



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS DE CHAPADINHA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

ALAYNE ARAÚJO RODRIGUES

**MONITORAMENTO DA VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA
CONCENTRAÇÃO ATMOSFÉRICA DE DIÓXIDO DE CARBONO SOBRE ÁREAS
AGRÍCOLAS NA ROTA DE EXPORTAÇÃO DE GRÃOS DO PORTO DE ITAQUI.**

Chapadinha-MA
2025

ALAYNE ARAÚJO RODRIGUES

Monitoramento da variabilidade espaço-temporal da concentração atmosférica de dióxido de carbono sobre áreas agrícolas na rota de exportação de grãos do Porto de Itaqui.

Dissertação/Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, do Centro de Ciências de Chapadinha, da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre/Doutor em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Meio Ambiente e Recursos Naturais

Linha de pesquisa: Biodiversidade e Desenvolvimento Sustentável

Orientador(a): Prof. Dr. Gustavo André de Araújo Santos

Coorientador: Prof. Dr. Celso Henrique Leite Silva Júnior

**Chapadinha-MA
2025**

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Araújo Rodrigues, Alayne.
VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO
ATMOSFÉRICA DE DIÓXIDO DE CARBONO SOBRE ÁREAS AGRÍCOLAS NA
ROTA DE EXPORTAÇÃO DE GRÃOS DO PORTO DE ITAQUI / Alayne
Araújo Rodrigues. - 2025.
91 p.

Coorientador(a) 1: Prof. Dr. Celso Henrique Leite Silva
Júnior.

Orientador(a): Prof. Dr. Gustavo André de Araújo
Santos.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em
Ciências Ambientais/ccch, Universidade Federal do
Maranhão, Chaapdinha, 2025.

1. Mudanças Climáticas. 2. Agricultura. 3. Emissões
de Dióxido de Carbono. I. André de Araújo Santos, Prof.

ALAYNE ARAÚJO RODRIGUES

Monitoramento da variabilidade espaço-temporal da concentração atmosférica de dióxido de carbono sobre áreas agrícolas na rota de exportação de grãos do Porto de Itaqui.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, do Centro de Ciências de Chapadinha, da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Meio Ambiente e Recursos Naturais

Linha de pesquisa: Biodiversidade e Desenvolvimento Sustentável

Orientador(a): Prof. Dr. Gustavo André de Araújo Santos

Coorientador: Prof. Dr. Celso Henrique Leite Silva Júnior

Aprovada em: _26___/_09___/_2025___.

BANCA EXAMINADORA

Orientador Prof.(a) Dr.(a) GUSTAVO ANDRÉ DE ARAÚJO SANTOS
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Examinador 1 Prof. Dr. WASHINGTON DA SILVA SOUSA
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Examinador 2 Prof. Dr. MARCOS VINICIUS DA SILVA
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus e aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, dedico este trabalho a Deus por ter me sustentado até aqui. Foram muitos propósitos e conexão divina os quais me fizeram enxergar que eu não estava sozinha. A Ele a glória!

Aos meus pais, Antonio e Eranilda, que debaixo de muito sol se esforçaram para que, hoje, eu esteja na sombra. Gratidão por todo o incentivo e pela oportunidade que me deram de estudar e me qualificar.

Sou grata ao meu amado, Felipe Walber, pois desde a graduação sempre estive ao meu lado em todos os momentos, incentivando-me a continuar e sempre me ajudando no que eu precisava. Amo vocês!

Gratidão aos órgãos de fomento: Porto do Itaqui, CAPES e FAPEMA pela ajuda no desenvolvimento da pesquisa e contribuição na minha formação acadêmica. Gratidão aos grupos Agrocarbon e LAPIClima pelo espaço do laboratório e apoio acadêmico.

Enfim, agradeço a mim pela coragem, dedicação e esforço que tive desde o início desse projeto. Não foi tarefa fácil, pois fazer pesquisa é um trabalho árduo, mas que é gratificante ver que conseguimos contribuir em algo relevante para a sociedade e para o meio ambiente.

Muito Obrigada!

RESUMO

O monitoramento da concentração de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera é fundamental para compreender os impactos do uso e cobertura da terra no balanço de carbono. Nesse contexto, o sensoriamento remoto se apresenta como uma ferramenta estratégica, permitindo a obtenção de dados essenciais para promover a sustentabilidade da produção agrícola, inclusive ao possibilitar uma melhor compreensão da emissão de CO_2 nos agroecossistemas. Portanto, o objetivo do trabalho foi analisar, caracterizar e quantificar a dinâmica espaço-temporal do estoque de carbono nas áreas agrícolas da rota de exportação de grãos do Porto do Itaquí via Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) na última década. Foram utilizadas séries temporais de 2016 a 2023 das informações de X_{CO_2} de áreas de pastagem e soja, obtidos pela plataforma administrada pela NASA, GES DISC e comparadas com elementos meteorológicos (precipitação, temperatura e umidade relativa do ar) extraídos do NASA POWER e índices de vegetação (NDVI, EVI e LAI) derivados do sensor MODIS-Terra. As análises estatísticas incluíram gráficos boxplot anuais e mensais, gráficos de tendência temporal do X_{CO_2} com aplicação do teste não paramétrico Mann-Kendall e do teste de normalidade Shapiro-Wilk com nível de significância de 5%, todos realizados por meio de linguagem Python. No que se refere à elaboração de mapas temáticos para investigar a influência dos fatores ambientais sobre a dinâmica do carbono, foram criados pelos softwares Qgis® e ArcGis®. Além disso, aplicou-se a técnica de “hot-spot analysis” para identificar aglomerações espaciais de altas e baixas concentrações de CO_2 em áreas de soja e pastagem, assim como foi analisado as anomalias de X_{CO_2} para ambas áreas. A variação temporal de X_{CO_2} para as áreas de pastagem e soja não mostraram tendência significativa, apresentando comportamento estável com poucas oscilações ao longo dos anos. O teste Shapiro-Wilk indicou que os dados não seguem uma distribuição normal, embora se aproximem de uma curva normal. A análise espacial revelou padrões de hot-spots de concentrações de CO_2 elevadas em áreas de pastagem degradada, enquanto regiões dominadas pela soja apresentaram maior ocorrência de “cold-spots”. Os anos com maiores hot-spots em áreas de pastagem e soja foram 2020 e 2022, já os anos com maiores cold-spots em áreas de pastagem foram 2019, 2021 e 2023, enquanto que para as áreas de soja foram 2019 e 2021. Em áreas de soja, verificou-se correlação negativa entre X_{CO_2} e os índices de vegetação NDVI e EVI. A influência das variáveis meteorológicas foi significativa, ou seja, a precipitação e a umidade relativa do ar mostraram associação positiva com a redução do X_{CO_2} , especialmente durante períodos de estiagem, enquanto a temperatura apresentou correlação inversa. Essas descobertas indicam que os agroecossistemas da região respondem de maneira diferenciada às condições climáticas e ao manejo do solo, com implicações diretas para a sustentabilidade agrícola e para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, é viável a conexão socioeconômica a fim de relacionar os padrões de X_{CO_2} à expansão agrícola, à demanda global por commodities e às políticas públicas voltadas à neutralidade de carbono. Essas perspectivas reforçam a relevância do uso de sensoriamento remoto aliado a dados climáticos no acompanhamento das emissões e do sequestro de carbono.

Palavras-chave: agroecossistemas; mudanças climáticas; sensoriamento remoto.

ABSTRACT

The monitoring of atmospheric carbon dioxide (CO₂) concentration is essential for understanding the impacts of land use and land cover on the carbon balance. In this context, remote sensing emerges as a strategic tool, enabling the acquisition of key data to promote the sustainability of agricultural production, including a better understanding of CO₂ emissions in agroecosystems. Therefore, the objective of this study was to analyze, characterize, and quantify the spatiotemporal dynamics of carbon stock in agricultural areas along the grain export corridor of the Port of Itaquí, using data from the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) over the past decade. Time series from 2016 to 2023 of X_{CO2} information for pasture and soybean areas were obtained from the platform managed by NASA's GES DISC and compared with meteorological elements (precipitation, temperature, and relative humidity) extracted from NASA POWER, as well as vegetation indices (NDVI, EVI, and LAI) derived from the MODIS-Terra sensor. Statistical analyses included annual and monthly boxplots, temporal trend graphs of X_{CO2} using the non-parametric Mann-Kendall test, and the Shapiro-Wilk normality test with a 5% significance level, all performed using Python programming language. Thematic maps were created using QGIS® and ArcGIS® software to investigate the influence of environmental factors on carbon dynamics. In addition, the "hot spot analysis" technique was applied to identify spatial clusters of high and low CO₂ concentrations in soybean and pasture areas, along with the analysis of X_{CO2} anomalies for both land-use types. The temporal variation for pasture and soybean areas did not show a significant trend, presenting stable behavior with few oscillations over the years. The Shapiro-Wilk test indicated that the data do not follow a normal distribution, although they approximate a normal curve. Spatial analysis revealed patterns of CO₂ concentration hot-spots in degraded pasture areas, whereas regions dominated by soybean cultivation showed a higher occurrence of cold-spots. The years with the greatest hot spot intensity in pasture and soybean areas were 2020 and 2022, while the years with the most prominent cold-spots in pasture areas were 2019, 2021, and 2023, and for soybean areas, 2019 and 2021. In soybean areas, a negative correlation was observed between X_{CO2} and the vegetation indices NDVI and EVI. The influence of meteorological variables was significant: precipitation and relative humidity showed a positive association with X_{CO2} reduction, especially during drought periods, while temperature exhibited an inverse correlation. These findings indicate that the region's agroecosystems respond differently to climatic conditions and soil management, with direct implications for agricultural sustainability and greenhouse gas mitigation. Furthermore, socioeconomic connections are feasible to link X_{CO2} patterns to agricultural expansion, global commodity demand, and public policies aimed at carbon neutrality. These perspectives reinforce the importance of using remote sensing combined with climate data to monitor emissions and carbon sequestration.

Keywords: agroecosystems; climate change; remote sensing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Área de rota de exportação de grãos do Porto do Itaqui.....	30
Figura 2. Percentual das áreas de uso e cobertura da solo área da rota de exportação de grãos do Porto do Itaqui	37
Figura 3. Uso e cobertura do solo para a área da rota de exportação de grãos do Porto do Itaqui.....	38
Figura 4. Distribuição dos dados de X_{CO2} ; série temporal e teste de tendência; distribuição anual de X_{CO2} ; distribuição mensal de X_{CO2}	39
Figura 5. Distribuição dos dados de X_{CO2} ; Série temporal e teste de tendência; Distribuição anual de X_{CO2} ; Distribuição mensal de X_{CO2}	41
Figura 6. Análise de pontos quentes e frios de X_{CO2} ; Análise de Hot/Cold-spots mensais de X_{CO2} ; Mapa de Hots Spots para área de pastagem.	43
Figura 7. Análise de pontos quentes e frios de X_{CO2} ; Análise de Hot/Cold-spots mensais de X_{CO2} ; Mapa de Hots Spots para área de soja	44
Figura 8. Série temporal de Anomalia de X_{CO2} diferenciando períodos de fonte de emissão e absorção; Anomalia Média de X_{CO2} por grau de latitude; Mapa de Anomalia em área de pastagem	46
Figura 9. Série temporal de Anomalia de X_{CO2} diferenciando períodos de fonte de emissão e absorção; Anomalia Média de X_{CO2} por grau de latitude; Mapa de Anomalia em área de soja.....	48
Figura 10. Matriz de correlação de X_{CO2} para as áreas de Pastagem; Matriz de correlação de X_{CO2} para as áreas de Soja	50
Figura 11. Matriz de correlação de Anomalia X_{CO2} para as áreas de Pastagem; Matriz de correlação de Anomalia X_{CO2} para as áreas de Soja	51
Figura 12. Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) para área da rota de exportação de grãos do Porto do Itaqui	52

Figura 13. Índice de Precipitação Padronizado (SPI) anual para área da rota de exportação de grãos do Porto do Itaqui	54
Figura 14. Umidade do solo anual para área da rota de exportação de grãos do Porto do Itaqui	56
Figura 15. Precipitação anual para área da rota de exportação de grãos do Porto do Itaqui	58
Figura 16. Umidade relativa do ar anual para área da rota de exportação de grãos do Porto do Itaqui	60
Figura 17. Temperatura anual para área da rota de exportação de grãos do Porto do Itaqui	62
APÊNDICE A. Série temporal de X_{CO_2} para a área de pastagem.....	88
APÊNDICE B. Série temporal de X_{CO_2} para a área de soja.	88
APÊNDICE C. Análise de distribuição da coluna de anomalia de X_{CO_2} para área de pastagem	89
APÊNDICE D. Série temporal de X_{CO_2} com linha de tendência em áreas de pastagem	89
APÊNDICE E. Valores corrigidos de X_{CO_2} em áreas de pastagem	90
APÊNDICE F. Análise de distribuição da coluna de anomalia de X_{CO_2} para área de soja	90
APÊNDICE G. Série temporal de X_{CO_2} com linha de tendência em áreas de soja.....	91
APÊNDICE H. Valores corrigidos de X_{CO_2} em áreas de soja	91

SUMÁRIO

CAPITULO I	11
1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
1.1 Área de gestão do Porto do Itaqui	11
1.2 Efeito das emissões de CO ₂ no setor agrícola	12
1.3 Agroecossistemas e dinâmica do carbono	13
1.4 Uso de sensoriamento remoto no monitoramento do carbono terrestre	14
1.5 Agricultura inteligente para o clima	17
2 OBJETIVOS	18
2.1 Geral	18
2.2 Específicos	18
3 HIPÓTESE.....	19
REFERÊNCIAS.....	19
CAPÍTULO II - MONITORAMENTO DA VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO ATMOSFÉRICA DE CO ₂ SOBRE ÁREAS AGRÍCOLAS NA ROTA DE EXPORTAÇÃO DE GRÃOS DO PORTO DO ITAQUI	
1. INTRODUÇÃO	26
2. MATERIAIS E MÉTODOS	28
3. RESULTADOS	29
4. DISCUSSÃO	36
5. CONCLUSÃO	63
REFERÊNCIAS.....	80
APÊNDICE.....	81
	89

CAPÍTULO I

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Área de gestão do Porto do Itaqui

Localizado na Baía de São Marcos, em São Luís, no estado do Maranhão, o Porto do Itaqui é reconhecido por sua importância na exportação de milho e soja do Arco Norte. Em 2021, movimentou mais de 4 bilhões de dólares em toneladas (Porto de Itaqui, 2022). Iniciando suas operações em 1972 com os berços 101 e 102, o porto passou por investimentos significativos e agora conta com 9 berços operacionais, variando de 12 a 19 metros, capazes de receber grandes navios (Porto do Itaqui, 2022). O Porto de Itaqui é gerido pela Empresa Maranhense de Administração Portuária (EMAP), uma entidade pública estadual com status de pessoa jurídica de direito privado, com sede no próprio Porto do Itaqui.

A EMAP desempenha o papel de Autoridade Portuária, encarregada de executar os planos e programas estabelecidos pelos governos estadual e federal para a administração e operação comercial dos portos e instalações portuárias do Maranhão (EMAP, 2018). Conforme indicado pela EMAP (2018), a área de influência do Porto do Itaqui abrange os estados do Maranhão, Piauí, Tocantins, Bahia e Goiás, além de parte do Mato Grosso do Sul, do Distrito Federal e do Pará. No âmbito internacional, os principais parceiros do Complexo Portuário do Itaqui são a Comunidade Econômica Europeia (46,8%), a Ásia (20%) e o MERCOSUL (6%).

Conforme relatado pela EMAP (2022), o Porto do Itaqui testemunhou um aumento significativo no volume de movimentação de grãos sólidos (milho e soja) e líquidos (produtos petrolíferos). Embora haja mais de 30 tipos de cargas movimentadas nos portos do Maranhão, incluindo grãos sólidos, líquidos e cargas gerais, é importante observar que algumas cargas específicas, como alumínio, pelotas e minério de ferro, são direcionadas para outros portos da região de São Luís, como Ponta da Madeira e ALUMAR.

No segmento de grãos sólidos, que abrange os anos de 2017 a 2022, a soja, o milho e os fertilizantes foram os mais movimentados, representando mais de 50% do total de grãos sólidos movimentados nesse período. Devido à sua localização geográfica estratégica, o Porto do Itaqui emergiu como um importante ponto de acesso para exportações para a Ásia, Europa e América do Norte, facilitando o comércio internacional e a introdução de novos produtos no mercado brasileiro (LIMA et al., 2023).

O sucesso do Porto do Itaqui não se resume apenas à sua infraestrutura, a inovação desempenha um papel crucial nesse processo. O porto tem adotado tecnologias avançadas para aprimorar suas operações, diminuir custos e aumentar a eficiência. Isso inclui o uso de

Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) para inspeção de cargas e sistemas de inteligência artificial para gerenciar as atividades portuárias. Essas medidas têm impulsionado o crescimento econômico da região e atraído investimentos adicionais. Com uma combinação de fatores vantajosos, como sua localização estratégica, infraestrutura moderna e capacidade de inovação, o Porto do Itaquí emergiu como um líder no setor portuário do Brasil, desempenhando um papel fundamental na economia nacional (LIMA et al., 2023).

2.2. Efeito das emissões de CO₂ no setor agrícola

Embora possua uma enorme importância para o setor econômico, a agricultura é uma das principais atividades emissoras de gases do efeito estufa (GEE), dentre eles o CO₂, no entanto, também é uma das alternativas para a redução das alterações climáticas no planeta (LUN et al., 2016). Além disso, as práticas de uso e manejo do solo na agricultura são capazes de interferir diretamente na emissão de CO₂, e possibilitar que ocorra o acúmulo de carbono na atmosfera e, consequentemente, impactar no efeito estufa (LAL, 2009). Embora não pareça, as mudanças no fluxo de CO₂ emitido pelo solo podem ser consideradas implicações na concentração de CO₂ atmosférico, e, consequentemente, no efeito estufa (SONG et al., 2012).

Por ser considerado um dos maiores produtores de commodities agrícolas, como cana-de-açúcar, soja, milho, café e gado de corte, o Brasil se destaca mundialmente (FAO, 2020). Grande parte do território agrícola brasileiro é destinado ao cultivo de pastagens destinado a prática da bovinocultura, a qual pertence a uma das culturas economicamente mais importantes do país (SCARAMUZZA et al., 2017). Diante disso, percebe-se um importante impacto da agricultura brasileira nas emissões de gases de efeito estufa (GEE), principalmente relacionadas às que levam a degradação do solo devido ao manejo inadequado.

No que se refere ao uso da terra para o cultivo de pastagem, no Brasil ocorreu inúmeros episódios de desmatamentos, de modo que para a implantação da pecuária, muitas áreas de vegetação nativa tiveram que ser desmatadas (DOMINGUES; BERMANN, 2005; CARVALHO; DOMINGUES, 2016), tal prática interfere diretamente na emissão de CO₂. Segundo Bogaerts et al. (2017), atividades da pecuária, no Brasil, são estimadas em 18% das emissões de CO₂ anuais. Inúmeros trabalhos de manejo de pastagens têm capacidade de afetar a emissão de CO₂, como o manejo inadequado que causa degradação (DE FIGUEIREDO et al., 2017). Além da pecuária, é importante destacar que o Brasil obteve uma área plantada de soja em mais de 44 milhões de hectares, em 2021, conforme os dados do Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023).

No país, o manejo dessa cultura é feito de forma mecanizada e com uma excelente tecnologia aplicada, de maneira que a dependência de insumos (fertilizantes, máquinas,

combustíveis e pesticidas) por parte dessa atividade obteve um alto impacto na emissão de CO₂, (RAUCCI et al., 2014).

Diante do exposto, é necessário compreender a dinâmica das fontes de emissão de CO₂ nos diferentes tipos de manejos agrícolas. O sensoriamento remoto por meio de satélites tem contribuído para a compreensão das variações desses gases a nível global (BUCHWITZ et al., 2015; NELSON et al., 2016; FISCHER et al., 2017; KOHLER et al., 2018; LI et al., 2018). Alguns exemplos de plataformas e satélites responsáveis por essas observações são o SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY - SCIAMACHY (BOVENSMANN et al., 1999), Global Ozone Monitoring Experiment – GOME (BURROWS et al., 1999), o Greenhouse gases Observing SATellite - GOSAT (KASUYA et al., 2009) e o OCO-2 (O'DELL et al., 2012).

2.3. Agroecossistemas e dinâmica do carbono

Durante a revolução industrial até os dias atuais, há o aumento das emissões dos GEE como o dióxido de carbono CO₂, o metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), trazendo impactos ambientais, como o aumento da temperatura média da superfície global, os níveis atmosféricos de CO₂ aumentaram de 280 para 367 ppm em 2017-2018 (DU et al. 2024). Nesse contexto, o sequestro de carbono no solo pode ser afetado, visto que o carbono desempenha um papel crucial na compreensão do ciclo do solo e das mudanças climáticas.

Além disso, a capacidade do solo de armazenar carbono oferece uma série de benefícios, incluindo aprimoramento da fertilidade, qualidade e produtividade do solo, promoção da biodiversidade e redução da compactação do solo (LAL, 2003; DHERI; PASRICHA, 2021). Nos ecossistemas terrestres o solo é o maior reservatório de carbono, dessa forma, as alterações na dinâmica desse elemento proporcionam um desequilíbrio no ciclo de carbono e mudanças climáticas (LAL, 2004). Por isso, é indispensável entender os fatores que interferem nas alterações de carbono, como o uso da terra e a gestão do solo, visto que, o gerenciamento inadequado diminui o carbono orgânico ao longo do tempo causando déficit (ONTL; SCHULTE, 2012).

Muitas atividades agrícolas estão ligadas a esses déficits de carbono no solo sendo um dos principais causadores de mudanças climáticas, como a desflorestação, as alterações na utilização dos solos, a utilização excessiva de fertilizantes e a queima de combustíveis fósseis, (NUWAGABA; NAMATEEFU, 2013). Essas práticas interferem também nas propriedades físicas do solo, prejudicando a biodegradação e conduzindo à baixa produtividade. Existem estudos que verificam o potencial do sequestro de carbono no solo na redução das emissões de

gases efeito de estufa e na mitigação do impacto climático da agricultura moderna (DU et al., 2024).

Lal (2004) afirmou que o sequestro de carbono no solo poderia armazenar concentrações significativas de carbono por muito tempo, compensando aproximadamente 10% das emissões anuais de gases de efeito estufa. A adoção generalizada da lavoura de conservação nas terras agrícolas poderia aumentar significativamente o sequestro de carbono.

Um estudo realizado em Bhopal, Índia, descobriu que os sistemas de preparo do solo influenciaram significativamente o sequestro de carbono orgânico do solo apenas na camada superficial (0-5 cm), com maiores teores de sequestro de carbono observados no plantio direto e preparo reduzido do que no preparo convencional após três safras (DU et al., 2024).

Nesse contexto, uma estratégia para aumentar o estoque de carbono no solo é a implementação da agricultura de conservação, culturas de cobertura, proteção de resíduos de culturas, reciclagem de nutrientes, utilização de composto e gestão eficiente de fatores de produção agrícolas como nutrientes, água e energia podem mitigar notavelmente as alterações climáticas. Esses métodos são eficazes para reduzir gases de efeito estufa (GEE) e promover o desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis mais resilientes aos impactos das alterações climáticas (DU et al., 2024).

2.4. Uso de sensoriamento remoto no monitoramento do carbono terrestre

O Sensoriamento Remoto é considerado a ciência responsável por obter informações por meio de registro sem contato físico (SILVA et al., 2024). Ele também é capaz de revolucionar vários campos de atuação devido sua capacidade de interação e tomada de decisão por meio do processamento de imagens e através de programas computacionais (TULLIO, 2018). O sensoriamento remoto com resolução temporal (décadas) e espacial (local ao global) (CAMACHO-VELASCO, et al., 2015).

Nesse sentido, o sensoriamento remoto torna-se útil para explorar diversas áreas e auxiliar na tomada de decisões. Dessa forma, essa ferramenta colabora para estudar e quantificar as concentrações de dióxido de carbono na atmosfera (CO_2). Dentre as plataformas e satélites utilizados nessas missões espaciais, foi lançado em 2014, pela NASA, o satélite Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2), o qual é um importante instrumento científico em relação à compreensão dos processos que atuam na absorção e emissão de dióxido de Carbono (CO_2) (ELDERING et al., 2017). Esse satélite mede as variáveis essenciais para o entendimento das mudanças climáticas como a coluna média de fração molar de ar seco (X_{CO_2}), que representa a concentração média de CO_2 na coluna atmosférica, desde a superfície terrestre até a parte superior da atmosfera. (XIAO et al., 2019).

Todavia, o OCO-2 não foi o principal satélite para medição de CO₂, existiram também o SCIAMACHY, o qual tinha como intuito entender os aspectos físico-químicos da Terra, porém foram encerradas suas atividades em 2012 (PAN et al., 2021); em 2004, a NASA lançou a AURA, pois tinha melhor resolução espacial que o anterior; em 2009, o GOSAT (Satélite de Observação de Gases do Efeito Estufa) foi lançado, porém, pela Aeroespacial Nacional Japonesa (JAXA) para detectar CO₂ e CH₄ (YOKOTA et al., 2009; FRANKENBERG et al., 2011). O OCO-2 envolve o X_{CO2} espacialmente resolvido com ciclos de repetição de trilha terrestre de 16 dias. A resolução espacial do OCO-2 corresponde a 2,25 × 1,29 km e a resolução temporal de 16 dias, além disso, é configurado para intercalar entre os modos nadir e glint e é capaz de mudar para o modo alvo a fim de obter medições para os locais de validação em solo (SCHWANDNER et al., 2017).

