

MAPEAMENTO DO SERVIÇO ECOSISTÊMICO DE SEQUESTRO DE CARBONO PRESTADO PELA COBERTURA FLORESTAL DO PARQUE ESTADUAL MATA DO PAU-FERRO E SUA ZONA DE AMORTECIMENTO, AREIA, PARAÍBA

MAPPING OF THE ECOSYSTEM OF SERVICE CARBON SEQUESTRATION PROVIDED BY THE FOREST COVER OF THE PAU-FERRO STATE PARK AND ITS BUFFER ZONE, AREIA, PARAÍBA

MAPEO DEL SERVICIO ECOSISTÉMICO DE SECUESTRO DE CARBON PRESTADO POR LA CUBIERTA FORESTAL DEL PARQUE ESTATAL MATA DO PAU-FERRO Y SU ZONA DE AMORTIGUAMIENTO, AREIA, PARAÍBA

Jean Oliveira Campos

Doutorando em Geografia, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa – PB
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2874-754X>
E-mail: jeannolliveira@gmail.com

Eduardo Rodrigues Viana de Lima

Doutor em Geografia, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa – PB
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1116-9090>
E-mail: eduvianalima@gmail.com

Diógenes Felix da Silva Costa

Doutor em Ecologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal – RN
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4210-7805>
E-mail: diogenesgeo@gmail.com

RESUMO: O serviço ecossistêmico de sequestro de carbono prestado pela cobertura florestal descreve o processo de captura do carbono atmosférico e sua incorporação na biomassa vegetal por meio da fotossíntese. O mapeamento desse serviço em unidades de conservação é de fundamental importância para evidenciar a contribuição das áreas protegidas para o bem-estar humano. Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo mapear o serviço ecossistêmico de sequestro de carbono prestado pela vegetação florestal nativa do Parque Estadual Mata do Pau-Ferro e da Zona de Amortecimento no município de Areia, no estado da Paraíba. Para isso, foi utilizado o índice CO₂flux, que resulta da integração entre os índices NDVI e sPRI. As capacidades de sequestro de carbono, mapeadas pelo índice, variam de não relevante a alta, com a capacidade baixa predominante na zona, enquanto a capacidade média é majoritária na Unidade de Conservação. As informações geradas por meio das técnicas empregadas reforçam a contribuição do espaço na ciclagem do carbono, funcionando como sumidouro. Por outro lado, a degradação da vegetação pode elevar as taxas de emissão e transformar a área em uma fonte. Nesse sentido, destaca-se a importância de áreas protegidas florestais para a manutenção do sequestro e armazenamento de carbono.

Palavras-chave: Parque Estadual; Zona de Amortecimento; Floresta; Mapeamento; Serviço ecossistêmico.

ABSTRACT: The ecosystem service of carbon sequestration provided by the forest cover describes the process of capturing atmospheric carbon and its incorporation into plant biomass through photosynthesis. The mapping of this service in conservation units is of fundamental importance to highlight the contribution of protected areas to human well-being. In this sense, the present study aims to map the ecosystem service of carbon sequestration provided by the native forest vegetation of the Pau-Ferro State Park and the Buffer Zone in the municipality of Areia, in the state of Paraíba. For this, the CO₂flux index was used, which results from the integration between the NDVI and sPRI indices. The carbon sequestration capacities mapped by the index range from not relevant to high, with low capacity predominant in the zone, while medium capacity is majority in the Conservation Unit. The information generated through the techniques used reinforces the contribution of space in carbon cycling, functioning as a sink. On the other hand, vegetation degradation can increase emission rates and turn the area into a source. In this sense, the importance of protected forest areas for maintaining carbon sequestration and storage is highlighted.

Keywords: State Park; Buffer Zone; Forest; Mapping; Ecosystem Service.

RESUMEN: El servicio ecosistémico de secuestro de carbón prestado por la cubierta forestal describe el proceso de captura del carbón atmosférico y su incorporación en la biomasa vegetal por medio de la fotosíntesis. El mapeo de ese servicio en unidades de conservación es de fundamental importancia para evidenciar la contribución de las áreas protegidas para el bienestar humano. En ese sentido, el presente estudio tiene el objetivo de mapear el servicio ecosistémico de secuestro de carbón prestado por la vegetación forestal nativa del Parque Estatal Mata do Pau-Ferro y de la Zona de Amortiguador en el municipio de Areia, en el estado de Paraíba. Para eso, ha sido utilizado en índice CO₂flux, que resulta de la integración entre los índices NDVI y sPRI. Las capacidades de secuestro de carbón mapeadas por el índice varían de no relevantes a alta, con la baja capacidad predominante en la zona, mientras la capacidad media es mayoritaria en la Unidad de Conservación. Las informaciones generadas a través de técnicas empleadas refuerzan la contribución del espacio en el ciclo del carbón, funcionando como sumidero. Por otro lado, la degradación de la vegetación puede elevar las tasas de emisión y transformar el área en una fuente. En ese sentido, se subraya la importancia de áreas forestales protegidas para el mantenimiento del secuestro y almacenamiento de carbón.

Palabras clave: Parque Estatal; Zona de Amortiguamiento; Foresta; Mapeo; Servicio ecosistémico.

1. INTRODUÇÃO

As florestas exercem papel fundamental na ciclagem do carbono, em razão de atuarem como sumidouros, caracterizando o serviço ecossistêmico de sequestro de carbono. Trata-se da taxa líquida de carbono atmosférico adicionado na biomassa vegetal e que contribui para desacelerar as mudanças climáticas (FAO, 2020; MEIRA *et al.*, 2020; NAIDOO *et al.*, 2008; SAATCHI *et al.*, 2011). Nesse contexto, os serviços ecossistêmicos são contribuições fornecidas pelos ecossistemas para o bem-estar humano, incluindo atividades como o controle de erosão, regulação do clima, turismo, recreação e produtos florestais (COSTANZA *et al.*, 2017; MEA, 2005).

Mediante a necessidade de identificação de áreas com sequestro de carbono, sobretudo nos países em desenvolvimento, em virtude das políticas de carbono, diversos métodos têm sido utilizados para o mapeamento dessas áreas, especialmente para selecionar as áreas proeminentes e lançar mão de estratégias de proteção e conservação (HOLMBERG *et al.*, 2019; PAUDYAL *et al.*, 2015).

Entre esses métodos, encontra-se o Índice de Sequestro de Carbono (CO₂flux) que, resulta da integração entre os índices *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Photochemical Reflectance Index* (PRI) e, permite a localização e distinção de diferentes capacidades da vegetação para sequestrar carbono, em razão de ambos os índices utilizados no processo, estarem relacionados à atividade da vegetação durante o processo de fotossíntese e estocagem da biomassa (AMARAL; BAPTISTA; BEZERRA, 2020; SILVA; LACERDA, 2021).

Diante disso, os mapas configuram-se como produtos essenciais, pois, auxiliam na formulação de políticas voltadas à conservação e manutenção da oferta de serviços, ou mesmo, recuperação de áreas degradadas, no intuito de recompor funções ecossistêmicas (ALAHULKKO *et al.*, 2019; KRUSE; PETZ, 2017). De acordo Syrbe *et al.* (2017), o mapeamento pode indicar as áreas de riscos aos ecossistemas, usos insustentáveis e impactos na paisagem.

Nesses termos, a representação espacial se apresenta como uma importante ferramenta de abordagem na política de sustentabilidade, uma vez que, permite ilustrar e quantificar as áreas de maior oferta e demanda de serviços em diferentes escalas, funcionando, assim, como subsídio para o estabelecimento de áreas prioritárias à conservação, e como suporte para a tomada de decisão no que diz respeito ao planejamento da paisagem (CROSSMAN *et al.*, 2013; MARTÍNEZ-HARMS; BALVANERA, 2012). Além disso, como parte da população não tem consciência da existência dessas contribuições dos ecossistemas, mesmo fazendo uso delas, as representações se apresentam como ferramentas de divulgação (NAIDOO *et al.*, 2008).

No âmbito dos mapeamentos, as Unidades de Conservação da Natureza aparecem como espaços prioritários para investigações, visto que, são espaços permeados por conflitos ambientais, resultantes do interesse de diversos setores da sociedade nos recursos naturais protegidos. E, nesse cenário, os mapas apresentam os potenciais da paisagem para fornecer serviços ecossistêmicos, reforçando, a contribuição desses espaços para proteção da biodiversidade, para o bem-estar humano e mitigação das mudanças climáticas.

Diante disso, o presente estudo objetiva mapear o serviço ecossistêmico de sequestro de carbono prestado pela vegetação florestal nativa do Parque Estadual Mata do Pau-Ferro e da Zona de Amortecimento no município de Areia, estado da Paraíba. A referida área protegida é permeada por conflitos desde a sua instituição na paisagem e o mapeamento pode evidenciar sua contribuição para o sequestro de carbono e destacar sua importância para a sociedade.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

O PE Mata do Pau-Ferro está localizado no município de Areia, na microrregião do Brejo Paraibano, no estado da Paraíba (Figura 1). Constitui uma unidade de conservação de proteção integral, com área de 607,96 ha, administrada pela Superintendência de Administração do Meio Ambiente da Paraíba (SUDEMA). Foi implantada em 1992, como Reserva Ecológica da Mata do Pau-Ferro e, por meio do Decreto Estadual nº 26.098, de 04 de agosto de 2005 mudou para a categoria parque de domínio estadual (PARAÍBA, 2005). Desde sua criação, a área protegida não possuía Zona de Amortecimento em seu entorno, foi delimitada apenas em 2020, com o Plano de Manejo (SANTOS *et al.*, 2020). A zona compreende a área de 5.404,11 ha e se estende para os municípios limites de Areia na porção sul e oeste.

