



DINÂMICA ESPACIAL DO ESTOQUE DE CARBONO NO MARAJÓ (PA): INFLUÊNCIA DA TEXTURA DO SOLO E DO USO DA TERRA EM 2023

Tatiana Pará¹, Norma Ely S. Beltrão²

¹Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (UEPA),
tatiana.para@ifpa.edu.br. ²Doutora em Economia Agrícola. Universidade Estadual do Pará.

RESUMO

O presente estudo analisou a relação entre o uso da terra e o estoque de carbono orgânico no solo na região de integração do Marajó, no estado do Pará, considerando sua relevância ecológica e sua potencialidade na contribuição para estratégias de mitigação das mudanças climáticas. O problema identificado parte da necessidade de compreender como diferentes classes de uso da terra influenciam a capacidade de armazenamento de carbono, em um contexto regional marcado por desigualdades socioambientais e elevada vulnerabilidade climática. A justificativa está relacionada à importância do arquipélago como área estratégica para a conservação ambiental e ao fato de que o Brasil abriga parte significativa dos estoques globais de carbono, como apontam estudos recentes. O objetivo foi correlacionar os dados de uso da terra com o estoque de carbono no solo identificadas pela plataforma do MapBiomas, a fim de identificar padrões espaciais que auxiliem no planejamento territorial e na tomada de decisões para mitigação climática e definição de áreas prioritárias. A metodologia empregou dados raster do MapBiomas Solos (coleção 2 beta – 1985 a 2023), processados em linguagem Python no Google Colab com técnicas de estatística descritiva e regressão linear simples. Foram analisadas 14 classes de uso da terra, com extração de valores médios, dispersão e coeficiente de determinação. Os resultados indicaram que as maiores concentrações de carbono ocorreram em áreas de Campo Alagado e Área Pantanosa (78,03 t/ha), Formação Campestre (58,01 t/ha) e Mangue (55,44 t/ha), enquanto áreas urbanizadas e corpos d'água apresentaram os menores valores. Embora o modelo de regressão tenha apontado uma relação estatisticamente significativa ($p < 0,05$), o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,021$) revelou uma correlação fraca entre uso da terra e carbono armazenado. Conclui-se que outras variáveis ambientais devem ser integradas para melhor explicar a dinâmica do carbono e subsidiar ações territoriais voltadas à mitigação das mudanças climáticas na Amazônia.

Palavras-chave: MapBiomas. Estatística. Geoprocessamento.

Área de Interesse do Simposio: Metodologias, geotecnologias, estatística

Realização



Apoio





1. INTRODUÇÃO

O estado do Pará recebeu em 2025 a COP30, conferência global sobre clima que reúne gestores e lideranças internacionais responsáveis por discutir estratégias diante das mudanças climáticas e do cumprimento do Acordo de Paris. Segundo Prolo et al. (2021), os gases de efeito estufa (GEE) e as alterações climáticas configuram um problema de escala planetária, demandando respostas integradas, cooperativas e baseadas em evidências científicas. Os autores destacam ainda que a emergência climática decorre, em grande parte, das atividades econômicas, cujos impactos e custos são socialmente distribuídos. Esses efeitos não são internalizados pelos emissores e apresentam natureza cumulativa, de longo prazo e de difícil mensuração, o que torna seu monitoramento e mitigação ainda mais desafiadores.

Nesse contexto, compreender as relações entre o uso da terra e os mecanismos naturais de mitigação climática torna-se essencial. Este estudo parte da premissa de que o estoque de carbono no solo pode ser influenciado pelas atividades humanas e pelos diferentes padrões de ocupação territorial, o que abre caminhos para a adoção de práticas agroecológicas de manejo e adaptação agrícola. Assim, o presente artigo utiliza dados do produto MapBiomias Solos para correlacionar, por meio de uma análise linear aplicada a dados raster, as classes de uso e ocupação da terra com os níveis de carbono estocado no solo. Essa abordagem visa fornecer subsídios científicos para o planejamento territorial e para a formulação de estratégias de mitigação alinhadas aos desafios impostos pela crise climática.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O Bioma Amazônia desempenha papel estratégico para a regulação climática global, especialmente por sua elevada capacidade de armazenamento de carbono (Soares *et al.*, 2025). Em ambientes tropicais, como a Amazônia, o acúmulo de matéria orgânica do solo (MOS) é intensificado pelo aporte contínuo de biomassa proveniente da vegetação nativa, fator que favorece a ciclagem de nutrientes e o sequestro de carbono (Fontana *et al.*, 2024).