A NASA autorizou o desenvolvimento de outro satélite, o OCO-3, lançado em 4 de maio de 2019, depois do lançamento bem-sucedido do OCO-2. Esse satélite traz uma nova visão para estudar o dióxido de carbono atmosférico (CO₂), assim como a fluorescência da clorofila induzida pelo sol (SIF). Para o ciclo do carbono terrestre, o OCO-3 ajuda a quantificar as variações diárias na liberação e absorção de dióxido de carbono pelas plantas, árvores e animais em locais de grandes reservas de carbono acima do solo no nosso planeta, incluindo as principais florestas tropicais e as regiões agrícolas (BASILIO et al., 2019).

Por meio do OCO-3, há possibilidade de avançar nos estudos do ciclo do carbono; desenvolver a capacidade de determinar fontes e sumidouros regionais; explorar os limites de detecção e o valor da resolução do ciclo diurno de SIF e X_{CO2} para melhor restringir o fluxo de carbono em florestas e plantas; e detectar e quantificar a variabilidade do X_{CO2} associada às atividades humanas em centros urbanos em rápido desenvolvimento (BASILIO et al., 2019). O OCO-2 é considerado uma ótima ferramenta para a detecção de Fluorescência da clorofila induzida pelo solo (SIF) de forma remota (SUN et al., 2017).

Estudos feitos por Frankenberg et al. (2014) destacaram a eficiência desse satélite para detecção da fluorescência da clorofila, e inferiram que essa ferramenta possui um excelente desempenho ao fornecer fluorescência da clorofila induzida por energia solar em 755 nm (SIF755), com precisão simples de medição de cerca de 0,3-0,5 Wm⁻² sr⁻¹ m⁻¹ e precisão superior a 0,05 Wm⁻² sr⁻¹ m⁻¹ e, no solo, com tamanhos de um pixel (1,3 × 2,25 km⁻²) muito menores ao comparar com o GOSAT. Em alguns estudos, muitos autores confirmaram que um identificador chave do crescimento da planta, do equilíbrio de carbono dos ecossistemas

terrestres e do período de captação do carbono é a SIF por satélite (GUANTER et al., 2014; JOINER et al., 2014; SUN et al., 2017; YANG et al., 2017).

A fluorescência da clorofila consiste na luz emitida por meio da clorofila posterior à absorção da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), a qual envolve a faixa espectral de aproximadamente 400 a 700 nm, correspondendo à faixa de luz visível ao olho humano (MÜLLER, 1874). Durante a reação luminosa da fotossíntese, a emissão de fluorescência acontece na faixa de 650 a 800 nm, onde essa energia absorvida pelos pigmentos das folhas se transforma na energia química que é imprescindível para reações escuras fixar o dióxido de carbono atmosférico em açúcares. Quando não há estresse na vegetação, grande parte da energia de agitação é usada para fotoquímica, porém ocorre sempre apenas uma pequena fração (~ 0,5%-2%) que é emitida como fluorescência da clorofila (PORCAR-CASTELL et al., 2014; MAXWELL; JOHNSON, 2000).

Isso porque a medição de SIF em satélites é fundamentada no preenchimento de linhas solares Fraunhofer, em outras palavras, a medição da profundidade fracionária das linhas Fraunhofer reduz na presença da emissão de SIF da superfície da terra (SUN et al., 2018). Vale ressaltar que a SIF possui uma vantagem primordial ao se comparar com os índices de vegetação, como o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada – NDVI e o Índice de Vegetação Melhorada - EVI, pois a SIF possui maiores correlações processos fisiológicos da vegetação (JOINER et al., 2014; WOOD et al., 2017).

Em estudo feito por Golkar et al. (2020) em relação ao sensoriamento remoto, eles analisaram a relação entre índices vegetativos e variáveis climáticas com X_{CO_2} . Enquanto Shekhar et al. (2020) fizeram a aplicação dados de OCO-2 para modelar X_{CO_2} para qualquer local, baseado em parâmetros atmosféricos e inventários de emissões. Já os autores Falahatkar et al. (2017) e Siabi et al. (2019) verificaram a relação entre X_{CO_2} (GOSAT e OCO-2) e os tipos de cobertura do solo no Irã.

Ultimamente, inúmeras ferramentas para medir de forma precisa a emissão de SIF foram desenvolvidas (DU et al., 2017). Dentre essas ferramentas, pode-se citar os espectrômetros de campo a nível do solo (LIU; LIU; HU, 2015), espectrômetros de imagem no ar (RASCHER et al., 2015) e sensores de satélites usando o princípio do preenchimento da profundidade da linha Fraunhofer (PLASCYK; GABRIEL, 1975).

Alguns exemplos de satélites são o Satélite de Observação de Gases do Efeito Estufa (“Greenhouse Gases Observing Satellite” – GOSAT) (KÖHLER; GUANTER; JOINER, 2015; LEE et al., 2015; ZHANG et al., 2016), Observatório do Carbono Orbital 2 (“Orbiting Carbon Observatory 2” - OCO-2) (FRANKENBERG et al., 2014), espectrômetro de absorção de

imagem de digitalização para Cartografia Atmosférica (“SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY” - SCIAMACHY) (KÖHLER; GUANTER; JOINER, 2015; JOINER et al., 2016) e a experiência global de monitoramento de Ozônio 2 (“Global Ozone Monitoring Instrument 2” - GOME-2) (JOINER et al., 2013; HE et al., 2017).

2.5. Agricultura Inteligente para o clima

Já é de consenso científico que as elevadas concentrações de gases do efeito estufa têm desencadeado eventos extremos (IPCC, 2022; GAO et al., 2021). Os cientistas, nos últimos anos, mensuraram as causas das mudanças climáticas no setor agrícola (SCHLENKER et al., 2006; MENDELSON, 2008; FISHER et al., 2012; KALLI; JENA, 2020; KALLI; JENA, 2022).

Eshete et al. (2020), por meio de um modelo de equilíbrio geral computável dinâmico recursivo, concluíram que a emissão de CO₂ causa impactos negativos à produção agrícola, enquanto que, Pickson et al. (2020) afirmaram a produção de cereais na China são prejudicadas pelas emissões de CO₂. Como resultado desses estudos, pode-se afirmar que as alterações climáticas ainda são uma ameaça à segurança alimentar na humanidade. O aquecimento global é um fenômeno causador dessas mudanças ambientais, como destaque o aumento das ondas de calor intensas, o aumento do nível do mar, a diminuição das geleiras, as secas extremas, os incêndios florestais, as chuvas extremas, as mudanças nas espécies de água doce e marinhas, etc.

Além disso, ocorre prejuízo à produtividade das culturas por conta desses efeitos climáticos. Tais culturas, pode-se citar como exemplo, a soja e o milho pois são extremamente afetadas pelas alterações climáticas, resultando em baixo rendimento, 16,7% e -10,8%, respectivamente (PORTER et al., 2019). O setor agrícola necessita tomar medidas de gerenciamento que mitiguem essas ameaças à proporção que as mudanças se elevam e/ou geram novas ameaças.

Obviamente, essas medidas não devem contemplar somente a agricultura, mas também outros ramos como economia ambiental, sustentabilidade social e a segurança alimentar em todo o mundo (NEWELL et al., 2019). Nesse contexto, a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) defende a introdução da Agricultura Inteligente para o Clima (CSA) que tem intuito a garantia da segurança alimentar por meio de orientações ao sistema agrícola em relação ao desenvolvimento sustentável, a fim de realizar práticas e estratégias resilientes aos eventos climáticos (LIPPE; BUILDING, 2018).

Essa tecnologia inovadora envolve a internet das coisas (IoT), big data e computação em nuvem no setor agrícola para uma melhor eficiência. Além disso, ele avançou rapidamente no

decorrer do tempo e contribuiu com as atividades agrícolas no que se refere ao clima. Abhiram et al. (2020) definem agricultura inteligente como um sistema que integra a internet das coisas (IoT), ou seja, permite que ocorra a ligação entre a rede de objetos físicos ou a incorporação de sensores, software e outras tecnologias de rede com o objetivo de se conectar e trocar informações (KUMAR et al., 2019).

A CSA está entrelaçada a três princípios de regime agrícola que são aplicados mundialmente a fim de obter segurança alimentar diante das alterações climáticas. Tais princípios são: (I) melhor produtividade agrícola sustentável e rendimentos familiares; (II) adaptação e desenvolvimento de resiliência de famílias a fim de enfrentar as alterações climáticas; e (III) redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (SEKABIRA et al., 2022).

A agricultura inteligente para o clima (CSA) engloba diversos tipos de trabalhos avançados como tecnologias melhoradas de gestão da água, melhoramento de culturas, agricultura conservacionista, consorciação e rotação de culturas, seguros baseados em índices meteorológicos, práticas de gestão integrada da fertilidade do solo e outras tecnologias (MAKATE, 2019). Estudos científicos mostram que por meio de pesquisas sobre a CSA, há possibilidade de alavancar a produtividade, o rendimento e a segurança alimentar em diversos locais.

Por exemplo, a inserção de melhores culturas, como feijão e milho resistentes à seca (BURUCHARA et al., 2011), que resistem ao estresse ambiental possibilita o aumento do rendimento dos agricultores e a segurança alimentar (MAKATE, 2019). Diante do exposto, se faz necessário mais estudos em relação aos meios de avaliação, além de sistemas seguros que indiquem índices meteorológicos agrícolas, assim como a razão, o processo e o problema, uma vez que isso possibilita satisfazer as necessidades de equilibrar a produção agrícola, garantindo segurança alimentar e realizando os objetivos da CSA.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar, caracterizar e quantificar a dinâmica espaço-temporal do estoque de carbono nas áreas agrícolas da rota de exportação de grãos do Porto do Itaquí via Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) na última década.

2.2 Específicos

- I) Utilizar dados do Orbiting Carbon Observatory-2 para monitorar as concentrações de dióxido de carbono (CO₂) na área de exportação de grãos do Porto do Itaquí como área de grãos e pastagens;
- II) Avaliar a relação entre as concentrações de CO₂ (X_{CO2}) e elementos meteorológicos, como precipitação, temperatura e umidade do ar, com foco nas áreas agrícolas da rota de exportação, usando análises estatísticas para compreender como fatores ambientais influenciam na dinâmica do carbono na atmosfera.
- III) Investigar a correlação entre as concentrações de CO₂ e os índices de vegetação derivados de dados do sensor MODIS-Terra.
- IV) Aplicar a análise de “hot-spot” para identificar aglomerações espaciais significativas de altas ou baixas concentrações de CO₂ na rota de exportação de grãos do Porto do Itaquí.

3 HIPÓTESE

Presume-se que exista dinâmica espaço-temporal do X_{CO2} decorrentes de efeitos bióticos e abióticos nas áreas agrícolas da rota de exportação de grãos do Porto do Itaquí com diferenças representativas com a mudança do sistema de manejo do solo de pastagem e soja.

REFERÊNCIAS

- ABHIRAM, M. S. D. et al. **Smart Farming System using IoT for Efficient Crop Growth.** In: **IEEE International Students Conference on Electrical, Electronics and Computer Science**, 2020.
- BASILIO, R. R. et al. **"Orbiting Carbon Observatory-3 (OCO-3), remote sensing from the International Space Station (ISS),"** Proc. SPIE 11151, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XXIII, 1115109, 2019.
- BOGAERTS, M. et al. **Mitigação das mudanças climáticas através do manejo intensificado de pastagens: Estimando emissões de gases de efeito estufa em fazendas de gado na Amazônia brasileira.** Revista Produção Mais Limpa, v. 162, p. 1539-1550, 2017.
- BOVENSMANN, H., J. P. et al. **SCIAMACHY— Mission objectives and measurement modes,** Journal of the Atmospheric Sciences., v. 56, p.127 – 150, 1999.
- BUCHWITZ, M. et al. **The Greenhouse Gas Climate Change Initiative (GHG-CCI): Comparison and quality assessment of near-surface-sensitive satellite-derived CO₂ and CH₄ global data sets.** Remote Sensing of Environment, v. 162, p. 344–362, 2015.
- BURUCHARA, R. et al. **Development and delivery of bean varieties in Africa: The Pan-Africa bean research alliance (PABRA) model.** Afr. Crop Sci. J., v.19, p.227–245, 2011.
- BURROWS, J. P.; WEBER, M.; BUCHWITZ, M.; ROZANOV, V. **Journal of the Atmospheric Sciences;** Boston, Vol. 56, Iss. 2, p.151-175. 1999.
- CAMACHO-VELASCO, Ariolfo et al. **Aplicações e desafios do sensoriamento remoto hiperespectral na geologia colombiana.** Revista Facultad de Ingeniería, v. 24, n. 40, p. 17-29,

CARVALHO, T. S.; DOMINGUES, E.P. **Projeção de um cenário econômico e de desmatamento para a Amazônia Legal brasileira entre 2006 e 2030**. Nov. Econ. v.26, p. 585– 621, 2016.

CONAB-Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <www.conab.gov.br>. . Acesso 17 mai. 2024.

DE FIGUEIREDO, E. B. et al. **Soil CO₂–C Emissions and Correlations with Soil Properties in Degraded and Managed Pastures in Southern Brazil**. Land Degradation and Development, v. 28, n. 4, p. 1263–1273, 2017. Disponível em: Acesso em 07 jul. 2023.

DHERI, G.S., PASRICHA, N.S. **Carbon dynamics under conservation agriculture. Conservation Agriculture: A Sustainable Approach for Soil Health and Food Security**. Springer. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-981-16-0827-8_15>. Acesso em 27 fev. 2024.

DOMINGUES, M. S.; BERMANN, C. **O arco de desflorestamento na amazônia: da pecuária à soja**. Ambiente & Sociedade, v. XV, n. 2, p. 1–22, 2005.

DU, S. et al. **Response of Canopy Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence to the Absorbed Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Chlorophyll**. Remote Sensing, v. 9, n. 9, 2017.

ESHETE, Z.S. et al. **CO₂ emissions, agricultural productivity and welfare in Ethiopia**. Int J Clim Change Strateg Manag v.12, n.5, p. 687–704, 2020. Disponível em: <<https://doi.org.ez14.periodicos.capes.gov.br/10.1108/IJCCSM-07-2019-0046>> Acesso em 27 fev. 2024.

FALAHATKAR, S. et al. **Spatial and temporal distribution of carbon dioxide gas using GOSAT data over IRAN**. Environmental Monitoring and Assessment, 189, 627, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10661-017-6285-8>>. Acesso em 06 ago. 2023.

FISCHER, M. L. et al. **Simulating estimation of California fossil fuel and biosphere carbon dioxide exchanges combining in situ tower and satellite column observations**. Journal of Geophysical Research, v. 122, n. 6, p. 3653–3671, 2017.

FISHER, A.C. et al. **The economic impacts of climate change: evidence from agricultural output and random fluctuations in weather: comment**. Am. Econ. Rev. v.102, n. 7, p. 3749–3760, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1257/aer.102.7.3749>>. Acesso em 14 dez. 2023.

Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020. FAOSTAT Database. FAO, Rome, Italy. Retrieved March 12, 2020 from. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/home/E>>. Acesso em 13 dez 2023.

FRANKENBERG, C. **Prospects for Chlorophyll Fluorescence Remote Sensing from the Orbiting Carbon Observatory-2**. Remote Sensing of Environment, v. 147, n. Supplement C, p. 1–12, 2014.

FRANKENBERG, C. et al. **New global observations of the terrestrial carbon cycle from GOSAT: Patterns of plant fluorescence with gross primary productivity**, *Geophysical Research Letters*, n. 38, v. 28, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2011GL048738>> Acesso em 11 dez. 2023.

GAO, C. et al. **Simulation and design of joint distribution of rainfall and tide level in Wuchengxiyu Region, China**. *Urban Climate*, v. 40, 101005, 2021.

GUANTER, L. et al. **Global and Time-Resolved Monitoring of Crop Photosynthesis with Chlorophyll Fluorescence**. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 111, n. 14, p. E1327–E1333, 8 Apr. 2014.

HE, Z. et al. **A Data-Driven Assessment of Biosphere-Atmosphere Interaction Impact on Seasonal Cycle Patterns of Xco₂ Using GOSAT and MODIS Observations**. *Remote Sensing*, v. 9, n. 3, 2017.

IPCC, 2022. In: Portner, "H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Loschke, " S., Moller, " V., Okem, A., Rama, B. (Eds.), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press (in press).

JOINER, J. et al. **Global Monitoring of Terrestrial Chlorophyll Fluorescence from Moderate Spectral Resolution near-Infrared Satellite Measurements: Methodology, Simulations, and Application to GOME-2**. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 6, n. 2, p. 2803–2823, 2013.

JOINER, J. et al. **New Methods for the Retrieval of Chlorophyll Red Fluorescence from Hyperspectral Satellite Instruments: Simulations and Application to GOME-2 and SCIAMACHY**. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 9, n. 8, p. 3939–3967, 2016.

JOINER, J. et al. **The Seasonal Cycle of Satellite Chlorophyll Fluorescence Observations and Its Relationship to Vegetation Phenology and Ecosystem Atmosphere Carbon Exchange**. *Remote Sensing of Environment*, v. 152, p. 375–391, 2014.

KALLI, R.; JENA, P.R. **How large is the farm income loss due to climate change? 563 Evidence from India**. *China Agric. Econ. Rev.*, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1108/CAER56411-2020-0275>> Acesso em 14 dez. 2023.

KALLI, R.; JENA, P.R. **Impact of climate change on crop yields: evidence from irrigated and dryland cultivation in the semi-arid region of India**. *J. Environ. Account. Manag.* v.8, n.1, p. 19–30, 2020.

KASUYA, M. **Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) Program Overview and Its Development Status**. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan*, v. 7, n. 26, p. To_4_5-To_4_10, 2009.

KÖHLER, P. et al. **Assessing the potential of sun-induced fluorescence and the canopy scattering coefficient to track large-scale vegetation dynamics in Amazon forests**. *Remote Sensing of Environment*, v. 204, n. October 2017, p. 769–785, 2018.

KÖHLER, P.; GUANTER, L.; JOINER, J. **A Linear Method for the Retrieval of Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence from GOME-2 and SCIAMACHY Data.** *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 8, n. 6, p. 2589–2608, 2015.

KUMAR, S. et al. **Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review.** *J Big Data*, v. 6, p. 111, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s40537-019-0268-2>> Acesso em 14 dez. 2023.

LAL, R. **Challenges and opportunities in soil organic matter research.** *European Journal of Soil Science*, v. 60, n. 2, p. 158–169, 2009.

LAL, R. **Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect.** *CRC Crit. Rev. Plant Sci.* 2003. Disponível em :<<https://doi.org/10.1080/713610854>>: Acesso em 27 fev. 2024.

LAL, R. **Soil carbon sequestration to mitigate climate change.** *Geoderma*, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>> Acesso em 27 fev. 2024.

LI, C. et al. **Estimating apple tree canopy chlorophyll content based on Sentinel-2A remote sensing imaging.** *Scientific Reports*, 2018.

LIMA, A. N. et al. **Indústria, inovação e infraestrutura: Porto do Itaqui.** *Revista CEDS, São Luís*, v. 3, n. 12, jan./dez. 2023. ISSN 2447-0112. Disponível em: Acesso 10 jun. 2023.

LIPPER, L.; BUILDING, D.Z. **A Short History of the Evolution of the Climate Smart Agriculture Approach and Its Links to Climate Change and Sustainable Agriculture Debates.** *Climate Smart Agriculture: Building Resilience to Climate Change*; Springer: Cham, Switzerland, 2018.

LIU, L.; LIU, X.; HU, J. **Effects of Spectral Resolution and SNR on the Vegetation Solar Induced Fluorescence Retrieval Using FLD-Based Methods at Canopy Level.** *European Journal of Remote Sensing*, v. 48, n. 10, p. 743–762, 2015.

LUN, F.E.I. et al. **Estimating crop land carbon sequestration potentials in China affected by three improved cropping practices.** *Journal of Mountain Science*, v. 13, n. 2, p. 1840–1854, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11629-015-3813-2>> . Acesso em 12 dez. 2023.

MAKATE, C. **Effective scaling of climate smart agriculture innovations in African smallholder agriculture: A review of approaches, policy and institutional strategy needs.** *Environ. Sci. Policy*, v.96, p.37–51, 2019.

MAXWELL, K.; JOHNSON, G. N. **Chlorophyll fluorescence – a practical guide,** *J. Exp. Bot.*, v. 51, p. 659–668, 2000.

MENDELSON, R., **The impact of climate change on agriculture in developing 573 countries.** *J. Nat. Resour. Pol. Res.* v.1, n.1, p. 5–19, 2008.

- MÜLLER, N. J. C.: **Beziehungen zwischen assimilation, absorption und fluoreszenz im chlorophyll des lebenden blattes**, Jahrb. Wiss. Bot., v. 9, 42–49, 1874.
- NELSON, R. R. et al. **The potential of clear-sky carbon dioxide satellite retrievals**. Atmospheric Measurement Techniques, v. 9, n. 4, p. 1671–1684, 2016.
- NEWELL, P. et al. **Climate Smart Agriculture? Governing the Sustainable Development Goals in Sub-Saharan Africa**. Front. Sustain. Food Syst. 2019.
- NUWAGABA, A.; KISEKKA NAMATEEFU, L. Climatic change, land use and food security in Uganda: A survey of Western Uganda. 2013.
- O'DELL, C. W. et al. **The ACOS CO₂ retrieval algorithm-Part 1: Description and validation against synthetic observations**. Atmospheric Measurement Techniques, v. 5, n. 1, p. 99–121, 2012.
- ONTL, T.A., SCHULTE, L.A. **Soil carbon storage**. Nat. Educ. Knowl. 2012, 3.
- PAN, G.; XU, Y.; MA, J. **The potential of CO₂ satellite monitoring for climate governance: A PICKSON R.B. Cereal production in the presence of climate change in China**. Environ Sci Pollut Res, v. 27, p. 45802–45813, 2020.
- PLASCYK, J. A.; GABRIEL, F. C. **The Fraunhofer Line Discriminator MKII-An Airborne Instrument for precise and Standardized Ecological Luminescence Measurement**. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 24, n. 4, p. 306–313, 1975.
- PORTER, J.R. et al. **Invited Review: Intergovernmental Panel on Climate Change, Agriculture, and Food-A Case of Shifting Cultivation and History**. Glob. Chang. Biol., v.25, p.2518–2529, 2019.
- PORCAR-CASTELL, A. et al. **Linking chlorophyll a fluorescence to photosynthesis for remote sensing applications: mechanisms and challenges**, J. Exp. Bot., v.65, p. 4065–4095, 2014.
- PORTO DO ITAQUI (São Luís). EMAP. **MEIO AMBIENTE: Política do Sistema de Gestão Ambiental**. In: RELATÓRIO DE SUSTENTABILIDADE 2018. Portodoitaqui.com: Empresa Maranhense de Administração Portuária, 2018. Disponível em: <https://www.portodoitaqui.com/emap/gestao/meio-ambiente>. Acesso em: 10 jun. 2024.
- PORTO DO ITAQUI (São Luís). EMAP. **Movimentação de Cargas: Relatório de Movimentação de Cargas**. In: **Movimentação de Cargas**. São Luís - MA: Empresa Maranhense de Administração Portuária, 2022. Disponível em: https://www.portodoitaqui.com/public/_files/arquivos/HIST%C3%93RICO%20DE%20MOVIMENTA%C3%87%C3%83O%20-%202001%20A%202021_6203b9392236e.pdf. Acesso em: 10 jun. 2024.
- RASCHER, U. et al. **Sun-Induced Fluorescence - a New Probe of Photosynthesis: First Maps from the Imaging Spectrometer HyPlant**. Global Change Biology, v. 21, n. 12, p. 4673–4684, 2015.

- RAUCCI, G. S. et al. **Greenhouse gas assessment of Brazilian soybean production: A case study of Mato Grosso State.** Journal of Cleaner Production, v. 96, p. 419–425, 2015.
- review. Journal of Environmental Management, v. 277, n. September 2020, p. 111423, 2021.
- SCARAMUZZA, C. A. DE M. et al. **Land-use and land-cover mapping of the brazilian cerrado based mainly on landsat-8 satellite images.** Revista Brasileira de Cartografia (2017), Edição de Fotogrametia e Sensoriamento Remoto, v. 69, n. 6, p. 1041–1051, 2017.
- SCHWANDNER, F. M. et al. **Spaceborne detection of localized carbon dioxide sources.** Science 358, (2017). DOI:10.1126/science.aam5782 Acesso em 22 dez 2023.
- SCHLENKER, W. et al. **The impact of global warming on US agriculture: an econometric analysis of optimal growing 603 conditions.** Rev. Econ. Stat. v.88, n.1, p.113–125, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1162/rest.2006.88.1.113>>. Acesso em 14 dez. 2023.
- SEKABIRA, H. et al. **Determinants for Deployment of Climate-Smart Integrated Pest Management Practices: A Meta-Analysis Approach.** Agriculture, v.12, p.1052, 2022.
- SHEKHAR, A. et al. **Anthropogenic CO₂ emissions assessment of Nile Delta using X_{CO2} and SIF data from OCO-2 satellite.** Environmental Research Letters, v. 15, n. 9, 095010. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9cfe>> Acesso em 12 dez. 2023.
- SIABI, Z., et al. **Spatial distribution of X_{CO2} using OCO-2 data in growing seasons.** Journal of Environmental Management, Volume 244, 2019, pág. 110–118, ISSN 030-4797. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.049>> Acesso em 06 ago. 2023.
- SILVA, et al., **O uso do sensoriamento remoto na biodiversidade e conservação.** Peer review, Vol. 6, n. 7, 2024.
- SONG, M.; et al. **Environmental efficiency evaluation based on data envelopment analysis: A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 7, p. 4465–4469, 2012.
- SUN, Y. et al. **OCO-2 Advances Photosynthesis Observation from Space via Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence.** Science, v. 358, n. 6360, 2017.
- SUN, Y. et al. **Overview of Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence (SIF) from the Orbiting Carbon Observatory-2: Retrieval, Cross-Mission Comparison, and Global Monitoring for GPP.** Remote Sensing of Environment, v. 209, n. February, p. 808–823, 2018.
- TULLIO, L. Aplicações e princípios do sensoriamento remoto. [s.l.] Antonella Carvalho de Oliveira, 2018.
- XIAO, J. et al. **Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: A review of advances over 50 years.** Remote Sensing of Environment, v. 233, n. January, p. 111383, 2019.
- YANG, H. et al. **Chlorophyll Fluorescence Tracks Seasonal Variations of Photosynthesis from Leaf to Canopy in a Temperate Forest.** Global Change Biology, v. 23, n. 7, p. 2874–2886, 2017.
- YOKOTA, T. et al. **Global concentrations of CO₂ and CH₄ retrieved from GOSAT: First preliminary results.** Scientific Online Letters on the Atmosphere, v. 5, n. 1, p. 160–163, 2009.

