09	47.670.884,75	14.394.414,19	54.868.091,85	28.788.828,39	69.262.506,05	
Noroeste Fluminense	Formação florestal	66.372,10	7.102.571,31							1.452.738,34
Noroeste Fluminense	Pastagem	408.099,30	26.391.781,70	2.603.673,53	28.995.455,23	5.207.347,06	31.599.128,76	10.414.694,13	36.806.475,83	
Serrana	Formação florestal	300.763,55	34.771.274,71							5.167.117,89
Serrana	Pastagem	240.792,07	24.084.022,80	3.468.609,76	27.552.632,56	6.937.219,53	31.021.242,33	13.874.439,05	37.958.461,85	

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De forma geral, independentemente da região administrativa, é consistente encontrar mais estoques de carbono na camada 0-50 cm em solos sob floresta ($\sim 96,7 \text{ Mg ha}^{-1}$) do que sob pastagem ($\sim 78,9 \text{ Mg ha}^{-1}$), o que demonstra a importância da preservação e da restauração florestal não apenas para a conservação do carbono e da biodiversidade, como também para outros serviços ecossistêmicos prestados pelas florestas, como a produção de alimentos e fibras, a ciclagem de nutrientes e a re-

gulação hídrica. Esses resultados são corroborados por outros autores (Vieira *et al.*, 2011; Gomes *et al.*, 2014), na medida em que comprovam que biomas tipicamente florestais estocam mais quantidades de carbono no solo do que outros usos da terra.

Por outro lado, tanto as pastagens quanto as outras CUCT proporcionam maiores taxas de sequestro de carbono caso boas práticas agrícolas e de manejo sejam planejadas de forma coordenada e executadas. Destaca-se que Assad *et al.* (2013) relataram, em uma meta-análise realizada sobre pastagens do bioma Mata Atlântica, para a camada de espaço entre 0-30 e cm, estoques de carbono compatíveis com os encontrados no presente estudo de 50 Mg ha^{-1} .

Segundo os cenários propostos CF1, CF2 e CF3, respectivamente, de aumento de 25%, 50% e 100% do déficit de carbono alcançável, os estoques de carbono das pastagens do estado podem ser incrementados em 13,57 a 54,26 Tg (milhões de toneladas)(ou 49,66 a 198,60 Tg CO_2eq) por meio da adoção de boas práticas de manejo e conservação do solo, bem como da integração dos sistemas pecuários com lavouras e com o componente florestal nas regiões da Baixada Litorânea, Metropolitana, Norte Fluminense, Noroeste Fluminense e Serrana, regiões com dados disponíveis para as estimativas. Por outro lado, os valores de incrementos de C nas formações florestais para todas as regiões do estado foram estimados desde 15,65 Tg (aumento de 25% do déficit de C-alc) até 62,60 Tg (100% do déficit de C-alc), sendo possíveis por meio da adoção de técnicas eficientes de restauração florestal, como a restauração ativa ou assistida, resultando em benefícios múltiplos, tanto para a conservação da biodiversidade quanto para o sequestro de carbono do solo.

Fonte: Elaborada pelos autores.

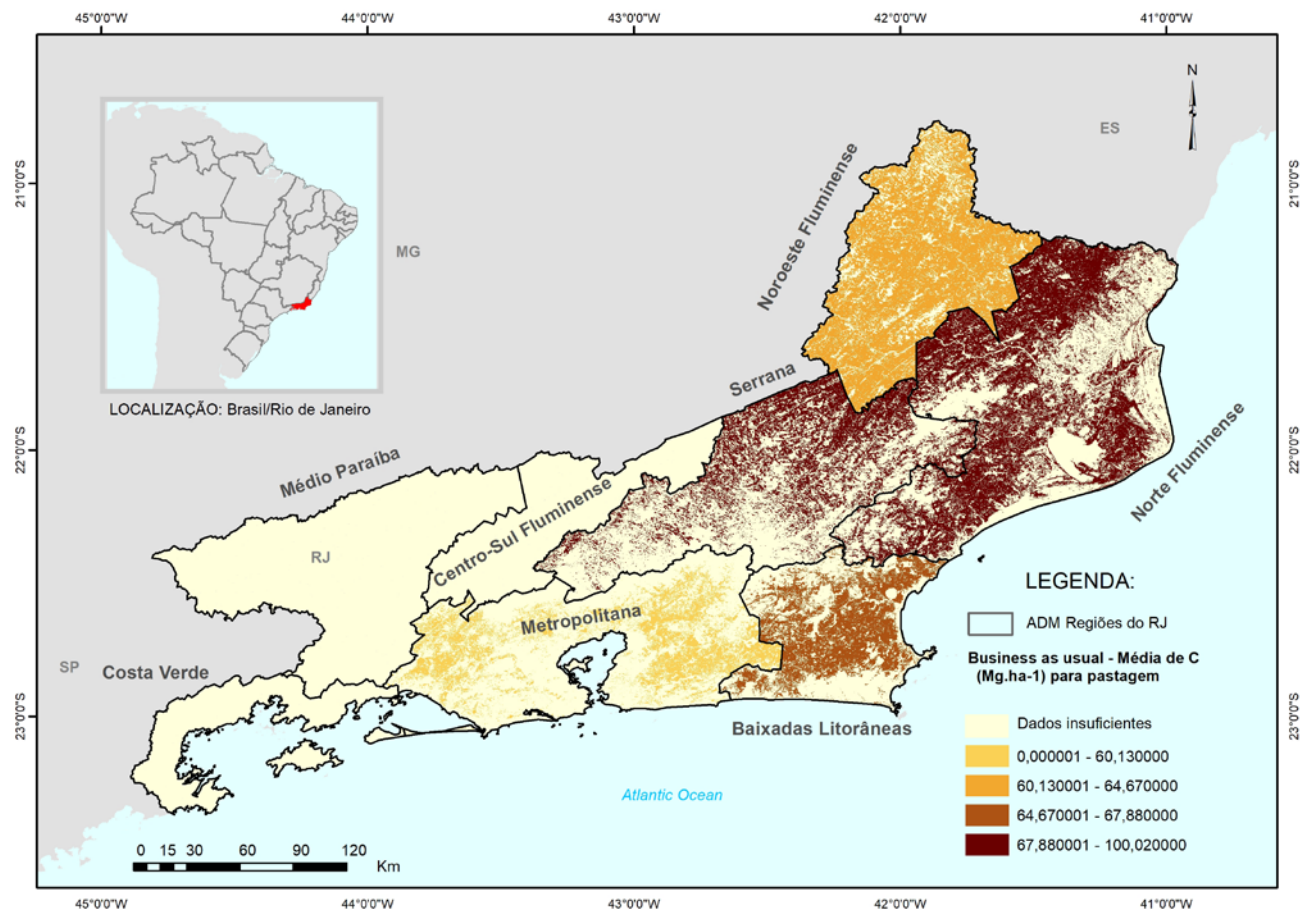
Continuação - Estoque C (Mg) por uso x região (área)				
CF4	CF5	CF5	CF6	CF6
Formação florestal	Formação florestal	Formação florestal	Formação florestal	Formação florestal
(C médio + 25% do déficit do alc.)	(50% do déficit do alc.)	(C médio + 50% do déficit do alc.)	(100% do déficit do alc.)	(C médio + 100% do déficit do alc.)
6.724.492,50	1.896.362,62	7.672.673,81	3.792.725,25	9.569.036,44
10.531.817,40	4.671.575,27	12.867.605,04	9.343.150,55	17.539.180,32
15.652.907,14	2.051.744,54	16.678.779,41	4.103.489,07	18.730.523,94
19.915.270,62	2.874.368,96	21.352.455,11	5.748.737,91	24.226.824,06
22.448.651,89	2.424.491,42	23.660.897,60	4.848.982,84	26.085.389,02
14.354.621,93	4.143.309,38	16.426.276,62	8.286.618,75	20.569.585,99
8.555.309,65	2.905.476,68	10.008.047,99	5.810.953,36	12.913.524,67
39.938.392,60	10.334.235,78	45.105.510,49	20.668.471,57	55.439.746,28

Pela metodologia adotada, as regiões com os maiores déficits de carbono alcançável e, portanto, com maior potencial de acúmulo de carbono sob pastagens, são a região Norte Fluminense (com 53% do potencial do estado), seguida pelas regiões Serrana (25%) e Noroeste Fluminense (19%). Por outro lado, as regiões com maior potencial de ganho de carbono em florestas são a Serrana (33% do total estimado), a Centro-Sul (15%) e a Norte Fluminense (13%). Estes resultados são consistentes com o histórico de uso intenso das terras nessas regiões. Contudo, a ausência de pontos de amostragem sob pastagens nas regiões Médio Paraíba, Costa Verde e Centro-Sul não permitiu a aplicação dos cenários de acúmulo de C em solos de pastagem nessas regiões.

A Figura 3 apresenta os mapas das linhas de base de estoque de C do solo para pastagem e formação florestal e os estoques de C do solo nos cenários preconizados (CF1 a CF6), indicando as regiões em que ocorrem os maiores e menores ganhos de carbono pelo solo em áreas de pastagem e sob formação florestal. Esses cenários podem se realizar caso boas práticas agrícolas e pecuárias, políticas de conservação do solo e da água e incentivos econômicos sejam incluídos como pilares norteadores do planejamento agroambiental no estado. A intensidade da cor nas diferentes regiões evidencia o que foi anteriormente mencionado: as regiões Norte Fluminense, Noroeste Fluminense e Serrana possuem maior potencial para sequestro de carbono em pastagens, caso as pastagens sejam melhor manejadas ou intensificadas; e as regiões mais centrais, como a Serrana e a Centro-Sul, apresentam elevado potencial de ganho de carbono no solo em florestas, por meio de restauração assistida ou ativa.

É importante ressaltar que o Estado tem o dever, por meio de suas políticas públicas e incentivos, de apoiar os produtores rurais na construção de paisagens rurais sustentáveis em todo o estado do Rio de Janeiro. Nesse contexto, o aumento dos estoques de carbono no solo fluminense, vislumbrado neste documento, estará associado à provisão de múltiplos serviços ecossistêmicos pelo solo. O sequestro de carbono é apenas um deles, e o produtor poderá também se beneficiar do mercado de créditos de C se a ele for interessante. Sem dúvida, os produtores que já praticam uma agricultura ou pecuária regenerativa, e que tenham em suas fazendas solos com níveis elevados de matéria orgânica, deveriam receber incentivos econômicos ou fiscais para continuarem manejando o solo de forma sustentável, evitando a perda do carbono armazenado no solo, beneficiando toda a sociedade.

