MODELAGEM DE CARBONO ORGÂNICO DO SOLO EM UMA REGIÃO DO CERRADO

Samuel Gameiro[1], Sara Fernandes Martins dos Santos[2], Manuel Eduardo Ferreira[1], Luis Fernando Chimelo Ruiz[3], Victor Fernandes Nascimento[4] Gillian L. Galford[5,6], Mojtaba Zeraatpisheh[5,6], Fabio Daniel Trinco[7], Rosane Garcia Collevatti[1,8]*

[1]Remote Sensing and GIS Lab (LAPIG), Environmental Science Graduate Program, Federal University of Goiás, Goiânia, Brazil, samuel_gameiro@outlook.com, manuel@ufg.br; [2]Remote Sensing and GIS Lab (LAPIG), Environmental Science Undergraduate, Federal University of Goiás, Goiânia, Brazil, sara_fernandes@discente.ufg.br ; [3] Research and Development (R&D) at SensorGreen, Brazil, ruiz.ch@gmail.com; [4] Engineering, Modelling, and Applied Social Sciences Center, Federal University of ABC, Santo André, Brazil, victorfnascimento@gmail.com; [5] Rubenstein School of Environment and Natural Resources, University of Vermont, Burlington, VT 05405, USA, gillian.galford@uvm.edu, mojtaba.zeraatpisheh@uvm.edu; [6]. Gund Institute for Environment, University of Vermont, Burlington, VT 05405, USA; [7] Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Buenos Aires, Argentina, trinco.fabio@inta.gob.ar; 8 Genetics & Biodiversity Laboratory, Institute of Biological Sciences, Federal University of Goiás, Goiânia, GO, Brazil, rgcollevatti@gmail.com.

RESUMO

A quantificação do carbono orgânico do solo (COS) é um desafio devido à sua alta variabilidade no espaço e no tempo, entretanto, são de extrema importância para sustentabilidade ambiental e para que sejam tomadas medidas de gestão para mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Este estudo foi conduzido utilizando 132 amostras para quantificar o COS em uma região do Cerrado, aplicando modelagem. O algoritmo Boruta foi empregado para determinar a importância de 49 variáveis no processo de modelagem, destacando que as variáveis climáticas tiveram maior relevância. Os resultados mostraram que áreas de vegetação nativa e de savana apresentam os maiores estoques de COS, enquanto áreas destinadas à agricultura são as que apresentaram menores níveis. A pesquisa enfatiza a importância da conservação do Cerrado, ressaltando que o uso agrícola reduz significativamente os estoques de carbono, impactando negativamente o equilíbrio ambiental e o ciclo do carbono.

Palavras-chave — Sequestro de Carbono, Mudanças Climáticas, Efeito Estufa, Random Forest, Carbono Orgânico.

ABSTRACT

Quantifying soil organic carbon (SOC) is a challenge due to its high variability in space and time, but it is extremely important for environmental sustainability and for management measures to mitigate the effects of climate change. This study was conducted using 132 samples to quantify SOC in a Cerrado region, applying modeling. The Boruta algorithm was used to determine the importance of 49 variables in the modeling process, highlighting that climate variables had greater relevance. The results showed that areas of native vegetation and savannah had the highest COS stocks, while areas used for agriculture had the lowest levels. The research emphasizes the importance of conserving the Cerrado, pointing out that agricultural use significantly reduces carbon stocks, negatively impacting the environmental balance and the carbon cycle.

Keywords — *Carbon Sequestration, Climate Change, Greenhouse Effect, Random Forest, Organic Carbon.*

1. INTRODUÇÃO

O Cerrado é o segundo maior bioma do Brasil e se destaca pela alta diversidade de vegetação, formando um mosaico de paisagens. Contudo, a rápida transformação para áreas agrícolas e pastagens levou à perda de aproximadamente 50% de sua vegetação natural até 2021 [1]. A conversão em larga escala da vegetação nativa para esses usos tem gerado profundos impactos nos ecossistemas locais, afetando diretamente a biodiversidade e o ciclo do carbono [2].