WOOD, J. D. et al. **Multiscale Analyses of Solar-induced Florescence and Gross Primary Production**. *Geophysical Research Letters*, v. 44, n. 1, p. 533–541, 2017.

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO ATMOSFÉRICA
DE DIÓXIDO DE CARBONO SOBRE ÁREAS AGRÍCOLAS ROTA DE
EXPORTAÇÃO DE GRÃOS DO PORTO DO ITAQUI.**

Artigo a ser submetido no periódico Atmospheric Research

A revista publica artigos científicos (artigos de pesquisa, artigos de revisão, cartas e notas) que abordam a parte da atmosfera onde ocorrem eventos meteorológicos. ISSN impresso:

0169-8095; ISSN on-line: 1873-2895.

Variabilidade espaço-temporal da concentração atmosférica de dióxido de carbono sobre áreas agrícolas na rota de exportação de grãos do Porto do Itaqui.

1. INTRODUÇÃO

O Porto do Itaqui é gerido pela Empresa Maranhense de Administração Portuária (EMAP), uma entidade estadual com natureza jurídica de direito privado, cuja sede localiza-se nas próprias instalações do porto. A EMAP exerce o papel de Autoridade Portuária, sendo incumbida da implementação dos planos e programas definidos pelos governos estadual e federal para a gestão e operação comercial dos portos e terminais portuários no estado do Maranhão (EMAP, 2018).

A área de influência do Porto do Itaqui compreende os estados do Maranhão, Piauí, Tocantins, Bahia, Minas Gerais, Goiás, Distrito Federal além de regiões do Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, e Pará. Dados mais recentes da EMAP (2022) apontam para um crescimento expressivo na movimentação de grãos sólidos, em especial milho e soja, o que tem impulsionado o avanço da atividade agrícola na região. Entretanto, diversas pesquisas já evidenciaram que a expansão agrícola é a principal causa do desmatamento da vegetação nativa (Silva et al., 2021; Silva et al., 2020; Longo et al., 2020).

Diante desse panorama de intensificação do uso da terra, torna-se essencial compreender os impactos ambientais relacionados a essas transformações, visando garantir um modelo de desenvolvimento sustentável. Esse entendimento é ainda mais relevante no contexto das mudanças climáticas globais, sobretudo no que se refere às emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO_2) (Crivelari-Costa et al., 2023). A literatura científica atual destaca a forte influência das práticas agrícolas nas emissões de GEE, em virtude das atividades desenvolvidas no campo (Filho et al., 2021).

Por outro lado, é importante destacar que o setor agrícola também possui elevado potencial de mitigação das emissões de CO_2 , especialmente por meio da adoção de práticas sustentáveis de manejo, capazes de preservar ou até aumentar os estoques de carbono no solo (Rosset et al., 2019; Falcão et al., 2020). Tais estratégias sustentáveis contribuem para manter a produtividade agrícola ao mesmo tempo em que reduzem a liberação de CO_2 para a atmosfera (Borges et al., 2015; Besen et al., 2018).

Pesquisas anteriores demonstraram que as atividades agrícolas influenciam diretamente a dinâmica do CO_2 atmosférico, colaborando para um entendimento mais aprofundado do CO_2 no sistema climático (Patra et al., 2017; Falahatkar et al., 2017; Siabi et al., 2019; Golkar et al., 2020). Exemplos disso incluem o trabalho de Rossi et al. (2022), que analisaram a variação espaço-temporal do CO_2 em áreas agrícolas no estado do Mato Grosso e verificaram que as mudanças no uso da terra aumentam as concentrações de CO_2 ; Já o estudo de Moraes-Filho et al. (2021), que investigaram a variabilidade temporal do X_{CO_2} e de variáveis ambientais em

agroecossistemas do centro-sul brasileiro, constataram que o processo da fotossíntese tem grande influência no CO₂ atmosférico; e a pesquisa de Santos et al. (2022), que identificaram anomalias na concentração de CO₂ na Amazônia oriental por meio de dados do satélite OCO-2, concluíram que os pontos quentes de X_{CO2} estão concentrados em estações secas. Nesse contexto, o sensoriamento remoto se apresenta como uma ferramenta estratégica, permitindo a obtenção de dados essenciais para promover a sustentabilidade da produção agrícola, inclusive ao possibilitar uma melhor compreensão da emissão de CO₂ nos agroecossistemas. Apesar dos avanços, esse tipo de estudo ainda é pouco explorado em áreas diretamente afetadas pela expansão da agricultura.

Assim, o presente estudo teve como objetivo caracterizar a variabilidade espaço-temporal da concentração atmosférica de CO₂ em áreas agrícolas cultivadas com soja e pastagens, bem como monitorar o uso e cobertura da terra nas áreas agrícolas na rota de exportação de grãos do Porto do Itaqui, utilizando técnicas de sensoriamento remoto.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A área de estudo (Figura 1) abrange principalmente os estados do Maranhão, Piauí, Tocantins, Bahia, Goiás, Distrito Federal, Minas Gerais, além de partes do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e do Pará. Essa extensa região é atendida pelas operações e serviços oferecidos pelo Porto do Itaqui. A área do Porto do Itaqui faz fronteira com o Distrito Industrial na região do Itaqui, situado no litoral oeste da Ilha (Baía de São Marcos), a uma distância de 11 km do centro da cidade. A EMAP (Empresa Maranhense de Administração Portuária) ocupa uma extensão de terra de aproximadamente 5.100.000 m².

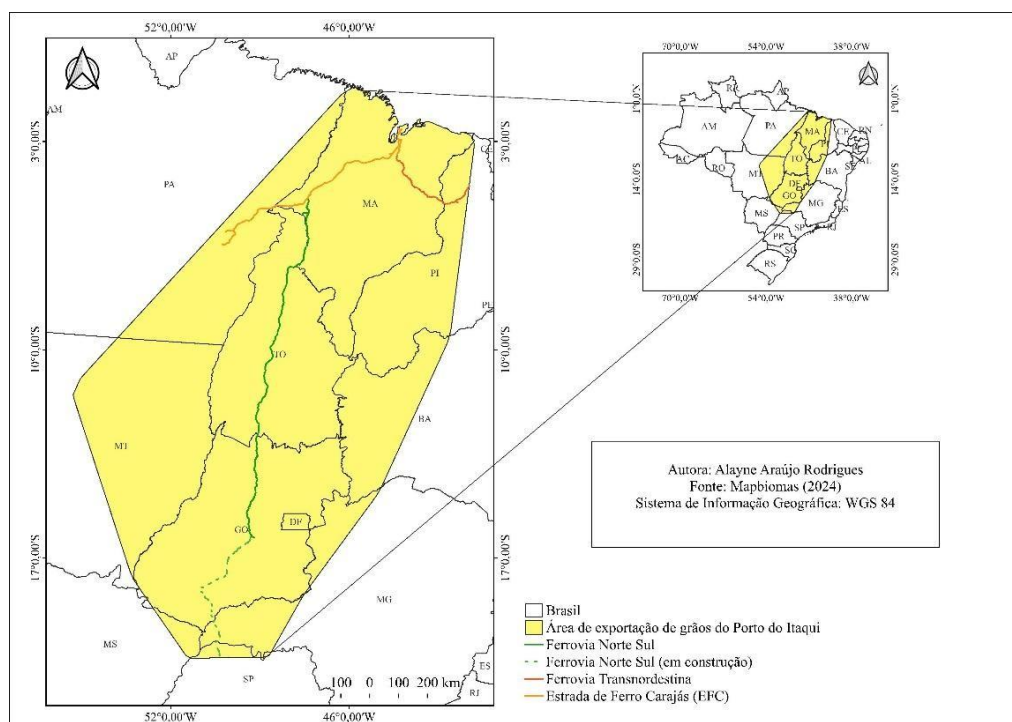


Figura 1. Área da rota de exportação de grãos do Porto do Itaqui.

A conectividade do porto com redes ferroviárias importantes, como a Estrada de Ferro Carajás, que se conecta com a Ferrovia Norte-Sul e Transnordestina, posiciona o Itaqui como um corredor vital para o Centro-Oeste do Brasil. A extensão da hinterlândia, área economicamente atendida pelo porto, abrange mais de 20 milhões de hectares, com 2.550 km de ferrovias e 55 km de rodovias estaduais e federais a partir da BR-135 (EMAP, 2022). Além das vantagens geográficas, o porto está situado na região conhecida como MATOPIBA, composta pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, considerada a terceira e última fronteira agrícola do país.

Além da eficiência multimodal, o Porto do Itaqui continua a expandir em infraestrutura, volume de carga movimentada e reconhecimento, resultado de uma gestão orientada para resultados e atração de investimentos públicos e privados, solidificando-o como o principal hub de grãos e combustíveis da região Centro-Norte do Brasil (EMAP, 2022).

2.2. Coleta e tratamento dos dados Xco2

O Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) disponibiliza o Xco2 o qual representa a concentração média de CO₂ na coluna atmosférica, desde a superfície terrestre até a parte superior da atmosfera. O satélite possui resolução espacial de 1,29 km transversal e 2,25 km ao longo da faixa e a faixa espectral é de 1594-1619 nm, com resolução espectral de 0,08 nm. Ele é capaz de fazer cerca de 100 mil medições por dia e em 16 dias cobre toda a Terra. O OCO-2 não mede o dióxido de carbono (CO₂) diretamente, mas sim a intensidade da luz solar refletida pela presença de CO₂ em uma coluna de ar. Logo, ao medir simultaneamente os gases no mesmo

local e ao longo do tempo, o OCO-2 consegue rastrear as mudanças na superfície. Os espectrômetros OCO-2 medem a luz solar refletida na superfície da Terra em comprimentos de ondas específicos no infravermelho. Informações mais detalhadas sobre o instrumento podem ser encontradas em Crisp et al. (2012).

Os dados de X_{CO_2} , provenientes da versão OCO-2 Lite V11.2r, foram coletados entre janeiro de 2016 e dezembro de 2023, sendo posteriormente organizados em escala anual. Essas informações foram acessadas por meio da plataforma GES DISC, gerenciada pela NASA (National Aeronautics and Space Administration), no formato de arquivo .csv. A etapa inicial consistiu na importação e no processamento desses dados utilizando o software R Studio®.

Para isso, foram utilizados pacotes como o readr, para leitura eficiente dos arquivos, e o dplyr, para manipulação e filtragem das informações. As colunas referentes à latitude, longitude e aos valores de X_{CO_2} foram selecionadas para as análises subsequentes. Com a preparação inicial concluída, os dados tabulares de X_{CO_2} foram transformados em uma camada de pontos georreferenciados no software Qgis®, versão 3.34 Prinzen. Utilizou-se a funcionalidade “Adicionar Camada de Texto Delimitado”, especificando-se as colunas correspondentes às coordenadas de longitude (eixo X) e latitude (eixo Y), além do Sistema de Referência Geográfica (SRG) original dos dados: WGS 84 - EPSG:4326. A camada de pontos gerada foi, então, exportada no formato shapefile (.shp), um padrão vetorial amplamente utilizado em análises espaciais.

2.3. Dados meteorológicos

Os dados de precipitação (mm) (Prec), temperatura a 2 metros (°C) (T) e umidade relativa do ar (%) (UR) foram obtidos a partir da plataforma NASA POWER (<https://power.larc.nasa.gov>) (Stackhouse et al., 2015) no intervalo de 2016 a 2023. Essa plataforma faz parte de um projeto da NASA denominado Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER), criado com o objetivo de aprimorar e desenvolver novos conjuntos de dados a partir de sistemas de satélites recentes. O NASA POWER disponibiliza mais de 300 variáveis meteorológicas e de radiação solar como temperatura a 2 metros, umidade relativa do ar, precipitação, velocidade dos ventos, pressão atmosférica, índices de evapotranspiração, entres outras. Cada parâmetro é fornecido com base na sua resolução espacial nativa de sua fonte de dados. Em relação às variáveis de temperatura a 2 metros e a umidade relativa do ar, são oriundas da reanálise do MERRA-2, a qual a malha possui resolução de aproximadamente 0,5° de latitude x 0,625° de longitude. Já a precipitação é derivada do produto IMERG (GPM) com resolução espacial de 0,1° x 0,1° e periodicidade de 30 minutos (NASA POWER, 2024).

Os dados extraídos foram tratados no software Microsoft Office Excel®, onde foram organizadas as planilhas contendo os dados anuais de cada variável para posteriormente, ser calculadas as médias da umidade relativa do ar e da temperatura, assim como a soma da precipitação. Em seguida as planilhas em (.csv) foram disponibilizadas no Qgis® onde foi feita a interpolação IDW (Ponderação pelo Inverso da Distância) dada pela seguinte equação:

$$Z_j = \frac{\sum_i^n = 1 \frac{Z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_i^n = 1 \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde: Z_j : valor estimado para a localização j ; Z_i : valor amostral medido no ponto i ; h_{ij} : distância entre Z_j e Z_i ; β : poder de ponderação.

2.4. Dados AppEEARS

Foi empregado o NDVI - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, conforme proposto por Rouse et al. (1973), a partir de dados obtidos pelo sensor MODIS a bordo do satélite Terra (Espectrorradiômetro de Imagens de Resolução Moderada), especificamente do produto MOD13A1, com resolução espacial de 500 metros e frequência temporal de 16 dias. A sensibilidade do NDVI deve-se à absorção da radiação na faixa do vermelho pela clorofila e demais pigmentos fotossintéticos, o que justifica seu uso recorrente em estudos de vegetação (Gao et al., 2000; Huete et al., 2002).

Além disso, também foram estudadas as variáveis: EVI - Índice de Vegetação Aprimorado; e LAI - Índice de Área Foliar. As imagens foram obtidas por meio da plataforma NASA AppEEARS (<https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/>). Esse conjunto de dados é amplamente utilizado na análise de padrões fenológicos da vegetação e na detecção de alterações no uso e cobertura da terra (Huete et al., 2002).

2.5. Dinâmica espaço-temporal do Uso e Cobertura da Terra via MapBiomass

Por meio da plataforma Mapbiomas®, coleção 9, foram coletadas imagens classificadas no formato raster de uso e cobertura do solo para o mesmo período (2016-2023), em formato GeoTIFF e resolução de 30 metros. Esses dados foram processados no software Qgis® versão 3.34 Prinzen, onde foram realizados o recorte das imagens e o cálculo das áreas de cada classe, culminando na confecção dos mapas.

Com a informação do uso e cobertura do solo associada a cada ponto de X_{CO_2} , a camada vetorial foi então dividida em duas camadas distintas através de filtros espaciais ou de atributos no Qgis®: uma contendo os pontos localizados em áreas classificadas como pastagem e outra

com os pontos em áreas de soja. Esta separação permitiu a análise comparativa da concentração de X_{CO_2} entre os diferentes tipos de uso do solo.

Posteriormente, foi realizada a criação de gráficos de dispersão para visualizar a distribuição da concentração de X_{CO_2} em relação à sua localização espacial, por meio do software ArcGIS®, a qual a concentração de X_{CO_2} foi representada pela variação no tamanho ou na cor dos pontos. Esta representação gráfica permitiu identificar padrões espaciais na concentração de X_{CO_2} em diferentes contextos de uso da terra.

Além disso, foram analisados os índices de seca SPI (Índice de Precipitação Padronizado) e SPEI (Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração) (McKee et al., 1993; Vicente-Serrano et al., 2010). Os índices SPI (Tabela 1) e SPEI são os mais utilizados para caracterizar a seca meteorológica, no entanto, no SPI é utilizado apenas dados de precipitação, diferente do SPEI que considera não só a precipitação, mas também a ETP (evapotranspiração), o que o torna mais sensível a variações e tendências de longo-tempo relacionadas à variabilidade e às mudanças climáticas (Morsy et al., 2022).

Categoria	SPI
Extremamente úmido	$\geq 2,00$
Severamente úmido	1,50 a 1,99
Moderadamente úmido	1,00 a 1,49
Umidade incipiente	0,10 a 0,99
Seca incipiente	0,00 a -0,99
Moderadamente seco	-1,00 a -1,49
Severamente seco	-1,50 a -1,99
Extremamente seco	$SPI < -2,00$

Tabela 1. Valores de Índice Padronizado de Precipitação (SPI) (McKee et al., 1993).

O SPI envolve a intensidade da seca meteorológica ou déficit de precipitação. A deficiência de precipitação é um fator fundamental e intuitivo para monitorar a seca. No entanto, interpretar a intensidade do déficit de precipitação pode ser desafiador, visto que a climatologia da precipitação varia amplamente entre regiões geográficas, bem como escalas temporais (Keyantash, 2014).

Todavia, o SPI não consegue identificar o papel do aumento da temperatura em futuras condições de seca e, independentemente dos cenários de aquecimento global, não consegue levar em conta a influência da variabilidade da temperatura e o papel das ondas de calor. Por isso, o SPEI foi desenvolvido por conseguir considerar os possíveis efeitos da variabilidade da temperatura e dos extremos de temperatura além do contexto do aquecimento global. Portanto, considerando os pequenos requisitos adicionais de dados do SPEI em relação ao SPI, o uso do primeiro é preferível para a identificação, análise e monitoramento de secas em qualquer região climática do mundo (Bergueira et al., 2010).

O SPEI preenche os requisitos de um índice de seca, uma vez que seu caráter multiescalar permite que ele seja usado por diferentes disciplinas científicas para detectar, monitorar e analisar secas. O o SPEI pode medir a severidade da seca de acordo com sua intensidade e duração, e pode identificar o início e o fim de episódios de seca. Além disso, ele permite a comparação da severidade da seca ao longo do tempo e do espaço, uma vez que pode ser calculado em uma ampla gama de climas, assim como o SPI (Bergueira et al., 2010).

2.6. Variação temporal da concentração de X_{CO_2}

A análise de variação do X_{CO_2} foi realizada por meio de linguagem Python, por meio do e teve como objetivo caracterizar a distribuição dos dados de X_{CO_2} e identificar a presença de tendências temporais significativas. Primeiramente, os dados brutos, extraídos de arquivos no formato (.xlsx), passaram por uma etapa de pré-processamento. Esta etapa incluiu a padronização dos nomes das colunas, a conversão da coluna de data para o formato datetime e a ordenação cronológica da série temporal.

Para a caracterização da distribuição dos dados, foram gerados gráficos de histograma com sobreposição da Curva de Densidade de Kernel (KDE), permitindo uma avaliação visual da forma da distribuição. A normalidade dos dados foi formalmente testada por meio do teste de Shapiro-Wilk, com nível de 5% de significância, que avalia a hipótese de que os dados seguem uma distribuição normal. A tendência central e a dispersão dos dados foram avaliadas através da geração de gráficos de boxplot anuais e mensais, o que permitiu analisar a variabilidade interanual e o ciclo sazonal médio.

Foi realizada uma análise de tendência do X_{CO_2} a fim de verificar o comportamento da tendência ao longo da série temporal. Inicialmente, um modelo de regressão linear simples foi ajustado aos dados para remover a influência global e obter uma série de valores corrigidos. Em seguida, para avaliar a tendência temporal na série, aplicou-se o teste não paramétrico de Mann-Kendall, proposto por Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) com um nível de significância de 5%. Esse teste é não-paramétrico por não apresentar distinção em relação à sua forma de distribuição (Cabral; Lucena, 2020). A equação do teste é dada por:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_j - x_i) \quad \text{Eq. 2}$$

Onde, S é total das contagens de $(x_j - x_i)$; x_j é o valor inicial após o x_i , e (n) é o número de dados da série temporal. Se S for positivo, significa que a tendência também é positiva, e se S for negativo significa uma tendência decrescente (Nascimento, 2023).

2.7. Análise de Anomalias

A fim de classificar temporalmente a área de estudo como uma fonte ou um sumidouro líquido de CO_2 , utilizando linguagem Python, foi aplicado um modelo de anomalia de X_{CO_2} , adaptado da metodologia de Hakkarainen et al. (2016). A anomalia para cada observação diária foi calculada como a diferença entre o valor de X_{CO_2} corrigido e a mediana de toda a série temporal.

A mediana foi escolhida como medida de tendência central por sua robustez a valores extremos (outliers). Períodos com anomalias positivas foram classificados como de emissão líquida de carbono (fonte), enquanto períodos com anomalias negativas foram classificados como de absorção líquida (sumidouro). Os mapas de anomalia foram gerados a partir de uma planilha de dados, contendo as coordenadas geográficas e os valores de anomalia, a qual importada para o ArcGis®, gerando uma camada de pontos. Os pontos foram, então, simbolizados com uma classificação de cor gradual, representando a intensidade das anomalias.

2.8. Análise de Hot-Spots e Cold-Spots

Para identificar períodos de anomalias estatisticamente extremas, foram conduzidas duas análises complementares de *hot-spots* (períodos anormalamente quentes) e *cold-spots* (períodos anormalamente frios) por meio de linguagem Python. A análise temporal de momentos extremos focou em identificar anomalias de curta duração que não são explicadas pela tendência ou pela sazonalidade. O processo incluiu o tratamento de datas duplicadas pela média diária; a criação de um índice temporal diário completo; e o preenchimento de dias faltantes por meio de interpolação linear baseada no tempo.

Uma segunda análise foi realizada sobre os dados agregados para identificar anos e meses inteiros com comportamento anômalo. Os dados de X_{CO_2} foram agrupados em médias anuais e médias mensais. Para cada uma dessas novas séries (anual e mensal), calculou-se a média geral e o desvio padrão. Anos ou meses foram classificados como *hot-spots* se sua média estivesse acima de um limiar superior e como *cold-spots* se estivesse abaixo de um limiar inferior.

Os mapas de *hot spot* e *cold-spots* foram confeccionados a partir do software ArcGIS®. A simbologia foi aplicada com base na significância estatística, utilizando uma paleta de cores para representar os diferentes níveis de confiança dos *Hot-spots* (tons de vermelho) e *Cold-spots* (tons de azul). Áreas sem significância estatística foram classificadas como "*Not Significant*".

2.9. Análise de Correlação de Pearson

Foi realizado as correlações das variáveis Anomalia e X_{CO_2} com as seguintes variáveis: EVI, NDVI, LAI, precipitação, temperatura do ar a 2 m e umidade relativa, utilizando o software Jamovi®. O mesmo foi feito com os dados de Anomalia, os quais foram dispostos em uma planilha com as variáveis: EVI, NDVI, LAI, precipitação, temperatura do ar a 2 m e umidade relativa do ar. As variáveis foram padronizadas no mesmo intervalo temporal para garantir comparabilidade. O coeficiente de correlação de Pearson (r) foi selecionado para avaliar associações lineares entre as variáveis. O nível de significância estatística adotado foi de $p < 0,05$. Valores de correlação foram apresentados na diagonal superior, permitindo identificação rápida de associações mais fortes. As análises foram realizadas separadamente para cada área de estudo (soja e pastagem), possibilitando comparação entre os ambientes. Essa abordagem permitiu identificar quais variáveis ambientais apresentaram correlação mais forte com os níveis de X_{CO_2} e as anomalias.

3. RESULTADOS

3.1. Distribuição espaço-temporal do uso e cobertura do solo

A análise temporal das classes de uso e cobertura do solo, entre os anos de 2016 e 2023 demonstra padrões consistentes e algumas mudanças sutis, porém relevantes, na área de estudo (Figura 2). As formações vegetais naturais, representadas pelas classes formação florestal e formação savânica, foram predominantes ao longo de todo o período, com percentuais superiores a 20% e 25%, respectivamente, indicando uma relativa estabilidade dessas áreas.

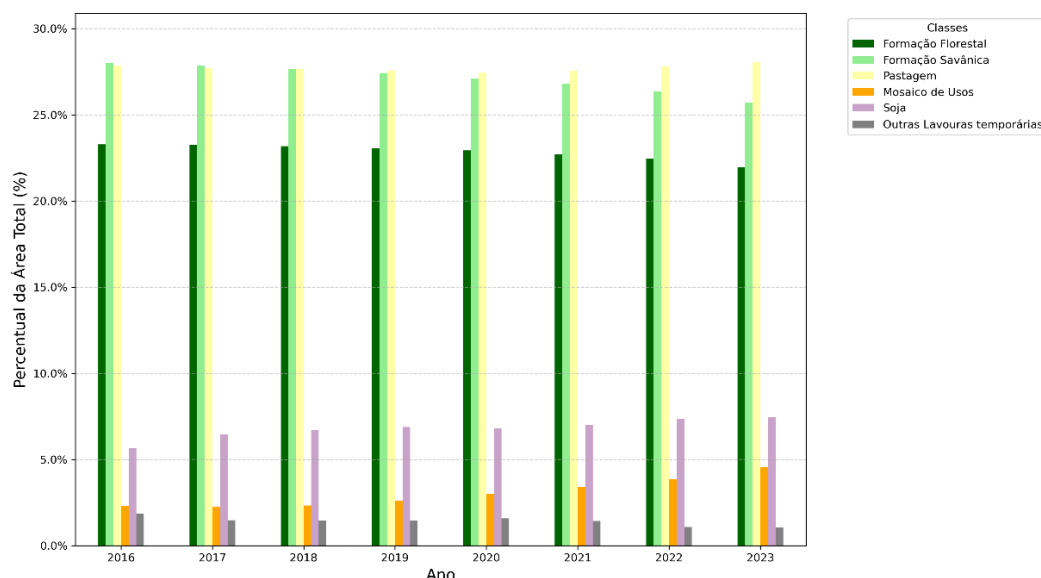


Figura 2. Percentual das áreas de uso e cobertura do solo por ano.