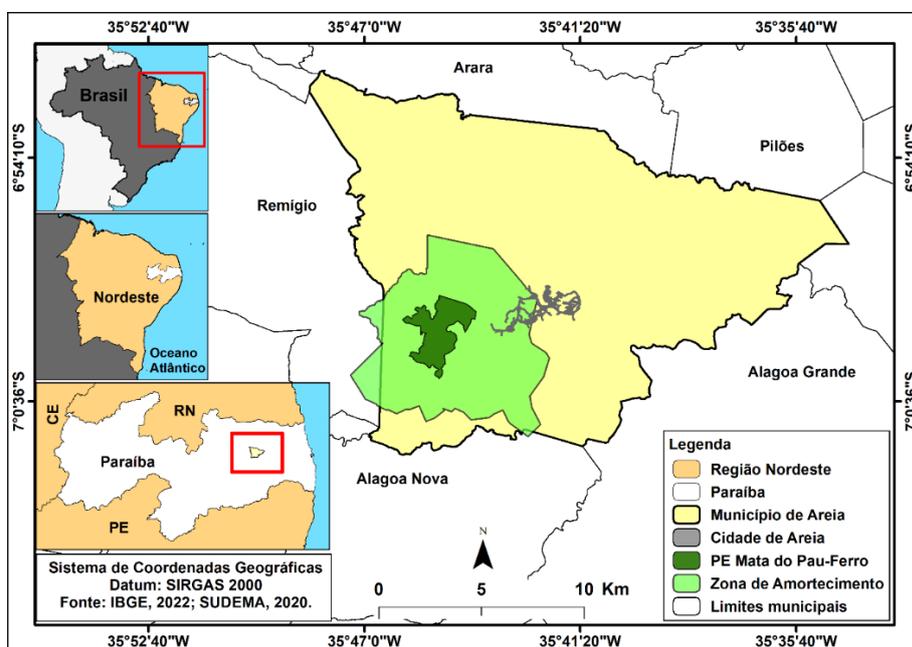


Figura 1 – Localização do PE Mata do Pau-Ferro e sua ZA no estado da Paraíba. Fonte: elaboração própria (2023).

O clima é classificado como As - tropical quente e úmido, caracterizado por chuvas durante o outono e inverno, com índice pluviométrico anual em torno de 1200 mm e temperatura média de aproximadamente 23,5°C (FRANCISCO; SANTOS, 2017). O período chuvoso ocorre de março a agosto, ao passo que o período seco abrange os meses de setembro a fevereiro (NASCIMENTO; BANDEIRA; ARAÚJO, 2019).

O município de Areia está situado em um Brejo de Altitude que se encontra posicionado na borda do Planalto da Borborema, em razão disso, apresenta maior volume de chuva em comparação aos municípios do entorno que possuem clima Semiárido (ARRUDA *et al.*, 2022; ARTIGAS; SOUZA; LIMA, 2022).

No perímetro da PE Mata do Pau-Ferro e em sua Zona de Amortecimento, observa-se a presença da Floresta Estacional Semidecidual, uma fitofisionomia característica da Mata Atlântica. Essa formação florestal nativa é marcada pela sua estacionalidade climática, perdendo parte de sua folhagem durante o período seco (IBGE, 2012). Devido ao gradiente altitudinal, essa floresta pode ser classificada em duas categorias principais: submontana, situada entre 100 a 600 m, e montana, encontrada em altitudes de 600 a 2000 m (CAMPOS; LIMA; COSTA, 2023; VELOSO; RANGEL FILHO; LIMA, 1991). O relevo local é predominantemente forte

ondulado, enquanto a cobertura pedológica é bem desenvolvida, com maior ocorrência de argissolos e latossolos (CARNEIRO *et al.*, 2021).

2.2 Materiais

Para realização das etapas do trabalho, utilizou-se os seguintes materiais e ferramentas:

- Aparelho de GNSS (*Global Navigation Satellite System*), modelo Etrex Garmin Vista;
- Imagem orbital do satélite Sentinel – 2, sensor MSI, nível 2A, apresentando 1,15% de cobertura por nuvens e data de 25/08/2020, adquirida gratuitamente na plataforma *Sentinel Hub* (<https://www.sentinel-hub.com>);
- Polígono da Unidade de Conservação Parque Estadual Mata do Pau-Ferro e de sua Zona de Amortecimento, disponibilizado pela Superintendência de Administração do Meio Ambiente (SUDEMA);
- Softwares *ArcGIS 10.2*[®] e *Microsoft Office Excel*[®].

2.3 Procedimentos metodológicos

De início, foram realizadas saídas de campo na Zona de Amortecimento, entre os meses de janeiro e fevereiro de 2021, para coleta de coordenadas e obtenção de informações do uso e cobertura da terra, que, por sua vez, subsidiaram o treinamento da classificação da imagem orbital. No *ArcGIS*, as bandas da imagem foram recortadas para a área de estudo e, posteriormente, procedeu-se com o treinamento do classificador e execução do algoritmo *Maximum Likelihood* (OTUKEI; BLASCHKE, 2010). Para a validação da classificação, utilizou-se 390 amostras coletadas em campo com uso de GNSS. A precisão da classificação, por sua parte, foi registrada na matriz de confusão.

Em seguida, ocorreu a obtenção dos polígonos dos fragmentos florestais: após a validação da classificação, houve a extração de todos os fragmentos de vegetação florestal nativa presentes na área de estudo. Os fragmentos foram distribuídos em três classes de tamanho, com base no estudo de Ribeiro *et al.* (2009), a conhecer: pequeno (< 50 ha), médio (≥ 50 e < 100 ha) e grande (≥ 100 ha). Após a divisão dos fragmentos por classes, realizou-se o mapeamento do sequestro de carbono.

O mapeamento foi realizado por meio do índice CO₂flux, que mensura a eficiência do sequestro carbono por parte da vegetação (BAPTISTA, 2004; RAHMAN *et al.*, 2000). O CO₂flux é obtido a partir da integração entre os seguintes índices de vegetação: NDVI e PRI reescalado para valores positivos, resultando no sPRI. O primeiro atua como um indicador da biomassa e vigor da vegetação fotossinteticamente ativa, enquanto o segundo, mede a eficiência do uso da luz na fotossíntese (OLIVEIRA; GANEM; BAPTISTA, 2017; SILVA *et al.*, 2023).

No cálculo do NDVI utilizou-se a equação proposta por Rouse *et al.* (1973) e Tucker (1979):

$$NDVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(\rho_{IVP} + \rho_V)}$$

Onde:

ρ_{IVP} = Reflectância na banda no infravermelho próximo;

ρ_V = Reflectância na banda do vermelho;

NDVI = Normalized Difference Vegetation Index.

Em seguida, para o cálculo do índice PRI foi utilizada a equação proposta por Gamon, Serrano e Surfus (1997):

$$PRI = \frac{(B - G)}{(B + G)}$$

Onde:

G = A reflectância da faixa do verde;

B = A reflectância da faixa do azul;

PRI = Photochemical Reflectance Index.

O PRI necessita ser reescalonado para valores positivos, para gerar o sPRI, dessa forma, o reescalonamento foi realizado por intermédio da equação a seguir (AMARAL; BAPTISTA; BEZERRA, 2020; SILVA; LACERDA, 2021):

$$sPRI = \frac{(PRI + 1)}{2}$$

Onde:

PRI = Photochemical Reflectance Index;

sPRI = Photochemical Reflectance Index reescalonado para valores positivos.

Por fim, a estimativa do sequestro de carbono foi gerada por meio da equação proposta por Rahman *et al.* (2000):

$$CO_2flux = sPRI * NDVI$$

Onde:

sPRI = Photochemical Reflectance Index reescalonado para valores positivos;

NDVI = Normalized Difference Vegetation Index;

CO₂flux = Índice de Sequestro de Carbono.

O arquivo *raster* contendo as informações de CO₂flux foi dividido em seis intervalos, os quais foram classificados em capacidades de oferta. Devido à ausência de classificações para o índice na literatura, os intervalos criados foram baseados na classificação qualitativa adotada por Aquino *et al.* (2018) para valores de NDVI. O Quadro 1 apresenta os intervalos criados, bem como as capacidades de oferta do serviço ecossistêmico.

Quadro 1 - Classes adotadas e capacidades de oferta correspondentes

Classes	Capacidade de oferta do serviço
0 a 0,16	Oferta não relevante
0,16 a 0,32	Capacidade de oferta muito baixa
0,32 a 0,48	Capacidade de oferta baixa
0,48 a 0,64	Capacidade de oferta média
0,64 a 0,80	Capacidade de oferta alta
0,80 a 1	Capacidade de oferta muito alta

Fonte: elaboração própria (2023).

A partir da classificação, realizou-se o mapeamento do serviço ecossistêmico no PE Mata do Pau-Ferro e na Zona de Amortecimento. A nomenclatura das capacidades, bem como o esquema de cores aplicado, estão em conformidade com a proposta de Burkhard *et al.* (2009) para o mapeamento de serviços ecossistêmicos. Além disso, o arquivo *raster* contendo as capacidades de oferta foi recortado por meio dos polígonos dos fragmentos florestais para a

obtenção dos percentuais de área. Isso possibilitou identificar as principais capacidades e as porções de ocorrência delas nos dois espaços considerados.

3 RESULTADOS

Com a aplicação dos procedimentos foram mapeadas seis classes de uso e cobertura da terra: vegetação florestal, pastagens, cultivos, áreas construídas, solo exposto e corpos hídricos. A classe de vegetação exibiu a maior precisão no mapeamento, enquanto o solo exposto apresentou o menor número de acertos, em razão da confusão (Tabela 1). De modo geral, a matriz de confusão recuperou uma acurácia de 0,9 no índice Kappa.

Tabela 1 – Matriz de confusão da Classificação Supervisionada

Classes	VF	P	C	AC	SE	CH	Total	AU	
VF	118	2	0	0	0	0	120	0,98	
P	0	124	4	2	0	0	130	0,95	
C	0	8	52	0	0	0	60	0,87	
AC	0	3	0	27	0	0	30	0,90	
SE	0	4	0	4	22	0	30	0,73	
CH	2	1	0	0	0	17	20	0,85	
Total	120	142	56	33	22	17	390	0,00	
AP	1	0,87	0,93	0,82	1	1	0	0,92	
Kappa									90%

Legenda: VF – Vegetação Florestal; P – Pastagens; C – Cultivos; AC – Áreas Construídas; SE – Solo exposto; CH – Corpos hídricos; AP – Acurácia do Produtor; AU – Acurácia do Usuário.

