

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).

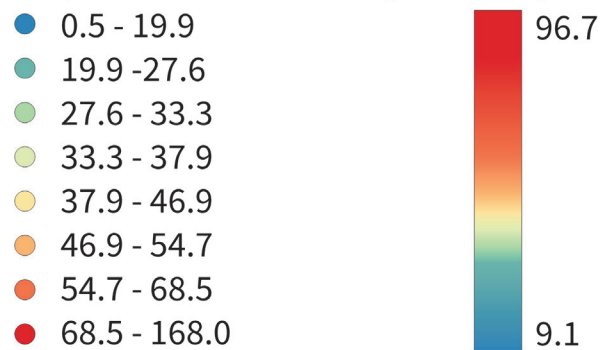
As covariáveis geoespaciais foram processadas no R, ArcGIS (ESRI, Redlands, EUA) e SAGA GIS (Conrad *et al.*, 2015). As variáveis climáticas foram interpoladas por krigagem ordinária a partir de 54 estações climáticas localizadas a uma distância de até 100 km da fronteira do estado. O modelo digital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

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



Os pontos mostram os valores de estoque de carbono do solo observados no campo em 188 pontos amostrais do Inventário Florestal Nacional.

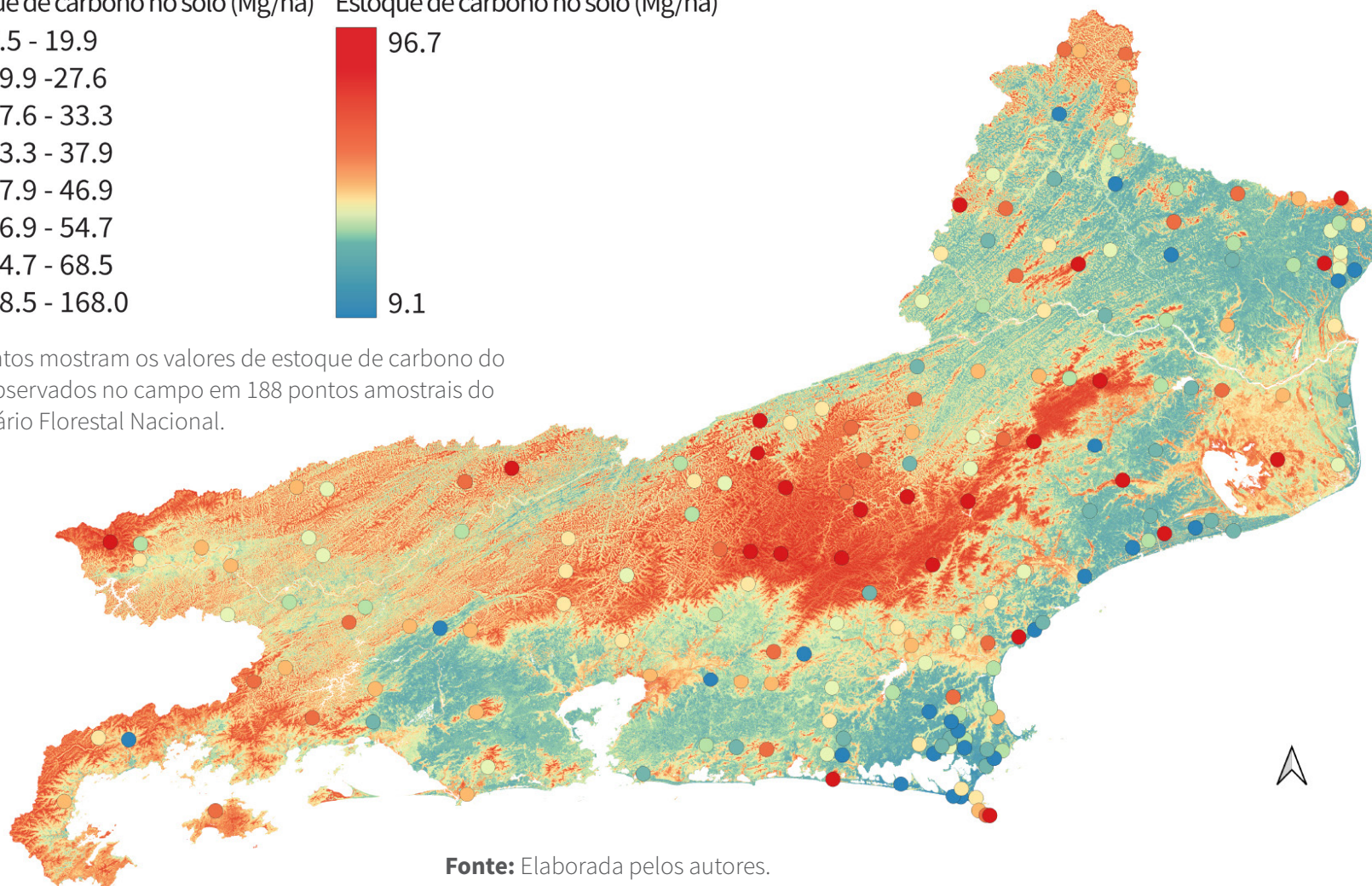
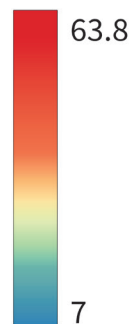