A substituição da vegetação nativa por atividades antrópicas exerce influência sobre o armazenamento e as emissões de carbono, tornando o Cerrado uma região-chave para estudos das dinâmicas do carbono orgânico do solo (COS), especialmente no contexto das mudanças no uso da terra (LULC). O COS desempenha um papel central no ciclo global do carbono, influenciando diretamente os processos climáticos em escala mundial [3]. O potencial de sequestro de COS é influenciado pelo tipo de uso e manejo do solo e, quando o solo é manejado de forma sustentável, pode-se aumentar esse sequestro de carbono [4][5], auxiliando na compensação das emissões provenientes de outros setores.

A quantificação do COS é um desafio devido à sua alta variabilidade no espaço e no tempo. Diferentes tipos de uso do solo, propriedades do solo e fatores ambientais, como temperatura, umidade e cobertura vegetal, influenciam a quantidade de carbono armazenada [6]. Os métodos diretos de quantificação de COS possuem alta limitação, principalmente espacial. Nesse sentido, tecnologias de sensoriamento remoto, como o LiDAR e a espectroscopia, têm sido cada vez mais utilizadas para avaliar o conteúdo de COS em grandes áreas com maior precisão [7]

Aliadas aos dados de sensoriamento remoto, as técnicas de modelagem oferecem uma alternativa valiosa às medições diretas, permitindo estimar os estoques de COS em grandes regiões com base em variáveis ambientais, climáticas e de uso do solo [8]. Esses modelos geralmente consideram variáveis como textura do solo, dados climáticos, histórico de uso do solo e tipo de vegetação para estimar as entradas e saídas de carbono. Portanto, os dados sobre COS são essenciais para informar políticas relacionadas a créditos de carbono, manejo do solo e estratégias de adaptação climática [9]. No Brasil, onde o Cerrado desempenha um papel significativo tanto na produção agrícola quanto no armazenamento de carbono, esses dados são cruciais para equilibrar o desenvolvimento econômico com a sustentabilidade ambiental.

Com isso, este estudo tem como objetivo modelar o COS em diferentes tipos de uso e cobertura da terra no bioma Cerrado, utilizando modelos de aprendizagem de máquina e distintas variaveis ambientais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo corresponde a uma poligonal de cerca de 100 km x 100 km, situada a leste da cidade de Goiânia, abrangendo diversos municípios (**Figura 01**). Nela estão localizadas duas unidades de conservação, a Floresta Nacional de Silvânia (FLONA?) e o Parque Estadual Altamiro de Moura Pacheco (PEAMP?). A área foi definida como extensão do Programa de Pesquisa Ecológica de Longa Duração que tinha como objetivo realizar o mapeamento atualizado do uso e ocupação da terra e serviços ecossistêmicos.

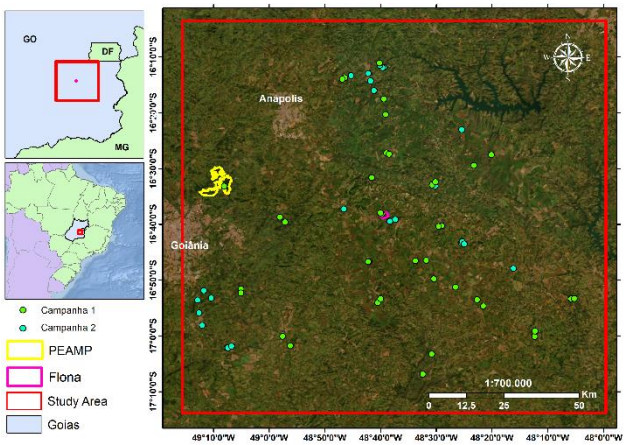


Figura 01. Mapa de localização da área de estudo e dos pontos de coleta de solo

O processo de amostragem seguiu três etapas principais e incluiu duas campanhas de campo. Nas quais amostras de solo foram coletadas em áreas representativas de diferentes tipos de uso e cobertura, como vegetação natural, pastagem, agricultura e savana. No total, foram coletadas 65 amostras de solo em pontos distribuídos aleatoriamente pela região (**Figura 01**). Após a coleta, as amostras foram enviadas para laboratórios especializados, onde foram submetidas a análises técnicas para quantificação do carbono orgânico e caracterização granulométrica do solo.