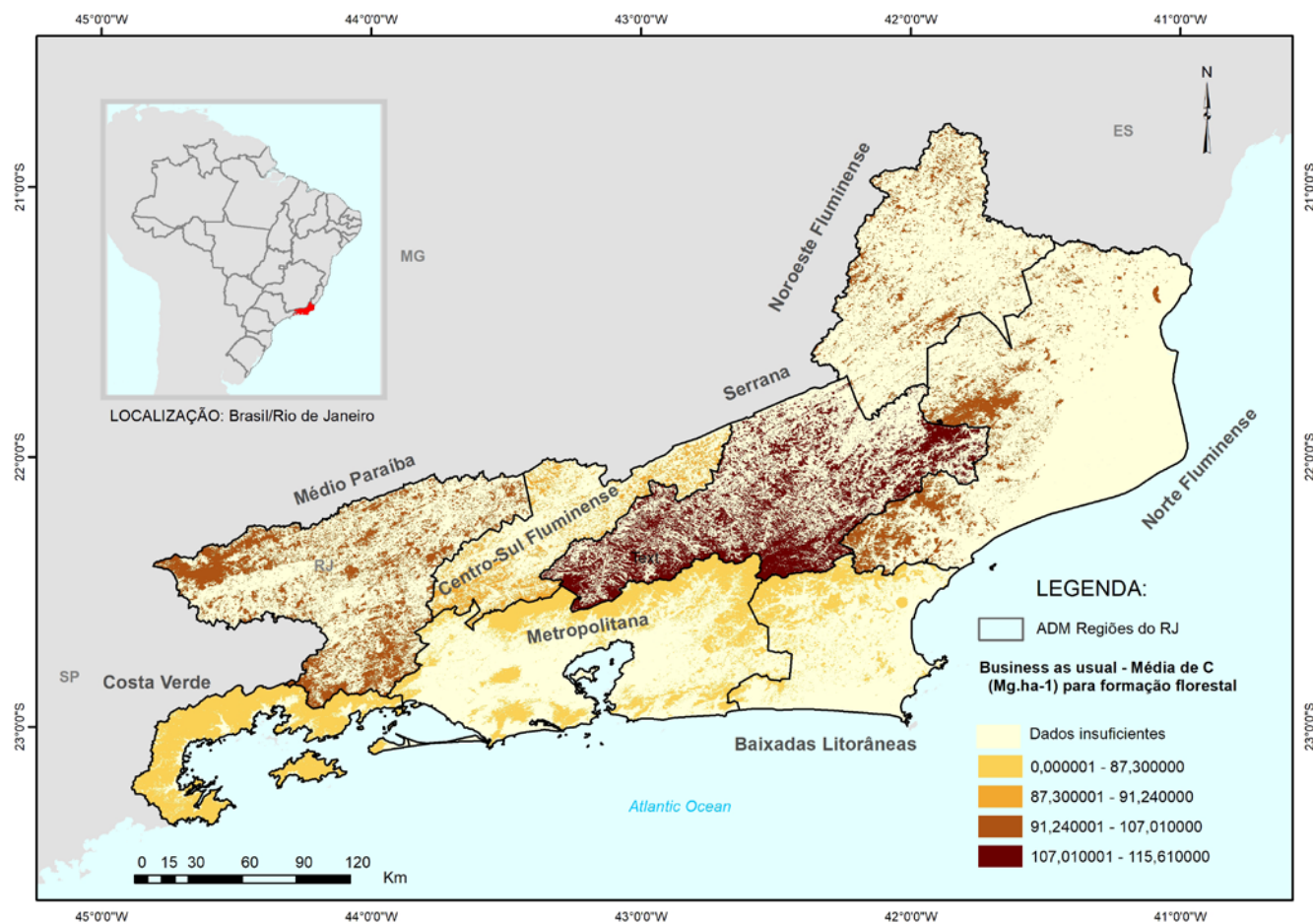
FIGURA 3A. Cenários futuros do estoque de C do solo para as regiões administrativas do estado do Rio de Janeiro: *Business as usual* (linhas de base do estoque de C ~ estoques de C médios) para pastagens (A) e formações florestais (B); linhas de base do estoque de C (estoques de C médios) + incrementos de 25 (CF1), 50 (CF2) e 100% (CF3) do déficit de carbono alcançável em pastagens (C, D e E, respectivamente); e linhas de base do estoque de C (estoques de C médios) + incrementos de 25 (CF4), 50 (CF5) e 100% (CF6) do déficit de carbono alcançável em formações florestais (F, G e H, respectivamente)



(A) - BusinessP

Fonte: Elaborada pelos autores.

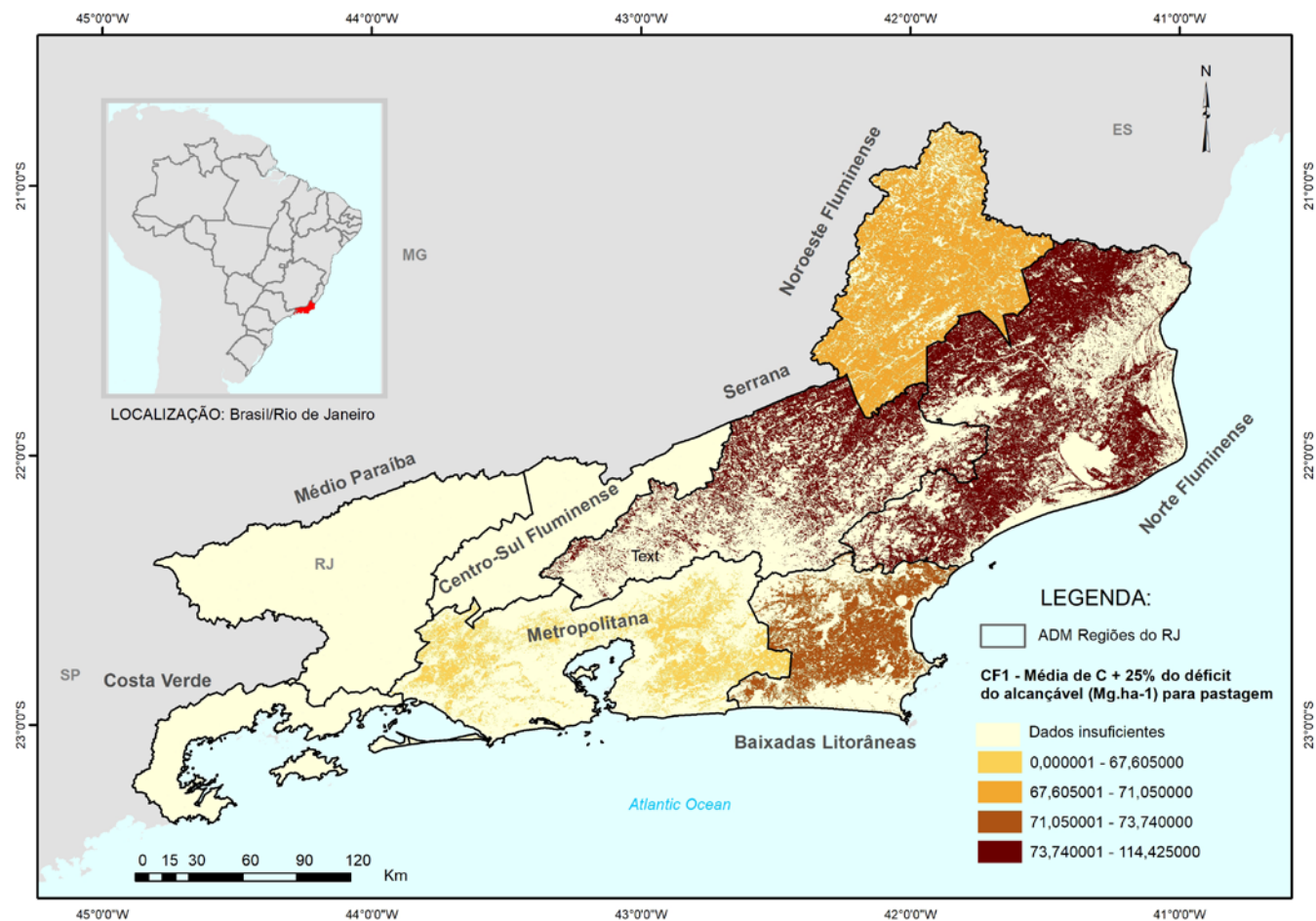
FIGURA 3B. Cenários futuros do estoque de C do solo para as regiões administrativas do estado do Rio de Janeiro: *Business as usual* (linhas de base do estoque de C ~ estoques de C médios) para pastagens (A) e formações florestais (B); linhas de base do estoque de C (estoques de C médios) + incrementos de 25 (CF1), 50 (CF2) e 100% (CF3) do déficit de carbono alcançável em pastagens (C, D e E, respectivamente); e linhas de base do estoque de C (estoques de C médios) + incrementos de 25 (CF4), 50 (CF5) e 100% (CF6) do déficit de carbono alcançável em formações florestais (F, G e H, respectivamente)



(B) - BusinessF

Fonte: Elaborada pelos autores.

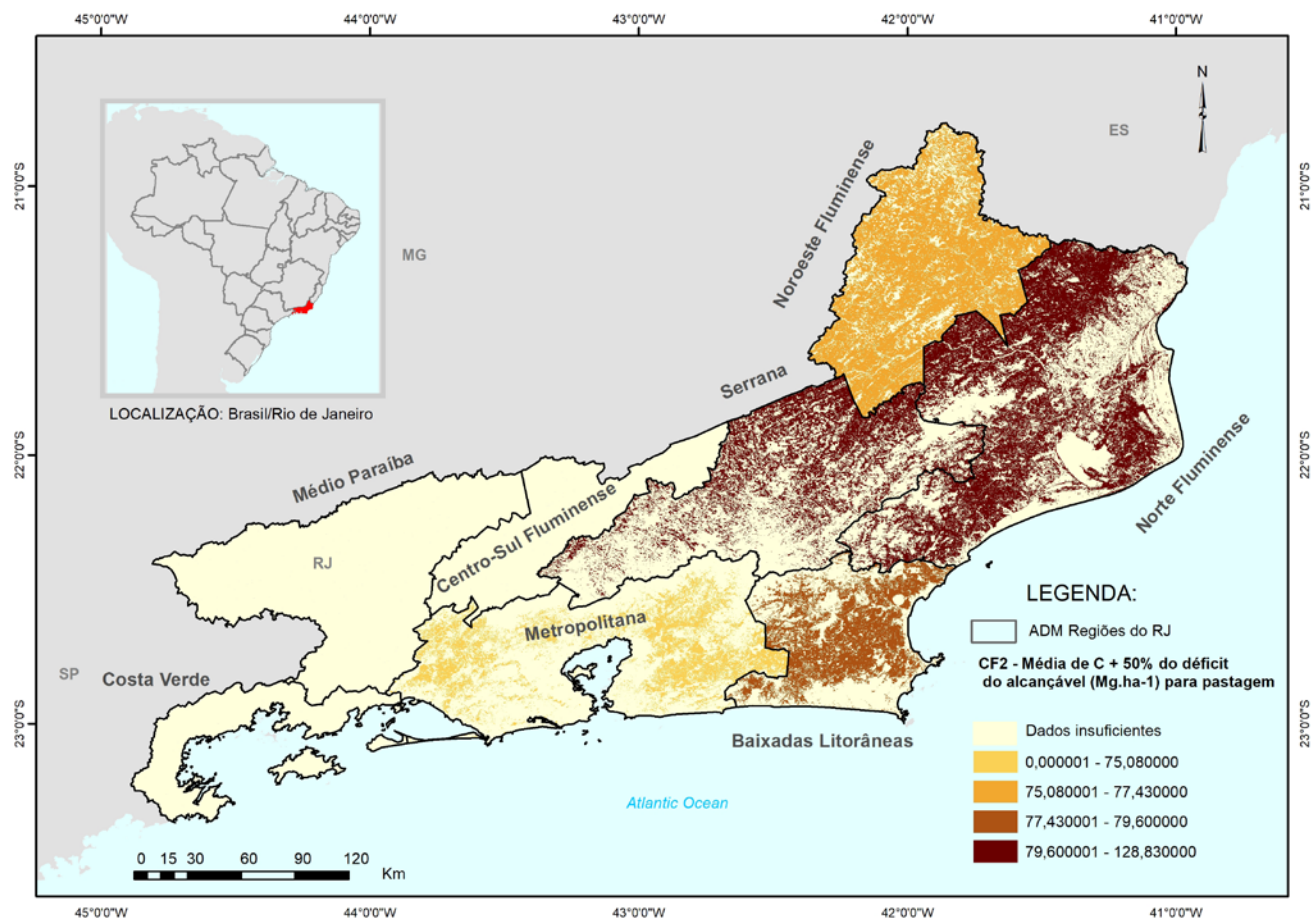
FIGURA 3C. Cenários futuros do estoque de C do solo para as regiões administrativas do estado do Rio de Janeiro: *Business as usual* (linhas de base do estoque de C ~ estoques de C médios) para pastagens (A) e formações florestais (B); linhas de base do estoque de C (estoques de C médios) + incrementos de 25 (CF1), 50 (CF2) e 100% (CF3) do déficit de carbono alcançável em pastagens (C, D e E, respectivamente); e linhas de base do estoque de C (estoques de C médios) + incrementos de 25 (CF4), 50 (CF5) e 100% (CF6) do déficit de carbono alcançável em formações florestais (F, G e H, respectivamente)



(C) - CF1

Fonte: Elaborada pelos autores.