Fonte: elaboração própria (2023).

A classe de vegetação florestal engloba 516 fragmentos, totalizando uma área de 2.102,20 ha, o que corresponde a 38,90% da Zona de Amortecimento. Nesse contexto, ao considerar que a área atual da Zona é de 5.404,11 ha, anteriormente constituía uma extensa massa florestal contínua no início da ocupação humana na região, observa-se uma perda de 61,1% da vegetação nativa nesse espaço, equivalente a 3.301,91 ha.

No que diz respeito à divisão por classes de tamanho, nota-se o maior número de fragmentos pequenos e menor número de fragmentos médios (Tabela 2). Em relação à área, os fragmentos grandes ocupam o maior percentual, ao passo que, os tamanhos pequeno e médio, representam os menores percentuais, na respectiva ordem.

Tabela 2 – Classes de tamanho dos fragmentos e área ocupada

Classes de tamanho	Número de fragmentos	Área total da classe	%
Pequeno (< 50 ha)	509	623,43	29,66
Médio (≥ 50 e < 100 ha)	3	216,52	10,30
Grande (≥ 100 ha)	4	1262,25	60,04
Total	516	2102,20	100

Fonte: elaboração própria (2023).

A espacialização dos fragmentos por classe de tamanho revela uma ampla distribuição dos fragmentos pequenos na Zona de Amortecimento (Figura 2). Na porção oeste da área, destaca-se exclusivamente a presença dessa classe de tamanho, evidenciando um notório uso da terra pelas atividades humanas. Nessa faixa, a vegetação nativa foi suprimida para a expansão de áreas de pastagens e agricultura.

Nas extremidades norte e sul, assim como na faixa leste, encontram-se distribuídas as unidades médias e grandes. Essa última classe, em particular, recebe maior atenção, apresentando-se de forma pontual na paisagem e concentrando a maior parte da vegetação

remanescente.

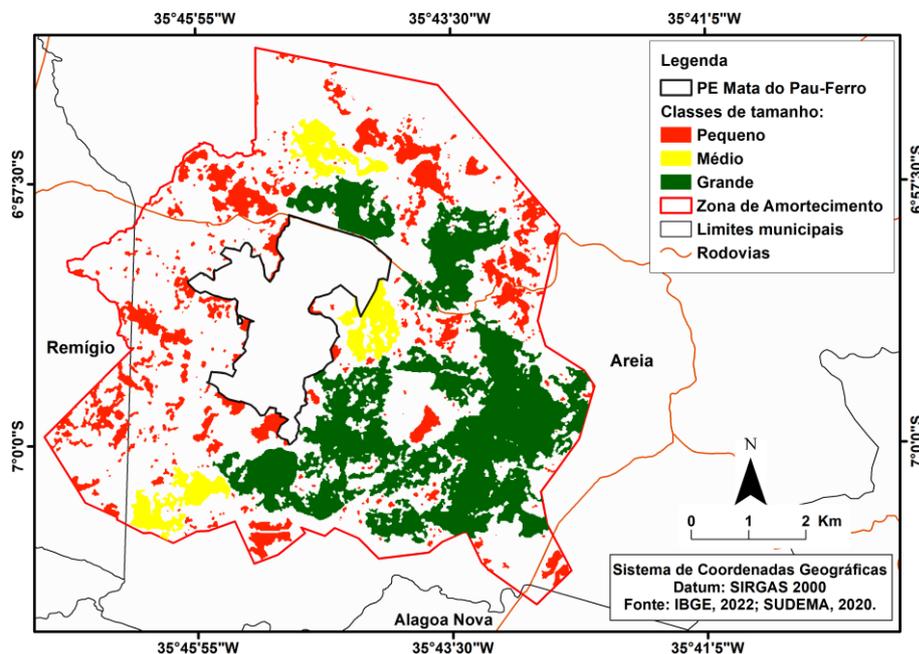


Figura 2 – Espacialização das classes de tamanho dos fragmentos. Fonte: elaboração própria (2023).

Na análise exploratória realizada no perímetro desses fragmentos, observa-se que os valores de pixel de CO₂flux, NDVI e sPRI não apresentaram acentuada variação, exibindo, assim, a predominância de valores próximos (Figura 3). O índice CO₂flux apresentou seus quartis entre 0,2 e 0,4, e expôs uma mediana de 0,31, sendo registrada também a ocorrência de *outliers*.

Em seguida, no NDVI, os quartis se posicionaram entre 0,8 e 1, registrando mediana de 0,89, e *outliers* que se distribuem entre 0,1 e 1. O sPRI (PRI reescalonado), por sua vez, apresentou valores semelhantes aos verificados no CO₂flux. Os quartis encontram-se entre 0,2, e 0,5, a mediana exposta é de 0,36, enquanto os *outliers* situam-se entre 0,2 e 0,6.

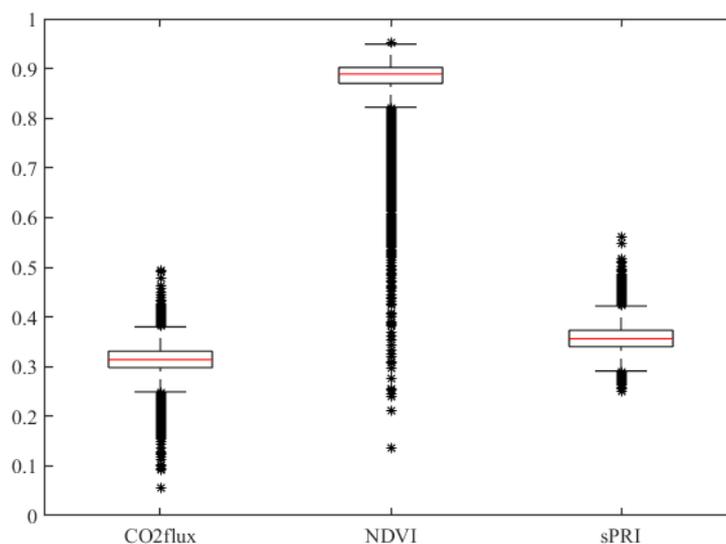


Figura 3 – Boxplot dos valores de CO₂flux, NDVI e sPRI. Fonte: elaboração própria (2023).

A espacialização do NDVI demonstra que os maiores valores ocorrem de forma notável no PE Mata do Pau-Ferro e no maior fragmento florestal da Zona de Amortecimento, situado na porção leste (Figura 4), indicando maior concentração de biomassa fotossinteticamente ativa ou vigor da vegetação verde (COLTRI *et al.*, 2013; ROUSE *et al.*, 1973; SILVA *et al.*, 2018). Os maiores valores estão representados pela classe 5, que contém o intervalo de 0,885 a 0,953, ao passo que os menores são indicados pela classe 1, com intervalo de 0,137 a 0,691. Essa última é registrada exclusivamente na Zona de Amortecimento, associada aos menores fragmentos. Os números expressados permitem afirmar que os valores do índice variam de muito baixos a altos, compreendendo diferentes densidades e estados de conservação da vegetação.

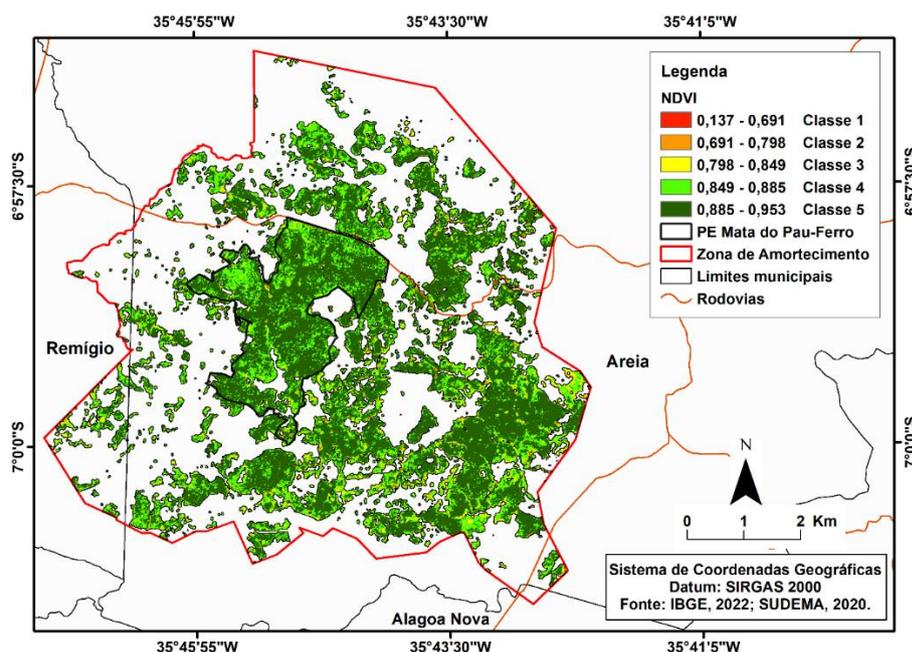


Figura 4 – NDVI no PE Mata do Pau Ferro e Zona de Amortecimento. Fonte: elaboração própria (2023).

A classe 5 também se apresenta como a mais representativa em termos de área, ocupando 55,92% da área de estudo, e estando amplamente distribuída (Tabela 3). Quadro semelhante é visto para a classe 4, que possui o intervalo de 0,849 a 0,885, e ocorre notadamente, assim como a classe 5, no PE Mata do Pau-Ferro e na Zona de Amortecimento, registrando um percentual de 31,55%, o segundo maior verificado. A classe 3 detém o terceiro percentual, com 9,82%, enquanto as classes 2 e 1, compreendem 2,41% e 0,31%, respectivamente, constituindo assim, as classes menos abrangentes, que em conjunto somam 12,54% da área.