Para ampliar a robustez dos dados e garantir maior consistência nas análises, foram também incorporadas 67 amostras adicionais obtidas da plataforma *SoilGrids*, que disponibiliza informações globais sobre solos. Com isso, o conjunto de pontos amostrais na camada de 0-30 cm de profundidade foi ampliado para 132, fortalecendo a base de dados para modelagem e análises subsequentes.

Para o desenvolvimento do modelo de COS, foram extraídas variáveis ambientais e climáticas abrangendo o período de 2015 a 2023, com resolução temporal semestral. Essa escolha permitiu uma análise detalhada das variações sazonais, tanto em períodos chuvosos quanto secos, e suas influências sobre a vegetação e o solo, garantindo uma caracterização robusta das dinâmicas temporais.

A coleta de variáveis foi realizada principalmente utilizando o *Google Earth Engine* (GEE) e o *software* SAGA-GIS (**Figura 02**). No GEE, foram gerados 16 índices espectrais a partir de imagens do mosaico Planet (bandas RGB e NIR) e imagens Sentinel-2. Além disso, 13 variáveis climáticas extraídas do banco de dados TerraClimate, contendo dados mensais de temperatura, precipitação, umidade e balanço hídrico, foram incluídas para uma análise abrangente das condições climáticas da área de estudo.

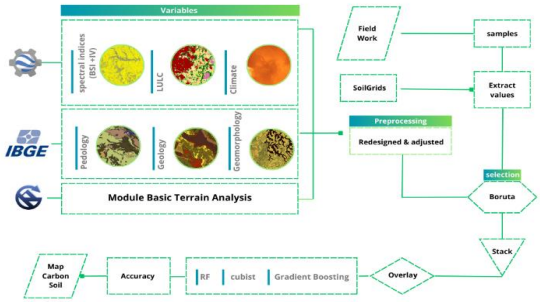


Figura 02. Fluxograma das etapas de trabalho

Adicionalmente, foram geradas 16 variáveis morfométricas a partir do modelo digital de elevação SRTM utilizando o *Module Basic Terrain Analysis* no SAGA-GIS, o que permitiu um detalhamento geomorfológico essencial para a modelagem. Esses dados foram complementados com informações sobre pedologia, geologia e geomorfologia obtidas junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), contribuindo para uma compreensão aprofundada da área de estudo.

Para a categorização de LULC, foram gerados mapas a partir de técnicas de classificação supervisionada usando o algoritmo *Random Forest*, permitindo maior precisão na classificação das áreas. Esses mapas de LULC, junto aos dados espectrais, climáticos e físicos do solo, foram integrados no processo de modelagem.

As variáveis ambientais utilizadas no desenvolvimento do mapa de carbono, ilustrando a resolução inicial dessas

variáveis e a fonte podem ser visualizadas na (**Tabela 01**). No software R, um fluxo metodológico foi seguido para garantir a precisão e a consistência dos resultados obtidos. Para isso, todas as variáveis foram reprojetadas e suas resoluções espaciais padronizadas para 4,77 metros, o que assegurou a homogeneidade dos dados e facilitou sua integração no modelo. Em seguida, os valores de cada pixel das variáveis foram associados aos dados de carbono orgânico provenientes das 132 amostras de solo.