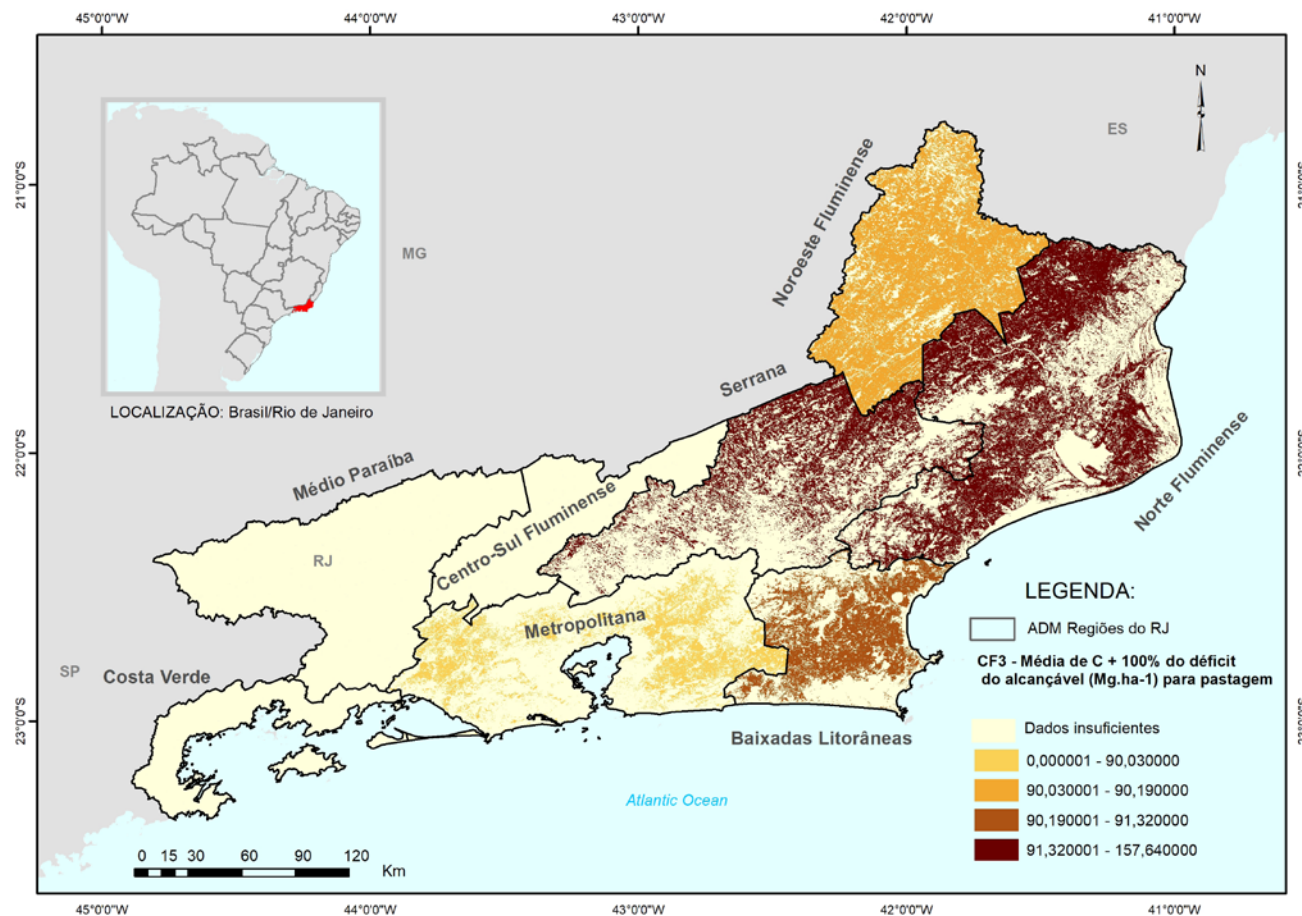
FIGURA 3D. Cenários futuros do estoque de C do solo para as regiões administrativas do estado do Rio de Janeiro: *Business as usual* (linhas de base do estoque de C ~ estoques de C médios) para pastagens (A) e formações florestais (B); linhas de base do estoque de C (estoques de C médios) + incrementos de 25 (CF1), 50 (CF2) e 100% (CF3) do déficit de carbono alcançável em pastagens (C, D e E, respectivamente); e linhas de base do estoque de C (estoques de C médios) + incrementos de 25 (CF4), 50 (CF5) e 100% (CF6) do déficit de carbono alcançável em formações florestais (F, G e H, respectivamente)



(D) - CF2

Fonte: Elaborada pelos autores.

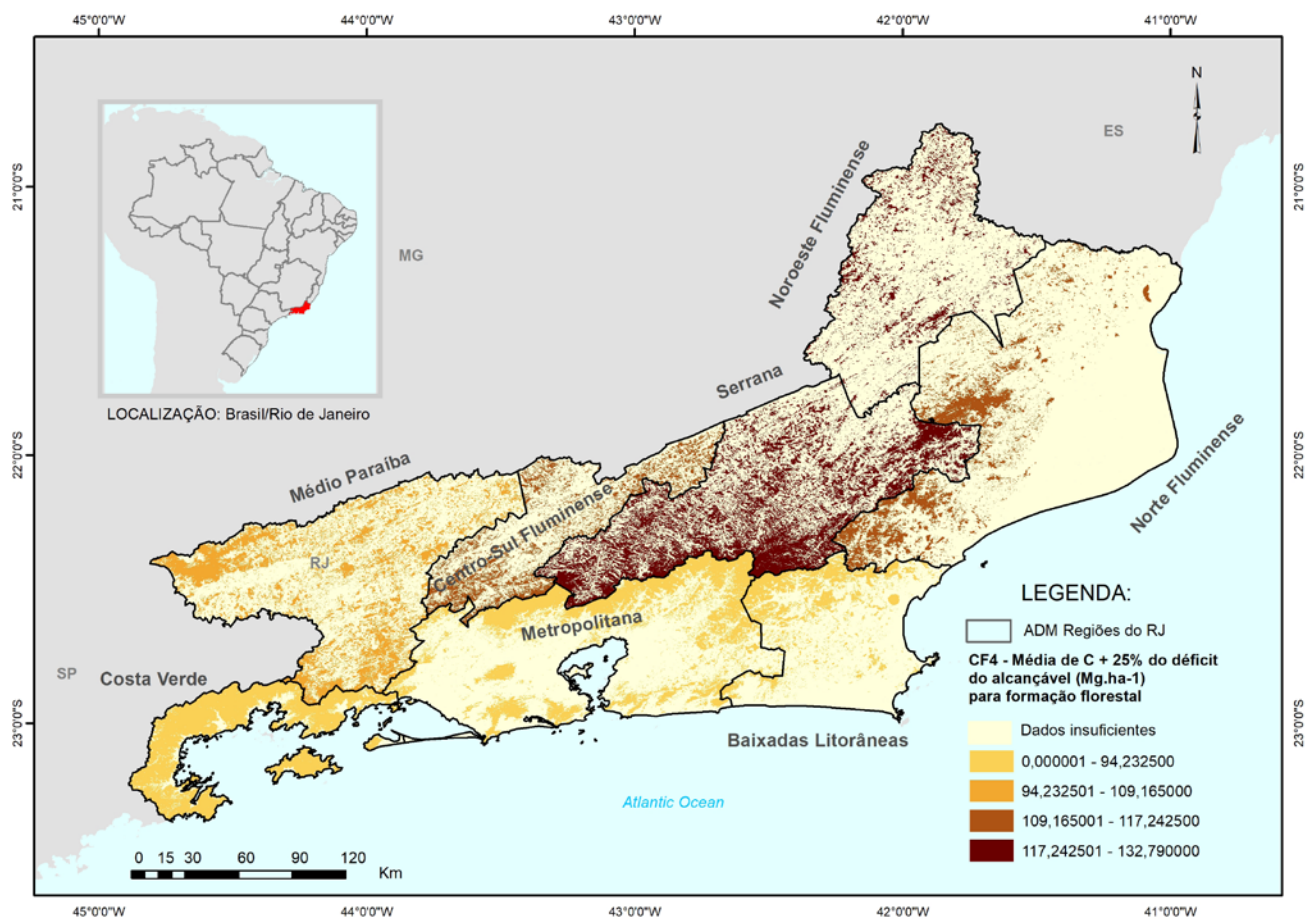
FIGURA 3E. Cenários futuros do estoque de C do solo para as regiões administrativas do estado do Rio de Janeiro: *Business as usual* (linhas de base do estoque de C ~ estoques de C médios) para pastagens (A) e formações florestais (B); linhas de base do estoque de C (estoques de C médios) + incrementos de 25 (CF1), 50 (CF2) e 100% (CF3) do déficit de carbono alcançável em pastagens (C, D e E, respectivamente); e linhas de base do estoque de C (estoques de C médios) + incrementos de 25 (CF4), 50 (CF5) e 100% (CF6) do déficit de carbono alcançável em formações florestais (F, G e H, respectivamente)



(E) - CF3

Fonte: Elaborada pelos autores.

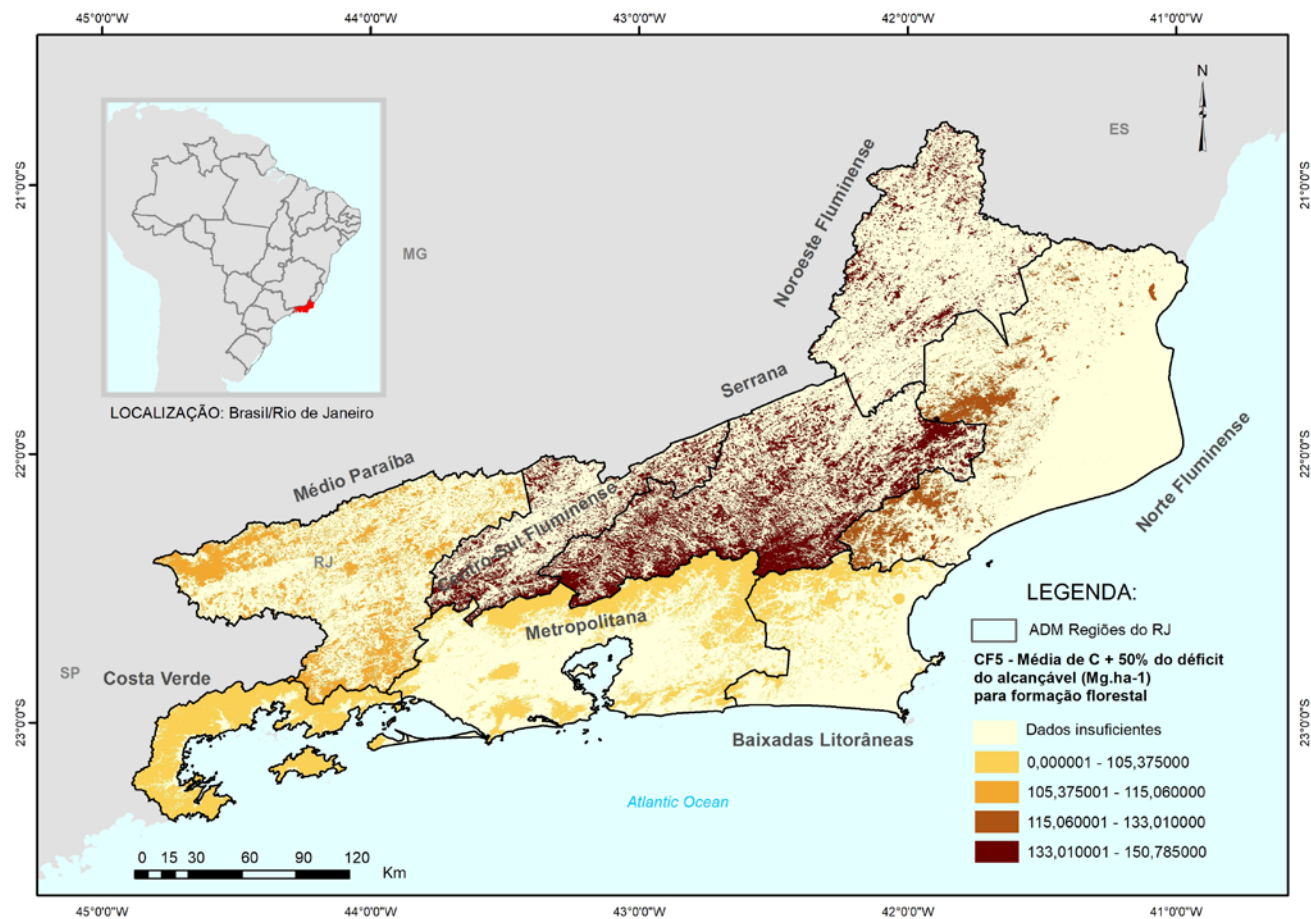
FIGURA 3F. Cenários futuros do estoque de C do solo para as regiões administrativas do estado do Rio de Janeiro: *Business as usual* (linhas de base do estoque de C ~ estoques de C médios) para pastagens (A) e formações florestais (B); linhas de base do estoque de C (estoques de C médios) + incrementos de 25 (CF1), 50 (CF2) e 100% (CF3) do déficit de carbono alcançável em pastagens (C, D e E, respectivamente); e linhas de base do estoque de C (estoques de C médios) + incrementos de 25 (CF4), 50 (CF5) e 100% (CF6) do déficit de carbono alcançável em formações florestais (F, G e H, respectivamente)