A quantidade de carbono estocado no solo é resultado da interação entre variáveis como clima, características físico-químicas do solo e histórico de uso e manejo (Fidalgo *et al.*, 2007). Nesse contexto, os ecossistemas costeiros, em especial os manguezais, têm se destacado como *hotspots* de carbono orgânico. Segundo Rovai et al. (2022), o Brasil concentra cerca de 8,5%

Realização



Apoio



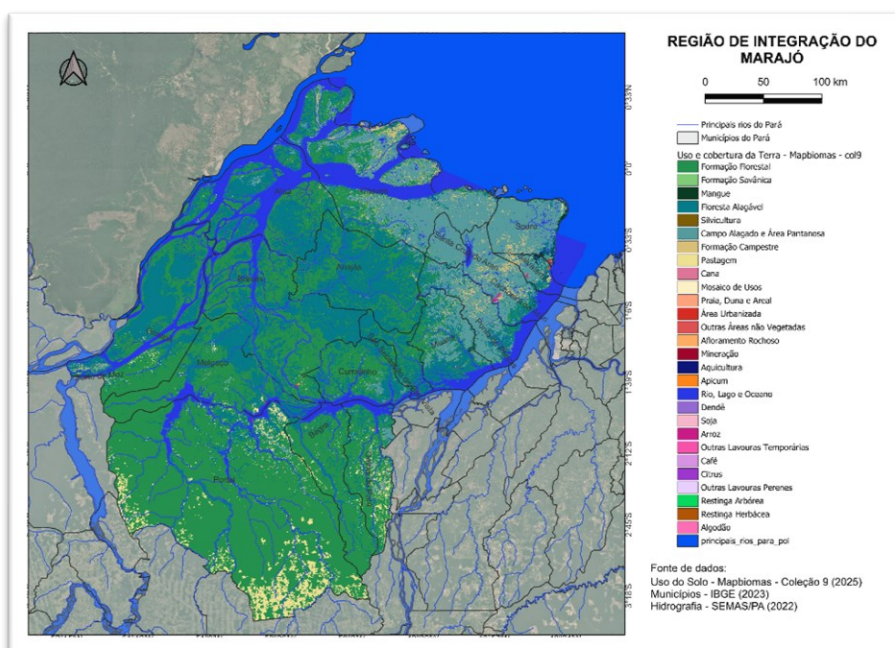
dos estoques globais de carbono presentes em manguezais, o que equivale a aproximadamente 0,32 Gt C, ou 320 milhões de toneladas de carbono. Esses ambientes, localizados na transição entre os sistemas terrestre e marinho, apresentam vegetação lenhosa e elevada biodiversidade adaptada às condições hidrodinâmicas específicas. O país ocupa a segunda maior área de manguezal do mundo (BRAGA, 2024), o que reforça sua responsabilidade na conservação desses ecossistemas e no monitoramento do carbono azul como estratégia para mitigação das mudanças climáticas.

3. METODOLOGIA

3.1. ÁREA DE ESTUDO

A região de estudo, compreendida na região de integração do Marajó, abrange mais de 100.000,00 km² e possui uma densidade demográfica de aproximadamente 5,7 habitantes/km². É uma região que possui o maior arquipélago fluviomarinho do mundo, sendo banhado pelo oceano Atlântico, o rio Pará e o delta do Amazonas. (FAPESPA,2022) Suas coordenadas estão localizadas (long, lat) nos limites -50.1495 e 0.7048, -50.1240 e 0.7033,-50.1074 e 0.7018, -50.0920 e 0.6471, e -50.0837e 0.6400.

Figura 1 – Região de Integração do Marajó



Fonte: Autores, 2025 (Dados do IBGE(2024) e Mapbiomas(2024))



Segundo os dados do Barômetro da Sustentabilidade (FAPESPA,2022) a população dessa região está na extrema pobreza com renda per capita de R\$205,42 reais. Sua área de uso de terra possui 81,1% da área com Cadastro Ambiental Rural (CAR) (SEMAS, 2023), compondo sua vegetação como Floresta Ombrófila Densa na terra firme, composta por árvores de madeira de lei e poucas palmeiras. Próximo aos rios, predominam florestas de várzea alagadas periodicamente, com árvores emergentes. Já nas áreas deprimidas, ocorrem Formações Pioneiras, caracterizadas por campos naturais com gramíneas, herbáceas e pequenas ilhas de vegetação lenhosa, formando um ecossistema diversificado influenciado por variações edafoclimáticas. (Brasil, 2007).