Category	Variables	Spatial Resolution	Temporal Scale	Source
Climate	AET	4 km	Biannual : 2015 - 2023	TerraClimate
	DEF	4 km	Biannual : 2015 - 2023	TerraClimate
	PDSI	4 km	Biannual : 2015 - 2023	TerraClimate
	PET	4 km	Biannual : 2015 - 2023	TerraClimate
	PR	4 km	Biannual : 2015 - 2023	TerraClimate
	RO	4 km	Biannual : 2015 - 2023	TerraClimate
	SOIL	4 km	Biannual : 2015 - 2023	TerraClimate
	SRAD	4 km	Biannual : 2015 - 2023	TerraClimate
	TMMN	4 km	Biannual : 2015 - 2023	TerraClimate
	TMMX	4 km	Biannual : 2015 - 2023	TerraClimate
	VAP	4 km	Biannual : 2015 - 2023	TerraClimate
	VPD	4 km	Biannual : 2015 - 2023	TerraClimate
	VS	4 km	Biannual : 2015 - 2023	TerraClimate
Spectral	BSI	10 m	Biannual : 2018 - 2023	SENTINEL 2
	NDVI	3 m	Biannual : 2015 - 2023	PLANET
	SAVI	3 m	Biannual : 2015 - 2023	PLANET
	VARI	3 m	Biannual : 2015 - 2023	PLANET
	NDWI	3 m	Biannual : 2015 - 2023	PLANET
	NDVIB	3 m	Biannual : 2015 - 2023	PLANET
	ENDVI	3 m	Biannual : 2015 - 2023	PLANET
	EXG	3 m	Biannual : 2015 - 2023	PLANET
	TGI	3 m	Biannual : 2015 - 2023	PLANET
	GLI	3 m	Biannual : 2015 - 2023	PLANET
	GNDVI	3 m	Biannual : 2015 - 2023	PLANET
	GRVI	3 m	Biannual : 2015 - 2023	PLANET
	MNLI	3 m	Biannual : 2015 - 2023	PLANET
	MSR	3 m	Biannual : 2015 - 2023	PLANET
	RDVI	3 m	Biannual : 2015 - 2023	PLANET
	TVDI	3 m	Biannual : 2015 - 2023	PLANET
	OSAVI	3 m	Biannual : 2015 - 2023	PLANET
	EVI	3 m	Biannual : 2015 - 2023	PLANET
Topography	Elevation (m)	4.77 m	Stable	Downloaded from the USGS
	Analytical Hillshading	4.77 m	Stable	Calculated using SAGA GIS
	Slope	4.77 m	Stable	Calculated using SAGA GIS
	Aspect	4.77 m	Stable	Calculated using SAGA GIS
	Plan Curvature	4.77 m	Stable	Calculated using SAGA GIS
	Profile Curvature	4.77 m	Stable	Calculated using SAGA GIS
	Convergence Index	4.77 m	Stable	Calculated using SAGA GIS
	Closed Depressions	4.77 m	Stable	Calculated using SAGA GIS
	Total Catchment Area	4.77 m	Stable	Calculated using SAGA GIS
	Topographic Wetness Index	4.77 m	Stable	Calculated using SAGA GIS
	LS-Factor	4.77 m	Stable	Calculated using SAGA GIS
	Channel Network	4.77 m	Stable	Calculated using SAGA GIS
	Drainage Basins	4.77 m	Stable	Calculated using SAGA GIS
	Channel Network Base Level	4.77 m	Stable	Calculated using SAGA GIS
	Channel Network Distance	4.77 m	Stable	Calculated using SAGA GIS
	Valley Depth	4.77 m	Stable	Calculated using SAGA GIS
	Relative Slope Position	4.77 m	Stable	Calculated using SAGA GIS
Soil	Pedology	10 km	Stable	IBGE
	Geology	10 km	Stable	IBGE
	Geomorphology	10 km	Stable	IBGE

Tabela 01. Resumo das variáveis ambientais para o desenvolvimento do mapa de carbono.

A seleção das variáveis para o modelo foi realizada por meio da metodologia Boruta [10], a qual possibilita identificar os elementos mais relevantes ao comparar versões originais e aleatorizadas de cada variável. Com as variáveis selecionadas, foram testados três algoritmos de aprendizado de máquina – *Random Forest*, *Cubist e Gradient Boosting*. Após a aplicação de validação cruzada e avaliação de desempenho, o modelo com a maior acurácia foi escolhido para gerar o mapa final de carbono orgânico do solo, proporcionando uma visão detalhada das dinâmicas de carbono na área de estudo e de suas interações com o LULC.

3. RESULTADOS

A análise da importância das variáveis no modelo (**Figura 03**) evidenciou a predominância dos atributos climáticos, especialmente a evapotranspiração, seguida dos índices espectrais, com destaque para o índice de excesso de verde. Essa predominância sugere que estas exercem um papel central na modelagem de COS, refletindo na relação entre o acúmulo de carbono e fatores ambientais como a vegetação e o balanço hídrico.