A classe pastagem aparece como a principal forma de uso do solo, apresentando leves variações, porém mantendo-se próxima ou superior a 27% durante todos os anos avaliados. A classe soja apresenta valores consistentes em torno de 6% a 7%, sem variações expressivas ao longo do período, o que sugere uma estabilidade no uso agrícola voltado à oleaginosa. No entanto, a presença da classe outras lavouras temporárias indica a diversificação agrícola na região, ainda que com extensão reduzida (inferior a 2%).

O mosaico de usos permaneceu constante, enquanto as áreas urbanas e áreas não vegetadas conservaram uma participação mínima. Como mostram os mapas da Figura 3, as maiores áreas de cultivo de soja e pastagens concentram-se nos estados de Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais, Tocantins, Bahia, parte do Maranhão e parte do Pará, região onde se localiza grande parte das rotas de exportação de grãos do Porto do Itaqui.

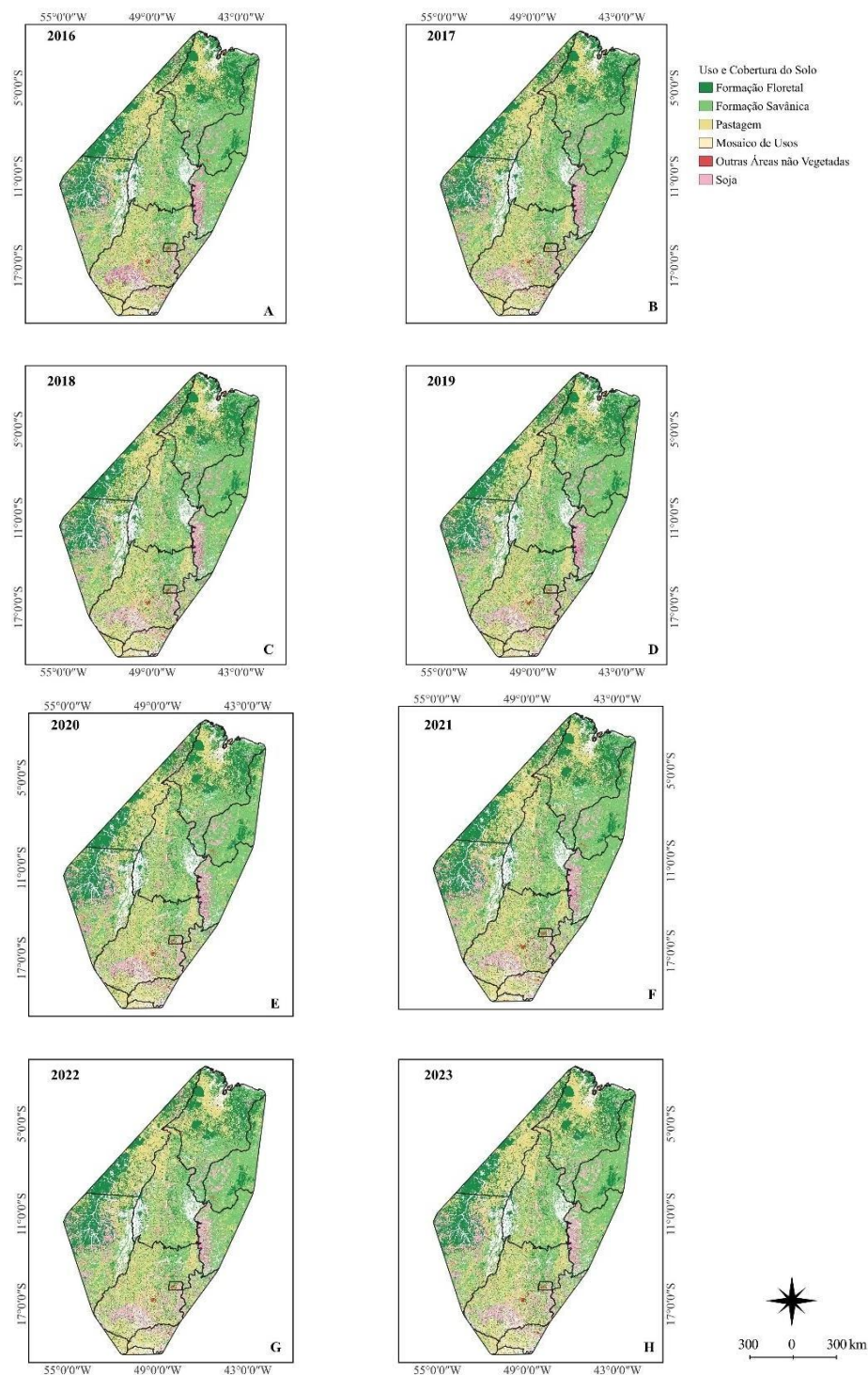


Figura 3. Uso e cobertura do solo para a área de exportação de grãos do Porto do Itaquí.

A pastagem, está amplamente dispersa, frequentemente associada a áreas previamente desmatadas, o que evidencia a conversão de vegetação nativa em áreas de pasto. Além disso, é possível observar que essas áreas estão, em sua maioria, fragmentadas, com partes da vegetação descontínuas. Por outro lado, as áreas de soja, se configuram como um padrão de ocupação mais concentrado e homogêneo, marcado por polígonos contínuos. Além disso, os mapas

revelam zonas de transição entre pastagens e áreas agrícolas, onde é possível observar o avanço da fronteira agrícola.

3.2. Variação temporal do X_{CO_2}

A análise da distribuição dos dados de X_{CO_2} , Figura 4A, para áreas de pastagem mostrou um padrão aproximadamente simétrico, próximo à distribuição normal. O teste de Shapiro–Wilk apresentou estatística $W = 0,999$ e $p < 0,001$, indicando que, apesar da simetria visual, existe evidência estatística para rejeitar a hipótese de normalidade, possivelmente devido ao grande tamanho amostral. Os valores variaram entre aproximadamente 385 ppm e 402 ppm, com maior concentração de frequências entre 392 e 395 ppm.

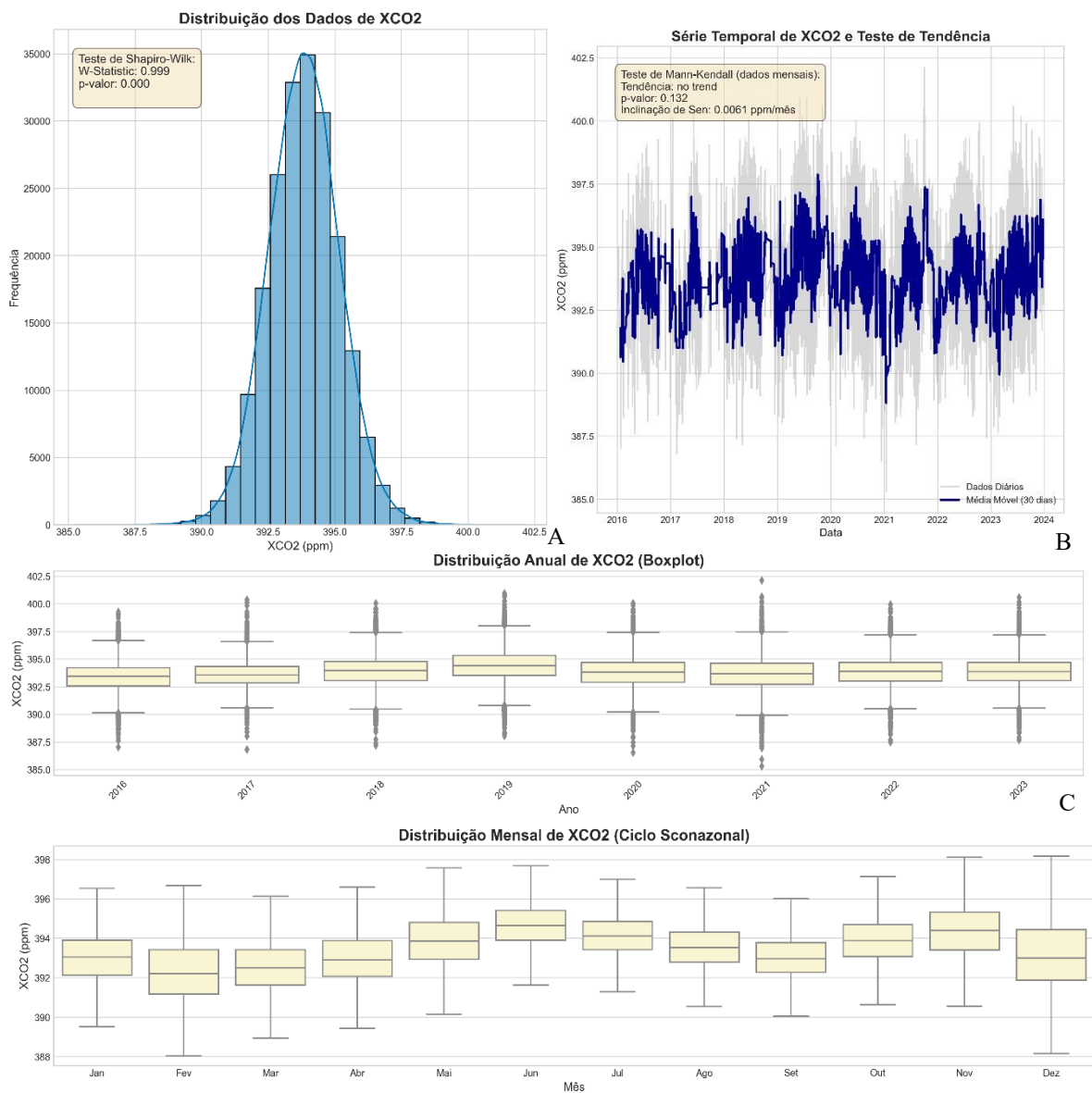


Figura 4. Distribuição dos dados de X_{CO_2} (A); Série temporal e teste de tendência (B); Distribuição anual de X_{CO_2} (C); Distribuição mensal de X_{CO_2} (D).

No que se refere à série temporal de X_{CO_2} no período de 2016 a 2023, Figura 4B, mostrou variação sazonal, com oscilações regulares ao longo dos anos. O teste de Mann–Kendall aplicado aos dados mensais não indicou tendência estatisticamente significativa ($p = 0,132$), com inclinação de Sen de 0,0061 ppm/mês, sugerindo incremento pouco expressivo no período. A média móvel de 30 dias destacou flutuações intra-anuais que acompanham ciclos sazonais, sem alteração consistente de longo prazo. A análise da distribuição anual do X_{CO_2} , Figura 4C, revelou relativa estabilidade nas medianas entre 2016 e 2023, com variações entre 392,5 e 394 ppm. Observou-se também amplitude interquartil semelhante na maior parte dos anos, com presença de valores extremos em todos os períodos, tanto inferiores, cerca de 385 ppm quanto superiores, aproximadamente 402 ppm.

Na escala mensal, Figura 4D, a mediana mais baixa ocorreu em fevereiro, com aproximadamente 392 ppm, enquanto os valores mais elevados foram registrados entre maio e julho (~394,5 ppm). Os meses do período seco (maio a agosto) apresentaram concentrações relativamente mais altas, enquanto o período chuvoso (dezembro a março) concentrou as menores medianas. A amplitude interquartil manteve-se estável, mas os meses de transição entre estações apresentaram maior dispersão.

Em áreas de soja, observa-se também uma variação recorrente ao longo dos anos, caracterizada por oscilações anuais que refletem os ciclos de absorção e emissão de CO_2 . Além disso, os valores de X_{CO_2} apresentaram maior dispersão nos últimos anos. A distribuição dos dados de X_{CO_2} , Figura 5A, apresentou forma aproximadamente normal, conforme evidenciado pelo histograma e pela curva de densidade ajustada, com concentração principal em torno de 392 ppm. O teste de Shapiro-Wilk indicou p -valor $< 0,05$ ($W = 0,999$), apontando para a rejeição da hipótese de normalidade em sentido estritamente estatístico, embora visualmente a distribuição se assemelhe a uma curva gaussiana. A análise da série temporal de X_{CO_2} , Figura 5B, para as áreas de soja, no período de 2016 a 2023, revelou que os valores oscilaram predominantemente entre 390 e 394 ppm, com variações sazonais evidentes ao longo dos anos. O teste de Mann-Kendall não indicou tendência estatisticamente significativa ($p = 0,209$), e a inclinação de Sen foi de aproximadamente $-0,0000$ ppm/ano, sugerindo estabilidade nos níveis médios do X_{CO_2} durante o período analisado.

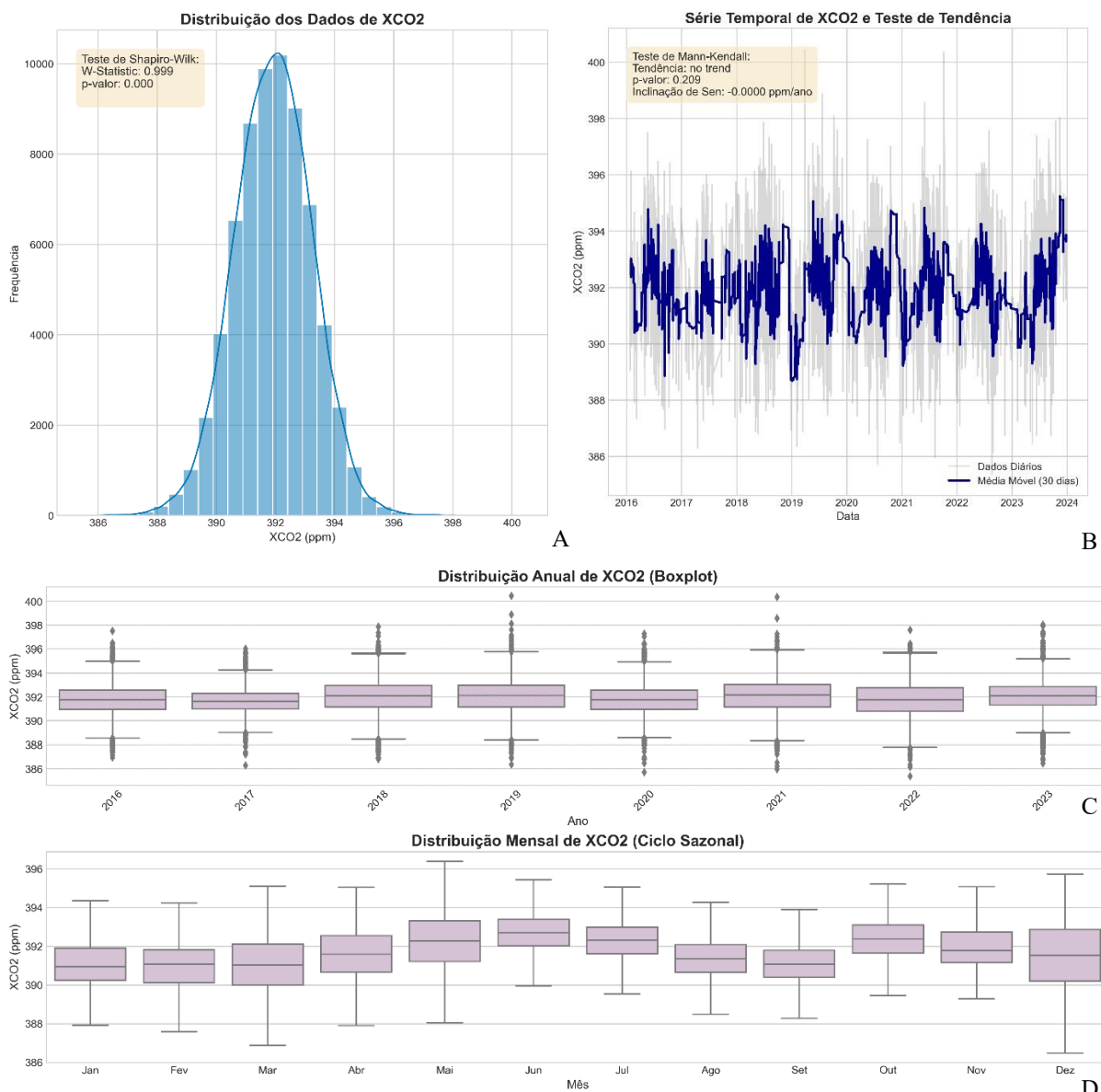


Figura 5. Distribuição dos dados de XCO₂ (A); Série temporal e teste de tendência (B); Distribuição anual de XCO₂ (C); Distribuição mensal de XCO₂ (D).

O boxplot anual, Figura 5C, indica estabilidade relativa das medianas ao longo do período analisado, variando em torno de 392 ppm, com leve aumento na dispersão a partir de 2019 e presença de valores extremos em todos os anos, sugerindo episódios pontuais de aumento ou redução das concentrações. A análise mensal, Figura 11D, mostra que os maiores valores medianos de XCO₂ ocorrem entre maio e julho, enquanto os menores concentram-se entre janeiro e março, refletindo padrão sazonal consistente.

3.3. Análise de Hot-spots e Cold-spots

A média mensal de XCO₂, em áreas de pastagens, Figura 6A, variou entre 391 e 396 ppm. A identificação de *hot-spots* mensais confirmou períodos de acúmulo de CO₂, especialmente entre 2018 e 2020, e em 2022. Enquanto os *cold-spots* foram mais pontuais,

principalmente em 2017. Na Figura 6B, observa-se a ocorrência de momentos críticos de concentração de CO₂, classificados como *hot-moments* e *cold-moments*. Observa-se variação sazonal na concentração de CO₂, com picos (*hot-moments*, em vermelho) mais recorrentes entre 2019 e 2020, destacando-se episódios de valores acima de 398 ppm. Já os *cold-moments* (em azul) foram menos frequentes, ocorrendo sobretudo em 2017, 2019, 2021 e início de 2023, em torno de 388 ppm.

No mapa, Figura 6C, o padrão espacial de *hot-spots* na área de pastagem revelou concentrações críticas de CO₂ com níveis de confiança entre 90% e 99%. Os *cold-spots*, por sua vez, ocorreram em menor proporção, com evidências de dispersão em áreas adjacentes. Já nas áreas de soja, mostrou eventos pontuais de elevação abrupta do X_{CO2}, Figura 7A, com múltiplos picos acima da média, concentrados especialmente entre 2018 e 2020 e em 2022. Eventos de *cold-moments* foram menos frequentes, ocorrendo, com destaque para 2017 e 2021. A série temporal apresentou oscilações mensais da média de X_{CO2}, Figura 7B, com valores variando predominantemente entre 390 e 400 ppm entre 2020 e 2021. Momentos de menor concentração, menor que 390 ppm, foram detectados em 2019, 2021, e início de 2023.

O mapa mostra os *hot-spots* e *cold-spots*, Figura 7C indicando agrupamentos estatisticamente significativos de altos ou baixos valores. *Hot-spots* - 99% Confidence (pontos vermelhos escuros) e *Hot-spots* - 95% Confidence (pontos vermelhos) indicam altas concentrações de de X_{CO2}. Já os *Cold-spots* - 99% Confidence (pontos azuis escuros) e *Cold-spots* - 95% Confidence (pontos azuis) indicam baixas concentrações de X_{CO2}. As áreas de soja apresentam uma forte correspondência espacial com os *hot-spots*, especialmente aqueles com maior nível de confiança.

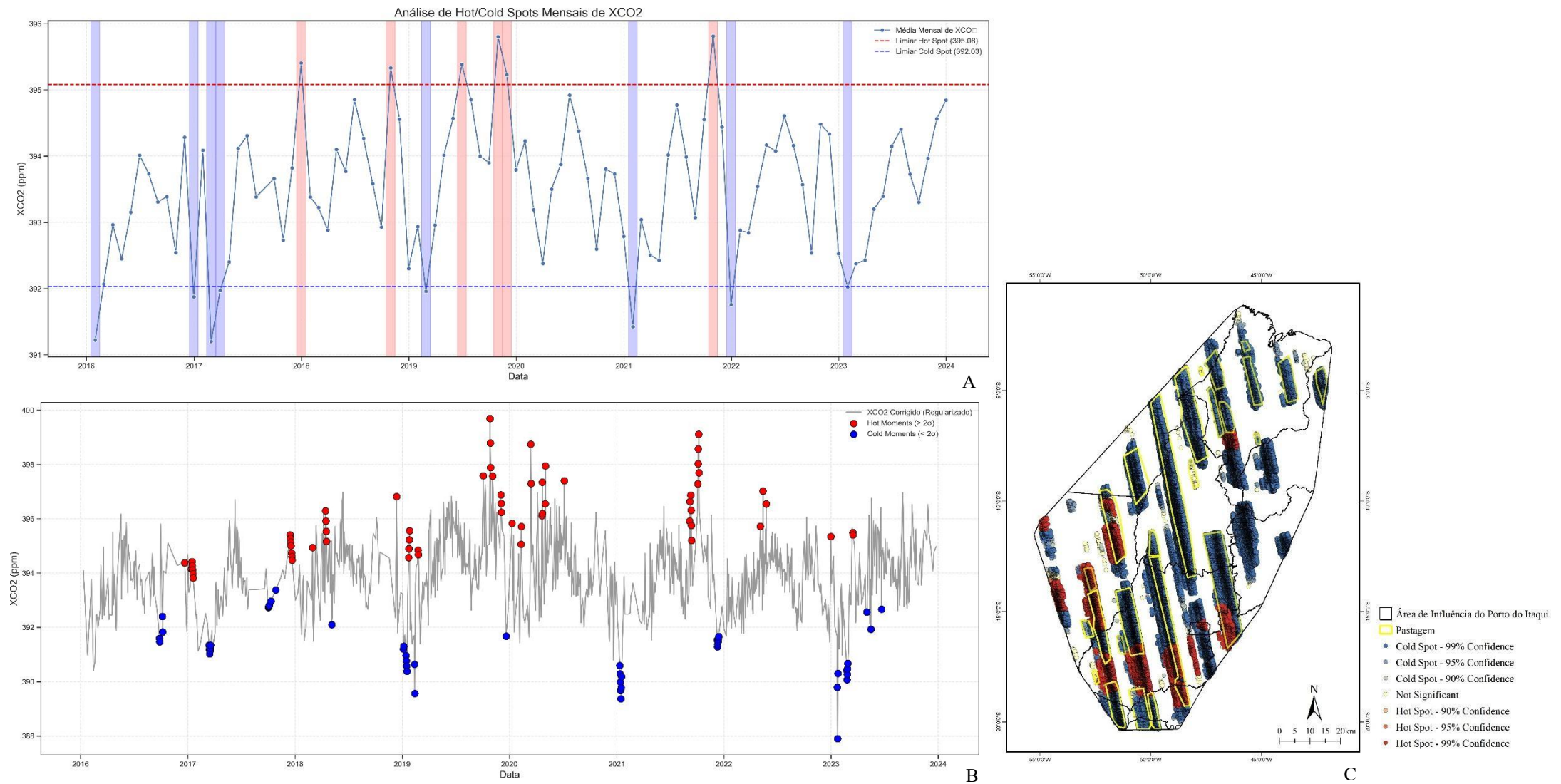
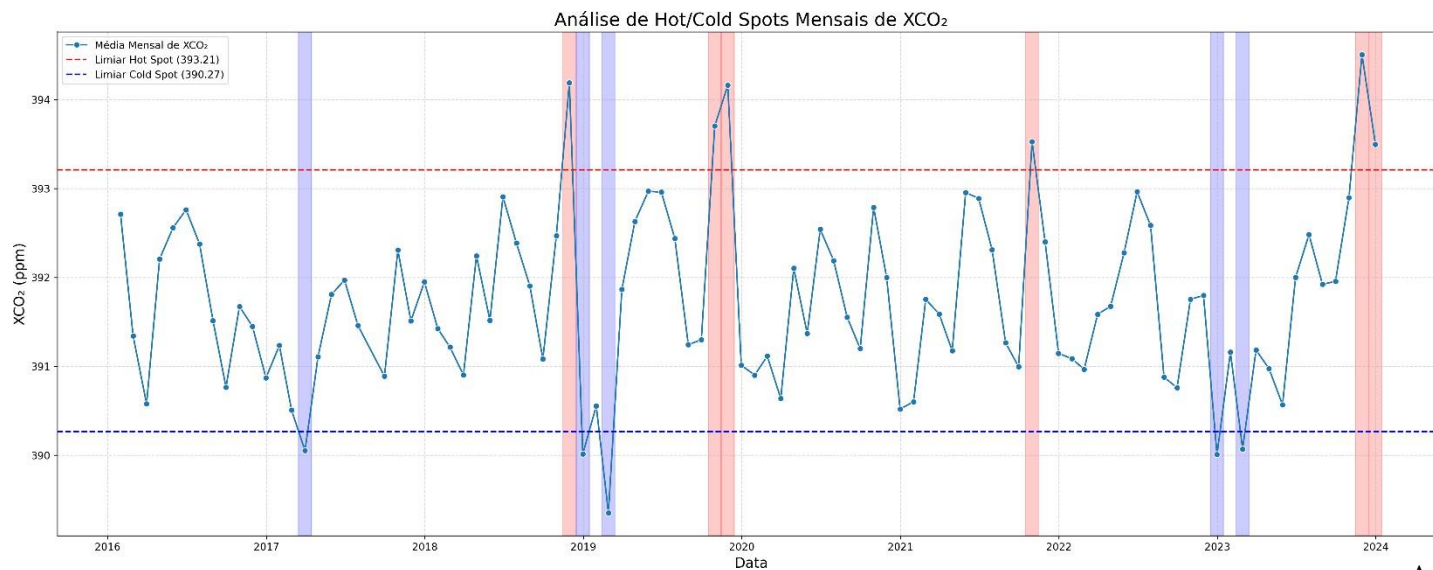
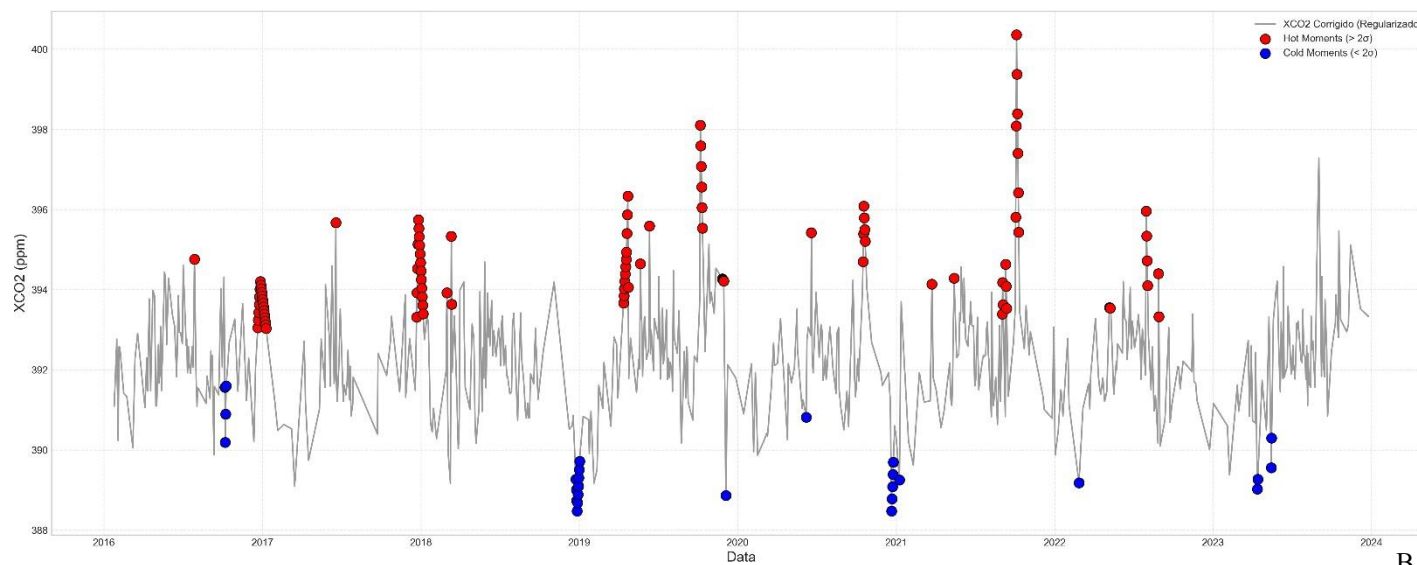