Tabela 3 – Percentual ocupado pelas classes de NDVI na paisagem

Classes	Intervalo	Área (ha)	%
Classe 1	0,137 - 0,691	8,31	0,31
Classe 2	0,691 - 0,798	64,23	2,41
Classe 3	0,798 - 0,849	261,93	9,82
Classe 4	0,849 - 0,885	841,63	31,55
Classe 5	0,885 - 0,953	1491,76	55,92
Total	-	2667,87	100

Fonte: elaboração própria (2023).

As classes menos abrangentes estão distribuídas particularmente nas áreas de borda dos fragmentos florestais da Zona de Amortecimento, evidenciando uma vegetação alterada, possivelmente em consequência dos efeitos de borda (LAURANCE; VASCONCELOS, 2009; MILHEIRAS; MACE, 2019). No que diz respeito ao sPRI, os maiores valores são apresentados pela classe 5, que varia de 0,393 a 0,561, e os menores pela classe 1, que se refere ao intervalo de 0,251 a 0,328 (Figura 5). Desse modo, considerando os valores máximo e mínimo que o índice pode atingir, é possível inferir que as faixas de valores encontradas variam de baixas a medianas (AQUINO *et al.*, 2018; HE *et al.*, 2016).

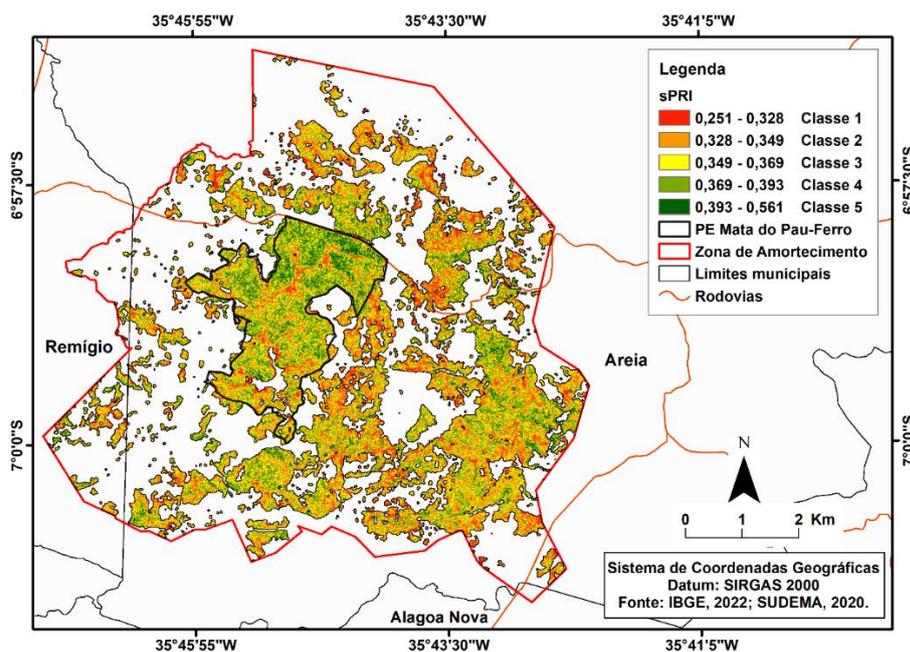


Figura 5 – sPRI no PE Mata do Pau Ferro e Zona de Amortecimento. Fonte: elaboração própria (2023).

A quantificação das áreas demonstra que a classe 3 apresenta o maior percentual de área coberta, ao passo que a classe 2 expõe a menor extensão (Tabela 4). Diferente do NDVI, os menores valores do sPRI representam as áreas mais efetivas no uso da luz no processo de fotossíntese (GAMON; SERRANO; SURFUS, 1997; SILVA; LACERDA, 2021).

A espacialização dos valores do índice revela que todas as classes ocorrem simultaneamente no PE Mata do Pau-Ferro e na Zona de Amortecimento, sugerindo semelhanças nas condições da vegetação. Ainda, na distribuição espacial dos valores do sPRI, percebe-se com maior ênfase a presença de números mais baixos nas bordas dos fragmentos florestais.

Tabela 4 – Percentual ocupado pelas classes de sPRI na paisagem

Classes	Intervalo	Área (ha)	%
Classe 1	0,251 - 0,328	343,03	12,86
Classe 2	0,328 - 0,349	735,42	27,57
Classe 3	0,349 - 0,369	810,51	30,38
Classe 4	0,369 - 0,393	572,86	21,47
Classe 5	0,393 - 0,561	206,04	7,72
Total	-	2667,87	100

Fonte: elaboração própria (2023).

Os valores para o índice CO_2flux obtidos para a área de estudo são apresentados na Figura 6, onde é possível observar um gradiente indicando as áreas de maior e menor capacidade de sequestro de carbono pela vegetação. Os tons mais escuros do gradiente são mais concentrados no PE Mata do Pau-Ferro, enquanto na Zona de Amortecimento os tons mais claros estão amplamente distribuídos.

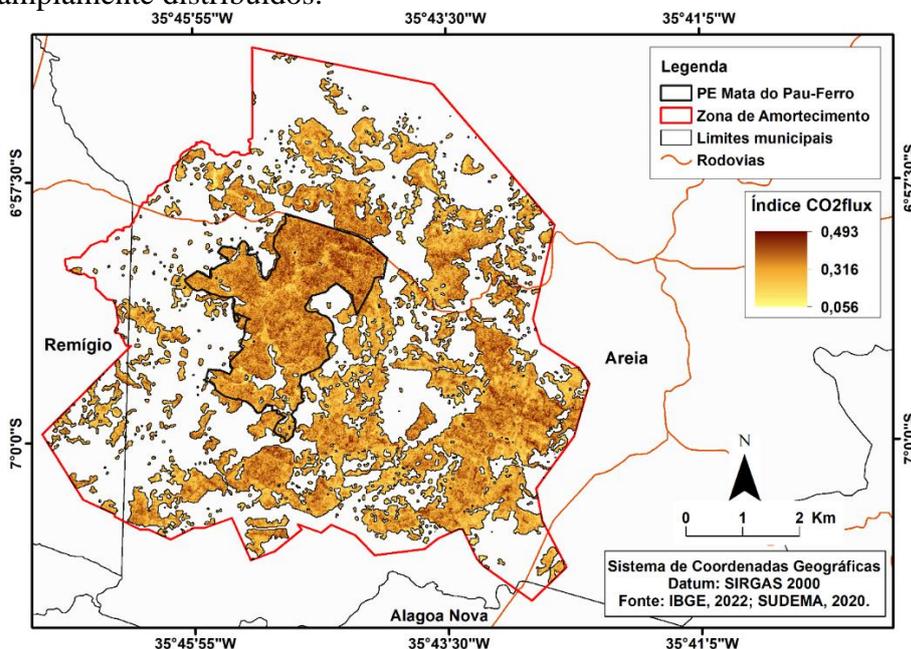


Figura 6 – Índice CO_2flux no PE Mata do Pau-Ferro e Zona de Amortecimento. Fonte: elaboração própria (2023).

De modo geral, verifica-se que, em sua maior parte, a área de estudo apresenta valores semelhantes, demonstrando a eficiência até mesmo dos menores fragmentos florestais no sequestro de carbono. Na Figura 7, são apresentadas linhas de transectos realizadas para o NDVI, sPRI e CO_2flux , dispostas sobre os maiores fragmentos da área de estudo. Essas linhas possibilitam a análise das variações nos valores de pixel encontradas nesses fragmentos.

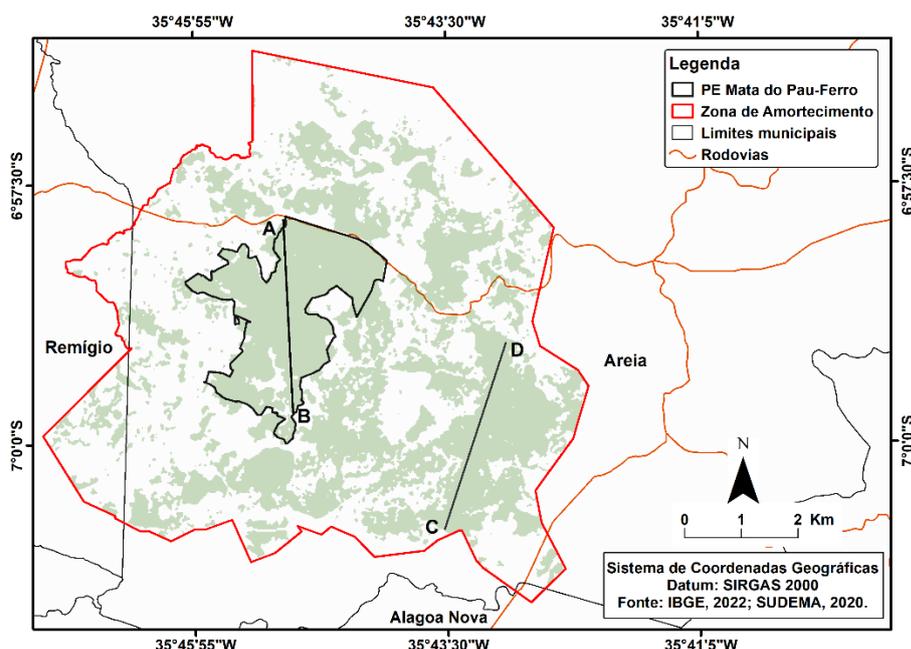


Figura 7 – Transectos para análise dos valores de NDVI, sPRI e NDVI. Fonte: elaboração própria (2023).

A partir da visualização, percebe-se uma variação nos valores de NDVI, sPRI e CO₂flux ao longo dos dois transectos (Figura 8). Na linha A-B, correspondente ao PE Mata do Pau-Ferro, os pixels de NDVI variaram entre 0,8 e 1,0, indicando uma vegetação densa. Já os valores de sPRI e CO₂flux mantiveram-se entre 0,2 e 0,5, conforme observado também no segmento C-D. Nesse contexto, o sPRI apresenta valores mais próximos ao CO₂flux em comparação com o NDVI, considerando o intervalo entre eles. Os picos observados estão associados à vegetação com maior capacidade fotossintética, enquanto os vales correspondem a áreas com vegetação alterada ou mesmo em estágios iniciais de regeneração nos fragmentos atravessados.