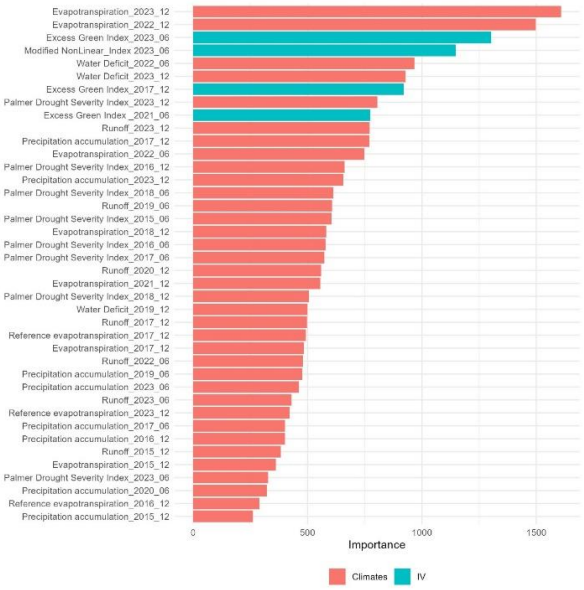


Figura 03. Estimativas de importância das variáveis

Na modelagem espacial do COS (**Figura 04**), foram identificadas áreas com valores reduzidos nas regiões sudoeste e centro-norte, caracterizadas principalmente pela predominância de agricultura de grãos, conforme indicado no mapeamento de LULC (**Figura 05**). Esse padrão reflete o impacto da conversão de vegetação nativa para agricultura, que está associado à diminuição dos estoques de carbono no solo. Em contrapartida, regiões próximas à capital, Goiânia, apresentaram elevados níveis de COS, atribuídos à presença de vegetação nativa preservada e pastagens não degradadas. Esse comportamento reforça a importância da cobertura vegetal para a manutenção dos teores de COS, especialmente em áreas onde a degradação é minimizada.

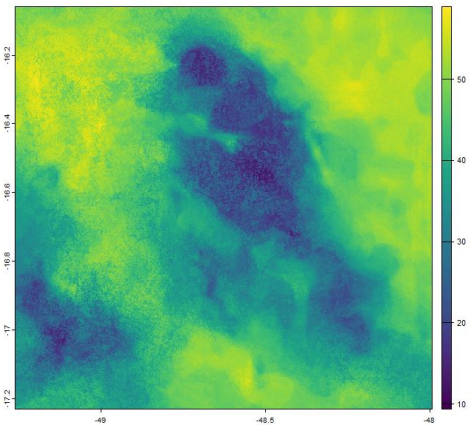


Figura 04. Mapa de estimativas de COS

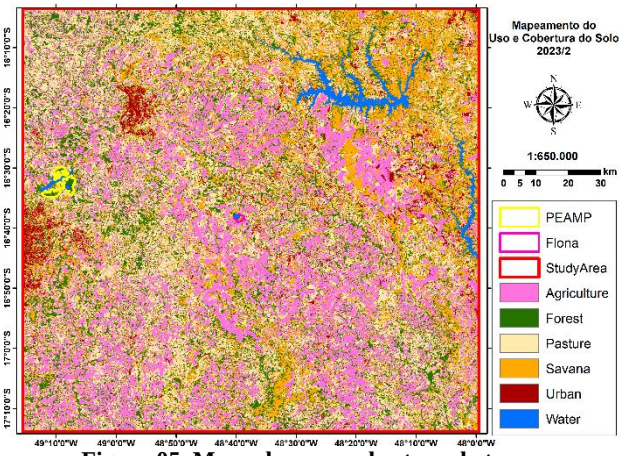


Figura 05. Mapa de uso e cobertura da terra

Adicionalmente, a região nordeste do mapa apresentou altos valores de COS, relacionados à predominância de vegetação savânica.

4. DISCUSSÃO

A presença de altos valores de COS em áreas de vegetação nativa e savânica, especialmente nas proximidades de Goiânia e na região nordeste do mapa, confirma que a vegetação desempenha um papel vital na retenção de carbono [4][6]. Essas áreas preservadas, além de pastagens pouco degradadas, demonstram o potencial do Cerrado em atuar como um importante sumidouro de carbono quando manejado de forma sustentável.