A Região do Marajó possui 65,64% do seu território coberto por áreas protegidas (Unidades de Conservação) sendo 65,03% de Uso Sustentável e 0,61% de Proteção Integral. (SUDAM,2024)

3.1. MÉTODO DE ANÁLISE

A relação entre o uso da terra e o estoque de carbono no solo no Marajó, Pará, foi analisada com dados raster do Mapbiomas, da segunda coleção (versão beta) de mapas anuais do estoque de carbono orgânico do solo (COS) no Brasil, cobrindo o período de 1985 a 2023 com resolução espacial de 30 metros com dados de estoque de carbono nos primeiros 30 cm do solo, em toneladas por hectare (t/ha). Também, foram utilizados mapas estáticos de granulometria, expressando a percentagem das frações minerais argila, silte e areia para profundidades 0-30 cm extraído do repositório SoilData, também do Mapbiomas.

Os rasters foram processados no Google Colab com as bibliotecas rasterio, numpy, pandas, matplotlib, seaborn, scipy.stats e statsmodels. Para garantir compatibilidade espacial, o raster do uso da terra foi reamostrado para a resolução do mapa de carbono usando interpolação por vizinho mais próximo. Os valores de carbono foram extraídos para cada classe de uso da terra. Foram feitas estatísticas descritivas (média, mediana, desvio padrão) para analisar os resultados dos boxplots e histogramas e melhor visualizar a distribuição dos estoques de carbono. Através do modelo de regressão linear simples (statsmodels.OLS) avaliou-se a influência do uso da terra sobre o carbono, validado pelo coeficiente de determinação (R^2).

Realização



Apoio



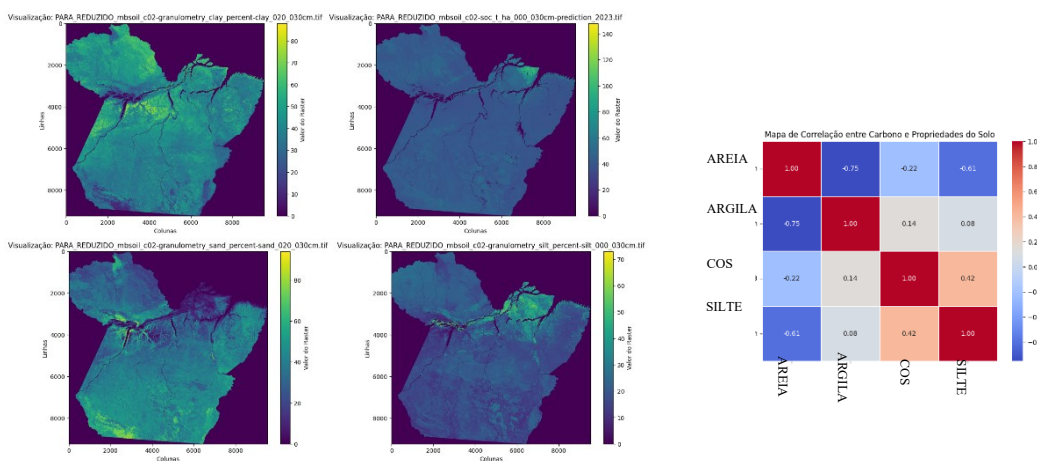
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados de Estoque de carbono orgânico do solo (COS) apresentam variações no estado do Pará em torno de 0 a 140 toneladas por hectares. Na figura 2 é visivelmente aparente que a região do arquipélago do Marajó apresenta uma maior concentração de estoque de carbono.

4.1. CORRELAÇÃO DA TEXTURA DO SOLO E O ESTOQUE DE CARBONO NO ESTADO DO PARÁ

Ao correlacionar os valores de areia (sand), argila (clay) e silte (silt) com o estoque de carbono no estado do Pará, a matriz de correlação (figura 2) a partir da análise de Pearson (que varia de -1 a 1) mostrou uma correlação fraca entre o estoque de carbono e a argila (0,14), assim como a relação com a areia (-0,22) que tem correlação negativa. Diferente da relação com o silte (0,42) que apresentou uma correlação moderadamente positiva.