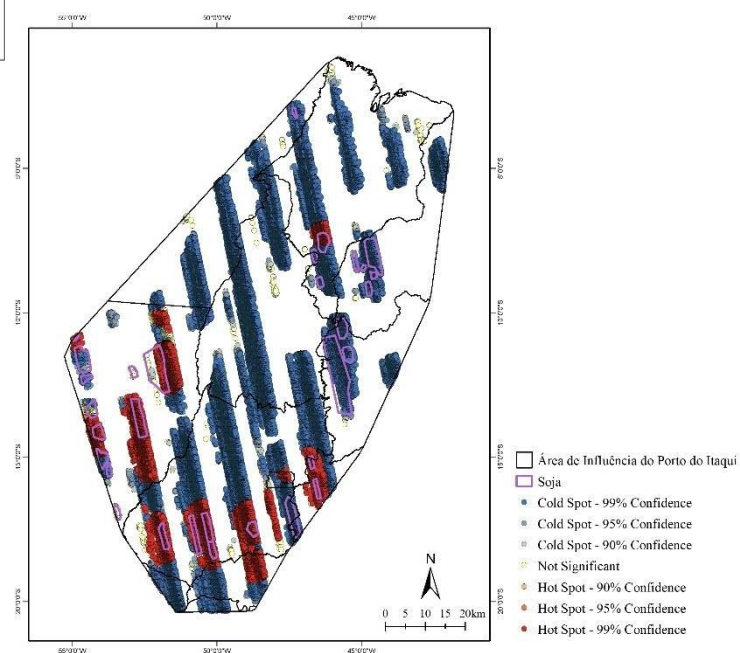
Figura 6. Análise de Hot/Cold-spots mensais de XCO₂ (A); Análise de hot/cold-moments de XCO₂ (B); Mapa de Hots e Colds Spots para área de pastagem (C).



A



B



C

Figura 7. Análise de Hot/Cold-spots mensais de XCO₂ (A); Análise de hot/cold-moments de XCO₂ (B); Mapa de Hots e Colds Spots para área de soja (C).

3.4. Análise de Anomalia

A série temporal da anomalia de X_{CO_2} para a área de pastagem, Figura 8, no período de 2016 a 2023, revela uma variação com oscilações sazonais ao longo de todo o intervalo de tempo. Os valores positivos, que indicam condição de fonte de emissão de CO_2 , aparecem com maior frequência, principalmente entre os anos de 2019 e 2022, alcançando anomalias superiores a +7 ppm em determinados eventos. Já os valores negativos, caracterizados como fonte de absorção, ocorreram em menor magnitude e frequência, situando-se em torno de -2 a -4 ppm em episódios pontuais, como observado nos anos de 2016, 2017, 2019 e 2021.

O gráfico mostra a variação das anomalias de X_{CO_2} , Figura 8A, diferenciando períodos de fonte de emissão. Observa-se uma alternância sazonal entre emissões e absorções, com predominância de valores positivos entre 2018 e 2019 e picos mais intensos de absorção a partir de 2021. A média móvel de 30 dias evidencia oscilações regulares, com alguns períodos de maior estabilidade intercalados com variações bruscas.

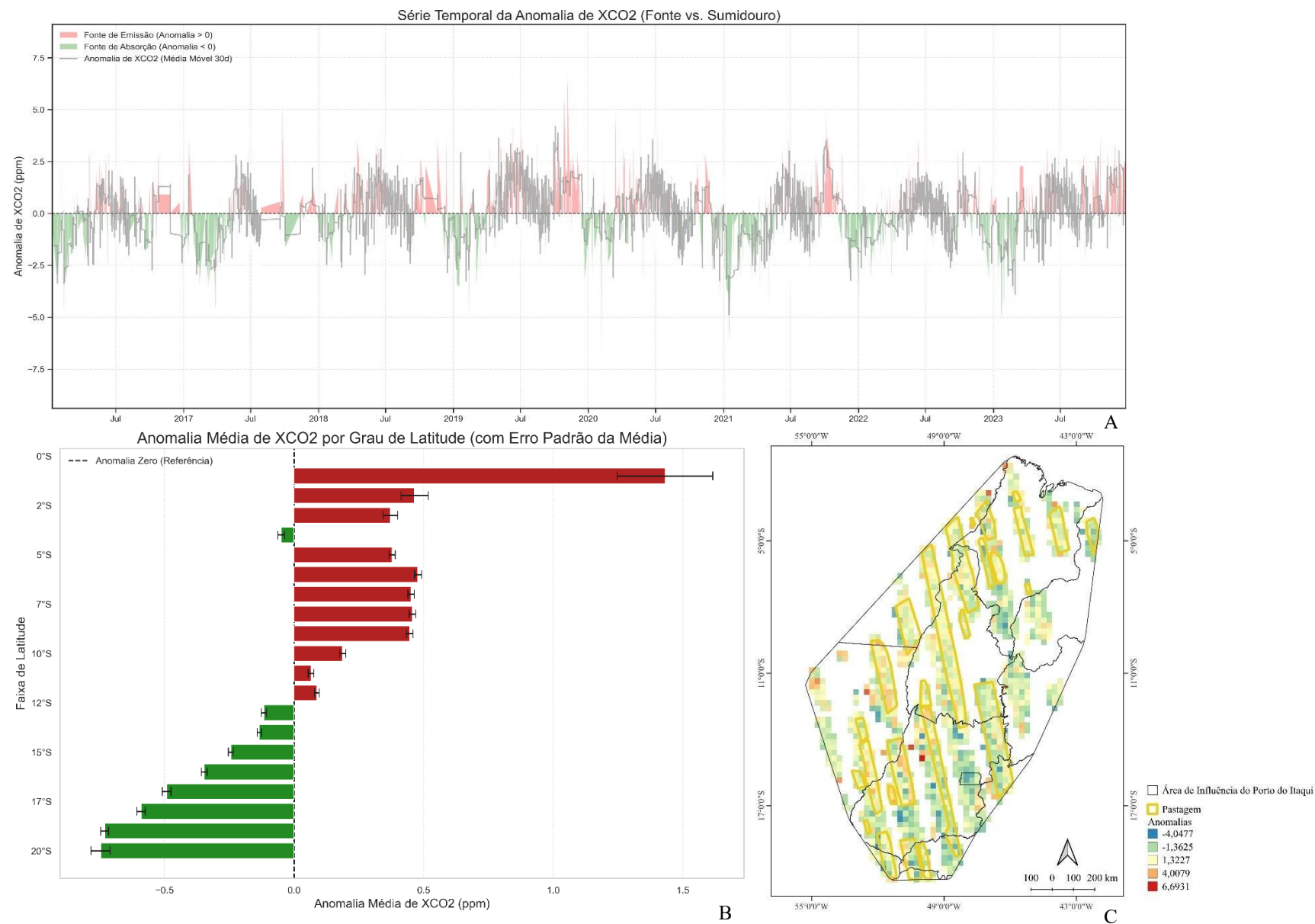


Figura 8. Série temporal de Anomalia de XCO₂ diferenciando períodos de fonte de emissão e absorção (A); Anomalia Média de XCO₂ por grau de latitude (B); Mapa de Anomalia em área de pastagem (C).

As anomalias médias, Figura 8B, mostram um gradiente latitudinal mostrando faixas próximas ao equador, 0°S a 12°S, e apresentam anomalias predominantemente positivas. Em contrapartida, nas latitudes mais ao sul, 12°S a 20°S, predominam valores negativos. O maior valor positivo foi registrado próximo ao 0°S, ou seja, 1,5 ppm, enquanto o maior valor negativo ocorreu próximo ao 20°S.

O mapa, Figura 8C, mostrou heterogeneidade no comportamento das anomalias sobre áreas de pastagem. As classes de anomalias variaram de forte absorção, -4,05 ppm, até forte emissão, +6,69 ppm. Áreas localizadas no norte e nordeste da região de estudo apresentaram maior concentração de anomalias positivas. Regiões mais centrais e ao sul apresentaram predominância de anomalias negativas.

A análise da série temporal da anomalia de X_{CO_2} em áreas de soja, Figura 9A, entre 2016 e 2023, mostra variações expressivas entre períodos de emissão (anomalias positivas) e de absorção (anomalias negativas). Foi possível observar que entre 2016 e 2018, ocorreu predominância de oscilações positivas, com picos de até +6 ppm, indicando forte emissão, intercaladas com períodos de absorção mais moderada. Em 2019, verifica-se maior frequência de anomalias negativas, chegando a -6 ppm. Entre 2020 e 2021, o padrão volta a se intensificar em valores positivos, com destaque para picos próximos de +8 ppm. Em 2022 e 2023, o comportamento torna-se mais equilibrado, alternando fases de absorção e emissão, mas ainda com registros de valores positivos mais expressivos, próximos de +6 ppm.

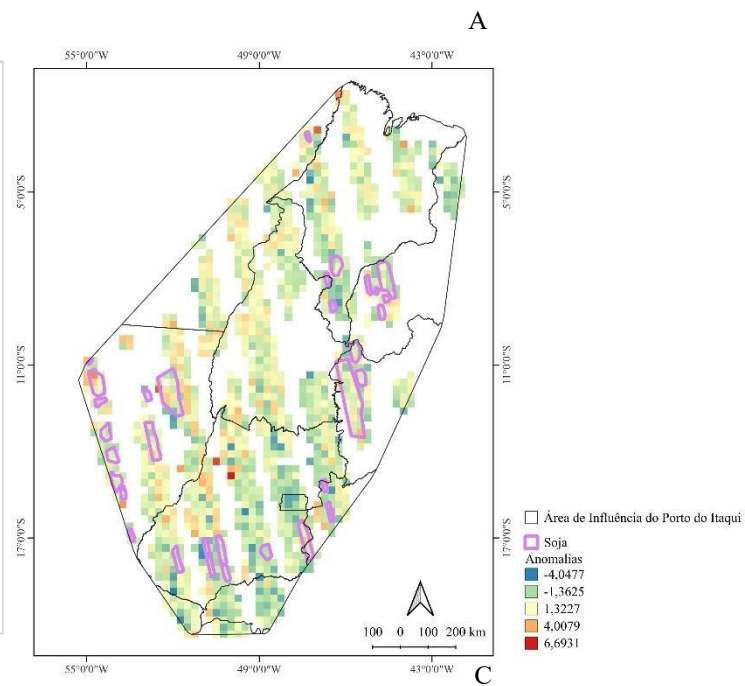
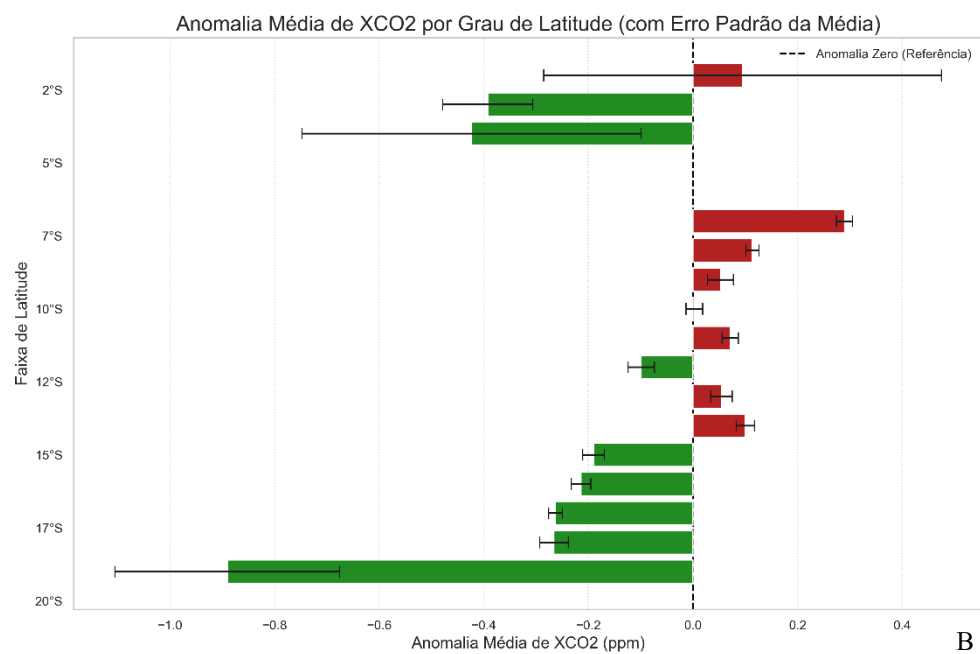
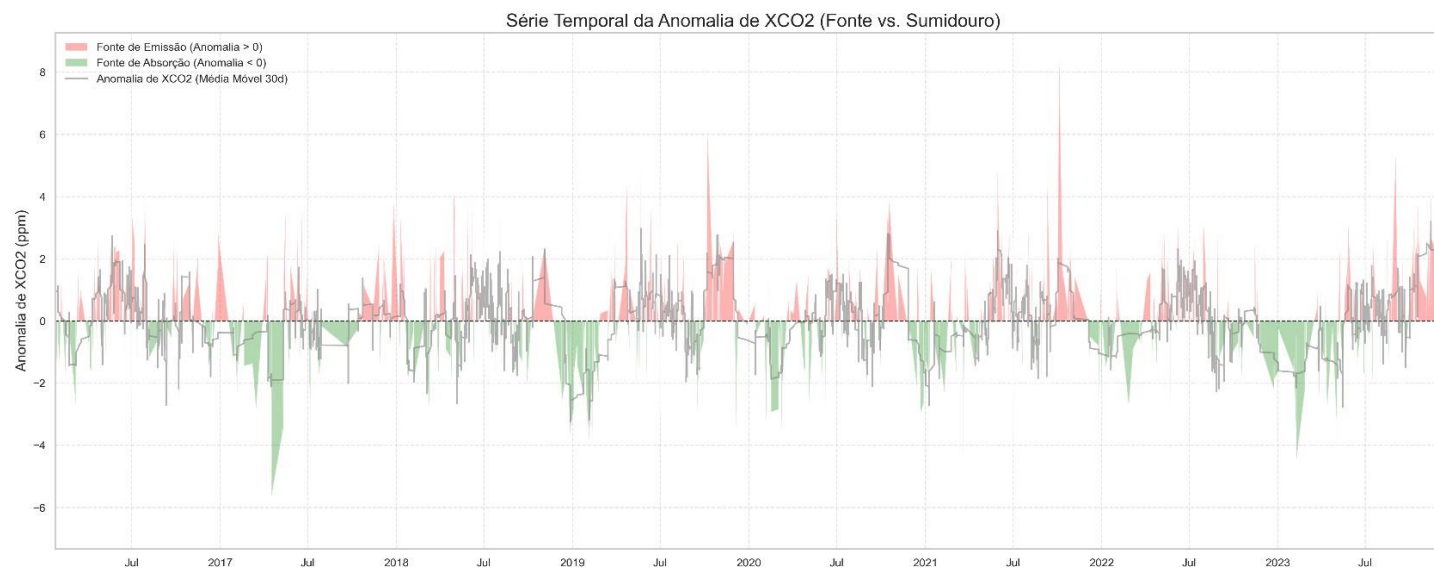


Figura 9. Série temporal de Anomalia de XCO₂ diferenciando períodos de fonte de emissão e absorção (A); Anomalia Média de XCO₂ por grau de latitude (B); Mapa de Anomalia em área de soja (C).

Os dados de anomalia média de X_{CO_2} por Grau de Latitude, Figura 9B, em latitudes mais ao norte, 2°S a 5°S, predominam anomalias negativas. Entre 7°S e 12°S, destacam-se anomalias positivas, ou seja, emissão líquida. Já em latitudes mais ao sul, 15°S a 20°S, predominam anomalias negativas.

O mapa de anomalias de X_{CO_2} , Figura 9C, revelou heterogeneidade de anomalias. Regiões das áreas de soja apresentam tanto anomalias positivas (emissões, em tons de laranja e vermelho) quanto negativas (absorções, em tons de verde e azul). As áreas próximas a cultivos de soja, especialmente no sul da área de influência, mostram valores negativos, ou seja, absorção. No entanto, existem pontos específicos que apresentaram anomalias positivas intensas.

3.5. Análise de Correlação de X_{CO_2}

A matriz de correlação para a área de pastagem, Figura 10A, revelou relações significativas entre variáveis climáticas, índices de vegetação e as concentrações de X_{CO_2} . Observou-se que o X_{CO_2} apresentou correlação positiva de baixa a moderada com NDVI ($r = 0,35$) e LAI ($r = 0,27$), além de uma correlação fraca com EVI ($r = 0,06$). Em contrapartida, foram verificadas correlações negativas entre X_{CO_2} e precipitação ($r = -0,20$), temperatura do ar a 2 m ($r = -0,06$) e umidade relativa ($r = -0,11$). Os índices de vegetação mostraram correlações internas mais expressivas, destacando-se a relação positiva entre NDVI e EVI ($r = 0,53$) e entre NDVI e LAI ($r = 0,68$). Entre as variáveis meteorológicas, a umidade relativa e a precipitação apresentaram forte correlação positiva ($r = 0,85$), enquanto a temperatura apresentou correlação negativa com a umidade relativa ($r = -0,54$).



Figura 10. Matriz de correlação do X_{CO_2} para as áreas de Pastagem (A) e Soja (B) com as variáveis: NDVI – Índice de Vegetação de Diferença Normalizada; EVI – Índice de Vegetação Aprimorado; LAI – Índice de Área Foliar; PREC – precipitação; T2M – temperatura a 2 metros e UR – Umidade Relativa do Ar.

A matriz de correlação para a área de soja, Figura 10B, evidencia diferentes padrões de associação entre as variáveis analisadas. Observa-se que o X_{CO_2} apresenta correlação negativa com os índices de vegetação: EVI ($r=-0,33$), NDVI ($r=-0,26$) e LAI ($r=-0,24$). Já em relação às variáveis meteorológicas, X_{CO_2} apresenta correlações muito baixas e negativas com a precipitação ($r=-0,05$), temperatura do ar a 2m ($-0,05$) e umidade relativa ($r=-0,06$). Entre as demais variáveis, nota-se correlações elevadas entre os índices de vegetação: NDVI e EVI ($r=0,96$), NDVI e LAI ($r=0,97$), bem como EVI e LAI ($r=0,92$). A precipitação mostra forte correlação positiva com a umidade relativa ($r=0,85$), enquanto a temperatura do ar apresenta correlação negativa com a umidade relativa ($r=-0,54$).

3.6. Análise de Correlação de Anomalia de X_{CO_2}

A análise da matriz de correlação para a área de pastagem, Figura 11A, a qual revelou diferentes relações entre as anomalias de X_{CO_2} e as variáveis ambientais e de vegetação. As anomalias de X_{CO_2} apresentaram correlação positiva moderada com o NDVI ($r = 0,40$) e com o LAI ($r = 0,44$), sugerindo que a variação da cobertura vegetal influencia a dinâmica das concentrações de CO_2 . Já a correlação com o EVI foi baixa ($r = 0,08$). Em relação às variáveis meteorológicas, a correlação foi fraca e negativa com a precipitação ($r = -0,13$), com a temperatura do ar ($r = -0,16$) e com a umidade relativa ($r = -0,05$), indicando que os efeitos climáticos, embora presentes, não foram determinantes diretos para a variação do X_{CO_2} nesse ambiente. Entre as próprias variáveis, destacam-se correlações fortes: NDVI e LAI ($r = 0,68$), bem como precipitação e umidade relativa ($r = 0,85$), evidenciando a forte interdependência

entre parâmetros de vegetação e entre os elementos climáticos. Por outro lado, o T2M apresentou correlação negativa significativa com a UR ($r = -0,54$).

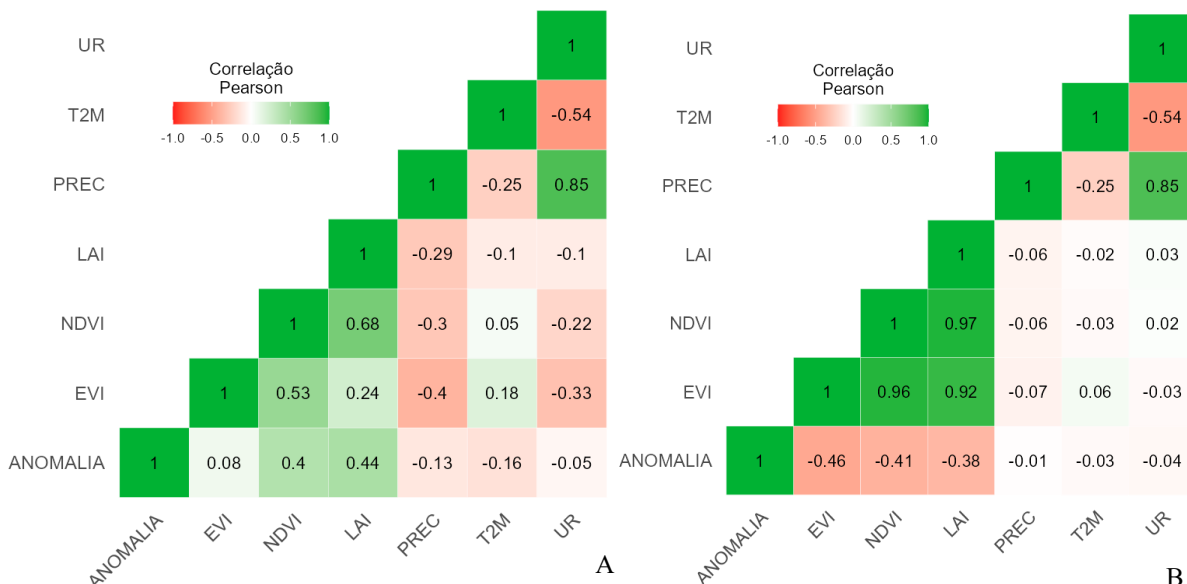


Figura 11. Matriz de correlação de Anomalia X_{CO_2} para as áreas de Pastagem (A) e Soja (B) com as variáveis: NDVI – Índice de Vegetação de Diferença Normalizada; EVI – Índice de Vegetação Aprimorado; LAI – Índice de Área Foliar; PREC – precipitação; T2M – temperatura a 2 metros e UR – Umidade Relativa do Ar.

A matriz de correlação da anomalia de X_{CO_2} para a área de soja, Figura 11B, revelou padrões importantes nas relações entre variáveis climáticas e de vegetação. Observou-se que a anomalia de X_{CO_2} apresentou correlação negativa com os índices de vegetação: EVI ($r=-0,46$), NDVI ($r=-0,41$) e LAI ($r=-0,38$). Já em relação às variáveis meteorológicas, a correlação da anomalia de X_{CO_2} foi muito baixa com a precipitação ($r=-0,01$), temperatura do ar próxima à superfície ($r=-0,03$) e umidade relativa ($r=-0,04$), indicando que, nesse contexto, o papel direto dos fatores climáticos sobre as anomalias de CO_2 não foi expressivo. Além disso, a matriz evidenciou fortes correlações positivas entre os índices de vegetação: NDVI e EVI ($r=0,96$), NDVI e LAI ($r=0,97$), e EVI e LAI ($r=0,92$). Também foi identificada uma correlação negativa moderada entre temperatura (T2M) e umidade relativa ($r=-0,54$), além de uma forte correlação positiva entre precipitação e umidade relativa ($r=0,85$).