(F) - CF4

Fonte: Elaborada pelos autores.

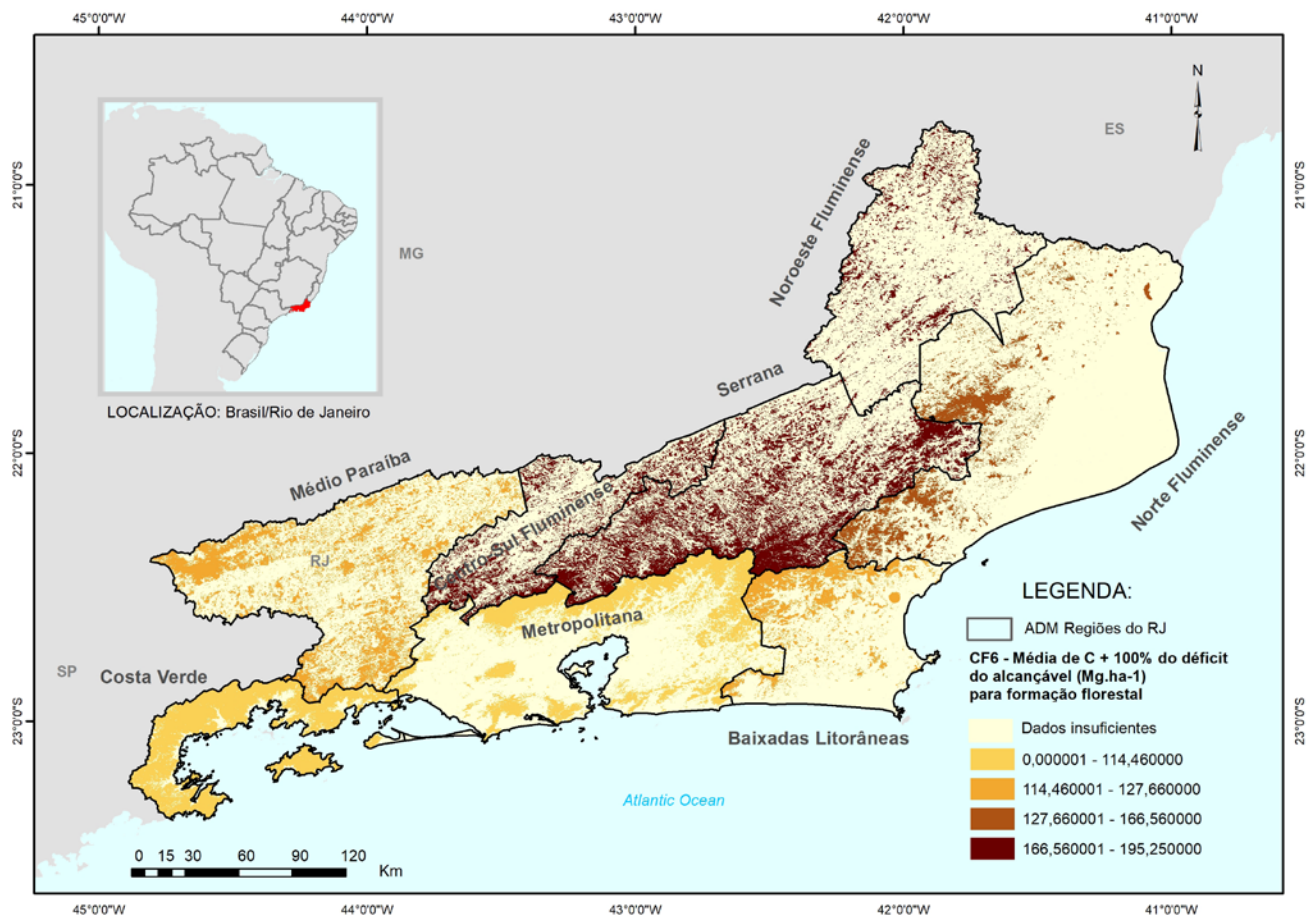
FIGURA 3G. Cenários futuros do estoque de C do solo para as regiões administrativas do estado do Rio de Janeiro: *Business as usual* (linhas de base do estoque de C ~ estoques de C médios) para pastagens (A) e formações florestais (B); linhas de base do estoque de C (estoques de C médios) + incrementos de 25 (CF1), 50 (CF2) e 100% (CF3) do déficit de carbono alcançável em pastagens (C, D e E, respectivamente); e linhas de base do estoque de C (estoques de C médios) + incrementos de 25 (CF4), 50 (CF5) e 100% (CF6) do déficit de carbono alcançável em formações florestais (F, G e H, respectivamente)



(G) - CF5

Fonte: Elaborada pelos autores.

FIGURA 3H. Cenários futuros do estoque de C do solo para as regiões administrativas do estado do Rio de Janeiro: *Business as usual* (linhas de base do estoque de C ~ estoques de C médios) para pastagens (A) e formações florestais (B); linhas de base do estoque de C (estoques de C médios) + incrementos de 25 (CF1), 50 (CF2) e 100% (CF3) do déficit de carbono alcançável em pastagens (C, D e E, respectivamente); e linhas de base do estoque de C (estoques de C médios) + incrementos de 25 (CF4), 50 (CF5) e 100% (CF6) do déficit de carbono alcançável em formações florestais (F, G e H, respectivamente)



(H) - CF6

Fonte: Elaborada pelos autores.

5. ESFORÇOS PARA INCREMENTAR OS ESTOQUES DE CARBONO DO SOLO NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

O planejamento da propriedade rural é a base para a construção de paisagens sustentáveis, para o aumento dos níveis de matéria orgânica do solo e, conseqüentemente, para o incremento da oferta de serviços ecossistêmicos do solo. Os princípios da agricultura sustentável, conservacionista, agroecológica ou regenerativa são amplamente conhecidos e devem constituir o alicerce para a construção de solos saudáveis e com elevados níveis de matéria orgânica. Práticas como plantios em nível, rotação ou consórcio de culturas, plantio direto na palha, adubação verde e manejo integrado de pragas e de dejetos devem ser inseridas nos sistemas de produção fluminenses, independentemente da região.

Estabelecer uma relação de confiança com os agricultores e a governança local e estadual é fundamental para estabelecer e consolidar mecanismos de compensação pelo uso sustentável dos solos do Rio de Janeiro, incluindo o mercado de créditos de C. Entre os desafios para a consolidação de mercados de compensação baseados em carbono no solo, destacam-se: i) a ausência de regulamentações em diferentes níveis; ii) informações dispersas e contraditórias na literatura acadêmica e não acadêmica, que muitas vezes dificultam ao invés de contribuir com a discussão sobre a regulamentação dos mercados de carbono; iii) os prazos inadequados dos projetos, que inspiram desconfiança tanto em vendedores quanto em compradores; iv) a falta de informação e treinamento sobre o tema; v) a comunicação ineficiente entre os atores do processo; e vi) a dificuldade de operacionalização e custo elevado do monitoramento e da certificação dos ganhos de carbono do solo.

Além disso, o declínio produtivo das áreas rurais, decorrente do baixo nível de produtividade, da dificuldade de acesso à assistência técnica e extensão rural, e do limitado apoio financeiro e para a comercialização dos produtos, exigirá esforços conjuntos em diversas esferas em prol do estabelecimento de um novo modelo de desenvolvimento para essas áreas (Vidal *et al.*, 2020).

A pluriatividade, com incentivo ao desenvolvimento de nichos específicos (como moradia para lazer, descanso e turismo rural), à produção de bens de valor agregado (orgânicos e artesanais) e as atividades produtivas tradicionais (comunitárias, familiares), também podem se beneficiar dos diferentes mecanismos de compensação pelo uso conservacionista do solo, das florestas e da biodiversidade, com ganhos que se estendem a toda a sociedade, extrapolando os limites da paisagem rural.

Políticas públicas, como o Plano de Agricultura de Baixo Carbono (Plano ABC+), o Programa de Agricultura Orgânica, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), bem como os mecanismos de compensação ambiental (ou econômica) que apoiam agricultores que adotam práticas sustentáveis de produção, com condições de crédito favoráveis ou na forma de incentivo compensatório, devem ser alinhados às demandas sociais e conduzidas com a menor interferência política.

Nesse sentido, e visando superar esses desafios, a Secretaria de Estado de Ambiente e Sustentabilidade (SEAS), a Secretaria de Estado de Agricultura, Pesca e Abastecimento (SEAPPA) e a Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Rio de Janeiro (EMATER-RIO) trabalham de forma colaborativa para a construção do Instrumento de Avaliação da Transição Agroecológica (IATA). Este instrumento reúne um conjunto de

ferramentas metodológicas para caracterizar e classificar as diferentes fases da transição agroecológica dos agroecossistemas no estado do Rio de Janeiro, e permite a construção de um plano de transição participativo, elaborado pelo Núcleo Social de Gestão do Agroecossistema (NSGA) em conjunto com a equipe de extensionistas responsáveis pelo acompanhamento do processo de transição (SEAS, 2025). Essas ações estão respaldadas pelos seguintes instrumentos legais:

- 1) Nota Técnica SEAS/SEAPPA/EMATER-RIO nº 01/2024, Instrumento para Avaliação da Transição Agroecológica (IATA) e elaboração do plano de transição agroecológica em agroecossistemas no âmbito do estado do Rio de Janeiro (Rio de Janeiro, 2024);
- 2) Resolução Conjunta SEAPPA/SEAS/EMATER-RIO/INEA nº 16, de 26 de novembro de 2024, que dispõe sobre critérios e procedimentos para o reconhecimento da transição agroecológica na unidade de produção e institui metodologia de classificação das fases de transição da produção agroecológica dos agroecossistemas, no âmbito do estado do Rio de Janeiro (Rio de Janeiro, 2024).

Ainda neste sentido, a SEAPPA e a Rede Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), entidade público-privada, assinaram em maio de 2025 um Protocolo de Intenções visando fortalecer a agricultura sustentável no território fluminense por meio da implementação de sistemas produtivos integrados e de baixa emissão de carbono. A viabilização de capacitações técnicas, eventos de difusão técnica, diagnósticos territoriais e produção científica focada em demandas do estado estarão compondo o plano de trabalho previsto em Acordo de Cooperação Técnica, que deverá abarcar diversas instituições de ensino, pesquisa e extensão do estado, bem como tomadores de decisão do estado.