Por outro lado, a diminuição do COS nas áreas agrícolas, especialmente no sudoeste e centro-norte da área de estudo, reflete o impacto negativo da conversão de uso da terra sobre o armazenamento de carbono. A agricultura, ao reduzir a vegetação nativa, expõe o solo a processos de degradação que afetam negativamente sua capacidade de retenção de carbono [2]. Esses resultados são congruentes com estudos anteriores [5], que apontam que práticas agrícolas não sustentáveis reduzem os estoques de carbono e podem agravar o efeito estufa.

Este estudo também reforça a importância do monitoramento espacial, utilizando modelagem e sensoriamento remoto para captar a variação do COS, uma vez que métodos diretos podem ser limitados para grandes áreas [7][8]. A abordagem adotada, que combinou diferentes tipos de variáveis e modelos, fornece uma visão abrangente da distribuição espacial do COS e do impacto das práticas de uso do solo, contribuindo para a formulação de políticas de manejo sustentável e mitigação das mudanças climáticas [3][9].

5. CONCLUSÕES

A conclusão deste estudo destaca a importância da vegetação nativa e do uso sustentável do solo na preservação dos estoques de COS no Cerrado. A pesquisa confirma que variáveis climáticas e espectrais, especialmente a evapotranspiração e os índices de vegetação, desempenham um papel central na modelagem do COS, refletindo a influência da cobertura vegetal e das condições ambientais nos estoques de carbono.

Os resultados mostram que áreas de vegetação nativa e savânica mantêm altos níveis de COS, enquanto a conversão para uso agrícola reduz esses estoques. Isso evidencia o impacto negativo da transformação do uso da terra no sequestro de carbono, indicando que a preservação e o manejo sustentável da vegetação podem contribuir para a mitigação das mudanças climáticas.

6. REFERÊNCIAS

[1] I. S. Silva et al. Desmatamento no cerrado brasileiro: uma análise das ecorregiões araguaia tocantins, alto paranaíba e paraná guimarães. In: anais do XX SBSR, 2023, Florianópolis. **Anais eletrônicos**... São José dos Campos, INPE, 2023.

[2] M.M.C. Bustamante, et al. Toward an integrated monitoring framework to assess the effects of tropical forest degradation and recovery on carbon stocks and biodiversity. **Glob Chang Biol.** 2016 Jan;22(1):92-109. doi: 10.1111/gcb.13087.

[3] P. Smith, et al. How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. **Glob Chang Biol.** 2020;26(1):219-241. https://doi.org/10.1111/gcb.14815.

[4] S. Wang, Q. Zhuang, S. Jia, X. Jin, Q. Wang. Spatial variations of soil organic carbon stocks in coastal hilly area of China. **Geoderma** v. 314, 8-19, 2018. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.052

[5] K. Paustian, et al. Quantifying carbon for agricultural soil management: from the current status toward a global soil information system. **Carbon Manag**. 2019;10(6):567-87. doi:10.1080/17583004.2019.1633231.

[6] E. D. Assad, et al. Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: paired site comparisons and a regional pasture soil survey. **Biogeosciences**, 10, 6141–6160, 2013 doi:10.5194/bg-10-6141-2013

[7] A. Stevens, et al. Laboratory, field and airborne spectroscopy for Monitoring organic carbon content in agricultural soils. **Geoderma**.2008;144:395-404.https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.12.009.

[8] R.K.K.V. Gini, V.R. Mandla. Study and evaluation of carbon sequestration using remote sensing and GIS: a review on various techniques. International **Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 8 (4), 287-300, 2017.

[9] R. Francaviglia, M. Almagro, J.L. Vicente-Vicente. Conservation Agriculture and Soil Organic Carbon: Principles, Processes, Practices and Policy Options. **Soil Syst**. 2023, 7, 17. https://doi.org/10.3390/soilsystems7010017

[10] M.B. Kursa, W.R. Rudnicki. Feature selection with the Boruta Package. **Journal of Statistical Software** 36(11), 1-13. https://doi.org/10.18637/jss.v036.i11