3.5. SPEI (Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração)

Os resultados do SPEI, Figura 12, indicam forte variabilidade espaço-temporal entre 2016 e 2023. O ano de 2016 predominou condições neutras a levemente úmidas em algumas partes da área, com valores próximos ou superiores a 0,5, especialmente na região central e sul.

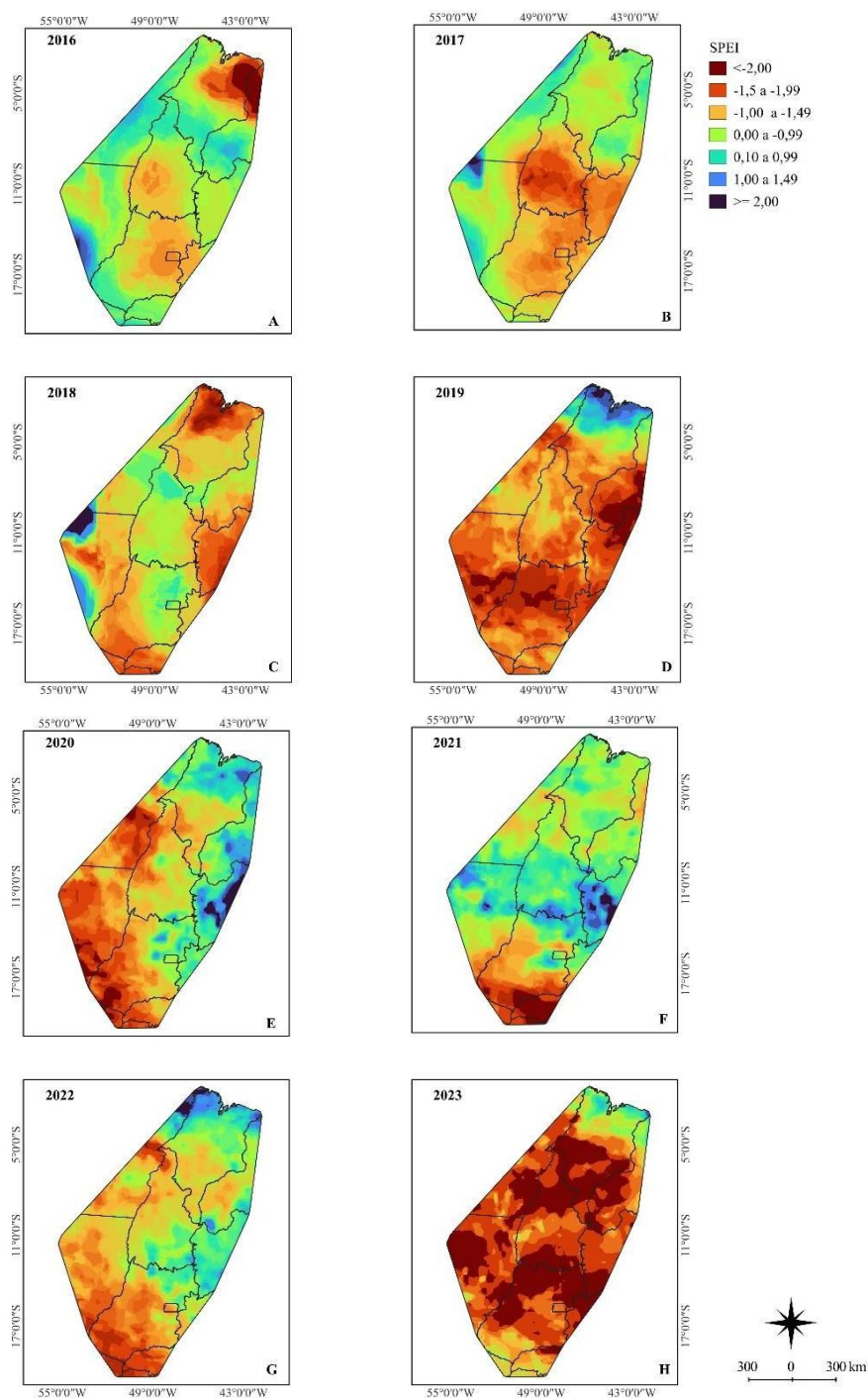


Figura 12. Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) anual para a área de exportação de grãos do Porto do Itaquí.

No entanto, na parte norte, especialmente no leste do Maranhão predominou seca extrema com SPEI registrando valores negativos abaixo de -2,00. Já 2017 apresentou uma pequena intensificação das condições secas, com valores negativos abrangendo principalmente a parte central da região, caracterizando seca moderada a severa com SPEI abaixo de -1,00. Em 2018 houve áreas de seca moderada, SPEI entre -1,00 e -1,49 intercaladas com áreas com índices positivos. Posteriormente, 2019 registrou a predominância de valores negativos acentuados SPEI abaixo de -2,00, caracterizando seca extrema em quase toda a região.

O ano de 2020 predominou resultados negativos na região oeste e sul caracterizando condições de seca severa, SPEI -1,5 e -1,99. Já 2021 mostrou SPEI entre 0,10 e 0,99 indicando umidade distribuídas principalmente no centro e predominando no estado de Minas Gerais. Diferente das regiões do sul a qual apresentou seca extrema, SPEI menor que -2,00. Em 2022 apresentou valores próximos à neutralidade e leve déficit hídrico em grande parte da área, com algumas manchas de seca mais severa no setor centro-sul, SPEI de -1,50 a -1,99. Enquanto, 2023 foi o mais crítico do período, com ampla predominância de valores negativos acentuados, $SPEI < -2,00$, em praticamente toda a área.

3.6. SPI (Índice de Precipitação Padronizado)

Em relação à análise do SPI para o período de 2016 a 2023 mostra diferenças os padrões espaciais de disponibilidade hídrica (Figura 13). Em 2016 ocorreu o índice apontou região moderadamente úmida, com valores entre 1,00 e 1,49, e área indicando seca extrema como mostra no leste maranhense coincidindo com os valores de SPEI. Já 2017 pode-se observar aumento de índice de seca na região central, com áreas registrando valores negativos de -1,5 a -1,99, enquanto áreas que antes indicavam seca extrema, nesse ano, os valores do SPI indicaram seca moderada. O ano de 2018 apresentou SPI próximo de zero, principalmente na parte central que envolve os estados de Tocantins e uma parte do Goiás com valores entre 0,00 e -0,99. O ano 2019 registrou índices negativos caracterizando em boa parte da área como seca severa e seca extrema.

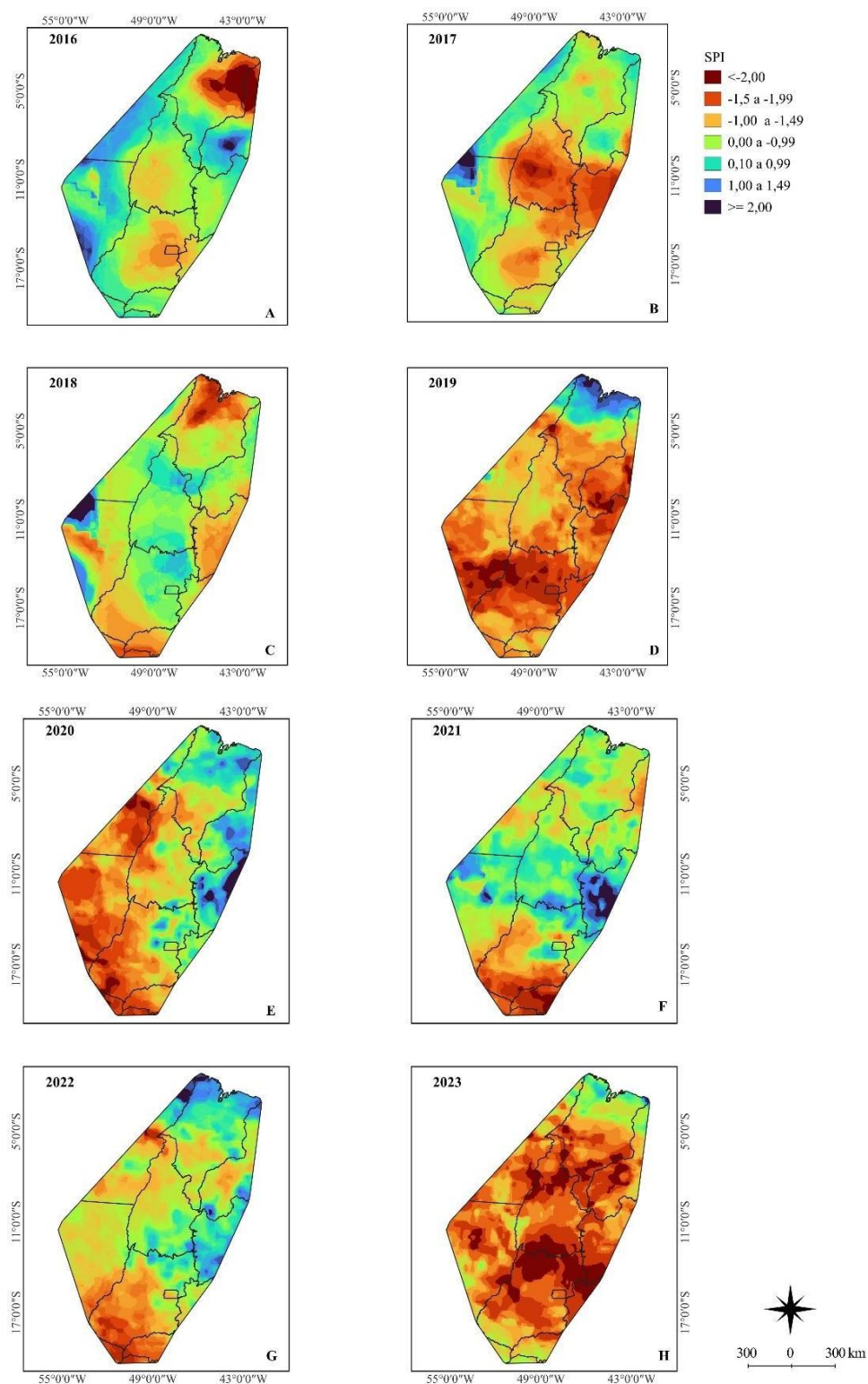


Figura 13. Índice de Precipitação Padronizado (SPI) anual para a área de exportação de grãos do Porto do Itaquí.

Ao observar 2020, nota-se aumento do SPEI em áreas antes afetadas pelas secas no ano anterior, predominantemente próximas à neutralidade e algumas áreas moderadamente úmidas, destacando pequenas regiões com valores negativos moderados caracterizando secas moderadas a severas no sul do mapa. Em 2021 mostrou valores próximos a zero entre os

estados do Maranhão e do Tocantins e condições de índice acima de 2,00 na região da Bahia indicando região extremamente úmida. Em contrapartida, no sul da região, envolvendo os estados do Goiás e parte de Minas Gerais, continuou com secas moderadas. Já 2022 exibiu um padrão semelhante a 2021, com seca moderada no extremo sul. Por fim, 2023 marcou um cenário mais seco que os anos anteriores, com áreas mais extensas de valores negativos SPI abaixo de -2,00, principalmente no setor central e norte entre os estados do Maranhão e do Goiás.

3.7. Umidade do Solo

No que se refere à análise da umidade do solo, 2016 apresentou maiores valores de umidade do solo acumulada de mais de 350 mm, com destaque para áreas acima de 520 mm (Figura 14). As regiões central e sul do mapa apresentaram valores reduzidos, menores que 180 mm). O ano 2017 apresentou comportamento semelhante ao de 2016, com áreas mais úmidas concentradas na região norte da área, ou seja menor que 350 mm, mas uma predominância de baixos valores menores que 180 mm na parte central e sul. Em 2018 registrou uma leve redução de áreas com umidade elevada, concentrando valores abaixo de 350 mm em uma faixa menor ao norte. A maior parte da região apresentou valores baixos, menores que 180 mm). Já 2019 constatou umidade elevada maior que 350 mm, limitada ao extremo norte, enquanto a maior parte da região continuou com baixos valores menores que 180 mm). Em 2020 houve baixa umidade do solo em grande parte da área, com valores mais acima de 350 mm, na parte norte do mapa. O ano de 2021 teve comportamento análogo a 2020, com valores acima de 350 mm, enquanto o restante da região apresentou valores baixos a intermediários.

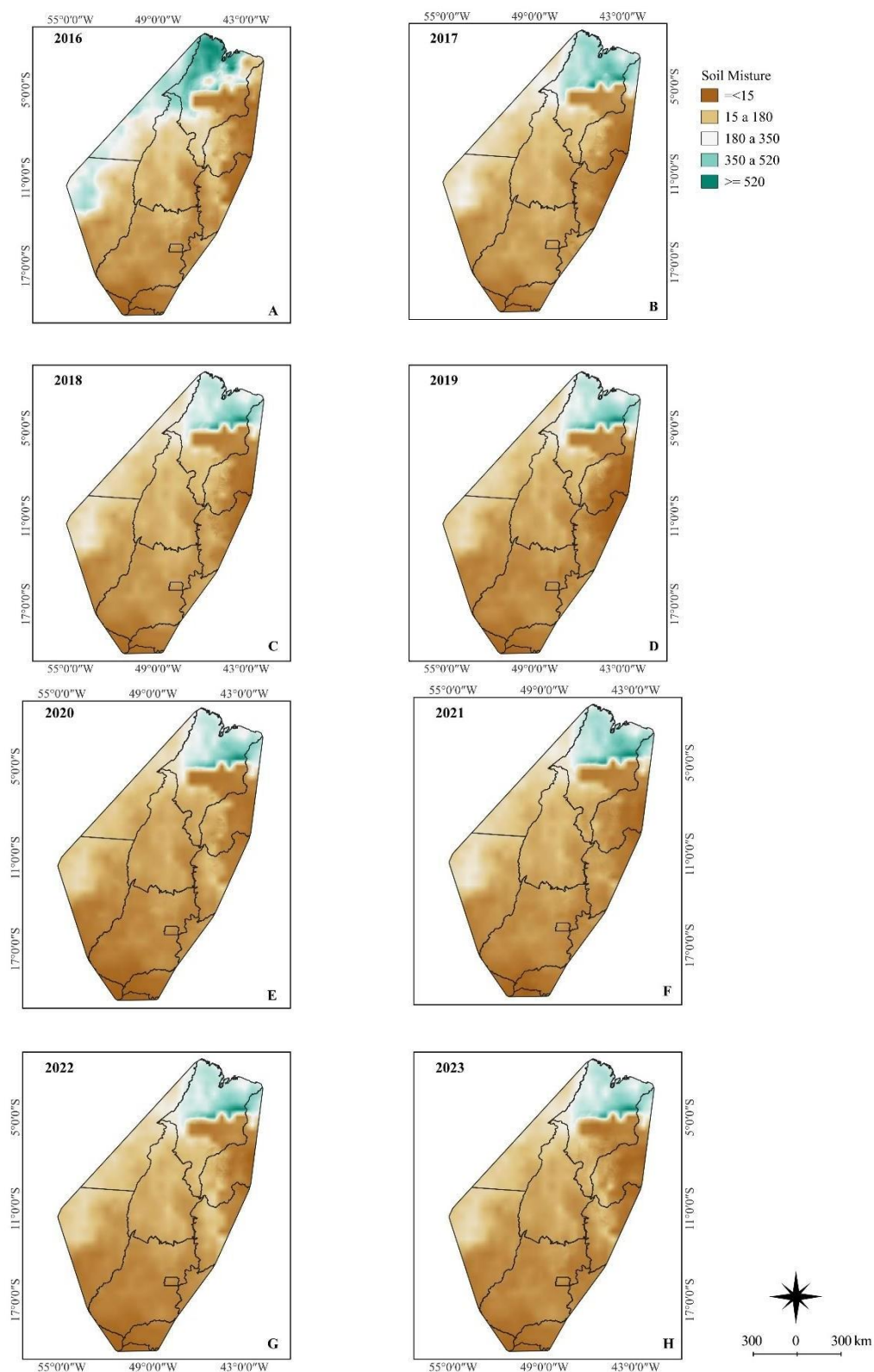


Figura 14. Umidade do solo anual para a área de exportação de grãos do Porto do Itaquí.

Em relação ao ano 2022 houve uma leve redução nas áreas com alta umidade do solo em relação a 2021, com valores acima de 350 mm apenas em uma pequena faixa da região norte, enquanto a maior parte permaneceu abaixo de 180 mm. Enquanto o último ano da escala, 2023, apresentou resultados semelhantes a 2022, mantendo baixos valores de umidade abaixo

de 180 mm na maior parte do território, com alta umidade restrita a uma área pequena no extremo norte.

3.8. Precipitação

A Figura 15 mostra a análise da precipitação anual entre 2016 e 2023. Em 2016 houve variação entre 1000 e 1500 mm/ano. O centro da área apresentou valores entre 500 e 1000 mm/ano. Em 2017 ocorreu uma leve diminuição da precipitação predominando valores entre 1000 e 1500 mm/ano em quase toda a área, enquanto o sul apresentou volumes menores, entre 500 e 1000 mm/ano. Em 2018 houve comportamento semelhante ao ano anterior, especialmente na parte norte, mantendo a porção central e sul com valores entre 500 e 1000 mm/ano. Enquanto em 2019 foi registrado o menor volume de precipitação no período, com valores entre 500 e 1000 mm/ano na maior parte da região, exceto uma pequena faixa ao norte com precipitação entre 1000 e 1500 mm/ano.

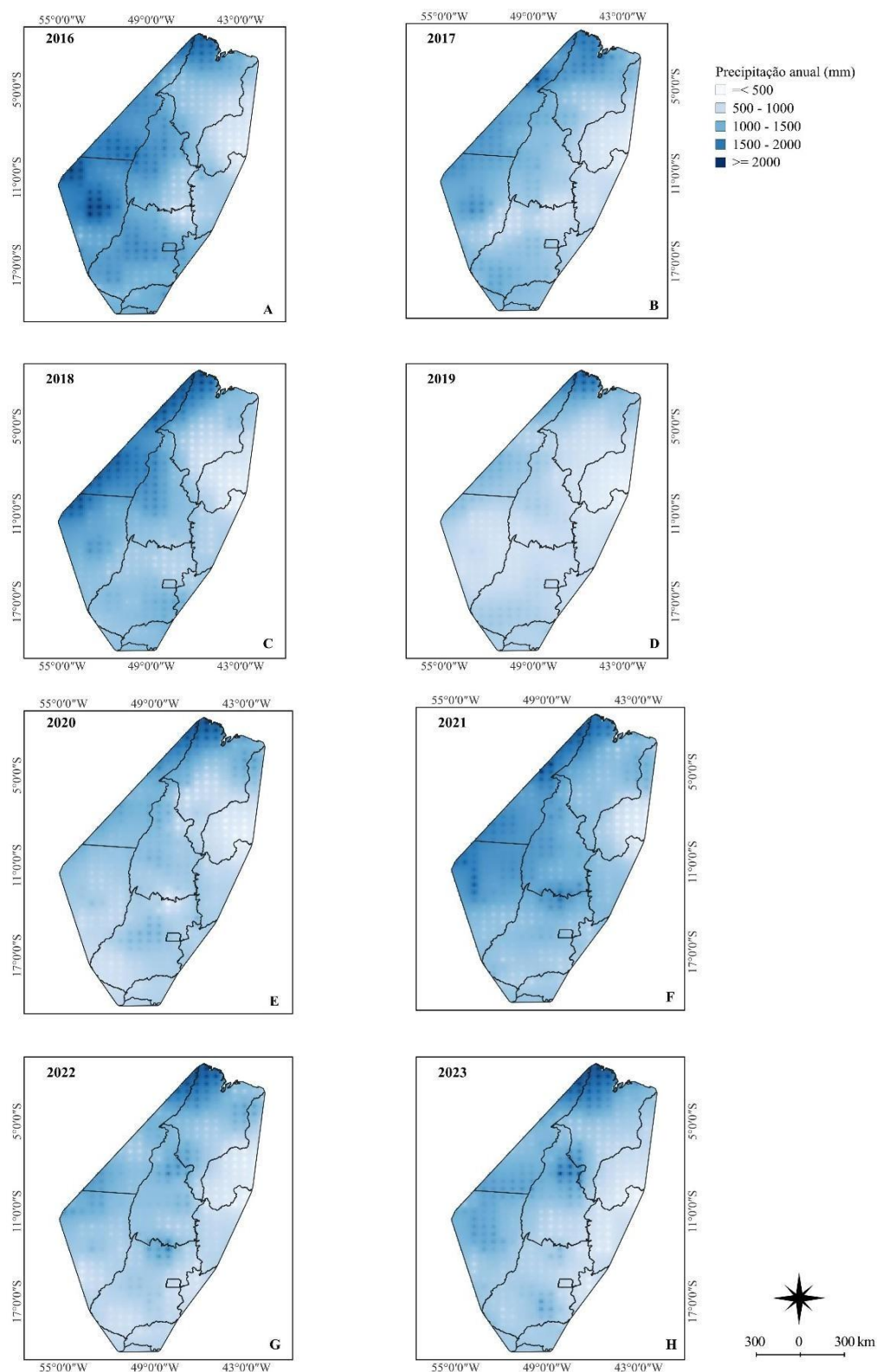


Figura 15. Precipitação anual para a área de exportação de grãos do Porto do Itaquí.

Em 2020 a precipitação anual ficou entre 1000 e 1500 mm/ano, com áreas do norte acima de 1500 mm/ano e o centro com volumes mais baixos, predominantemente entre 500 e 1000 mm/ano. O ano de 2021 registrou uma distribuição pluviométrica mais equilibrada, com valores de 1000 a 1500 mm/ano, destacando-se um aumento no volume ao norte, ultrapassando

1500 mm/ano em algumas áreas. Em 2022 foi observado diminuição da precipitação comparando com 2021, com valores entre 500 e 100 mm/ano na região central, enquanto o sul obteve valores abaixo de 500. Em 2023 apresentou cenário semelhante ao ano anterior, com precipitações mais elevadas na região norte do Maranhão e menores no centro-sul, leste e oeste da região.

3.9. Umidade Relativa do Ar

A Figura 16 mostra os mapas de umidade relativa do ar entre 2016 a 2023. Ao analisar, verifica-se que em 2016, as maiores porcentagens de umidade relativa, maior que 80%, concentraram-se no norte maranhense, enquanto o sul do estado, assim como em boa parte do Tocantins e do Piauí a umidade ficou entre 50% a 60%. Em 2017, houve uma ampliação das áreas com umidade acima de 70%, também no norte maranhense, enquanto que no restante da área não houve tantas mudanças.

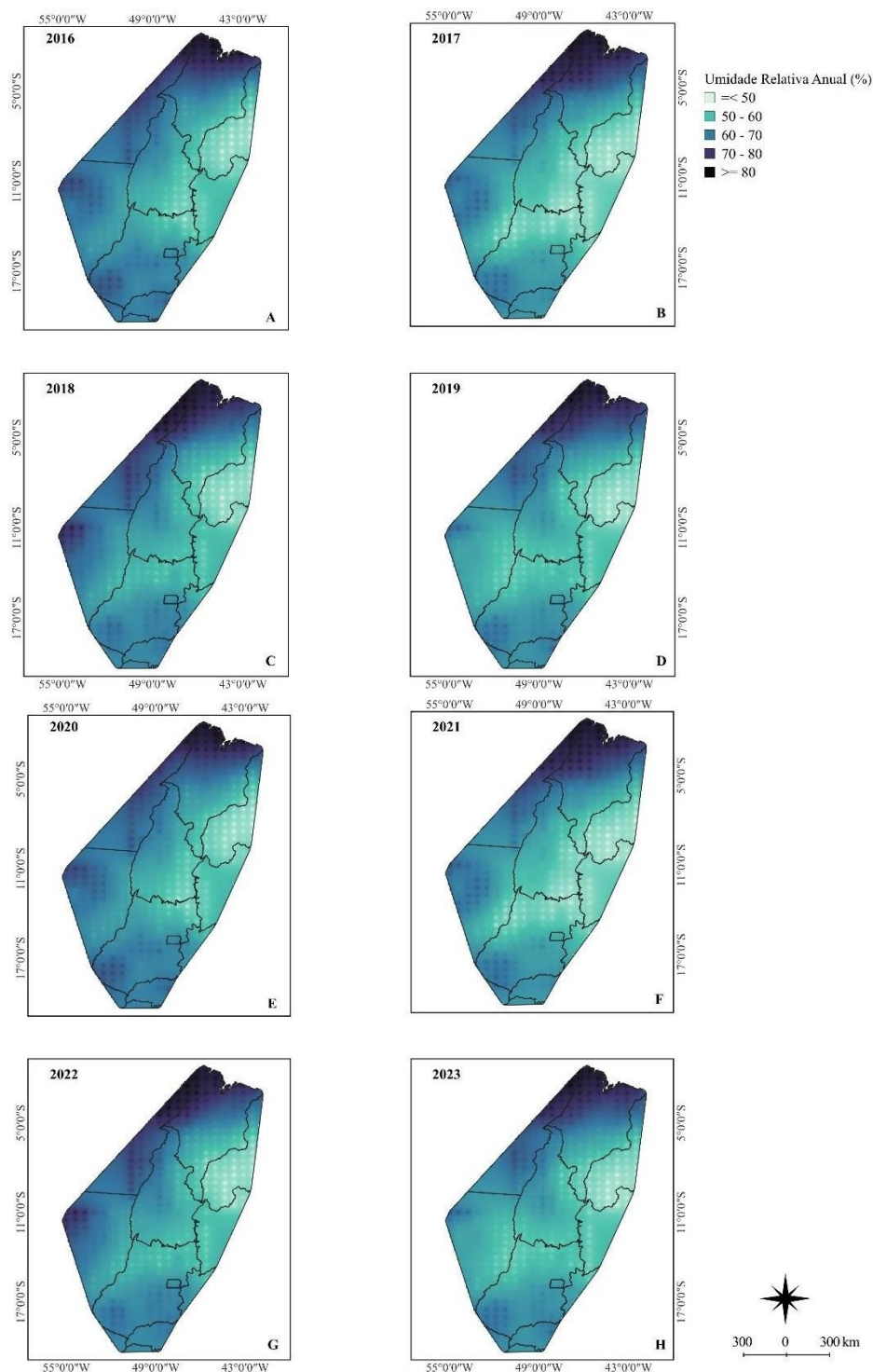


Figura 16. Umidade relativa do ar anual para a área de exportação de grãos do Porto do Itaquí.