Figura 2 – Matriz de correlação de Pearson entre COS e Textura do solo



Fonte: Autores, 2025 (Dados Mapbiomas (2024))

Em solos arenosos, o menor acúmulo de carbono pode estar associado à sua limitada capacidade de retenção de matéria orgânica, o que resulta em uma forte correlação negativa com determinadas frações granulométricas. De acordo com Arruda (2022), essa correlação negativa é observada na camada de 20 a 40 cm.

Arruda (2022) sugere que outras características do ambiente, tipo de vegetação, tipo de solo, uso e manejo, condições climáticas e outros fatores como a existência de outras propriedades do solo (variáveis) podem influenciar na dinâmica do carbono do solo e por isso

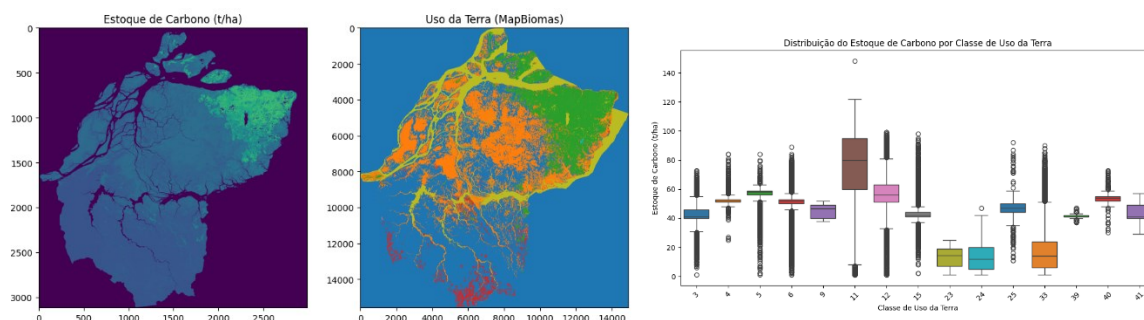
devem ser avaliadas. A modelagem dos dados raster de origem (COS) teve como base 105 variáveis preditoras. (Mapbiomas,2024).

4.1. CORRELAÇÃO USO DA TERRA E O ESTOQUE DE CARBONO NO MARAJÓ

Na Amazônia, Matos *et al* (2016) encontrou, em Sinop/MT valores de estoque de carbono de 99,45 (mg/ha⁻¹) em áreas de Sistema agroflorestais; Mello (2015) encontrou no Alto Xingu, valores de 97,48 em floresta nativa, Gregolin *et al* (2016), em Norte Mato-grossense encontrou valor de 100,76 em área de pastagem. Mais os maiores valores encontrados foram no Bioma Pantanal, em áreas inundáveis. Dias *et al* (2015) encontrou 181,29 em Poconé/MT e Siqueira *et al* (2015) chegou ao valor de 184,4.

Esses dados corroboram com o resultado encontrado na região do Marajó, que possui áreas de várzeas, sendo uma região fitogeográfica parecida ao Pantanal, como vimos na figura 3.

Figura 3 – Matriz de correlação de Pearson entre COS e Textura do solo Região de Integração do Marajó



Fonte: Autores, 2025

Na tabela 1 e nas análises feitas, percebeu-se que a classe 11, caracterizada como “Campo Alagado e Área Pantanosa” na coleção 09 do Mapbiomas, apresenta o maior valor médio de carbono (78.03 t/ha), indicando que esse tipo de uso da terra tende a armazenar mais carbono no solo. Possivelmente o solo correspondente a essa região é o gleissolo, caracterizado por regiões de várzeas. Já a classe 12 “Formação Campestre” (58.01 t/ha) e 5 “Mangue” (55.44 t/ha) também possuem um grande valor de estoque de carbono. Já as menores classes com estoque de carbono temos a 24 “Área Urbanizada” (13.21 t/ha) e 33 “Rio, Lago e Oceano” (16.32 t/ha).