Finalmente, destaca-se a capacidade e potencial da agricultura conservacionista para melhoria da saúde do solo e, conseqüentemente, da produtividade, inclusive permitindo a entrega de múltiplos serviços ecossistêmicos. O solo fluminense tem a capacidade de armazenar quantidades significativas de carbono, conforme demonstrado pelas estimativas robustas geradas a partir de dados reais, coletados com a uma metodologia consistente de amostragem e análise de carbono.

A Embrapa Solos continuará trabalhando com as amostras do IFN de forma a obter estimativas mais precisas do carbono alcançável nas diferentes regiões do estado. Os dados do primeiro ciclo do IFN obtidos até o momento já permitem uma visão regional sobre o potencial da agricultura e do setor florestal para sequestrar carbono no solo no contexto de adaptação do produtor rural frente às mudanças climáticas, com reconhecimento das externalidades geradas no campo pela adoção de práticas conservacionistas e sustentáveis. O carbono agregado ao solo, decorrente de boas práticas de produção e conservação do solo, certamente dará mais resiliência ao produtor diante das mudanças do clima em curso, e beneficiará a população, tanto rural quanto urbana, pelos múltiplos bens e serviços gerados em suas propriedades.

REFERÊNCIAS

- AMAZONAS, N. T.; FORRESTER, D. I.; SILVA, C. C.; ALMEIDA, D. R. A.; RODRIGUES, R. R.; BRANCALION, P. H. S. High diversity mixed plantations of Eucalyptus and native trees: an interface between production and restoration for the tropics. **Forest Ecology and Management**, v. 417, p. 247-256, 15 May 2018.
- ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; MARTINS, S. C.; GROPPPO, J. D.; SALGADO, P.; EVANGELISTA, B. A.; SANO, E. E. ; PAVAO, E.; LUNA, R.; MARTINELLI, L. A.

Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: paired site comparisons and a regional pasture soil survey. **Biogeosciences**, v. 10, p. 6141-6160, 2013.

BALBINO, L. C.; KICHEL, A. N.; BUNGESTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G. **Sistemas de integração**: conceitos, considerações, contribuições e desafios. In: Bungestab, D. J.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. (ed.). **ILPF**: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta. Brasília, DF: Embrapa, 2019. p. 31-42.

BALIEIRO, F. C.; PEREIRA, H. S.; LOYOLA, R.; TONIN, A. M.; AUGUSTO, D. C. C.; MELO, F. P. L.; MAIA, J. L. S.; UGUEN, K.; MONTEIRO, M. M.; VIEIRA, R. R. S.; BARBIERI, R. L.; ALFAIA, S. S. Conciliando a agricultura e a manutenção da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos. In: PRADO, R. B.; OVERBECK, G. E.; GRACO-ROZA, C.; MOREIRA, R. A.; MONTEIRO, M. M.; DUARTE, G. T. (org.). **Relatório temático sobre agricultura, biodiversidade e serviços ecossistêmicos**. 1. ed. Campinas, SP: Ed. dos Autores, 2024. p. 99-131. DOI: <http://doi.org/10.4322/978-65-01-21502-0.cap04>.

BATISTA, A.; CALMON, M.; LUND, S.; ASSAD, L.; PONTES, C.; BIDERMAN, R. **Investing in native tree species and agroforestry systems in Brazil**: an economic valuation. São Paulo: WRI Brasil, 2021. Disponível em: https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/wribrasil_verena_ing_baixa.pdf. Acesso em: 05 abr. 2023.

BOLFE, É. L.; VICTORIA, D. C.; SANO, E. E.; BAYMA, G.; MASSRUHÁ, S. M. F. S.; OLIVEIRA, A. F. Potential for agricultural expansion in degraded pasture lands in Brazil based on Geospatial Databases. **Land**, v. 13, n. 200, 6 Feb. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/land13020200>.

BORGES, T. S. F. **Flora, biomassa e carbono da floresta atlântica no estado do Rio de Janeiro**: um retrato do primeiro ciclo do Inventário Florestal Nacional (2013-2016). 2024. 202 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

BRANCALION, P. H. S.; AMAZONAS, N. T.; CHAZDON, R. L.; VAN MELIS, J.; RODRIGUES, R. R.; SILVA, C. C.; SORRINI, T. B.; HOLL, K. D. Exotic eucalypts: from demonized trees to allies of tropical forest restoration?. **Journal of Applied Ecology**, v. 57, n. 1, p. 55-66, Jan. 2020.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 3, p. 777-783, May/Jun. 1992. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>.

COTRUFO, M. F.; RANALLI, M. G.; HADDIX, M. L.; SIX, J.; LUGATO, E. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. **Nature Geoscience**, v. 12, p. 989-994, 18 Nov. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6>.

DIAS, P. F.; SOUTO, S. M.; FRANCO, A. A. Leguminosas arbóreas introduzidas em pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n. 1, p. 119-126, jan. 2007.

FAUSTINO, L. L.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; BARRETO-GARCIA, P. A. B. Oxidizable organic carbon fractions in soils under leguminous nitrogen-fixing trees in a degraded pasture. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 52, n. 12, 2022.

FELLER, C.; BEARE, M. H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, v. 79, n. 1-4, p. 69-116, Sept. 1997.

FIGUEIREDO, E. B.; JAYASUNDARA, S.; BORDONAL, R. O.; BERCHIELLI, T. T.; REIS, R. A.; WAGNER-RIDDLE, C.; LA SCALA JR., N. Greenhouse gas balance and carbon footprint of beef cattle in three contrasting pasture-management systems in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, pt. 1, p. 420-431, 20 Jan. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.132>.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The state of the world's forests 2018**: forest pathways to sustainable development. Rome: FAO, 2018. 139 p.

FUNDAÇÃO CENTRO ESTADUAL DE ESTATÍSTICAS, PESQUISAS E FORMAÇÃO DE SERVIDORES PÚBLICOS DO RIO DE JANEIRO. **Mapa de regiões de governo e municípios**. Rio de Janeiro: CEPERJ, 2014.

GAUI, T. D.; CYSNEIROS, V. C.; SOUZA, F. C.; SOUZA, H. J.; SILVEIRA FILHO, T. B.; CARVALHO, D. C.; PACE, J. H. C.; VIDAURRE, G. B.; MIGUEL, E. P. Biomass equations and carbon stock estimates for the southeastern brazilian atlantic forest. **Forests**, v. 15, n. 9, 6 Sept. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15091568>.

GEORGIU, K.; JACKSON, R. B.; VINDUŠKOVÁ, O.; ABRAMOFF, R. A.; AHLSTRÖM, A.; FENG, W.; HARDEN, J. W.; PELLEGRINI, A. F. A.; POLLEY, H. W.; SOONG, J. L.; RILEY, W. J.; TORN, M. S. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. **Nature Communications**, v. 13, n. 3797, 1 Jul. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31540-9>.

GOMES, L. C.; FARIA, R. M.; SOUZA, E.; VELOSO, G. V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES FILHO, E. I. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. **Geoderma**, v. 340, p. 337-350, 15 Apr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.007>.

INGRAM, J. S. I.; FERNANDES, E. C. M. Managing carbon sequestration in soils: concepts and terminology. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 87, n. 1, p. 111-117, Oct. 2001 DOI: [doi:10.1016/S0167-8809\(01\)00145-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00145-1).

KARUNARATNE, S.; ASANOPOULOS, C.; JIN, H.; BALDOCK, J.; SEARLE, R.; MACDONALD, B.; MACDONALD, L. M. Estimating the attainable soil organic carbon deficit in the soil fine fraction to inform feasible storage targets and de-risk carbon farming decisions. **Soil Research**, v. 62, n. 2, Feb. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR23096>.

LIMA, R. A. F.; OLIVEIRA, A. A.; PITTA, G. R.; GASPER, A. L.; VIBRANS, A. C.; CHAVE, J.; STEEGE, H. T.; PRADO, P. I. The erosion of biodiversity and biomass in the Atlantic Forest biodiversity hotspot. **Nature Communications**, v. 11, n. 6347, 11 Dec. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20217-w>.

MAMEDES, I.; GUERRA, A.; RODRIGUES, D. B. B.; GARCIA, L. C.; GODOI, R. F.; OLIVEIRA, P. T. Brazilian payment for environmental services programs emphasize water-related services. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 11, n. 2, p. 276-289, Jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.01.001>.

METZGER, J. P.; MARTENSEN, A. C.; DIXO, M.; BERNACCI, L. C.; RIBEIRO, M. C.; TEIXEIRA, A. M. G.; PARDINI, R. Time-lag in biological responses to landscape changes in a highly dynamic Atlantic forest region. **Biological**

Conservation, v. 142, n. 6, p. 1166-1177, Jun. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.01.033>.

MORAES, L. F. D.; OLIVEIRA, R. E.; ZAKIA, M. J. B.; GLEHN, H. C. V. The brazilian legal framework on mixed-planted forests. *In*: CARDOSO, E. J. B. N.; GONÇALVES, J. L. M.; BALIEIRO, F. C.; FRANCO, A. A. (org.). **Mixed plantations of eucalyptus and leguminous trees: soil, microbiology and ecosystem services**. 1. ed. Cham: Springer, 2020. p. 257-270. v. 1.

MOTA, P. K.; COSTA, A. M.; PRADO, R. B.; FERNANDES, L. F. S.; PISSARRA, T. C. T.; PACHECO, F. A. L. Payment for environmental services: a critical review of schemes, concepts, and practice in Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 899, n. 165639, 15 Nov. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165639>.

OLIVEIRA, P. P. A.; BERNDT, A.; PEDROSO, A. F.; ALVES, T. C.; LEMES, A. P.; OLIVEIRA, B. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; RODRIGUES, P. H. M. Greenhouse gas balance and mitigation of pasture-based dairy production systems in the Brazilian Atlantic Forest Biome. **Frontiers in Veterinary Science**, v. 9, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.958751>.

OLIVEIRA, P. P. A.; RODRIGUES, P. H. M.; PRAES, M. F. F. M.; PEDROSO, A. F.; OLIVEIRA, B. A.; SPERANÇA, M. A.; BOSI, C.; FERNANDES, F. A. Soil carbon dynamics in Brazilian Atlantic forest converted into pasture-based dairy production systems. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 2, p. 1136-1149, Mar./Apr. 2021.

PACIULLO, D. S. C.; FERNANDES, P. B.; CARVALHO, C. A. B.; MORENZ, M. J. F.; LIMA, M. A.; MAURÍCIO, R. M.; GOMIDE, C. A. M. Pasture and animal production in silvopastoral and open pasture systems managed with crossbred

dairy heifers. **Livestock Science**, v. 245, n. 104426, Mar. 2021.

PAN, Y.; BIRDSEY, R. A.; PHILLIPS, O. L.; HOUGHTON, R. A.; FANG, J.; KAUPPI, P. E.; KEITH, H.; KURZ, W. A.; ITO, A.; LEWIS, S. L.; NABUURS, G.-J.; SHVIDENKO, A.; HASHIMOTO, S.; LERINK, B.; SHCHEPASHCHENKO, D.; CASTANHO, A.; MURDIYARSO, D. The enduring world forest carbon sink. **Nature**, v. 631, p. 563-569, 17 Jul. 2024. DOI:10.1038/s41586-024-07602-x.

RANGEL, J. H. A.; NEVES, E.; MORAES, S. A.; SOUZA, S. F.; AMARAL, A. J.; MACHADO, J. C. Integração lavoura pecuária floresta na região Nordeste do Brasil. **Ciência Veterinária nos Trópicos**, Recife, v. 19, f. 3, p. 75-84, 2016.