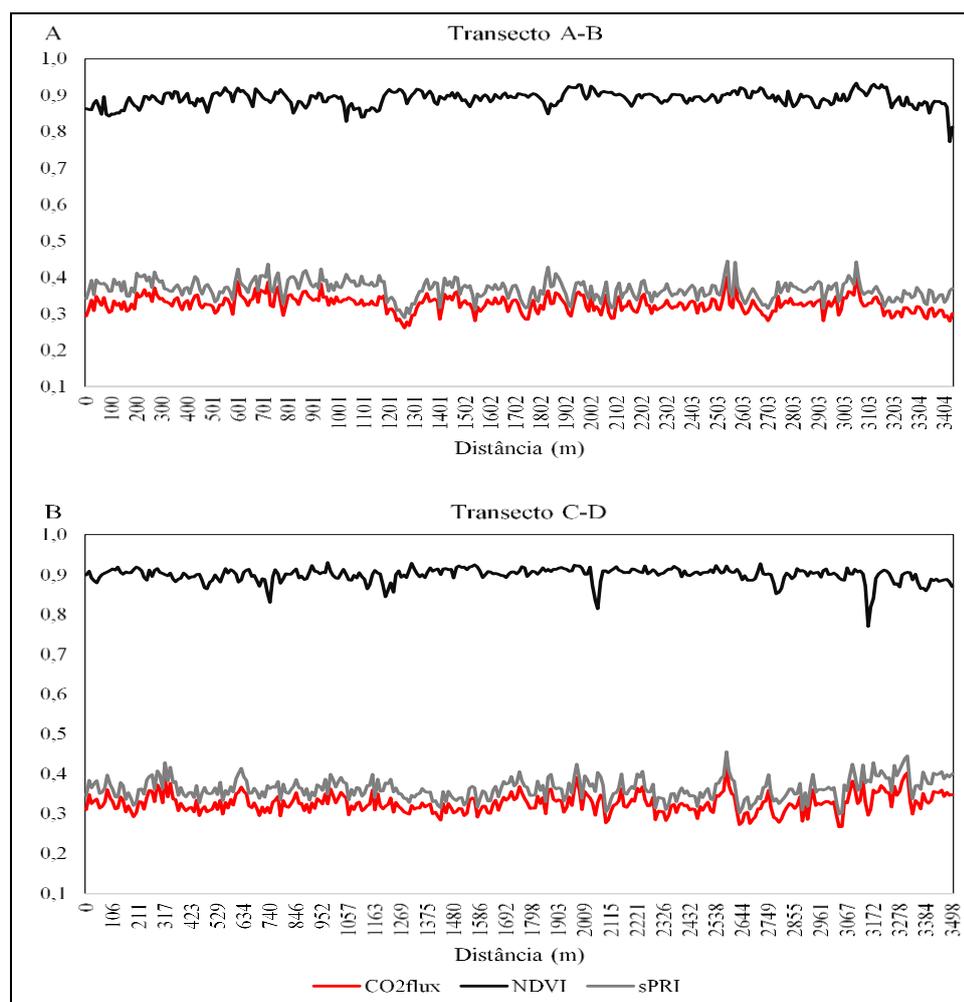


Figura 8 – Transectos A-B e C-D no PE Mata do Pau-Ferro e na Zona de Amortecimento. Fonte: elaboração própria (2023).

Com base na variação observada, nota-se uma menor relação entre os valores de NDVI e CO₂flux, devido à distância em que os valores se concentram e ao comportamento não semelhante das curvas, especialmente quando considerados os picos e os vales ao longo da transecção (Figura 8). Essa percepção é reforçada pelo baixo coeficiente de determinação obtido a partir da regressão entre os valores de pixels desses índices ($R^2 = 0,172$) (Figura 9).

De maneira distinta, observa-se uma relação mais significativa entre sPRI e CO₂flux, como também comprovado pelo valor de $R^2 = 0,718$. Nesse contexto, ao contrário do NDVI, o sPRI mostrou-se um indicador mais eficaz de áreas de sequestro de carbono, evidenciando sua sensibilidade em identificar regiões com maior e menor sequestro, bem como alterações no estado de conservação da vegetação, que não são diretamente percebidas no NDVI.

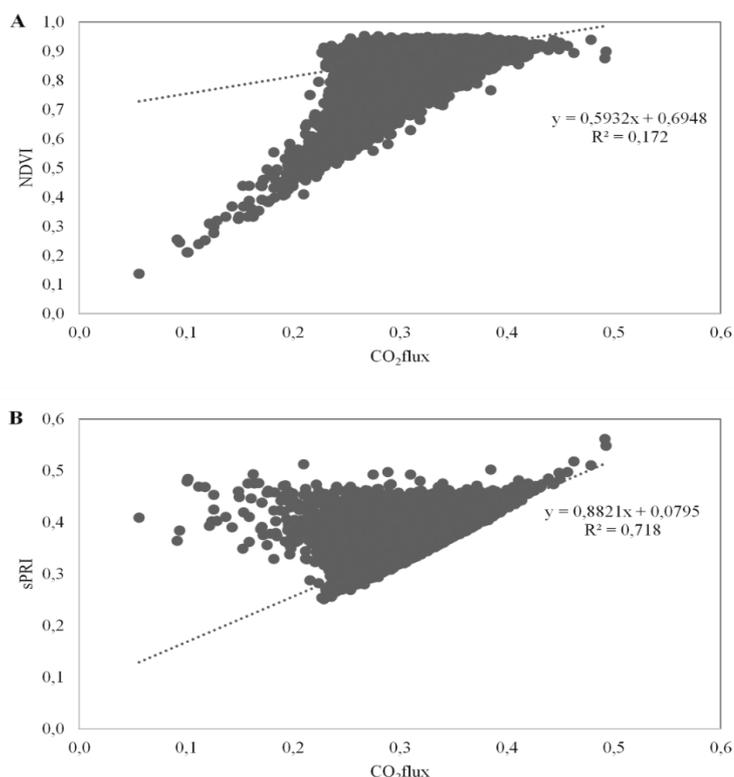


Figura 9 – A: Regressão linear simples entre NDVI e CO₂flux. B: Regressão linear simples entre sPRI e CO₂flux. Fonte: elaboração própria (2023).

O ordenamento dos valores de CO₂flux obtidos para ambos os espaços possibilitou identificar as seguintes capacidades de oferta do serviço ecossistêmico de sequestro de carbono: alta, média, baixa, muito baixa e não relevante. Notadamente, a partir da Figura 10, verifica-se que as classes de capacidade de oferta média e baixa ocorrem em maior proporção, enquanto as demais classes se apresentam em dimensões menores.

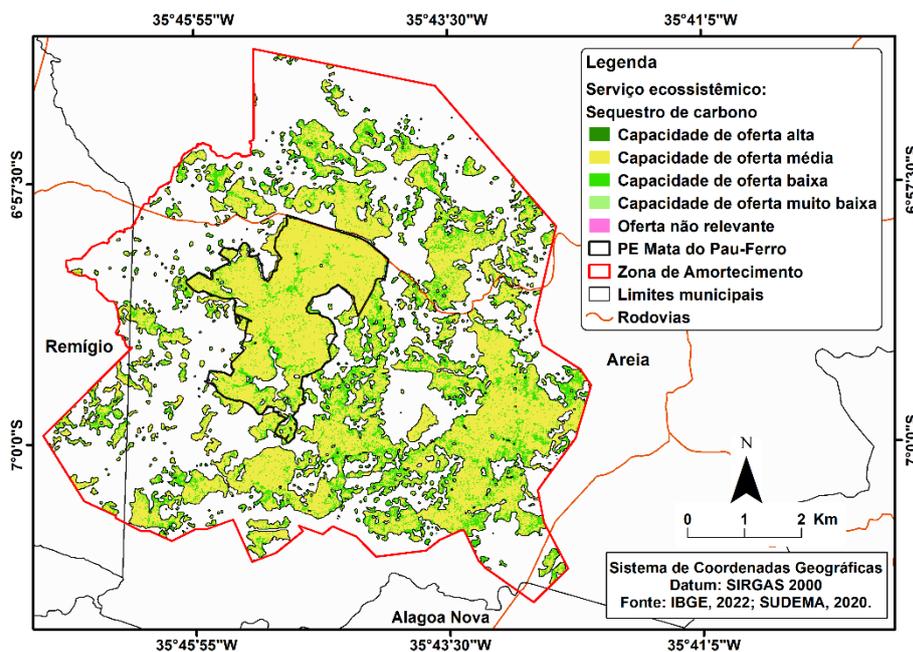


Figura 10 – Capacidade de oferta para o serviço ecossistêmico de sequestro de carbono. Fonte: elaboração própria (2023).

Nos fragmentos pequenos da Zona de Amortecimento têm-se a predominância da capacidade de oferta baixa, que ocupa 71,91% da área (Tabela 5). Em sequência, o segundo maior percentual é listado para a capacidade de oferta média, que compreende 28,06%, enquanto a capacidade de oferta muito baixa é responsável por 0,02% dos fragmentos da classe. Por fim, o menor percentual de área é observado para a oferta não relevante, a saber, 0,003%. Um contexto semelhante se manifesta nos fragmentos médios, posto que, ocorre a predominância da capacidade de oferta baixa, que abrange 70,71%, seguida pelas capacidades de oferta média e alta, que respondem pelos percentuais de 29,28% e 0,01%, respectivamente.

Em relação aos fragmentos grandes, constatou-se que a capacidade de oferta baixa apresenta o percentual de 60,54%, ao passo que a capacidade de oferta média se distribui em 39,45% da área. O menor percentual, por sua vez, foi registrado para a capacidade de oferta muito baixa, que soma apenas 0,01%.