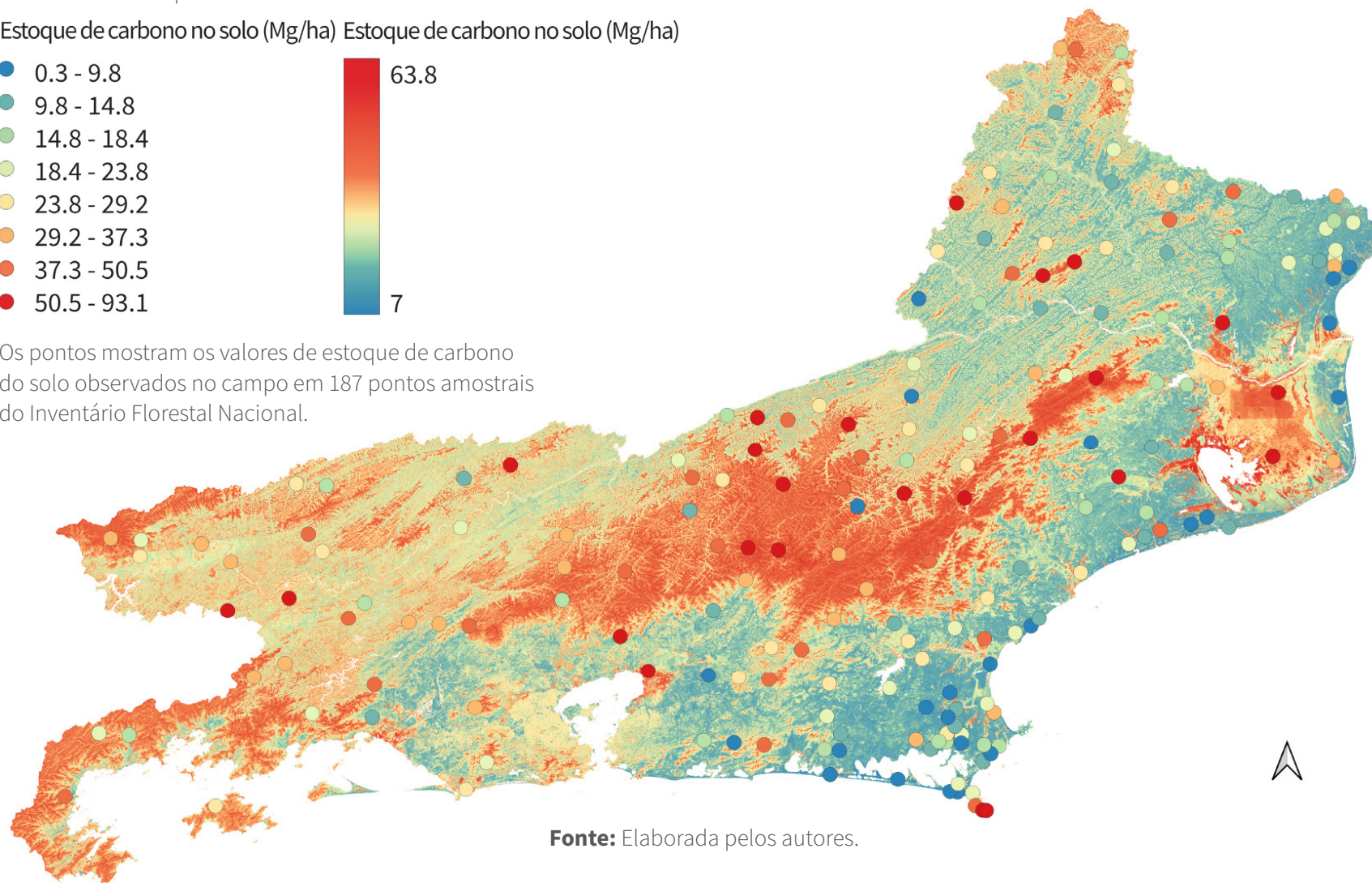
FIGURA 2. Estoque de carbono do solo de 30 a 50 cm no estado do Rio de Janeiro

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.

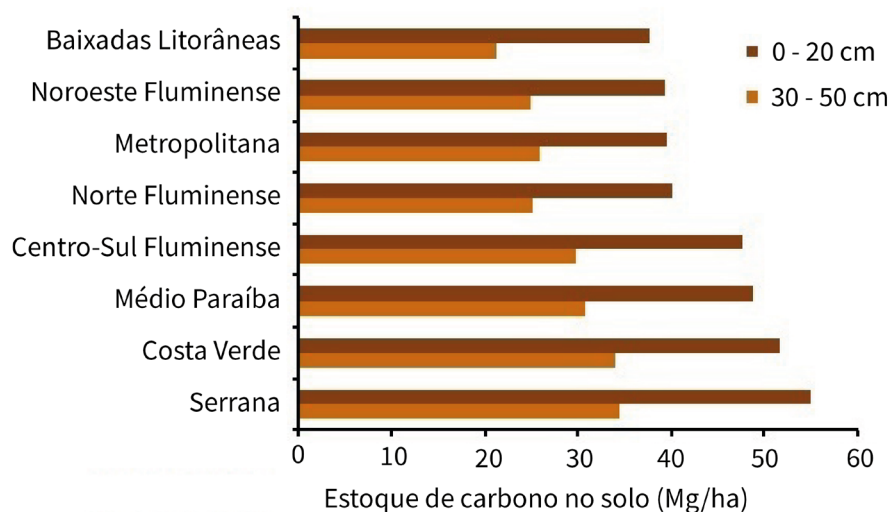


Fonte: Elaborada pelos autores.

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**