RIBEIRO, B. R.; RESENDE, F. M.; TESSAROLO, G.; MARTINS, K. G. G. M.; LOYOLA, R.; SILVA, R. **Mapeamento de estimativas de déficit de vegetação nativa em áreas de reserva legal e de proteção permanente e excedente de reserva legal**. Rio de Janeiro: Planaflores, 2021. 345 p. v. 6. Disponível em: www.planaflores.org. Acesso em: 01 jun. 2009.

RIBEIRO, B. R.; RESENDE, F. M.; TESSAROLO, G.; MARTINS, K. G. G. M.; LOYOLA, R.; SILVA, R. **Mapeamento de estimativas de déficit de vegetação nativa em áreas de reserva legal e de proteção permanente e excedente de reserva legal**. [Rio de Janeiro: FBDS, 2020]. 454 p.

RIBEIRO, M. C.; METZGER, J. P.; MARTENSEN, A. C.; PONZONI, F. J.; HIROTA, M. M. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141-1153, Jun. 2009.

RIO DE JANEIRO (Estado). Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária, Pesca e Abastecimento. Resolução Conjunta SEAPPA/SEAS/EMATER-RIO/

INEA nº 16 de 26 de novembro de 2024. Dispõe sobre critérios e procedimentos para o reconhecimento da transição agroecológica na unidade de produção e institui metodologia de classificação das fases de transição da produção agroecológica dos agroecossistemas, no âmbito do estado do Rio de Janeiro. **Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro:** parte 1, Rio de Janeiro, ano 50, n. 220, 27 nov. 2024.

RIO DE JANEIRO (Estado). Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade. **Nota Técnica SEAS/SEAPPA/EMATER-RIO nº 01/2024.** Instrumento de avaliação da transição agroecológica (IATA) e elaboração do plano de transição agroecológica em agroecossistemas no âmbito do estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2024. SEI-070001/002066/2024. Disponível em: https://www.rj.gov.br/seas/sites/default/files/arquivos_paginas/Nota%20Tecnica%20SEAS%20SEAPPA%20EMATER%2001_2024.pdf. Acesso em: 25 ago. 2025.

RIO DE JANEIRO (Estado). Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade. Bioeconomia. Rio de Janeiro, [2025]. Disponível em: <https://www.rj.gov.br/seas/node/1046>. Acesso em: 25 ago. 2025.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Inventário Florestal Nacional:** Rio de Janeiro: principais resultados. Brasília, DF: MMA, 2018. 111 p. (Série relatório técnico).

SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, U.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 76, n. 1, p. 39-58. Mar. 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2003.08.007>.

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, v. 241, p. 155-176, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>.

TARRÉ, R. M.; MACEDO, R.; CANTARUTTI, R. B.; REZENDE, C. P.; PEREIRA, J. M.; FERREIRA, E.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. The effect of the presence of a forage legume on nitrogen and carbon levels in soils under Brachiaria pastures in the Atlantic forest region of the South of Bahia, Brazil. **Plant and Soil**, v. 234, p. 15-26, 2001.

VIEIRA, S. A.; ALVES, L. F.; DUARTE-NETO, P. J.; MARTINS, S. C.; VEIGA, L. G.; SCARANELLO, M. A.; PICOLLO, M. C.; CAMARGO, B.; CARMO, J. B.; NETO, E. C.; SANTOS, F. A. M.; JOLY, C. A.; MARTINELLI, L. A. Stocks of carbon and nitrogen and partitioning between above- and belowground pools in the Brazilian coastal Atlantic Forest elevation range. **Ecology and Evolution**, v. 1, n. 3, p. 421-434, Nov. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/ece3.41>.

ZAIA, F. C.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; MOCO, M. K. S.; FONTES, A. G.; MACHADO, R. C. R.; BALIGAR, V. C. Carbon, nitrogen, organic phosphorus, microbial biomass and N mineralization in soils under cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. **Agroforest Syst**, v. 86, p. 197-212, 2012. DOI: [10.1007/s10457-012-9550-4](https://doi.org/10.1007/s10457-012-9550-4).

ZILLI, J. E.; BATISTA, J. N.; GUARESCHI, R. F.; ZITO, R. K. (ed.). **Avaliação de cultivos de soja no norte fluminense.** Seropédica, RJ: Embrapa Agrobiologia, 2022. 36 p. (Documentos, 323).

ZILLI, J. E.; POLIDORO, J. C.; ALVES, B. J. R.; LUMBRERAS, J. F. (ed.). **A produção da soja e do milho como um caminho para o desenvolvimento**

to do agronegócio da Região Norte Fluminense. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2021. 44 p. (Documentos, 221).

SOBRE OS AUTORES

Fabiano C. Balieiro

É Engenheiro Agrônomo, Mestre em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) e Doutor em Ciência do Solo, pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). É Pesquisador da Embrapa Solos desde 2007 e Professor Permanente do Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambientais e Florestas da UFRRJ (desde 2019). Atua nas áreas de ciclagem de nutrientes e dinâmica da matéria orgânica em florestas naturais e plantadas, e outros agroecossistemas. (fabiano.balieiro@embrapa.br).

Gustavo M. Vasques

É Engenheiro Florestal pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) e Doutor em Ciência do Solo pela Universidade da Flórida (UF). Possui experiência em ciência de dados, geofísica e geotecnologias aplicadas à ciência do solo. Gustavo é Pesquisador da Embrapa Solos desde 2011. (gustavo.vasques@embrapa.br).

Rachel B. Prado

É Doutora em ciências da engenharia ambiental, é pesquisadora da Embrapa há 22 anos. Possui experiência em projetos nacionais e internacionais, atuando nas temáticas de sustentabilidade de paisagens rurais, manejo de bacias hidrográficas, serviços ecossistêmicos e políticas correlatas. (rachel.prado@embrapa.br).

Telmo B. Silveira Filho

É Engenheiro Florestal, Mestre em Ciências Ambientais e Florestais pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) e Doutor em Ciências Ambientais e Florestais pela mesma universidade. Possui experiência em gestão florestal e atua como servidor público desde 2006. Superintendente de Mudanças do Clima e Florestas na Subsecretaria de Mudanças do Clima e Conservação da Biodiversidade da Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade do Rio de Janeiro (SEAS). (telmoborges.florestal@gmail.com).

Monise A. F. Magalhães

É Engenheira Florestal, Mestre em Ciências Ambientais e Florestais pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), com especialização em Unidades de Conservação (UCs). Possui experiência em gestão de projetos ambientais e florestais e políticas públicas. Atua na área há mais de 15 anos. Hoje trabalha para a Superintendência de Mudanças do Clima e Florestas na Subsecretaria de Mudanças do Clima e Conservação da Biodiversidade da Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade do Rio de Janeiro (SEAS). (monise.seas@gmail.com).

CAPÍTULO 5

POR UMA ESTRATÉGIA JURISDICIONAL DE CARBONO NO SOLO NO TERRITÓRIO ESTADUAL: AMPLIANDO A CESTA DE PRODUTOS SUSTENTÁVEIS NAS PROPRIEDADES RURAIS FLUMINENSES

Telmo B. Silveira Filho, Monise A. F. Magalhães, Fabiano C. Balieiro,
Aldair S. Medeiros



1. INTRODUÇÃO

Créditos de carbono no solo emergem não como uma bala de prata quanto a necessidade de solução para mitigação das emissões decorrentes das mudanças climáticas, mas devem ser entendidos como mais um produto na cesta de opções para os produtores rurais alinhados a uma agricultura conservacionista ou regenerativa, fomentando práticas agrícolas que interconectam a saúde ambiental, a saúde animal e a saúde humana – princípio da saúde única.

Embora ainda existam divergências metodológicas e distintos protocolos quanto aos princípios gerais de contabilização de créditos, se faz necessário coletar dados, construir informações e caminhos mensuráveis dessa contribuição ao manejo dos solos.

Sem integridade de informações e coleta de dados robustos, o mercado não se consolida nem se credibiliza para oferecer respostas efetivas à mitigação das emissões. Desta forma, essa contribuição do estado do Rio de Janeiro, em parceria com a Embrapa Solos, visa elucidar possíveis caminhos para estimativas do estoque inicial de carbono orgânico no solo, formas de modelagem e mensuração das mudanças desse estoque ao longo do tempo, sempre apoiada na ciência.

O conteúdo apresentado não tem a pretensão de ser uma proposta parcial, mas sim a base para a construção de políticas públicas que foque no potencial das áreas rurais, para além da produção de alimentos e demais *commodities* do agronegócio, materialize serviços ecossistêmicos emergentes do solo associados às práticas agrícolas sustentáveis.

A era das consequências climáticas reforça a necessidade de soluções que gerem múltiplos resultados e envolvam diversos setores econômicos. Diminuir o consumo de combustíveis fósseis é crucial; mudanças nas cadeias de geração de energia limpa são fundamentais; ampliar e conservar áreas florestais são centrais; e produzir alimentos com conservação de solo e da biodiversidade faz parte desse conjunto de soluções.

Parte da solução está certamente sob nossos pés. No último século, a conversão de ecossistemas naturais em agrícolas, aliada a práticas prejudiciais – como aração profunda e repetitiva, monocultivos extensivos, excesso de adubação química, superpastejo e a ausência de práticas mecânicas e vegetativas de conservação do solo – causou uma redução de 25% a 75% no estoque global de matéria orgânica do solo (Lal, 2011; Sanderman; Hengl; Fiske, 2017).

Dessa forma, políticas públicas que ampliam práticas agrícolas sustentáveis podem reverter essa tendência. Entre elas, destacam-se o uso de plantas de cobertura e adubos verdes, a redução do revolvimento do solo, o controle do pastejo excessivo, o uso eficiente de nutrientes e a diversificação dos sistemas de produção (Balieiro *et al.*, 2024). Tais métodos demonstram potencial para recuperar os estoques de matéria orgânica do solo (Dupla *et al.*, 2024).

2. QUANTIFICAÇÃO DE CARBONO ORGÂNICO NO SOLO

Um dos incentivos à adoção dessas práticas é o crédito de carbono agrícola do solo (em inglês, *Soil Carbon Credit* – SCC). Os SCCs são títulos negociáveis que permitem aos agricultores, que implementem práticas de sequestro de carbono, vendam suas reduções de emissões a organizações interessadas em compensar sua pegada de CO₂, ainda que pouco disseminados ou discutidos no Brasil.

Essas transações ocorrem atualmente em mercados voluntários de carbono, regulados por entidades públicas ou privadas. Em 2022, o volume total de negociações de SCCs no mundo foi de 5,1 MtCO₂e, movimentando cerca de US\$ 50,1 milhões (Mikolajczyk; Bravo, 2023). Especialistas projetam que esse mercado poderá atingir US\$ 10 a 40 bilhões até 2030 (Porsborg-Smith *et al.*, 2023).

Apartir da Lei Federal nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024, que institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), torna-se necessária a construção de protocolos de mensuração, relato e verificação (MRV), considerando as características ecológicas e de práticas de manejo presentes no país, além da manutenção de uma matriz de indicadores de permanência e adicionalidade para futura geração de créditos e sua comparação.

A falta de uma padronização, somada às diversas práticas agrícolas, dificultam assegurar o monitoramento e a avaliação dos benefícios climáticos reais e líquidos. Um sistema nacional ou subnacional de MRV, estabelecido em regulamentos claros e disponíveis ao público, incluindo garantias de controle de qualidade, baseado em acordos institucionais e internacionais, facilitaria a prestação de contas de forma adequada ao contexto nacional (Wilkes; Tennigkeit; Solymosi, 2013).

O que se apresenta nesta publicação para quantificação do carbono orgânico do solo baseia-se nas informações e nas atuais práticas da ciência do solo, desde amostragem de solo dentro de uma grade amostral regional, seguindo padrões do Inventário Florestal Nacional no estado do Rio de Janeiro (IFN/RJ), até a combinação de modelagens de processos e sensoriamento remoto. Demonstra-se que é possível, nacionalmente, desenvolver e implementar métodos robustos de dados e informações para contribuição do carbono estocado no solo.