Considerando a área total da Zona de Amortecimento, nota-se que a capacidade de oferta baixa expõe o percentual de 64,96%, enquanto a segunda maior representatividade é atestada para capacidade de oferta média por materializar-se em 35,03% da área. As frações de área restantes encontram-se distribuídas nas capacidades alta, muito baixa e não relevante, apresentadas em menores proporções. No espaço do PE Mata do Pau-Ferro, por sua parte, foram detectadas as capacidades média e baixa, que ocupam dos percentuais de 59,90% e 40,10%, na devida ordem.

Tabela 5 – Capacidade de oferta do serviço ecossistêmico sequestro de carbono no PE Mata do Pau-Ferro e na Zona de Amortecimento

Capacidade de oferta	Área (ha)	%
Zona de Amortecimento: fragmentos pequenos		
Capacidade de oferta é média	174,96	28,06
Capacidade de oferta é baixa	448,33	71,91
Capacidade de oferta é muito baixa	0,12	0,02
Oferta não relevante	0,02	0,003
Total	623,43	100
Zona de Amortecimento: fragmentos médios		
Capacidade de oferta é alta	0,02	0,01
Capacidade de oferta é média	63,40	29,28
Capacidade de oferta é baixa	153,10	70,71
Total	216,52	100
Zona de Amortecimento: fragmentos grandes		
Capacidade de oferta é média	497,94	39,45
Capacidade de oferta é baixa	764,22	60,54
Capacidade de oferta é muito baixa	0,09	0,01
Total	1262,25	100
Somatório Zona de Amortecimento		
Capacidade de oferta é alta	0,02	0,001
Capacidade de oferta é média	736,30	35,03
Capacidade de oferta é baixa	1365,65	64,96
Capacidade de oferta é muito baixa	0,21	0,01
Oferta não relevante	0,02	0,001
Total	2102,20	100
PE Mata do Pau-Ferro		
Capacidade de oferta é média	338,85	59,90
Capacidade de oferta é baixa	226,82	40,10
Total	565,67	100

Fonte: elaboração própria (2023).

Tomando o PE Mata do Pau-Ferro e a Zona de Amortecimento como unidade, infere-se que, as capacidades de oferta baixa e média detêm os maiores percentuais de área ocupada, 59,69% e 40,30%, nessa ordem (Tabela 6). As demais capacidades, por outro lado, exibem percentuais mínimos de área. Nesses termos, a síntese das áreas assumidas pelas capacidades de oferta no PE Mata do Pau-Ferro e na citada Zona confirmam a tendência expressada anteriormente nas classes de tamanho, a predominância da capacidade de oferta baixa na maior parte do perímetro considerado.

Tabela 6 – Área total da capacidade de oferta

PE Mata do Pau-Ferro e Zona de Amortecimento		
Capacidade de oferta	Área (ha)	%
Capacidade de oferta é alta	0,02	0,001
Capacidade de oferta é média	1075,15	40,30
Capacidade de oferta é baixa	1592,47	59,69
Capacidade de oferta é muito baixa	0,21	0,01
Oferta não relevante	0,02	0,001
Total	2667,87	100

Fonte: elaboração própria (2023).

A partir da análise das capacidades de oferta manifestadas durante o mapeamento do serviço ecossistêmico de sequestro de carbono, é possível constatar que a capacidade de oferta alta, assim como a oferta não relevante, detêm um dos menores percentuais de área coberta. Além disso, a capacidade de oferta muito alta não foi registrada. Dessa forma, a Zona de Amortecimento, juntamente com o Parque, apresenta com maior precisão ofertas variando entre muito baixa e média.

3.1 Discussão

Os resultados obtidos evidenciam a relevância dos fragmentos florestais no sequestro de carbono, enfatizando a importância da Unidade de Conservação e de sua Zona de Amortecimento para a proteção dos remanescentes florestais do Brejo de Altitude. Estes espaços são caracterizados por restrições e desempenham um papel fundamental na manutenção da cobertura florestal. Apesar da maior permissividade observada na Zona de Amortecimento em relação ao manejo da vegetação, constata-se que ela possui capacidades de sequestro de carbono semelhantes às registradas no Parque. Isso sugere condições próximas no que diz respeito à estrutura e conservação da vegetação (ANDRADE; XAVIER, 2020; BRASIL, 2011).

Na Zona de Amortecimento do Parque, até mesmo os fragmentos pequenos, sujeitos a intensas alterações ecológicas devido aos efeitos de borda, demonstraram uma notável atividade no sequestro do carbono. Dessa forma, independentemente do tamanho, todos os fragmentos florestais contribuíram para a prestação do serviço ecossistêmico. Na área de estudo, os efeitos de borda são provocados pelo contato entre florestas e pastagens, predominantemente, e podem ser caracterizados como desregulações ecológicas que ocorrem na periferia do ecossistema florestal devido a mudanças microclimáticas. Essas mudanças geram condições desfavoráveis para a biodiversidade, incluindo aumento da temperatura, redução da umidade e alterações na altura, diâmetro e diversidade das espécies vegetais (CAMPOS *et al.*, 2018).

No entanto, é importante considerar que o avanço dos efeitos de borda sobre os fragmentos exerce uma influência negativa no sequestro de carbono. Portanto, se os usos da terra atualmente presentes na área se mantiverem, poderão ser observadas faixas de valores mais baixos no CO₂flux para os fragmentos, especialmente os pequenos e médios, devido à maior suscetibilidade às alterações ecológicas (FERRAZ *et al.*, 2014; MILHEIRAS; MACE, 2019; MURCIA, 1995).

As capacidades de oferta registradas variam de oferta não relevante a alta, sem que seja percebida uma oferta muito alta, mesmo em uma área florestal densa durante o período chuvoso. A falta de capacidade muito alta ou mesmo a ausência de maiores percentuais de área para a capacidade de oferta alta pode estar relacionada à característica do NDVI de saturar seus valores em áreas de vegetação densa, como ocorre no PE Mata do Pau-Ferro e na Zona de Amortecimento. Essa condição impede a observação de valores mais elevados para o índice (GU *et al.*, 2013; TESFAYE; AWOKE, 2021). Além disso, as capacidades de oferta podem ser influenciadas pela sazonalidade, já que o período chuvoso exerce influência sobre o NDVI, resultando em repercussões nos valores de CO₂flux (GAMON *et al.*, 2015).

Contudo, as capacidades evidenciadas pelo índice no presente estudo destacam as contribuições da área protegida e de sua Zona de Amortecimento para atender à demanda global do serviço ecossistêmico. Isso ocorre porque se trata de um serviço usufruído em todo o globo, independentemente da localização das áreas responsáveis pelo sequestro (MEIRA *et al.*, 2020; NAIDOO *et al.*, 2008).

Resultados semelhantes para o CO₂flux foram observados para áreas florestais densas em diversos municípios do Brasil. Na Mata Atlântica, Castanheira, Landim e Lourenço (2014) verificaram valores acima de 0,50 para a maior parte da Floresta Estadual Edmundo Navarro de Andrade (FEENA), no município de Rio Claro, estado de São Paulo, por outro lado, Folharini e Oliveira (2017) registraram valores entre 0 e 0,43 para áreas florestais no município de Cubatão, enquanto Silva *et al.* (2018) obtiveram valores próximos a 0,31 para remanescentes densos no município de Sorocaba, ainda em São Paulo, os quais os autores classificaram como indicativos de baixo sequestro de carbono.

Na Amazônia, números variando de 0,14 a 0,37 foram mencionados para a Área de Proteção Ambiental Raimundo Irineu Serra (APARIS), município de Rio Branco, no Acre, por Almeida e Rocha (2021). Há que se considerar, neste caso, que tratando-se de uma área protegida de uso sustentável, existe uma permissividade no uso dos recursos naturais, o que por sua vez, pode estar inviabilizando a manifestação de maiores taxas de captura de carbono atmosférico, dado que os índices que possibilitam a geração do CO₂flux são sensíveis a perturbações na vegetação e, assim, influenciam nos valores (VIEIRA *et al.*, 2021).

Ao comparar os números apresentados para outros ambientes do território nacional, observa-se semelhanças nas faixas de valores registradas para o PE Mata do Pau-Ferro e sua Zona de Amortecimento, evidenciando capacidades próximas no que diz respeito ao sequestro de carbono. Acrescentando-se a isso, resultados correlatos foram constatados para os valores de sPRI e NDVI nos estudos mencionados, reforçando a relação entre esses parâmetros e o CO₂flux.

O serviço ecossistêmico de sequestro de carbono teve sua importância ressaltada nas últimas décadas, em razão do aumento das concentrações de carbono na atmosfera terrestre para além nos níveis pré-industriais, com tendência a promover mudanças climáticas em todo o globo (HOLMBERG *et al.*, 2019; SULLIVAN *et al.*, 2017). Assim, as florestas encontram-se no centro das discussões, devido as suas capacidades de sequestrar e armazenar carbono, podendo também atuar como fontes de carbono, quando submetidas a perturbações (CSILLIK *et al.*, 2019).

Nesse contexto, cresce a necessidade de quantificação dos estoques de carbono na biomassa vegetal e no solo dos ecossistemas florestais, visando subsidiar políticas de carbono e coletar informações que orientem a implementação de ações de conservação e regeneração de florestas em todo o mundo (AMARAL; BAPTISTA; BEZERRA, 2020; MEIRA *et al.*, 2020). Nesse cenário, o CO₂flux certamente pode auxiliar na identificação e mapeamento de áreas proeminentes para o sequestro e armazenamento de carbono. Os índices que compõem o CO₂flux permitem estimativas das condições da vegetação e da biomassa estocada, e demonstram eficácia no presente estudo (DAI *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2021).