Já em 2018, a distribuição voltou a apresentar um padrão semelhante ao de 2016, com o predomínio de valores entre 60-50% e redução das áreas com umidade superior a 80%. Em 2019, observa-se novamente uma elevação na umidade relativa na parte norte, enquanto o sul manteve menores valores. Em 2020, a umidade relativa apresentou padrão mais homogêneo, com ampla área apresentando valores médios a elevados. Já em 2021, embora a distribuição

espacial continue semelhante, nota-se leve redução da umidade no centro-sul do território. Em 2022, há indícios de um leve aumento da umidade nas porções sul e sudoeste. No entanto, em 2023, observa-se uma ligeira redução da umidade na maior parte da área principalmente ao centro-sul da área.

3.10. Temperatura

A Figura 17 apresenta a distribuição espacial da temperatura anual média entre os anos de 2016 a 2023 na área de estudo. Observa-se que, em todos os anos analisados, as temperaturas médias anuais se concentraram majoritariamente entre 27 °C e 29 °C, com algumas áreas pontuais apresentando médias superiores a 29 °C, especialmente na porção nordeste da área mapeada. Em 2016 a maior parte do território apresentou temperaturas entre 27 °C e 29 °C, com valores inferiores de 25 °C a 27 °C, na parte sul do mapa. Algumas áreas com temperaturas maiores que 29 °C foram identificadas no norte da região. Já 2017 houve um leve aumento de temperaturas maiores ou iguais a 29 °C. O sul permaneceu com valores entre 25 °C e 27 °C, apresentando pouca variação em relação a 2016. O ano 2018 mostrou um aumento mais expressivo das áreas com temperatura maiores ou iguais a 29 °C. Em 2019, verificou-se um padrão semelhante ao de 2018, com temperaturas elevadas e estabilidade nas regiões mais frias na parte sul da área. No entanto, notam-se ligeiras reduções nas áreas com temperatura maior que 29 °C.

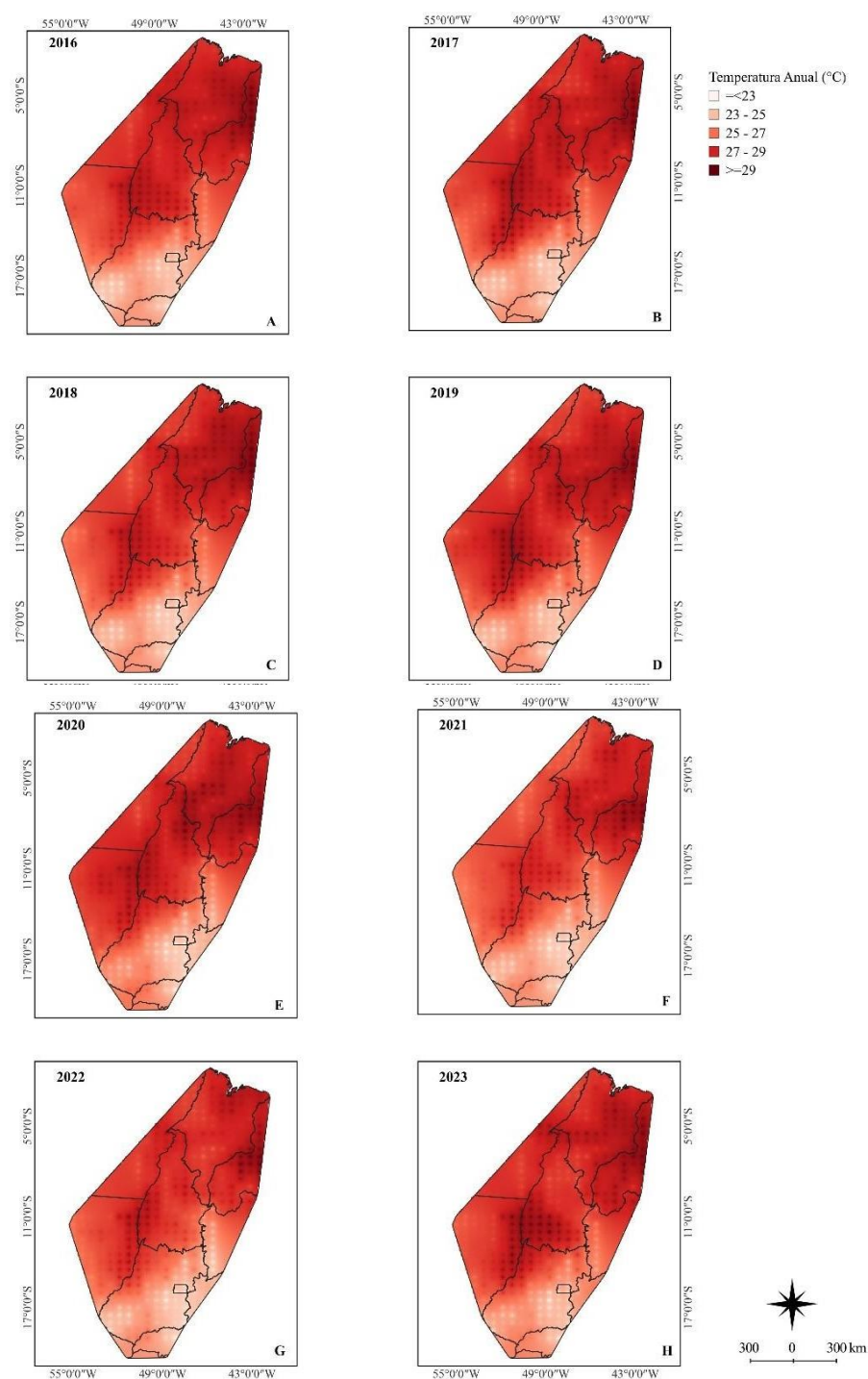


Figura 17. Temperatura anual da área de exportação de grãos do Porto do Itaquí.

Em 2020, as temperaturas variaram entre aproximadamente 26,5 °C e 28,5 °C, com as maiores médias na região norte da área, abrangendo áreas do sul do Pará e norte do Maranhão. As áreas ao sul, próximas à transição com o Cerrado, apresentaram temperaturas mais amenas, entre 26,5 °C e 27,5 °C. No ano de 2021, houve um leve aumento nos valores médios, com temperaturas variando de 27,0 °C a 29,0 °C. A elevação térmica foi mais evidente nas áreas

centrais área de estudo. Em 2022, os valores médios de temperatura mantiveram-se elevados, variando entre 27,2 °C e 29,2 °C, reforçando a tendência de aquecimento. Observa-se uma manutenção mais quente na área norte e o sul mais ameno. A faixa central da área de estudo apresentou amplas áreas com temperaturas acima de 28,5 °C, o que representa uma ampliação das áreas com calor intenso em relação aos anos anteriores. Por fim, 2023 registrou os maiores valores médios do período analisado, com temperaturas oscilando entre 27,5 °C e 29,5 °C. O mapa indica uma homogeneização do calor em praticamente todo o território, com poucas áreas apresentando valores abaixo de 28,0 °C. Destaca-se a persistência de uma mancha térmica intensa no quadrante norte-nordeste.

3. DISCUSSÃO

4.1. Distribuição espaço-temporal do uso e cobertura do solo

Na análise temporal dos mapas de uso e cobertura do solo entre 2016 e 2023 é possível observar a predominância de formações florestais e savânicas, mas com avanço de atividades agropecuárias, especialmente pastagens e cultivos temporários como a soja. Isso pode evidenciar um incremento progressivo de áreas de pastagem e lavouras no sul e sudeste da área de estudo, que sofrem maior pressão por expansão agropecuária. As áreas de soja, demonstraram uma expansão contínua, enquanto as pastagens ocupam porções maiores e mais dispersas do território ao longo dos anos. Essa dinâmica territorial reflete o padrão observado em estudos como os de Fidalgo et al. (2020), que avaliaram as mudanças no uso da terra na região do Pantanal por meio de imagens do Mapbiomas e concluíram que a vegetação natural da região estudada foi predominantemente substituída por pastagens ao longo do período estudado, entre 1990 a 2019, enquanto que a vegetação natural teve a maior redução de área neste período.

Nesse período foi observado o desenvolvimento de soja, principalmente na região do Maranhão, Tocantins, Goiás e Mato Grosso, uma vez que esses estados são um dos que contribuem com o desenvolvimento da fronteira agrícola da região de exportação de grãos do Porto do Itaquí. Segundo Costa et al. (2019), em 2020 o Porto do Itaquí exportou aproximadamente 12 milhões de toneladas de soja no Maranhão, enquanto o Porto de Santarém (Pará) exportou mais de 7 milhões de toneladas, o que confirma o crescimento dessa cultura na região. Antunes et al. (2019) apontam que esse crescimento da soja está frequentemente ligado à conversão de áreas anteriormente destinadas a pastagens. Além disso, é possível notar que o uso mosaico e outras lavouras temporárias também crescem pontualmente. Isso implica em diversificação agrícola, congruente com a intensificação das atividades produtivas ligadas ao agronegócio da região, especialmente com a logística proporcionada pelo Porto do Itaquí. Este

processo tem sido correlacionado com mudanças nos estoques e fluxos de carbono atmosférico, conforme Gatti et al. (2021) na Amazônia e Cerrado. Essas mudanças no uso da terra possuem influência direta com a dinâmica dos gases de efeito estufa, especialmente o CO₂.

Áreas de pastagem, embora com menor capacidade de sequestro de carbono comparadas às florestas, possuem papel crucial na emissão de CO₂ (Bustamante et al., 2012). Ademais, a substituição de vegetação nativa por pastagens pode aumentar a liberação de CO₂ para a atmosfera, sendo um dos fatores que explicam os valores de X_{CO2} mais elevados observados em determinadas áreas analisadas no estudo.

4.2. Variação temporal de concentração do X_{CO2}

A distribuição quase normal observada para as concentrações de X_{CO2} nas áreas de pastagem é compatível com padrões obtidos em regiões tropicais com uso predominante para pecuária extensiva, onde há relativa estabilidade interanual, mas marcada sazonalidade intra-anual (Crisp et al., 2017). A rejeição estatística da hipótese de normalidade pelo teste de Shapiro–Wilk, mesmo diante da simetria visual, é um efeito esperado em conjuntos de dados com elevado tamanho amostral, dada a alta sensibilidade do teste (Razali; Wah, 2011). Essa condição implica que análises subsequentes devem considerar métodos não-paramétricos ou transformações adequadas.

A ausência de tendência significativa na série temporal indica que, no período analisado, as áreas de pastagem mantiveram um balanço relativo entre emissões e absorções de CO₂, possivelmente associado ao manejo da vegetação e às características fenológicas da cobertura vegetal. Oscilações anuais observadas estão alinhadas com o padrão sazonal de fotossíntese e respiração, sendo influenciadas por variáveis climáticas, como precipitação e temperatura (Zeri et al., 2021). Estudos recentes alertam que áreas de pastagem em regiões tropicais podem responder rapidamente às mudanças climáticas e intervenção antrópica, como escassez hídrica, intensificação da atividade agrícola, eventos extremos e desertificação que podem modificar o clima e potencializar emissões (Medeiros et al., 2025).

A estabilidade interanual do X_{CO2} nas áreas de pastagem reforça o padrão detectado na série temporal, sugerindo que não ocorreram mudanças expressivas no balanço de carbono ao longo do período analisado. Essa estabilidade é comum em ecossistemas manejados de forma contínua, onde a biomassa aérea e o ciclo fenológico permanecem relativamente constantes de ano para ano (Bastos et al., 2020). Entretanto, a presença recorrente de valores extremos pode indicar que, embora a média anual se mantenha estável, há episódios localizados e temporários que alteram significativamente as concentrações de X_{CO2}. Isso acontece por conta de queimadas, alterações do uso do solo e aumento de atividades antrópicas (Kunchala et al., 2022).

O padrão mensal identificado, com concentrações mais elevadas durante a estação seca e menores no período chuvoso, é coerente com estudos que demonstram maior acúmulo de CO₂ atmosférico quando a vegetação reduz a taxa fotossintética devido à limitação hídrica (Piao et al., 2020). Vale destacar também que em pastagens, a produtividade primária líquida decai nos meses secos, favorecendo o acúmulo de carbono na atmosfera. Isso ocorre devido a mudanças de uso da terra com ênfase no desmatamento e degradação florestal (Medeiros et al., 2025). Por outro lado, no período chuvoso, o aumento da umidade do solo e da atividade fotossintética contribui para a redução temporária do X_{CO2}.

A correspondência entre as oscilações sazonais e as variações climáticas locais indica que as pastagens funcionam como sistemas sensíveis às condições ambientais, visto que a conversão de vegetação em novas áreas de pasto aumenta as emissões de CO₂ (Silva et al., 2018). Essa relação leva a eventos climáticos extremos, que podem exercer impactos, como degradação das terras cultiváveis, visto que práticas agrícolas insustentáveis aceleram a perda de carbono e nutrientes orgânicos do solo (Li et al., 2021).

O aumento contínuo do X_{CO2} ao longo da série está de acordo com a tendência global de crescimento da concentração de CO₂ atmosférico, que vem sendo reproduzida em diferentes regiões do planeta (Friedlingstein et al., 2022; NOAA, 2023). Esse aumento é resultado principalmente das atividades antrópicas, como uso de combustíveis fósseis, mudanças no uso da terra e desmatamento, processos que têm contribuído para a intensificação do efeito estufa e das mudanças climáticas (Kunchala et al. 2022). Em áreas de pastagem, a variação no manejo, associada ao crescimento da vegetação, impacta diretamente no fluxo de carbono para a atmosfera (Soares et al., 2019). Durante períodos de maior atividade fotossintética, há maior sequestro de CO₂, enquanto em fases de degradação da biomassa predomina a emissão (Pastorello et al., 2020). Além disso, degradação da pastagem faz com que haja redução na produtividade primária líquida, perda de matéria orgânica do solo e contribui com o aumento de emissões (Rosa et al., 2014).

Esses fatores podem ser acelerados por pressões relacionadas à expansão agrícola, uma vez que essas atividades intensificam as emissões regionais (Silva et al., 2021). Ademais, eventos climáticos extremos, como o El Niño de 2023, podem ter acentuado os picos de CO₂ devido ao estresse hídrico, que reduz a capacidade de sequestro pelas pastagens (Gentine et al., 2019). A ausência de tendência significativa nos níveis de X_{CO2} nas áreas de soja indica que, durante o período analisado, as variações interanuais não foram suficientemente expressivas para alterar a média de longo prazo. Esse padrão pode estar relacionado à estabilidade no uso

da terra e à manutenção de práticas agrícolas semelhantes na região, apesar de possíveis mudanças no manejo e na extensão das áreas cultivadas (Gloor et al., 2018).

Apesar da aparente estabilidade nos níveis médios de X_{CO_2} , é importante considerar que a intensificação agrícola pode contribuir indiretamente para emissões de CO_2 , por meio do uso de fertilizantes nitrogenados e de processos de preparo do solo (Smith et al., 2019). Assim, mesmo que os valores atmosféricos na escala local não apresentem tendência crescente, a pressão sobre os ecossistemas regionais e as emissões associadas à cadeia produtiva da soja permanecem relevantes no contexto das mudanças climáticas globais.

O padrão sazonal identificado, com maiores concentrações de X_{CO_2} nos meses secos (maio-julho) e menores durante a estação chuvosa (janeiro-março), é consistente com a dinâmica da fotossíntese e respiração vegetal. No período chuvoso, a alta disponibilidade hídrica e a cobertura vegetal mais densa favorecem a assimilação de CO_2 pela fotossíntese (Liu et al., 2020). Isso ocorre pois, conforme Bourns et al. (2024), a cobertura vegetal desempenha um papel importante para o aumento no carbono do solo, por meio da melhoria do ciclo de nutrientes, o qual intensifica a do solo e acúmulo de matéria orgânica. Já na estação seca, a redução da biomassa ativa e a maior decomposição de matéria orgânica contribuem para aumento das concentrações atmosféricas (Neumaier et al., 2020).

Além disso, o cultivo intensivo da soja pode influenciar o ciclo local do carbono não apenas pela fotossíntese, mas também pelo uso de insumos, preparo do solo e mudanças na cobertura vegetal (Spera et al., 2020). Em regiões de expansão agrícola, a substituição de vegetação nativa por lavouras pode alterar o balanço de carbono a médio e longo prazo, ainda que os dados atuais não apontem para tendência significativa. O comportamento aproximadamente normal da distribuição dos dados reforça que as variações observadas são, em grande parte, sazonais e cíclicas, mais do que indicadoras de mudança sistemática de longo prazo. Entretanto, a presença de valores extremos sugere que eventos pontuais, possivelmente associados a queimadas, mudanças abruptas no uso do solo ou variações climáticas, influenciam episodicamente as concentrações.

O aumento dos níveis de X_{CO_2} na área de soja está em conformidade com a disposição global de crescimento das concentrações atmosféricas de CO_2 (Friedlingstein et al., 2022). A presença de um período sazonal na série pode estar relacionada ao ciclo vegetativo da soja, que, durante seu período de crescimento, atua como sumidouro de carbono, reduzindo temporariamente as concentrações locais de CO_2 (Baldocchi, 2020). As culturas de cobertura desempenham um papel crucial no aumento do carbono do solo por meio da melhoria do ciclo de nutrientes, melhoria da saúde do solo e acúmulo de matéria orgânica (BOURNS et al., 2024).

No entanto, após a colheita e a exposição do solo, a absorção é reduzida, favorecendo a manutenção de níveis mais altos de X_{CO_2} . Além disso, estudos recentes têm mostrado que áreas agrícolas no Brasil, particularmente associadas a culturas como a soja, apresentam variações de X_{CO_2} fortemente moduladas pelas condições climáticas e pela variabilidade interanual ligada a eventos como El Niño e La Niña (Zhang et al., 2023; Gatti et al., 2021).

Em estudos feitos por Batista et al. (2021), verificaram a produtividade da soja em regiões distintas do país em cenários de El Niño e constataram resultados negativos para a produção. Nesse contexto, pode-se afirmar que esses eventos influenciam a produtividade da cultura e interferem no balanço do carbono. O fato de os últimos anos da série apresentarem maior amplitude de variação pode indicar efeitos combinados de pressões antrópicas como expansão agrícola, mudanças no manejo e de eventos climáticos extremos (Marengo et al., 2024). Assim, os resultados evidenciam que, embora a soja possa atuar temporariamente como sumidouro de carbono, a área estudada está inserida em uma dinâmica de aumento contínuo de X_{CO_2} , reflexo das tendências globais e regionais de emissões e variabilidade climática.

4.3. Análise de Hot-spots e Cold-spots

A ocorrência de *hot-monents* e *hot-spots* em áreas de pastagem indica que o uso do solo exerce papel importante na variação das concentrações de CO_2 . A substituição da vegetação nativa por pastagens reduz a capacidade de sequestro de carbono, aumentando a emissão líquida para a atmosfera (Bustamante et al., 2012). Além disso, a compactação do solo e o manejo inadequado do pasto podem intensificar a liberação de CO_2 por meio da respiração microbiana e da redução na infiltração hídrica (Carvalho et al., 2022).

Os padrões sazonais observados também estão alinhados a processos fenológicos e climáticos. Durante a estação seca, quando há menor atividade fotossintética, o acúmulo de CO_2 tende a ser maior, resultando em picos de *hot-spots*. Já em períodos chuvosos, o aumento da biomassa e da atividade vegetal favorece a assimilação de carbono, explicando a ocorrência de *cold-spots*. O contexto espacial revela ainda a influência de fatores antrópicos, ou seja, a interação entre pressões locais como o uso da terra e fatores globais com as alterações climáticas evidencia a complexidade da dinâmica de carbono em áreas de pastagem. Assim, a análise temporal e espacial reforça que as pastagens, embora apresentem algum nível de absorção de CO_2 , funcionam predominantemente como fontes líquidas de carbono, contribuindo para o aumento das concentrações atmosféricas quando mal manejadas (Spera et al., 2016).

Os resultados indicam que as áreas de soja apresentam variação espaço-temporal significativa na concentração de X_{CO_2} . Os picos de *hot-spots* ao longo dos anos coincidem com períodos de maior revolvimento do solo, aplicação de insumos e plantio, fases que podem estar

associadas à emissão de CO₂ para a atmosfera (Cunha et al., 2020). Por outro lado, os *cold-spots* e *cold-moments* tendem a ocorrer nos períodos de maior desenvolvimento vegetativo da cultura, em que a taxa de fotossíntese é mais elevada e o sequestro de CO₂ atmosférico é intensificado. Esse desempenho está alinhado com evidências de que culturas anuais como a soja atuam como sumidouros de carbono durante seu pico de crescimento, reduzindo temporariamente a concentração atmosférica de CO₂ local (Zhang et al., 2023).

Segundo Bastos et al. (2020), áreas de produção agrícola apresentam forte variabilidade nas trocas de carbono em função de práticas de manejo, o que pode resultar em padrões espaciais heterogêneos, como os observados neste estudo. A identificação de *hot e cold-moments* com alta frequência é relevante para o monitoramento de emissões, pois permite detectar episódios de acúmulo ou remoção de CO₂ de curta duração, auxiliando na compreensão de processos dinâmicos que não seriam capturados apenas pela média mensal.

4.4. Análise de Anomalias

A predominância de valores positivos na série temporal da anomalia de X_{CO2} em áreas de pastagem corrobora evidências de que este tipo de uso da terra está fortemente associado à emissão de carbono para a atmosfera. A conversão de ecossistemas naturais em pastagens implica em perdas significativas de biomassa e de carbono estocado no solo, resultando em emissões líquidas de CO₂ (Bustamante et al., 2012; Houghton; Nassikas, 2017). Além disso, práticas de manejo inadequadas, como o sobrepastoreio e a baixa taxa de recuperação da vegetação, intensificam o processo de degradação e reduzem a capacidade de absorção de carbono (Carvalho et al., 2020).

Entretanto, os episódios de anomalias negativas observados podem estar associados a períodos de maior crescimento da vegetação, impulsionados por condições climáticas favoráveis, como maior disponibilidade hídrica e temperaturas adequadas, que aumentam a assimilação de carbono via fotossíntese (Pastorello et al., 2020). Essa dinâmica reforça o papel da sazonalidade na regulação do balanço de CO₂ em áreas de uso agropecuário, em especial na região tropical.

Estudos recentes mostram que vegetação nativa convertidas em pastagens apresentam menor resistência climática e respondem de forma mais intensa a extremos meteorológicos, como secas prolongadas e variações no regime pluviométrico, que podem alterar temporariamente o balanço de carbono (Gloor et al., 2018; Friedlingstein et al., 2022). Nesse sentido, os resultados apresentados indicam a relevância de considerar tanto as práticas de manejo quanto os fatores climáticos para compreender a dinâmica de CO₂ em áreas de pastagem no Brasil.

Os resultados indicam uma forte variabilidade espaço-temporal no comportamento das anomalias de X_{CO_2} sobre áreas de pastagem, refletindo o equilíbrio dinâmico entre processos de emissão e absorção. Esses resultados corroboram com estudos que mostram que áreas de pastagem podem atuar tanto como sumidouros quanto fontes de CO_2 , dependendo de fatores como manejo, sazonalidade e estresse hídrico (Latawiec et al., 2017; Conant et al., 2017). O gradiente latitudinal observado revela um contraste importante, ou seja, as regiões equatoriais apresentam maior tendência de emissão, possivelmente relacionadas à maior intensidade da decomposição da biomassa e atividade microbiana acelerada por temperaturas elevadas (Davidson; Janssens, 2006). Já as regiões mais ao sul, com anomalias negativas, sugerem maior capacidade de sequestro de carbono em pastagens, o que pode estar associado tanto a práticas de manejo quanto à influência de regimes climáticos distintos (Scholes; Archer, 1997).

A variação temporal mostrou períodos em que as pastagens funcionaram como fontes líquidas de CO_2 , especialmente entre 2018-2019, possivelmente ligados a secas regionais, que reduzem a assimilação de carbono e aumentam a mortalidade da vegetação herbácea (Pastorello et al., 2020). Em contrapartida, os períodos de absorção mais acentuados após 2021 coincidem com condições climáticas mais favoráveis ao crescimento da biomassa e à incorporação de carbono nos solos. Por fim, a heterogeneidade espacial mostra que não é possível tratar as pastagens como um sistema homogêneo. Estudos recentes destacam que o papel das pastagens no balanço de carbono depende do histórico de uso do solo e da intensidade de manejo, podendo variar de sumidouro eficiente a forte fonte de emissão (Silva et al., 2023; Carvalhais et al., 2014).

Os resultados sugerem que o cultivo da soja apresenta papel duplo no balanço de carbono, funcionando como sumidouro em determinados momentos do ciclo produtivo (especialmente durante o crescimento vegetativo) e como fonte em outros, sobretudo associados a atividades de preparo do solo, colheita e manejo pós-colheita. Essa alternância já foi observada em estudos de monitoramento atmosférico, que demonstram a influência da sazonalidade agrícola no comportamento do X_{CO_2} (Bastos et al., 2020; Virkkala et al., 2022).

A presença de picos de emissão mais intensos a partir de 2020 pode estar relacionada tanto ao aumento da área cultivada quanto a práticas de manejo que ampliam a liberação de carbono para a atmosfera, como a expansão da fronteira agrícola e a intensificação do uso do solo (Friedlingstein et al., 2020; Silva Junior et al., 2021). Além disso, fatores climáticos como eventos de seca e variações na umidade relativa podem reduzir a capacidade de absorção da soja, tornando-a fonte líquida de carbono em determinadas fases (Ainsworth; Long, 2021).