As práticas agrícolas que visam aumentar o carbono orgânico do solo podem trazer diversos co-benefícios, como a melhoria da qualidade da água, o aumento de produtividade e uma maior resiliência das colheitas (Chaer *et al.*, 2023; Balieiro *et al.*, 2024; Cavalieri-Polizeli *et al.*, 2024). Portanto, mesmo havendo incertezas quanto ao potencial de mitigação climática, os esforços para construir carbono no solo continuam sendo valiosos.

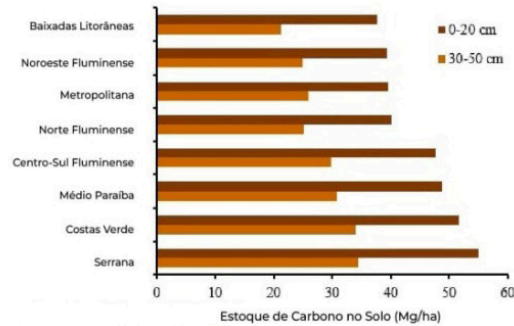
De forma inovadora, o modelo conceitual neste estudo permite o uso de unidades de monitoramento jurisdicional e facilita a contabilidade regional de carbono, minimizando os custos de monitoramento de projetos para os agricultores e fomentando ações em maior escala de práticas agrícolas que reduzam emissões e armazenem carbono (Figura 1).



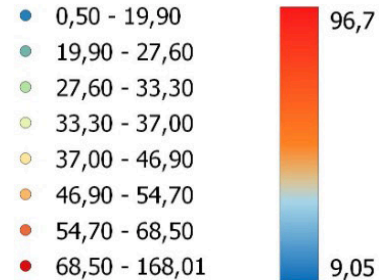
FIGURA 1. Estoque de carbono no solo no território do estado do Rio de Janeiro

Fonte: Elaborada pelos autores (mais informações disponíveis no Capítulo 2).

Estoque de carbono do solo no estado do Rio de Janeiro



Estoque do carbono do solo (Mg/ha)



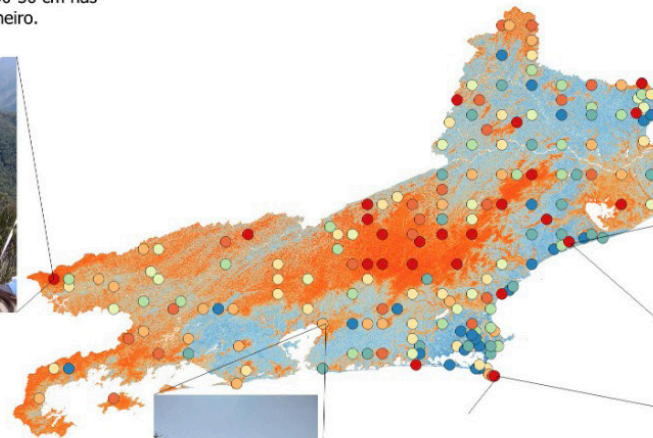
Os estoques de carbono do solo no ERJ somam aproximadamente 189 milhões de toneladas (189 Tg; 1 Tg = 1012 g) a 0-20 cm e aproximadamente 119 milhões de toneladas (119 Tg) a 30-50 cm, respectivamente.

Os maiores estoques de C no solo no ERJ estão na região montanhosa e de alta altitude, nas Serras do Mar (nas regiões Serrana e Costa Verde) e da Mantiqueira (na região do Médio Paraíba), bem como nos manguezais próximos à costa, principalmente no delta do Rio Paraíba do Sul, na divisa leste do estado, na região Norte Fluminense.

Estoque de carbono do solo médio a 0-20 e 30-50 cm nas mesorregiões do estado do Rio de Janeiro.



Campo de Altitude



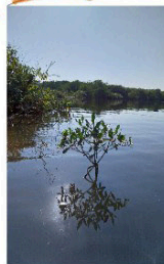
Vegetação de Restinga



QR Code para a profundidade de 0 - 20 cm.



QR Code para a profundidade de 30 - 50 cm



Vegetação de Manguezal



Floresta Ombrófila Densa Submontana

3. PROJETO JURISDICIONAL DE INCREMENTO DO CARBONO NO SOLO

Este modelo de avaliação regional do carbono no solo, vinculado às políticas que promovem sistemas agroalimentares sustentáveis, permitem ampliar as possibilidades de acréscimo de renda aos produtores e produtoras rurais. Por meio da Política Estadual de Desenvolvimento Rural Sustentável, de Agroecologia e Produção Orgânica no estado do Rio de Janeiro (Lei Estadual nº 8.625/2019), alinhada à Política de Pagamento por Serviços Ambientais (Lei Federal nº 14.119/2021), aplicada em conjunto com o Instrumento de Avaliação da Transição Agroecológica (IATA)¹ de agroecossistemas e com a consolidação do SBCE, o país fortalece sua posição como grande produtor de alimentos e como protagonista na geração de créditos de carbono oriundos de florestas e solos, potencializando uma nova *commoditie* ambiental.

Porém, tais ferramentas de MRV, assim como os modelos de contratos e pagamentos, devem observar a lógica produtiva e social dos pequenos e médios produtores rurais. Sem políticas públicas consistentes, incentivos econômicos diretamente acessíveis ao agricultor, assistência técnica, extensão rural e monitoramento contínuo, pouco se avançará no aproveitamento desse grande potencial.

O Projeto Jurisdicional de incremento de carbono no solo deve ter como objetivo central estruturar diretrizes e instrumentos técnicos e financeiros que possibilitem o reconhecimento do carbono no solo como ativo ambiental e

econômico, a partir da geração de créditos para o mercado de carbono, mas especialmente no âmbito do Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), contribuindo para a remoção de C da atmosfera, a regeneração ambiental e o desenvolvimento sustentável das propriedades rurais fluminenses.

Estudos técnicos demonstram que práticas como o reflorestamento e os sistemas agroflorestais (SAFs) são eficazes no aumento do carbono orgânico no solo (COS). Resultados apontam ganhos de até 49% no estoque de COS em áreas reflorestadas (Macedo *et al.*, 2008) e de até 24% em SAFs, quando comparadas a áreas de pastagens convencionais (Matos *et al.*, 2022). Tais dados evidenciam a viabilidade ambiental e o potencial econômico dessas estratégias.

O estado do Rio de Janeiro, com iniciativas já consolidadas, como o Projeto Conexão Mata Atlântica², mostra-se preparado para ampliar sua atuação nesse mercado emergente, promovendo ganhos ambientais, sociais e econômicos. O desenvolvimento de bases tecnológicas voltadas ao monitoramento de carbono no solo constitui uma das recomendações estratégicas do Projeto Jurisdicional.

Conclui-se que a criação de um mercado de carbono no solo é não apenas viável, mas também desejável, desde que haja articulação entre políticas públicas, financiamento climático, capacitação técnica e certificação com métricas nacionais e chancela internacional.

¹ Resolução Conjunta SEAPPA/SEAS/EMATER-RIO/INEA nº 16/2024 e Nota Técnica SEAS/SEAPPA/EMATER-RIO nº 01/2024.

² Conexão Mata Atlântica, saiba mais em: <https://mataatlantica.inea.rj.gov.br/inicio> e <https://conexaomataatlantica.mctic.gov.br/cma/portal/>.

As Soluções baseadas na Natureza (SbN) englobam diversas abordagens que utilizam os ecossistemas como base para enfrentar desafios socioambientais. Essas soluções apresentam elevado potencial para restaurar, preservar e aprimorar os ecossistemas, além de contribuírem significativamente para a mitigação das mudanças climáticas (Maia *et al.*, 2022). Entre as ações de mitigação relacionadas às SbN, o solo desempenha um papel crucial, pois é o maior reservatório de carbono da superfície terrestre, veja capítulo 2 (*Mapas de Estoque de Carbono do Solo para o Estado do Rio de Janeiro: subsídios para oportunidades em mercado de carbono*) (Paustian *et al.*, 2016), tornando-se um elemento-chave na construção de paisagem resilientes no estado.

A elaboração de um Projeto Jurisdicional voltado à geração de créditos de carbono no solo no território fluminense busca definir premissas e diretrizes que fundamentem seu potencial como ativo econômico no mercado de carbono. Tal proposta integra o manejo agrícola e demais atividades de lavoura-pecuária-floresta e restauração ecológica. Esse processo busca viabilizar a comercialização desses créditos e fortalecer a agropecuária do estado, a partir do empoderamento dos agricultores das propriedades rurais no estado do Rio de Janeiro.

4. CARBONO NO SOLO COMO ATIVO AMBIENTAL

A comercialização de créditos de carbono e o PSA são mecanismos financeiros voltados à valorização da conservação ambiental, mas possuem diferenças fundamentais em sua estrutura e objetivos (Munhoz; Vargas, 2022).

A comercialização de créditos de carbono refere-se à geração e venda de certificados que representam a redução ou remoção de gases de efeito estufa (GEE) da atmosfera, sendo um mercado orientado para a compensação de emissões (Souza, 2022). Esses créditos podem ser adquiridos voluntariamente por empresas e indivíduos que desejam compensar suas emissões ou podem ser usados em mercados regulados como forma de cumprir metas estabelecidas por políticas climáticas (Brasil, 2024). O processo de certificação dos créditos de carbono segue padrões internacionais e requer validação por auditores independentes, a fim de garantir a integridade ambiental das reduções ou remoções das emissões de GEE (Souza, 2022).

Em relação ao PSA, este é um mecanismo financeiro destinado a remunerar produtores rurais, agricultores familiares e assentados, assim como comunidades tradicionais e povos indígenas, pelos serviços ambientais prestados, que geram benefícios para toda a sociedade (WRI Brasil, 2021). Esses serviços podem ocorrer por meio da conservação de vegetação nativa ou da restauração de áreas e florestas degradadas, visando à melhoria da qualidade da água, à remoção de carbono ou ainda à conservação da biodiversidade, a qual garante benefícios para a produção agrícola através da polinização, por exemplo (Prado *et al.*, 2016; WRI Brasil, 2021).

O sequestro de carbono no solo representa um serviço ecossistêmico valioso, que pode ser remunerado por meio de programas de PSA, independentemente da sua comercialização no mercado tradicional de créditos de carbono. Dessa forma, é essencial adotar uma abordagem que contemple ambas as vias – a geração de créditos de carbono e a valorização

do carbono no solo como ativo econômico para PSA – garantindo múltiplos incentivos para a conservação e o manejo sustentável do solo e em especial aos produtores rurais (Prado *et al.*, 2022).

Diferente da comercialização de créditos de carbono, que está focada na compensação das emissões em mercados ainda “fechados” e, também, na mitigação das mudanças climáticas, o PSA pode abranger diversas externalidades ambientais positivas, com pagamentos que podem ser realizados em dinheiro, bens ou serviços (Prado *et al.*, 2016; Prado *et al.*, 2022; Souza, 2022). Além disso, o PSA pode ser financiado tanto pelo setor privado quanto por políticas públicas, buscando incentivar práticas sustentáveis e garantir benefícios ambientais de longo prazo.

Em outras palavras, a comercialização de créditos de carbono ocorre em um mercado estruturado, no qual créditos certificados são vendidos para compensar emissões, podendo ser regulado ou voluntário. O PSA, ao considerar o carbono no solo como ativo ambiental, não depende necessariamente de um mercado formal, sendo frequentemente utilizado como política pública ou incentivo privado para a conservação ambiental. Enquanto o mercado de carbono foca na compensação de emissões, o PSA busca incentivar práticas sustentáveis por meio de pagamentos diretos, com externalidades facilmente reconhecíveis pela sociedade (Munhoz; Vargas, 2022; Souza, 2022).