A criação de áreas protegidas de proteção integral, juntamente com a implantação de suas zonas de amortecimento, mostra ser uma das formas mais promissoras de manutenção das florestas como sumidouros de carbono. As restrições legais desses espaços impedem, até certo ponto, maiores perturbações ecológicas que possam inverter a função dessas áreas florestadas no ciclo do carbono. Ademais, a redução do desmatamento nas zonas de amortecimento também pode contribuir para a diminuição das emissões de carbono e o aumento dos estoques.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As capacidades de sequestro de carbono identificadas pelo índice CO₂flux no PE Mata do Pau-Ferro e na Zona de Amortecimento variam entre não relevante e alta, sendo a capacidade baixa predominante na zona, ao passo que a capacidade média prevalece na Unidade de Conservação. As informações geradas por meio das técnicas empregadas evidenciam que a área possui ativa contribuição na ciclagem do carbono, operando, dessa forma, como sumidouro de carbono. Por outro lado, a degradação da vegetação pode transformar a área em fonte de emissão. Nesse contexto, destaca-se a importância de áreas protegidas florestais para a manutenção do sequestro e armazenamento de carbono.

Os valores do NDVI variaram consideravelmente, abrangendo desde números muito baixos até altos, sinalizando diferenças na atividade fotossintética e apontando espacialmente variações no estado de conservação da vegetação nativa, notadamente nas bordas dos fragmentos florestais. No mesmo sentido, o sPRI também apresentou diferenças nos remanescentes, demonstrando variados níveis de aproveitamento da luz durante a fotossíntese.

No contexto das mudanças climáticas, onde há uma crescente demanda pela quantificação dos estoques de carbono para subsidiar políticas de conservação e créditos de carbono, o índice CO₂flux apresenta potencial para identificar e mapear as capacidades das áreas vegetais para sequestrar carbono. Adicionalmente, as informações fornecidas por meio desse índice podem ser utilizadas para comunicar a importância dos fragmentos remanescentes de Mata Atlântica a diversos públicos, contribuindo para a conscientização ambiental sobre a temática em questão.

5. AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

REFERÊNCIAS

ALA-HULKKO, T.; KOTAVAARA, O.; ALAHUHTA, J.; HJORT, J. Mapping supply and demand of a provisioning ecosystem service across Europe. **Ecological Indicators**, v. 103, p. 520–529, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1470160X1930295X>. Acesso em: 5 fev. 2021.

ALMEIDA, J. R. da R.; ROCHA, K. da S. Caracterização da cobertura vegetal em Área de Proteção Ambiental no Sudoeste amazônico com dados de satélite. In: OLIVEIRA, R. J. de (org.). **Silvicultura e Manejo Florestal: Técnicas de Utilização e Conservação da Natureza - Volume 2**. Guarujá: Editora Científica Digital, 2021. p. 55–70.

AMARAL, R.; BAPTISTA, G. M. M.; BEZERRA, M. C. L. Identifying Carbon Sinks with the Use of Hyperspectral Images: a Potential Tool for Landscape Planning. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLII-3/W12, n. Lagirs, p. 465–469,

2020. Disponível em: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-3-W12-2020/465/2020/>. Acesso em: 6 out. 2021.

ANDRADE, L. A. de; XAVIER, K. R. F. Análise florística e estrutural de matas ciliares ocorrentes em Brejo de Altitude no município de Areia - PB. In: SANTOS, H. A.; COSTA, E. G.; ARAÚJO, H. F.; MENDONÇA, J. D. L.; SILVA, T. C. F. (org.). **Plano de manejo do Parque Estadual Mata do Pau-Ferro**. Cabedelo, PB: Editora UNIESP, 2020. p. 121–134.

AQUINO, D. N.; ROCHA NETO, O. C.; MOREIRA, M. A.; TEIXEIRA, A. S.; ANDRADE, E. M. Use of remote sensing to identify areas at risk of degradation in the semi-arid region. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, n. 3, p. 420–429, 2018. Disponível em: <http://www.gnresearch.org/doi/10.5935/1806-6690.20180047>. Acesso em: 2 out. 2021.

ARRUDA, L. V.; RODRIGUES, L. P. M.; SILVA, I. C.; SOUZA, R. S. Configuração geoambiental e dinâmica do espaço agrário atual do Brejo Paraibano (PB), Paraíba, Brasil. **Revista Ciência Geográfica**, v. 26, n. 01, p. 72–102, 2022. Disponível em: <https://ppg.revistas.uema.br/index.php/cienciageografica/article/view/2874>. Acesso em: 2 out. 2022.

ARTIGAS, R. C.; SOUZA, B. I.; LIMA, R. P. Climatic changes and distribution of plant formations in the state of Paraíba, Brazil. **Cuadernos de Investigación Geográfica**, v. 48, n. 1, p. 157–174, 2022. Disponível em: <https://publicaciones.unirioja.es/ojs/index.php/cig/article/view/5044>. Acesso em: 22 mar. 2023.

BAPTISTA, G. Mapeamento do sequestro de carbono e de domos urbanos de CO₂ em ambientes tropicais, por meio de sensoriamento remoto hiperespectral. **Geografia**, Rio Claro, v. 29, n. 2, p. 189–202, 2004. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/ageteo/article/view/853/860>. Acesso em: 5 abr. 2020.

BRASIL. SNUC: **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000; Decreto nº 4.340, de 22 de agosto de 2002; Decreto nº 5.746, de 5 de abril de 2006. Plano Estratégico Nacional de Áreas Protegidas: Decreto nº 5.758, de 13 de abril de 2006**. Brasília: MMA, 2011.

BURKHARD, B.; KROLL, F.; MÜLLER, F.; WINDHORST, W. Landscapes' capacities to provide ecosystem services - A concept for land-cover based assessments. **Landscape Online**, v. 15, n. 1, p. 1–22, 2009. Disponível em: <https://www.landscape-online.org/index.php/lo/article/view/LO.200915>. Acesso em: 9 abr. 2020.

CAMPOS, J. O.; LIMA, E. R. V.; COSTA, D. F. S. Uso e cobertura da terra em áreas protegidas na zona de amortecimento do parque estadual Mata do Pau-ferro, Paraíba, Brasil. **Revista Espaço & Geografia**, Brasília, v. 1, n. 26, 2023. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/article/view/43991>. Acesso em: 30 ago. 2023.

CAMPOS, J. O.; SANTOS, J. S.; SALVADOR, M. S. S.; LIMA, V. R. P. Análise e propagação dos efeitos de borda no Parque Estadual Mata do Pau-Ferro, Areia-PB. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 12, n. 2, p. 21–36, 2018. Disponível em: <https://revista.ufr.br/rga/article/view/5103>. Acesso em: 8 fev. 2021.

CARNEIRO, K. de A. A.; SOUSA, L. R.; FRAGA, V. S.; SILVA, A. P.; UTUNI, V. H. S.; SANTOS, R. F.; VENDRUSCOLO, J. Solos do brejo paraibano: Influências do clima, do relevo e do material de origem. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. 1–13, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/16545>. Acesso em: 8 nov. 2021.

CASTANHEIRA, L. B.; LANDIM, P. M. B.; LOURENÇO, R. W. Variabilidade do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em Áreas de reflorestamento: Floresta estadual “Edmundo Navarro de Andrade” (FEENA)/Rio Claro (SP). **Geociências**, v. 33, n. 3, p. 449–456, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/287092184_Variabilidade_do_Indice_de_vegetaCAo_por_diferenCa_normalizada_NDVI_em_Areas_de_reflorestamento_Floresta_estadual_%27edmundo_navarro_de_andrade%27_feenar_io_claro_SP. Acesso em: 5 out. 2021.

COLTRI, P. P.; ZULLO, J.; RIBEIRO DO VALLE GONCALVES, R.; ROMANI, L. A. S.; PINTO, H. S. Coffee Crop's Biomass and Carbon Stock Estimation With Usage of High Resolution Satellites Images. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 6, n. 3, p. 1786–1795, 2013. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6520004/>. Acesso em: 2 out. 2021.

COSTANZA, R.; DE GROOT, R.; BRAAT, L.; KUBISZEWSKI, I.; FIORAMONTI, L.; SUTTON, P.; FARBER, S.; GRASSO, M. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? **Ecosystem Services**, v. 28, p. 1–16, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008>. Acesso em: 6 abr. 2020.

CROSSMAN, N. D.; BURKHARD, B.; NEDKOV, S.; WILLEMEN, L.; PETZ, K.; PALOMO, I.; DRAKOU, E. G.; MARTÍN-LOPEZ, B.; MCPHEARSON, T.; BOYANOVA, K.; ALKEMADE, R.; EGOH, B.; DUNBAR, M. B.; MAES, J. A blueprint for mapping and modelling ecosystem services. **Ecosystem Services**, v. 4, p. 4–14, 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212041613000041>. Acesso em: 12 jun. 2020.

CSILLIK, O.; KUMAR, P.; MASCARO, J.; O'SHEA, T.; ASNER, G. P. Monitoring tropical forest carbon stocks and emissions using Planet satellite data. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 17831, 2019. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-54386-6>. Acesso em: 8 out. 2021.

DAI, P. V. S.; BAILO, F. H. R.; AZEVEDO, G. B. de; FAGUNDES, L. A.; TRENTO, A. C. S. Estimativa de volume de madeira baseada em índices de vegetação. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 129, p. 1–12, 2021. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr129/2318-1222-scifor-49-129-e3301.pdf>. Acesso em: 8 out. 2021.

FAO. **Global Forest Resources Assessment 2020**. Rome: FAO, 2020.

FERRAZ, S. F. B.; FERRAZ, K. M. P. M. B.; CASSIANO, C. C.; BRANCALION, P. H. S.; DA LUZ, D. T. A.; AZEVEDO, T. N.; TAMBOSI, L. R.; METZGER, J. P. How good are tropical forest patches for ecosystem services provisioning? **Landscape Ecology**, v. 29, n. 2, p. 187–200, 2014. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10980-014-9988-z>. Acesso em: 25 mar. 2021.

FOLHARINI, S. O.; OLIVEIRA, R. C. de. Cálculo do Índice Espectral CO2FLUX em área de mata atlântica e sua relação com processos gravitacionais no município de Cubatão. In: PEREZ FILHO, A.; AMORIM, R. R. (org.). **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**. Campinas - SP: INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNICAMP, 2017. p. 4642–4653.

FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D. **Climatologia do Estado da Paraíba**. Campina Grande: EDUFPG, 2017.

GAMON, J. A.; KOVALCHUCK, O.; WONG, C. Y. S.; HARRIS, A.; GARRITY, S. R. Monitoring seasonal and diurnal changes in photosynthetic pigments with automated PRI and NDVI sensors. **Biogeosciences**, v. 12, n. 13, p. 4149–4159, 2015. Disponível em: <https://bg.copernicus.org/articles/12/4149/2015/>. Acesso em: 6 out. 2021.

GAMON, J. A.; SERRANO, L.; SURFUS, J. S. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. **Oecologia**, v. 112, n. 4, p. 492–501, 1997. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s004420050337>. Acesso em: 20 ago. 2020.

GU, Y.; WYLIE, B. K.; HOWARD, D. M.; PHUYAL, K. P.; JI, L. NDVI saturation adjustment: A new approach for improving cropland performance estimates in the Greater Platte River Basin, USA. **Ecological Indicators**, v. 30, p. 1–6, 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1470160X13000757>. Acesso em: 5 set. 2021.

HE, M.; KIMBALL, J. S.; RUNNING, S.; BALLANTYNE, A.; GUAN, K.; HUENNRICH, F. Satellite detection of soil moisture related water stress impacts on ecosystem productivity using the MODIS-based photochemical reflectance index. **Remote Sensing of Environment**, v. 186, p. 173–183, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425716303224>. Acesso em: 6 out. 2021.

HOLMBERG, M.; AALTO, T.; AKUJÄRVI, A.; ARSLAN, A. N.; BERGSTRÖM, I.; BÖTTCHER, K.; LAHTINEN, I.; MÄKELÄ, A.; MARKKANEN, T.; MINUNNO, F.; PELTONIEMI, M.; RANKINEN, K.; VIHHERVAARA, P.; FORSIUS, M. Ecosystem Services Related to Carbon Cycling – Modeling Present and Future Impacts in Boreal Forests. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, n. March, p. 1–14, 2019. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2019.00343/full>. Acesso em: 5 out. 2021.

IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

KRUSE, M.; PETZ, K. Mapping provisioning ecosystem services. In: BURKHARD, B.; MAES, J. (org.). **Mapping**

Ecosystem Services. Sofia, Bulgaria: Pensoft Publishers, 2017. p. 187–196.

LAURANCE, W. F.; VASCONCELOS, H. L. Consequências ecológicas da fragmentação florestal na Amazônia. **Oecologia brasiliensis**, v. 13, n. 03, p. 434–451, 2009. Disponível em: <https://revistas.ufjr.br/index.php/oa/article/view/7080>. Acesso em: 9 mar. 2021.

MARTÍNEZ-HARMS, M. J.; BALVANERA, P. Methods for mapping ecosystem service supply: a review. **International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management**, v. 8, n. 1–2, p. 17–25, 2012. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21513732.2012.663792>. Acesso em: 11 jun. 2020.

MEA. **Ecosystems and human well-being: synthesis.** Washington, DC: Island Press, 2005.

MEIRA, A. C. S.; MELLO, A. A.; SANQUETTA, C. R.; FERREIRA, R. A. ESTIMATIVAS DE BIOMASSA E CARBONO EM ÁREA DE MATA ATLÂNTICA, IMPLANTADA POR MEIO DE REFLORESTAMENTO MISTO. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, n. 1, p. 130–134, 2020. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/biofix/article/view/67298>. Acesso em: 8 out. 2021.

MILHEIRAS, S. G.; MACE, G. M. Assessing ecosystem service provision in a tropical region with high forest cover: Spatial overlap and the impact of land use change in Amapá, Brazil. **Ecological Indicators**, v. 99, p. 12–18, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1470160X18309476>. Acesso em: 10 ago. 2020.

MURCIA, C. Edge effects in fragmented forests: implications for conservation. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 10, n. 2, p. 58–62, 1995. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169534700889776>. Acesso em: 20 jan. 2021.

NAIDOO, R.; BALMFORD, A.; COSTANZA, R.; FISHER, B.; GREEN, R. E.; LEHNER, B.; MALCOLM, T. R.; RICKETTS, T. H. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 105, n. 28, p. 9495–9500, 2008. Disponível em: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0707823105>. Acesso em: 16 ago. 2020.

NASCIMENTO, M. B.; BANDEIRA, M. M.; ARAÚJO, L. E. Variabilidade climática da precipitação do município de Areia no estado da Paraíba, Brasil. **Gaia Scientia**, v. 13, n. 3, p. 24–37, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufpb.br/index.php/gaia/article/view/41925>. Acesso em: 11 dez. 2023.

OLIVEIRA, M. T.; GANEM, K. A.; BAPTISTA, G. M. M. Análise Sazonal Da Relação Entre Sequestro De Carbono E Ilhas De Calor Urbanas Nas Metrôpoles De São Paulo, Rio De Janeiro. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 4, p. 807–825, 2017. Disponível em: <http://www.isie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/view/1956>. Acesso em: 2 out. 2021.

OTUKEI, J. R.; BLASCHKE, T. Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 12, p. S27–S31, 2010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0303243409001135>. Acesso em: 6 ago. 2020.

PARAÍBA. Decreto nº 26.098, de 04 de agosto de 2005. Cria o Parque Estadual MATA DO PAU FERRO, no Estado da Paraíba, e dá outras providências. **Diário Oficial [do] Estado da Paraíba: Poder Executivo**, João Pessoa – PB, n. 12.995, p. 2, 5 maio. 2005. Disponível em: https://www.jusbrasil.com.br/diarios/44314636/doespb-05-08-2005-pg-2?ref=next_button. Acesso em: 8 set. 2019.

PAUDYAL, K.; BARAL, H.; BURKHARD, B.; BHANDARI, S. P.; KEENAN, R. J. Participatory assessment and mapping of ecosystem services in a data-poor region: Case study of community-managed forests in central Nepal. **Ecosystem Services**, v. 13, p. 81–92, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221204161500008X>. Acesso em: 11 set. 2020.

RAHMAN, A. F.; GAMON, J. A.; FUENTES, D. A.; ROBERTS, D.; PRENTISS, D.; QIU, H. Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. *In: AVIRIS WORKSHOP2000*, Pasadena, Califórnia. **Proceedings**. Pasadena, Califórnia: JPL/NASA, 2000.

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, 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0006320709000974>. Acesso em: 20 jan. 2021.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington, DC. **Proceedings**. Washington, DC: NASA, United States, 1973. p. 309- 317.

SAATCHI, S. S.; HARRIS, N. L.; BROWN, S.; LEFSKY, M.; MITCHARD, E. T. A.; SALAS, W.; ZUTTA, B. R.; BUERMANN, W.; LEWIS, S. L.; HAGEN, S.; PETROVA, S.; WHITE, L.; SILMAN, M.; MOREL, A. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 24, p. 9899–9904, 2011. Disponível em: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1019576108>. Acesso em: 8 out. 2021.

SANTOS, H. A.; COSTA, E. G.; ARAÚJO, H. F.; MENDONÇA, J. D. L.; SILVA, T. C. F. **Plano de manejo do Parque Estadual Mata do Pau-Ferro**. Cabedelo, PB: Editora UNIESP, 2020.

SILVA, D. C. C.; MATOS, D.; OLIVEIRA, R. A.; SIMONETTI, V. C.; LOURENÇO, R. W. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE SEQUESTRO DE CARBONO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRAJIBU-MIRIM EM SOROCABA (SP). In: TULLIO, L. (org.). **Aplicações e Princípios do Sensoriamento Remoto 2**. 2. ed. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2018. p. 80–93.

SILVA, E. J.; ROSA, D. M.; VENDRUSCOLO, J.; CAVALHEIRO, W. C. S. Potencial de imagens do Sentinel-2 na estimativa da biomassa de *Tectona grandis* L.f. a Amazônia Ocidental. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, p. 1–19, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/19491>. Acesso em: 8 out. 2021.

SILVA, J. G. M.; QUINTANILHA, J. A.; GROHMANN, C. H.; COSTA, D. R.; COSTA, J. D. M.; SILVA, J. M. S. Distribuição da Biomassa vegetal e sequestro de carbono na sub-bacia do Rio Pirajibu no município de Sorocaba/SP. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 3, p. 1647–1656, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/256662>. Acesso em: 15 ago. 2023.

SILVA, M. A.; LACERDA, C. S. A. Análise do sequestro de carbono na região do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros utilizando técnicas de sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 9, n. 3, p. 251–270, 2021. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo/article/view/13542>. Acesso em: 10 out. 2022.

SULLIVAN, M. J. P. *et al.* Diversity and carbon storage across the tropical forest biome. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 39102, 2017. Disponível em: <http://www.nature.com/articles/srep39102>. Acesso em: 5 out. 2021.

SYRBE, R.-U.; SCHRÖTER, M.; KARSTEN, G.; WALZ, U.; BURKHARD, B. What to map? In: BURKHARD, B.; MAES, J. (org.). **Mapping Ecosystem Services**. Sofia, Bulgaria: Pensoft Publishers, 2017. p. 151–158.

TESFAYE, A. A.; AWOKE, B. G. Evaluation of the saturation property of vegetation indices derived from sentinel-2 in mixed crop-forest ecosystem. **Spatial Information Research**, v. 29, n. 1, p. 109–121, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s41324-020-00339-5>. Acesso em: 2 nov. 2021.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127–150, 1979. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0034425779900130>. Acesso em: 8 ago. 2020.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, 1991.

VIEIRA, R. M. S. P.; TOMASELLA, J.; BARBOSA, A. A.; POLIZEL, S. P.; OMETTO, J. P. H. B.; SANTOS, F. C.; FERREIRA, Y. da C.; TOLEDO, P. M. de. Land degradation mapping in the MATOPIBA region (Brazil) using remote sensing data and decision-tree analysis. **Science of The Total Environment**, v. 782, p. 146900, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969721019707>. Acesso em: 6 out. 2021.