Avaliando os bloxpots, é possível perceber a concentração do estoque de carbono sendo representado por caixa menores, como o caso das classes 4 “Formação Savânica”, 39 “Soja” e 40 “arroz”. Também, apresentam muitos outliers (alta dispersão - whiskers grandes) sugerindo que muita diferença de carbono estocado em relação a outros locais com a mesma classe. Isso pode sugerir que área esteja em transição ou possua solos diferentes com a mesma classe de uso. As classes 9 “Silvicultura” e 11 “Campo Alagado e Área Pantanosa” possuem menos outliers, portanto essas classes possuem mais uniformidade na categoria, provavelmente porque são áreas nelas a vegetação está com rotação mais longa o que sugere um maior acúmulo em seu estágio vegetativo.

Tabela 1 – Estatística da correlação entre uso da terra e estoque de carbono

USO TERRA	TOTAL	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	MIN	25%	50%	75%	MAX
3	2152719	42.82	4.14	1	40	41.0	46	73
4	2504	52.61	4.54	25	51	52.0	53	84
5	5693	55.44	7.34	1	56	58.0	59	84
6	1188885	50.74	4.55	1	50	52.0	53	89
9	20	45.6	4.87	38	40	46.5	49	52
11	604441	78.03	18.28	1	60	80.0	95	148
12	75064	58.01	10.54	1	51	56.0	63	99
15	146268	43.0	3.99	2	41	42.0	44	98
23	38	13.31	7.83	1	7	14.5	19	25
24	711	13.21	9.53	1	5	12.0	20	47
25	937	46.71	7.49	11	44	47.0	50	92
33	84242	16.32	12.69	1	6	14.0	24	90
39	230	41.41	1.59	37	41	41.0	42	47
40	1104	53.83	4.01	30	52	54.0	55	73
41	225	43.41	4.71	29	40	41.0	49	57

Fonte: Autores, 2025

O quadro 1 nos mostra as análises do teste do modelo de correlacionar a cobertura e uso da terra e o estoque de carbono. É possível perceber que a classe 11 (18.28 t/ha) e 12 (10.54 t/ha) possuem desvio padrão elevados. Já a classe 39 possui desvio padrão menor sugerindo que nessa classe a variação de valor de carbono é mais homogêneo.

O valor de R-squared (R^2) = 0.021, nos mostra a qualidade do modelo de correlação testado. O que nos diz que apenas 2,1% da variação no estoque de carbono é explicada pela variável "Uso_Terra", sendo um modelo fraco, sugerindo que outras variáveis são necessárias para explicar a correlação do estoque do carbono. Corroborando com o modelo do Mapbiomas que usou 105 variáveis para entregar os resultados do teste.



Quadro 1 – Estatística do modelo de regressão linear simples

OLS Regression Results						
Dep. Variable:	Carbono	R-squared:	0.021			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.021			
Method:	Least Squares	F-statistic:	9.235e+04			
Date:	Sun, 09 Mar 2025	Prob (F-statistic):	0.00			
Time:	21:29:05	Log-Likelihood:	-1.7602e+07			
No. Observations:	4263081	AIC:	3.520e+07			
Df Residuals:	4263079	BIC:	3.520e+07			
Df Model:	1					
Covariance Type:	nonrobust					
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	47.1422	0.011	4150.487	0.000	47.120	47.164
Uso_Terra	0.4302	0.001	303.895	0.000	0.427	0.433
Omnibus:	975226.266	Durbin-Watson:	0.244			
Prob(Omnibus):	0.000	Jarque-Bera (JB):	4588035.933			
Skew:	1.041	Prob(JB):	0.00			
Kurtosis:	7.636	Cond. No.	12.6			

Fonte: Autores, 2025

O valor Prob (F-statistic) = 0.00 é estatisticamente significativo ($p < 0.05$), o que indica que existe alguma relação entre as variáveis, embora seja fraca, porém a magnitude do impacto é baixa. E o valor de Intercepto (const) é igual a 47.14, ou seja, quando a classe é zero (ausente) o modelo pode prevê um estoque médio de 47.14 t/ha de carbono. No modelo criado o valor do Uso_Terra é 0.43, que quer dizer que cada aumento de uma unidade do valor do uso da terra, haverá em média um aumento de 0.43 t/ha no estoque de carbono.