A agricultura regenerativa ou conservacionista, vinculada a uma estratégia jurisdicional de carbono, exige coordenação articulada, pois tem no agricultor seu maior protagonista. Assim como a restauração em larga escala no território do estado do Rio de Janeiro só será possível com a participação dos agricultores e proprietários e proprietárias rurais, que são os principais gestores das terras e responsáveis pela

manutenção dos ecossistemas, assumindo riscos inerentes a essas atividades. Isso significa que se deve encontrar formas de financiar a regeneração e a restauração da Mata Atlântica, em diferentes escalas, fomentando as boas práticas de manejo sustentável do solo, ao mesmo tempo em que nos alinhamos com metas ecológicas estaduais mais amplas voltadas à conservação de biodiversidade e à segurança hídrica.

Garantir que o agricultor fluminense seja reconhecido como provedor de bens e serviços para a sociedade rural e urbana do estado é objetivo da Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade (SEAS) e de demais órgãos do estado. Os primeiros passos estão sendo dados a partir de agendas e soluções construídas de forma compartilhada – como demonstra esta publicação.

O IATA, em implementação, permitirá ao estado monitorar sistemas de produção em diferentes macrorregiões, bem como compreender a evolução dos seus solos. Laboratório de análise de C, utilizando métodos baseados em química verde, e banco de dados destinados ao armazenamento dessas informações darão suporte às interpretações de tendências de acúmulo ou perda de C dos agroecossistemas fluminenses, subsidiando políticas de pagamento por serviços ambientais voltados aos agricultores.

Os primeiros passos foram dados para construção de uma política pública que almeje a conservação da nossa Mata Atlântica e o fortalecimento de uma agricultura regenerativa, promovendo qualidade de vida nas áreas rurais, florestais e das cidades no território estadual.

REFERÊNCIAS

BARBIEIRO, F. C.; PEREIRA, H. S.; LOYOLA, R.; TONIN, A. M.; AUGUSTO, D. C. C.; MELO, F. P. L.; MAIA, J. L. S.; UGUEN, K.; MONTEIRO, M. M.; VIEIRA, R. R. S.; BARBIERI, R. L.; ALFAIA, S. S. Conciliando a agricultura e a manutenção da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos. *In*: PRADO, R. B.; OVERBECK, G. E.; GRACO-ROZA, C.; MOREIRA, R. A.; MONTEIRO, M. M.; DUARTE, G. T. (org.). **Relatório temático sobre agricultura, biodiversidade e serviços ecossistêmicos**. 1. ed. Campinas, SP: Ed. dos Autores, 2024. p. 99-131. (Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos).

Brasil – Presidência da República. Lei Nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE); e altera as Leis nºs 12.187, de 29 de dezembro de 2009, 12.651, de 25 de maio de 2012 (Código Florestal), 6.385, de 7 de dezembro de 1976 (Lei da Comissão de Valores Mobiliários), e 6.015, de 31 de dezembro de 1973 (Lei de Registros Públicos). 2024. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-15042-11-dezembro-2024-796690-publicacaooriginal-173745-pl.html>. Acesso em: 03 de fev. de 2025.

BRASIL. Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais; e altera as Leis nos 8.212, de 24 de julho de 1991, 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973, para adequá-las à nova política. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 7, 14 jan. 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Lei/L14119.htm. Acesso em: 15 out. 2025.

CAVALIERI-POLIZEL, K. M. V.; GUEDES FILHO, O.; ROMANOSKI, V. S.; RUTHES, B. E. S.; CALÁBRIA, Z. P.; OLIVEIRA, L. B. Conservative farming systems and their effects on soil organic carbon and structural quality. **Soil and Tillage Research**, v. 242, Oct. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106143>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198724001442?via%3Dihub>. Acesso em: 04 set. 2025.

CHAER, G. M.; MENDES, I. C.; DANTAS, O. D.; MALAQUIAS, J. V.; REIS JUNIOR, F. B.; OLIVEIRA, M. I. L. Evaluating C trends in clayey Cerrado Oxisols using a four-quadrant model based on specific arylsulfatase and β -glucosidase activities. **Applied Soil Ecology**, v. 183, Mar. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104742>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139322003584>. Acesso em: 04 set. 2025..

DUPLA, X.; BONVIN, E.; LUGASSY, L.; VERRECCHIA, E. BAVEYE, P. C.; GRAND, S.; BOIVIN, P. Are soil carbon credits empty promises? Shortcomings of current soil carbon quantification methodologies and improvement avenues. **Soil Use Management**, v. 40, n. 3, p. 1-17, Jul. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.13092>. Disponível em: <https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/sum.13092>. Acesso em: 04 set. 2025..

LAL, R. Sequestering carbon in soils of agro-ecosystems. **Food Policy**, v. 36, supl. 1, p. S33-S39, Jan. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.12.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306919210001454>. Acesso em: 04 set. 2025..

MACEDO, M. O.; RESENDE, A. S.; GARCIA, P. C.; BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; URQUIAGA, S.; CAMPELLO, E. F. C.; FRANCO, A. A. Changes in soil C and N stocks and nutrient dynamics 13 years after recovery of degraded land using leguminous nitrogen-fixing trees. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 5-6, p.1516-1524, Apr. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.11.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112707008742>. Acesso em: 04 set. 2025..

MAIA, S. M. F.; MEDEIROS, A. S.; SANTOS, T. C.; LYRA, G. B.; LAL, R.; ASSAD, E. D.; CERRI, C. E. P. Potential of no-till agriculture as a nature-based solution for climate-change mitigation in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 220, Jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105368>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016719872200054X>. Acesso em: 04 set. 2025..

MATOS, P. S.; CHERUBIN, M. R.; DAMIAN, J. M.; ROCHA, F. I.; PEREIRA, M. G.; ZONTA, E. Short term effects of agroforestry systems on soil health in Southeastern Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 96, p. 897-908, 17 Jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00749-4>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10457-022-00749-4>. Acesso em: 04 set. 2025..

Mikolajczyk, S.; Bravo, F. **Voluntary carbon market**: 2022 overview. [S. l.]: Climate Focus, 2023. 12 p.

MUNHOZ, L.; VARGAS, D. **Adicionalidade de serviços ambientais na perspectiva jurídica**: o pagamento por serviços ambientais em áreas legalmente protegidas. São Paulo: FGV, 2022. 22 p.

PAUSTIAN, K.; LEHMANN, J.; OGLE, S. M.; REAY, D.; ROBERTSON, G. P.; SMITH, P. Climate-smart soils. **Nature Climate Change**, v. 532, p. 49-57, 06 Apr. 2016.

PEROSA, B. B.; GURGEL, A. C.; VICENTE, L. F.; VICENTE, A. K.; SPINELLI-ARAUJO, L. **Agricultura de baixo carbono no Brasil**: potencialidade e desafios para construção de um sistema MRV. *In*: ENCONTRO NACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA ECOLÓGICA, 13., 2019, Campinas, SP. Anais [...]. Campinas, SP: Embrapa, 2019. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1116505/1/VicenteAgriculturaCarbono2019.pdf>. Acesso em: 15 out. 2025.

PORSBORG-SMITH, A.; NIELSEN, J.; OWOLANBI, B.; CLAYTON, C. The voluntary carbon market is thriving. **BCG global**, Boston, 19 Jan. 2023. Disponível em: <https://www.bcg.com/publications/2023/why-the-voluntary-carbon-market-is-thriving>. Acesso em: 13 out. 2025.

PRADO, R. B.; FIDALGO, E. C. C.; MONTEIRO, J. M. G.; SCHULER, A. E.; VEZZANI, F. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, A. P.; VIANA, J. H. M.; PEDREIRA, B. C. C. G.; MENDES, I. C.; REATTO, A.; PARRON, L. M.; CLEMENTE, E. P.; DONAGEMMA, G. K.; TURETTA, A. P. D.; SIMÕES, M. Current overview and potential applications of the soil ecosystem services approach in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1021-1038, Sept. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900002>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/dRBxzpS5VQ7cTbTbVZ-znD8m/?lang=en>. Acesso em: 04 set. 2025..

PRADO, R. B.; FIDALGO, E. C. C.; PARRON, L. M.; TURETTA, A. P. D.; BALIEIRO, F. C. Oportunidades e desafios relacionados aos serviços ecossistêmicos de solo e água na paisagem rural. **Cadernos de Ciência &**

Tecnologia, v. 39, n. 2, 2022. DOI: <https://doi.org/10.35977/0104-1096.cct2022.v39.26955>. Disponível em: <https://apct.sede.embrapa.br/cct/article/view/26955>. Acesso em: 04 set. 2025..

RIO DE JANEIRO (Estado). Lei nº 8.625, de 18 de novembro de 2019. Dispõe sobre a Política Estadual de Desenvolvimento Rural Sustentável, de Agroecologia e de Produção Orgânica no Estado do Rio de Janeiro. **Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro**: parte 1, Rio de Janeiro, ano 55, n. 219, 19 nov. 2019. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br/legislacao/782174786/lei-8625-19-rio-de-janeiro-rj>. Acesso em: 15 out. 2025.

SANDERMAN, J.; HENGL, T.; FISKE, G. J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 114, n. 36, p. 9575-9580, 21 Aug. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1706103114>. Acesso em: 04 set. 2025..

SOUZA, A. R. P. O que há em comum entre o PSA, os créditos de carbono, a CPR verde e afins?. **Agronanalysis**, v. 42, n. 12, p. 20-21, dez. 2022.

WILKES, A.; TENNIGKEIT, T.; SOLYMOSI, K. **Planificación nacional para la mitigación de GEI en la agricultura**: documento de orientación. Rome: MICCA: FAO, 2013. 34 p. (Serie de mitigación de cambio climático en la agricultura; 8).

WORLD RESOURCES INSTITUTE BRASIL (2021). Como funciona o pagamento por serviços ambientais a quem protege e restaura florestas. 14 jun. 2021. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/como-funciona-o-pagamento-por-servicos-ambientais-quem-protege-e-restaura-florestas>. Acesso em: 15 out. 2025.

SOBRE OS AUTORES

Telmo Borges Silveira Filho

É Engenheiro Florestal, Mestre em Ciências Ambientais e Florestais pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) e Doutor em Ciências Ambientais e Florestais pela mesma universidade. Possui experiência em gestão florestal e atua como servidor público desde 2006. Superintendente de Mudanças do Clima e Florestas na Subsecretaria de Mudanças do Clima e Conservação da Biodiversidade da Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade do Rio de Janeiro (SEAS). (telmoborges.florestal@gmail.com).

Monise A. F. Magalhães

É Engenheira Florestal, Mestre em Ciências Ambientais e Florestais pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), com especialização em Unidades de Conservação (UCs). Possui experiência em gestão de projetos ambientais e florestais e políticas públicas. Atua na área há mais de 15 anos. Hoje trabalha para a Superintendência de Mudanças do Clima e Florestas na Subsecretaria de Mudanças do Clima e Conservação da Biodiversidade da Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade do Rio de Janeiro (SEAS). (monise.seas@gmail.com).

Fabiano C. Balieiro

É Engenheiro Agrônomo, Mestre em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) e Doutor em Ciência do Solo, pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). É Pesquisador da Embrapa Solos desde 2007 e Professor Permanente do Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambientais e Florestas da UFRRJ (desde 2019). Atua nas áreas de ciclagem de nutrientes e dinâmica da matéria

orgânica em florestas naturais e plantadas, e outros agroecossistemas.
(fabiano.balieiro@embrapa.br).

Aldair S. Medeiros

É Licenciado em Ciências Agrárias pela Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), Mestre em Horticultura Tropical pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Doutor em Agronomia (Produção Vegetal) pela Universidade Federal de Alagoas (Ufal), Pós-Doutor em Ciência do Solo na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (USP) e em Biodiversidade e Biotecnologia pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA). Tem experiência em Agronomia (Fitotecnia e Ciência do Solo). É Professor de Graduação e Pós-Graduação no Campus Professora Cinobelina Elvas da Universidade Federal do Piauí (UFPI) (aldair.medeiros@ufpi.edu.br).