5. CONCLUSÃO

O modelo indica uma relação estatisticamente significativa, mas fraca entre uso da terra e estoque de carbono. Ainda assim é válido avaliar o uso da terra para ensar em ações de mitigação de mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- Arruda, F. D. S. (2022) Estimativa Do Estoque De Carbono Em Solos Do Bioma Pantanal Sob Diferentes Tipos De Uso No Município De Cáceres-Mato Grosso, Brasil. 2022. Dissertação de Mestrado em Geografia. Programa De Pós-Graduação Em Geografia. Universidade Do Estado De Mato Grosso. 95f. Acessado Em 05 De Março De 2025. Disponível Em: [,Https://Portal.Unemat.Br/Media/Files/Ppggeo/Dissertao_-_Fabiane_Da_Silva_Arruda_Final.Pdf](https://Portal.Unemat.Br/Media/Files/Ppggeo/Dissertao_-_Fabiane_Da_Silva_Arruda_Final.Pdf)>
- Braga, M.M. (2024) Análise do potencial econômico do estoque de carbono em unidades de conservação com manguezal no Ceará.. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza.



- BRASIL, Governo Federal. (2007) Plano de desenvolvimento territorial sustentável do Arquipélago do Marajó. Grupo Executivo do Estado do Pará. Decreto de, v. 30, 2007. Acessado em 02 de março de 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/casacivil/pt-br/arquivos/marajo.pdf>
- DIAS, V. R. M. et al. Influência da inundação nas concentrações de carbono no solo de florestas no norte do Pantanal Mato-grossense. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 35, [Anais...] Natal: CBCS, 2015.
- FAPESPA. (2022) Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas. Barômetro da Sustentabilidade da Região de Integração Marajó. 2022. Acessado em 01 de março de 2025. Disponível em: https://www.fapespa.pa.gov.br/wp-content/uploads/2024/10/BS-RI_MARAJO_SI.pdf
- Fidalgo, E. C. C. et al. Estoque de carbono nos solos do Brasil. Embrapa Solos: Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 2007. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/216824>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- FONTANA, Ademir et al. Níveis de referência do carbono orgânico no solo sob vegetação natural dos biomas brasileiros. Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2024. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 059). ISSN 1983-9715. <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1173872/niveis-de-referencia-de-carbono-organico-no-solo-sob-vegetacao-natural-dos-biomas-brasileiros>
- Gregolin, F.S. et al. (2016).Estoque de carbono do solo sob recuperação de pastagens na Amazônia mato-grossense. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 20, [Anais...] Foz do Iguaçu: RBMCSA, 2016.
- MapBiomass. (2024). Coleção 2 (beta) da série de mapas anuais do estoque de carbono orgânico do solo do Brasil 1985-2023", <https://doi.org/10.58053/MapBiomass/TVRX77>, MapBiomass Data, V1.
- Mello, J. M. et al. (2015) Dinâmica dos atributos físico-químicos e variação sazonal dos estoques de carbono no solo em diferentes fitofisionomias do pantanal norte matogrossense. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 39, n. 2, p. 325-336, 2015.
- Prolo, C. D.; PENIDO, G.; SANTOS, I.T.; e LA HOZ THEUER, S. Explicando os mercados de carbono na era do Acordo de Paris. Rio de Janeiro: Instituto Clima e Sociedade., 2021
- Rovai, A. S. et al. Brazilian Mangroves: Blue Carbon Hotspots of National and Global Relevance to Natural Climate Solutions. *Frontiers in Forests and Global Change*, v. 4, 2022.
- SEMAS. (2023).Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade. Programa Regulariza Pará - Ano 2023. Acesso em 01 de março de 2025. Disponível em: <https://www.semas.pa.gov.br/analise/car.php>
- Siqueira, M. D.; Vieira, T. F. S.; Coringa, E. A. O. Estoque e carbono orgânico associado às frações granulométricas de solos do Pantanal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35., 2015, [Anais...] Natal: CBCS, 2015.
- Soares, F., Sacramento, B., Valente, R., & Da Silveira, H. L. F. (2025). Florestas secundárias e biomassa acima do solo no bioma Amazônia. - Acesso em 02 de novembro de 2025. Disponível em:<https://www.sidalc.net/search/Record/dig-alice-doc-1175475/Description>
- SUDAM. (2024) Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia. Plano Integrado Para o Desenvolvimento Sustentável dos Arquipélagos do Marajó/PA e Bailique/AP 2024/2027. Volume I - Marajó / Versão Base. 2024 . Acesso em 02 de março de 2025. Disponível em: http://repositorio.sudam.gov.br:8080/sudam/prda/publicacoes-institucionais/plano_marajo.pdf