Por outro lado, os períodos de absorção observados, especialmente em 2019, reforçam o papel das culturas agrícolas na captura temporária de carbono durante seu ciclo de crescimento (Baldocchi, 2020), embora esse sequestro seja rapidamente revertido nos períodos de colheita e decomposição da biomassa. Assim, a variabilidade encontrada indica que áreas de soja não podem ser consideradas sumidouros permanentes de carbono, mas sim ambientes de fluxo dinâmico, fortemente condicionados ao manejo agrícola e às condições climáticas (Pugh et al., 2019).

Os resultados evidenciam a complexidade da dinâmica entre fontes e sumidouros de CO₂ na região analisada, marcada pela presença de áreas de cultivo de soja. A alternância entre períodos de emissão e absorção, vista na série temporal, é consistente com a sazonalidade da vegetação e com a influência de eventos climáticos (como El Niño e La Niña), que modulam a disponibilidade hídrica e a produtividade primária (Bastos et al., 2020; Cunha et al., 2019). A análise por latitude indica que a região sul atua como sumidouro líquido, possivelmente devido à maior densidade de áreas agrícolas em estágio vegetativo ativo, que apresentam elevada taxa de fotossíntese. Estudos prévios apontam que sistemas agrícolas, incluindo a soja, podem desempenhar papel temporário de sumidouro de carbono, especialmente em fases de crescimento rápido da biomassa (Baldocchi, 2020).

No mapa, pode-se observar que as áreas de soja possuem influência significativa nas anomalias de X_{CO2}. Enquanto em alguns locais a soja contribui para absorção, em outros há emissões líquidas, o que pode estar associado à preparação do solo, ao uso de fertilizantes nitrogenados e às operações de colheita e transporte (Freibauer et al., 2004; Carlson et al., 2017).

4.5. Análise de Correlação de X_{CO2}

Os resultados evidenciam que, em áreas de pastagem, a variabilidade do X_{CO2} está mais associada à dinâmica da vegetação do que às variáveis meteorológicas. A correlação positiva com NDVI e LAI sugere que o aumento da biomassa verde, resultante do crescimento da vegetação, pode estar relacionado a maiores fluxos de carbono, devido às mudanças na assimilação líquida de carbono (Rosa et al., 2011). Estudos como os de Jin et al. (2021) destacam que a resposta do X_{CO2} à vegetação pode variar conforme o tipo de cobertura e o manejo, sendo pastagens mais suscetíveis a oscilações em função de práticas de uso da terra.

A fraca correlação entre X_{CO2} e precipitação, temperatura e umidade relativa indica que, embora fatores meteorológicos influenciem os processos de fotossíntese e respiração, seu impacto direto sobre as concentrações atmosféricas de CO₂ em áreas de pastagem pode ser menos expressivo do que em áreas agrícolas intensivas. Pesquisas recentes sugerem que a

sazonalidade e a resiliência da vegetação desempenham papel central na regulação desses fluxos (Carvalho et al., 2020). Ademais, a forte correlação positiva entre precipitação e umidade relativa confirma o papel integrado das condições meteorológicas no balanço de carbono, reforçando que eventos climáticos extremos podem alterar significativamente o sequestro e a emissão de CO₂ (Zhang et al., 2024). Esses resultados ressaltam a importância de considerar tanto os índices de vegetação quanto as condições meteorológicas em conjunto para compreender a dinâmica do carbono em áreas de pastagem, sobretudo em regiões estratégicas para a exportação de grãos.

Os resultados apontam que as áreas de soja possuem relação clara entre o aumento da atividade fotossintética e a redução das concentrações de X_{CO2}, evidenciada pela correlação negativa com os índices de vegetação. Esse padrão está alinhado ao papel das culturas agrícolas como sumidouros temporários de carbono durante seu ciclo fenológico (Bourns et al., 2024; Sitch et al., 2020). Estudos anteriores confirmam que áreas cultivadas podem contribuir para a absorção de CO₂ atmosférico durante o desenvolvimento vegetativo, reduzindo momentaneamente as concentrações locais do gás (Le Quéré et al., 2019). A fraca correlação de X_{CO2} com as variáveis meteorológicas (precipitação, temperatura e umidade relativa) sugere que, nessas áreas, a variabilidade do carbono atmosférico está mais diretamente associada ao vigor da vegetação do que às condições climáticas imediatas. Entretanto, sabe-se que fatores como déficit hídrico ou excesso de chuvas podem influenciar indiretamente a absorção de CO₂, alterando o crescimento da cultura (Zhao et al., 2017).

As altas correlações entre NDVI, EVI e LAI confirmam a robustez desses indicadores na caracterização da vegetação, como já relatado por Myneni et al. (2002), destacando que tais métricas capturam diferentes aspectos do dossel, mas mantêm forte coerência entre si. Além disso, a correlação positiva entre precipitação e umidade relativa ($r=0,85$), bem como a relação negativa entre temperatura e umidade relativa ($r=-0,54$), refletem padrões climáticos esperados em ecossistemas tropicais. Portanto, os resultados reforçam a importância do uso de índices de vegetação derivados de sensoriamento remoto no monitoramento do ciclo do carbono em áreas agrícolas, ao mesmo tempo em que indicam que a variabilidade de X_{CO2} em áreas de soja depende mais da fenologia da cultura do que de fatores meteorológicos diretos.

4.6. Análise de Correlação de Anomalia de X_{CO2}

Os resultados demonstram que, nas áreas de pastagem, as Anomalias de X_{CO2} está mais associada aos índices de vegetação do que diretamente às variáveis meteorológicas. A correlação positiva entre Anomalia de X_{CO2}, NDVI e LAI indica que a presença e a densidade da vegetação desempenham papel central na absorção e emissão de carbono, já que a

fotossíntese regula os fluxos de CO_2 entre o ecossistema e a atmosfera Myneni et al. (2002). Essa tendência reforça que a manutenção da cobertura vegetal, mesmo em áreas de pastagem, é essencial para reduzir a variabilidade das emissões. Em contrapartida, as correlações negativas, ainda que fracas, entre as anomalias de X_{CO_2} e variáveis meteorológicas (precipitação, temperatura e umidade relativa) sugerem que o clima exerce influência indireta sobre as emissões, provavelmente modulando a produtividade vegetal e a respiração do solo (Liu et al., 2020). Isso é consistente com estudos que mostram como variações na disponibilidade hídrica e na temperatura podem alterar a dinâmica do carbono em ecossistemas tropicais e agrícolas (Zhang et al., 2023).

A forte associação entre NDVI e LAI confirma a robustez dos índices de vegetação derivados de sensoriamento remoto na caracterização da biomassa e da atividade fotossintética, sendo amplamente utilizados para monitorar fluxos de carbono em áreas agrícolas e de pastagem (Liu et al., 2020). Da mesma forma, a relação elevada entre precipitação e umidade relativa reflete padrões climáticos típicos da região tropical, onde a sazonalidade hídrica influencia a dinâmica da vegetação e, indiretamente, os fluxos de CO_2 (Carvalho et al., 2020).

Esses dados ressaltam que, embora fatores climáticos modulam o funcionamento ecossistêmico, a cobertura vegetal permanece como principal regulador da variação do X_{CO_2} em pastagens, corroborando a importância de práticas de manejo sustentável para a mitigação de emissões. Os resultados demonstram que a variabilidade do X_{CO_2} em áreas de soja está mais fortemente relacionada à dinâmica da vegetação do que diretamente aos fatores meteorológicos. A correlação negativa entre os índices de vegetação (NDVI, EVI e LAI) e a anomalia de X_{CO_2} sugere que o aumento da biomassa verde e da atividade fotossintética intensifica a absorção de CO_2 atmosférico, contribuindo para a redução das anomalias positivas. Esse padrão já foi evidenciado em estudos que destacam o papel da agricultura e da fenologia das culturas no sequestro sazonal de carbono (Zhang et al., 2023).

A ausência de correlação significativa entre a anomalia de X_{CO_2} e variáveis climáticas, como precipitação e temperatura, pode estar associada ao fato de que, em áreas agrícolas, a dinâmica do CO_2 é mais sensível ao estágio fenológico da cultura do que a variações diretas de clima de curto prazo (Bastos et al., 2020). Contudo, é importante destacar que fatores meteorológicos exercem papel indireto, regulando o crescimento da vegetação e, consequentemente, a capacidade de absorção de CO_2 , como também discutido por Liu et al. (2020). A forte correlação entre os índices de vegetação reforça sua consistência como indicadores complementares do desenvolvimento da cultura da soja. Estudos apontam que esses índices são ferramentas robustas para monitorar produtividade agrícola e o sequestro de carbono

em áreas cultivadas (Liu et al., 2020). Portanto, os resultados sugerem que, em áreas de soja, o monitoramento de índices de vegetação pode ser eficiente para explicar a variabilidade de anomalias de X_{CO_2} . Isso evidencia a importância de integrar dados de sensoriamento remoto de vegetação com análises de gases atmosféricos para compreender os mecanismos de absorção e emissão em sistemas agrícolas.

4.7. Análise dos Índice de Precipitação Padronizado e do Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração

Os resultados do SPI mostram que, entre 2016 e 2018, não houve predominância de secas extremas, mas sim uma alternância entre anos neutros e com déficits leves de precipitação. Diferentemente do SPEI o qual inclui precipitação e evapotranspiração, o SPI reflete unicamente as variações na precipitação (McKee et al., 1993). Isso explica porque, em anos como 2019, apesar de um SPI indicando déficit leve, o SPEI apresentou seca mais acentuada. Ao observar o ano 2017, percebe-se que houve chuvas distribuídas de forma irregular, uma característica comum em regiões de transição climática (Carvalho et al., 2020). Em anos com SPI próximo à neutralidade como em 2018, ainda podem ocorrer efeitos hidrológicos localizados, principalmente em áreas de uso agrícola intensivo, como soja e pastagem, que dependem de regularidade na precipitação.

A interpretação conjunta do SPI com o SPEI é fundamental para entender como a precipitação isolada pode não explicar totalmente os eventos de seca, especialmente em contextos de aumento de temperatura regional (Morsy et al., 2022). A presença de áreas agrícolas na região torna relevante analisar esses índices juntamente com variáveis de cobertura do solo e de fluxo de carbono, já que déficits moderados, quando combinados com altas temperaturas, podem resultar em maior estresse hídrico e mudanças no ciclo de carbono regional (Pugh et al., 2021).

O SPI entre 2020 e 2023 indica regiões com secas severas a extremas na maior parte dos anos, corrobora com o SPEI, que incorpora a evapotranspiração e registrou secas mais severas no mesmo período. Essa diferença indica que a disponibilidade de precipitação em si não foi drasticamente reduzida em anos como 2020, 2021 e 2022, mas sim que os déficits hídricos identificados pelo SPEI decorreram principalmente do aumento de temperaturas mais altas e menor umidade do solo (Fontão et al., 2022; Morsy et al., 2022). O ano de 2023 se destaca como o mais seco do período, mesmo no SPI, reforçando a presença de um déficit de precipitação mais significativo, associado à ocorrência de um evento El Niño nesse ano que influencia a redução das chuvas em regiões do norte e nordeste do Brasil (Cunha et al., 2020; Marengo et al., 2018). Conforme Sousa et al. (2021) o El Niño provoca perturbações na

atmosfera a nível global e regional , alterando o transporte de umidade (Chechi; Sanches, 2013) fator que altera o regime de precipitação e temperatura em diferentes regiões impactando na dinâmica do carbono.

A relação entre seca e X_{CO_2} é reforçada pela comparação entre SPI e SPEI, ou seja, em anos em que o SPI indicava neutralidade, mas o SPEI detectava seca agrícola como 2017, 2019 e 2023, há uma tendência de elevação do X_{CO_2} . Isso ocorre devido à redução da produtividade primária líquida, ou seja, menor absorção de CO_2 pelas culturas e vegetação nativa. No ano de 2023, quando ambos os índices detectaram seca extrema, o impacto no X_{CO_2} tende a ser ainda mais significativo, alinhando-se a estudos que mostram picos de concentração de CO_2 em anos de altas temperaturas (Wang et al., 2016). Esses resultados ressaltam a importância de utilizar ambos os índices de forma complementar. O SPI isoladamente evidencia anomalias de precipitação, já o SPEI, por considerar também a evapotranspiração, é mais sensível a mudanças térmicas e condições de solo, captando melhor eventos de seca agrícola e hidrológica (Morsy et al., 2022).

4.8. Umidade do solo

A umidade do solo apresentou resultados consistente com os aqueles obtidos para os índices de seca, SPEI e SPI, com maiores valores na região norte da área e baixa disponibilidade hídrica na parte central. Essa análise está ligada intrinsecamente às diferenças nas condições climáticas regionais, uma vez que os estados da parte norte do mapa são mais influenciados por um regime úmido associado à proximidade com áreas de transição amazônica, enquanto a região central apresenta características mais suscetíveis a déficits hídricos, especialmente em anos de alterações climáticas (Marengo et al., 2018).

A diminuição das áreas com alta umidade do solo observada em 2018 e 2019 está relacionada ao aumento da demanda evaporativa e à redução da precipitação registrada em índices como o SPEI (Gao et al., 2017), o que pode impactar diretamente áreas agrícolas, principalmente cultivos de soja e pastagem, que dependem da manutenção da umidade no solo para produtividade e manutenção de biomassa (Paredes-Trejo et al., 2021).

O comportamento da umidade do solo também é um importante indicador para o balanço de carbono (Hao et al., 2025), uma vez que a disponibilidade hídrica no solo influencia tanto a assimilação de carbono pelas culturas quanto os fluxos de respiração do solo. Reduções persistentes de umidade, como as vistas em 2019, podem contribuir para maior liberação de CO_2 por mudanças de uso e cobertura do solo e redução da fotossíntese, especialmente em áreas com manejo intensivo de pastagens (Liu et al., 2020).

Os resultados de 2020 a 2023 reforçam o que já foi identificado nos anos anteriores, isto é, com maior disponibilidade hídrica na região norte da área e condições de solo seco nas regiões centrais. Essa distribuição está relacionada aos diferentes regimes pluviométricos, com influência de sistemas úmidos no norte, uma vez que se encontra uma parte da Amazônia, e maior sensibilidade a déficits hídricos no restante da região (Marengo et al., 2018).

A permanência de valores baixos de umidade em 2022 e 2023 coincide com o período em que os índices de seca (SPEI e SPI) também indicaram déficit hídrico, sugerindo uma redução consistente na recarga hídrica do solo. Essa condição pode afetar diretamente as áreas de uso agrícola, principalmente pastagens e cultivo de soja, que dependem de níveis adequados de umidade para garantir produtividade e estabilidade do ciclo vegetativo (Paredes-Trejo et al., 2021). A manutenção de solos mais secos em anos sucessivos também pode intensificar fluxos de carbono para a atmosfera, tanto pela diminuição da absorção de CO₂ pela vegetação estressada quanto pelo aumento da emissão do solo, alinhando-se a estudos que destacam a relação entre déficits hídricos, dinâmica da vegetação e fluxos de carbono (Liu et al., 2020).

4.9. Precipitação

Ao analisar a precipitação anual no período de 2016 a 2023 nota-se que houve uma distribuição espacial bem definida, com maiores volumes na região norte da área, valores superiores a 1500 mm/ano em alguns setores, e menores índices no centro região, valores predominantes abaixo de 1000 mm/ano. O ano de 2023 destacou-se como o mais seco do período, apresentando algumas áreas com precipitação elevada e maior parte entre 500 e 1000 mm/ano. Essa redução ajustar-se com os sinais de seca identificados pelos índices SPI e SPEI, evidenciando a relação direta entre precipitação abaixo da média e déficits hídricos na região (Carmo; Lima, 2020).

A variabilidade da precipitação observada corrobora com pesquisas que apontam mudanças no regime pluviométrico, associadas tanto a fatores climáticos naturais quanto à intensificação das mudanças climáticas globais (Wang et al., 2016). Tais alterações impactam diretamente a disponibilidade hídrica para sistemas agrícolas como soja e pastagem, aumentando a vulnerabilidade dessas áreas à seca agrícola e aos riscos de degradação ambiental.

Os anos de 2020 e 2022 mostraram padrões semelhantes aos anos mais secos anteriores, especialmente no sul da área, enquanto 2021 apresentou um regime intermediário. Essa variabilidade pode ser explicada parcialmente pela influência de anomalias climáticas globais, como a transição de um episódio de La Niña entre 2020 e 2022, que tende a favorecer precipitações acima da média no norte do Nordeste. A variação observada no período permite observar os parâmetros climáticos, como SPI e SPEI, os quais podem avaliar os impactos da

precipitação no balanço hídrico e na umidade do solo, visto que mesmo nos anos com maiores totais de precipitação podem apresentar déficit hídrico localizado em função da distribuição temporal da chuva (Carmo; Lima, 2020).

A comparar os dados de precipitação, os índices de seca, SPI e SPEI, a umidade do solo e das variações no X_{CO_2} atmosférico observa-se que há uma relação clara entre eles. Isto é, nos anos secos como 2023, teve déficit hídrico, resultando em baixos valores de umidade do solo e em índices negativos de SPI e SPEI. Essa condição se relaciona com uma redução na produtividade da vegetação e, conseqüentemente, maior liberação de CO_2 para a atmosfera, possivelmente devido à redução da absorção de carbono e aumento de queimadas ou degradação da vegetação (Gatti et al., 2021).

Além disso, anos úmidos como 2016 acomodaram melhor reposição hídrica, resultando em índices positivos de SPI e SPEI, aumento da umidade do solo e provável intensificação do sequestro de carbono, levando à estabilização ou redução dos valores de X_{CO_2} . Esse comportamento está de acordo com estudos que mostram a forte sensibilidade da Amazônia e do Cerrado às variações climáticas e à ocorrência de secas prolongadas, que têm potencial de alterar significativamente o balanço regional de carbono (Aragão et al., 2020).

4.10. Umidade Relativa do Ar

As variações observadas na umidade relativa anual entre 2016 e 2019 refletem as alterações climáticas regionais. A variação entre anos mais secos e mais úmidos pode ser influenciada por fenômenos como El Niño e La Niña, os quais interferem nos padrões de precipitação e circulação atmosférica na região (Cunha et al., 2020; Marengo et al., 2020).

Em 2017 e 2019, as maiores extensões com umidade relativa superior a 70% indicam condições atmosféricas mais favoráveis à manutenção da umidade, o que pode ter resultado de maiores índices de precipitação nesses períodos. De acordo com dados do POWER/NASA (Stackhouse et al., 2016), essas flutuações estão diretamente ligadas ao balanço hídrico atmosférico, especialmente em regiões tropicais e subtropicais.

Por outro lado, os anos de 2016 e 2018 mostraram menores valores de umidade relativa, o que pode ser atribuído à atuação de bloqueios atmosféricos ou à redução da cobertura vegetal em determinadas áreas, comprometendo a umidade do ar (Silva et al., 2021). A relação entre o uso e cobertura da terra e a umidade atmosférica tem sido amplamente discutida, destacando que áreas de agricultura intensiva podem apresentar menor umidade relativa em comparação a áreas naturais ou florestadas (Assad; Assad, 2024).

Além disso, estudos apontam que alterações no regime hídrico não só afetam a umidade relativa, como também impactam diretamente a produtividade agrícola, os ciclos do carbono e

a qualidade do ar, mostrando a importância do monitoramento contínuo desses dados (IPCC, 2023). Já a análise da umidade relativa no período de 2020 a 2023 revela uma tendência de maior estabilidade. Essa dinâmica pode estar associada às condições climáticas interanuais e à influência de eventos atmosféricos, como o El Niño ocorrido em 2023, que tende a provocar redução da umidade em diversas regiões do Brasil.

A menor umidade observada em 2021 e 2023 nas regiões de pastagem pode estar relacionada a picos de X_{CO_2} nessas mesmas áreas, conforme observado nos mapas e análises anteriores, uma vez que a baixa umidade reduz a atividade fotossintética das plantas e, consequentemente, o sequestro de carbono via fotossíntese (Liu et al., 2020). Além disso, o ano de 2021 se destacou por um ligeiro aumento da umidade relativa em comparação a 2020, o que foi corroborado por valores positivos de SPI, indicando melhores condições de precipitação acumulada. No entanto, o SPEI para esse ano ainda refletiu certa pressão evaporativa, sobretudo nas áreas de pastagem, o que pode estar relacionado ao aumento das temperaturas médias, como observado por De Oliveira et al. (2023), que analisaram o impacto das condições climáticas sobre o balanço hídrico no Matopiba.

É importante destacar que a interação entre a umidade relativa e o uso e cobertura da terra influencia diretamente o balanço de carbono atmosférico. As áreas agrícolas, especialmente de soja, apresentam comportamento distinto das áreas de pastagem em relação às variações de umidade, o que reforça a importância de políticas agrícolas e ambientais regionais que considerem essas variáveis em conjunto.

4.11. Temperatura

O estudo da temperatura anual entre 2016 e 2023 revela uma tendência elevadas temperaturas, principalmente no norte da área de estudo. Esses resultados indicam uma influência significativa das questões climáticas regionais e a respeito da variação térmica, sendo possivelmente intensificados pela atuação de eventos como o El Niño, que esteve presente entre 2018 e 2020, promovendo aquecimento atípico em grande parte do território brasileiro (Medeiros et al., 2025). A elevação das temperaturas entre 2016 e 2018, principalmente na região norte, confirma-se com trabalhos recentes os quais apontam o aumento das temperaturas médias na região Norte e Nordeste do Brasil nos últimos anos influenciados pelas alterações climáticas e variações nos padrões de precipitação (Marengo et al., 2024).

Além disso, os anos de 2017 e 2018 coincidiram com episódios de seca severa na região, como indicado pelos índices SPEI e SPI negativos no mesmo período, o que pode estar relacionando à redução da umidade do solo e intensificação do calor (Cunha et al., 2020).

Conforme Zeri et al. (2021), o aumento da temperatura em cenários de seca acentuada tende a agravar os efeitos da estiagem sobre a vegetação e os ciclos de carbono.

Apesar da continuidade do aquecimento, 2019 apresentou uma ligeira compressão nas áreas com temperatura maiores que 29 °C, o que pode estar relacionado ao aumento da umidade relativa em certas áreas, sugerindo uma possível atenuação temporária dos extremos térmicos.

Entre os anos de 2020 a 2023, observou-se um padrão de aumento das temperaturas médias anuais. Com ênfase para o ano de 2023, o qual apresentou os maiores valores da série, esse resultado corrobora com o contexto global de aquecimento, especialmente intensificado por um evento El Niño forte ocorrido em 2023, o qual contribuiu para o aumento das temperaturas. Esse evento, somado ao aquecimento global de longo prazo, intensificou as anomalias térmicas em grande parte do Brasil, favorecendo a ocorrência de ondas de calor prolongadas e temperaturas médias recordes (Marengo et al., 2016).

Vale destacar que o aumento da temperatura média anual possui influência direta sobre o balanço hídrico e o de uso agrícola, principalmente pela intensificação da evapotranspiração e redução da umidade do solo, o que é refletido nos índices SPI e SPEI. Este último, por incluir o efeito da temperatura, apresentou valores mais negativos nas mesmas regiões em que se registraram os maiores aumentos de temperatura, evidenciando episódios de seca agrícola mais intensos e duradouros. Nas áreas centrais, a combinação de altas temperaturas e baixa umidade relativa ligadas ao déficit hídrico registrado por SPEI, resultou em menor sequestro de carbono e, conseqüentemente, aumento das concentrações médias de X_{CO_2} . Estudos recentes demonstram que, em anos de calor extremo e seca, como 2023, a fotossíntese é significativamente reduzida e a respiração do solo é intensificada, levando ao colapso temporário dos sumidouros terrestres de carbono (Liu et al., 2024; Bastos et al., 2020).

A relação entre temperatura elevada e maiores concentrações de X_{CO_2} foi também observada nas áreas de soja, sugerindo que práticas de manejo, tipo de solo e cobertura vegetal residual pode influenciar a resposta local ao estresse térmico e hídrico (Medeiros et al., 2025). Ainda assim, os valores de X_{CO_2} foram consistentemente mais altos nos anos com maiores anomalias de temperatura e SPI/SPEI negativos, refletindo um desequilíbrio entre os fluxos de entrada e saída de carbono em locais de atividades agrícolas (Gatti et al., 2021). Além disso, o ano de 2023 foi marcado por um colapso dos sumidouros de carbono terrestre, com as florestas tropicais, especialmente a Amazônia, deixando de funcionar como sumidouro e tornando-se uma fonte líquida de carbono para a atmosfera (Silva et al., 2018). Isso contribuiu para o maior crescimento anual já registrado das concentrações atmosféricas de CO_2 desde o início das

medições modernas, intensificando o efeito estufa e retroalimentando os extremos climáticos observados (Le Quéré et al., 2019; Friedlingstein et al., 2023).

5. CONCLUSÃO

O uso dos dados do OCO-2 permitiu monitorar as concentrações de CO₂ na rota de exportação do Porto do Itaqui, destacando diferenças entre áreas de soja e pastagem. A análise espaço-temporal do X_{CO2} em áreas de soja e pastagem entre 2016 e 2023 permitiu compreender como as variações do uso e cobertura da terra, associadas a fatores climáticos, influenciam a dinâmica regional do carbono atmosférico. Os resultados demonstraram que os índices de vegetação, especialmente EVI, NDVI e LAI apresentaram correlações negativas com o X_{CO2}, essa relação foi mais expressiva na área de soja, onde o ciclo fenológico e a maior biomassa favoreceram o sequestro de CO₂, quando comparado às áreas de pastagem.

No entanto, nas áreas de pastagem, o padrão de correlação foi mais fraco, indicando menor eficiência fotossintética. A análise dos índices de seca (SPI e SPEI) indicou que eventos de déficit hídrico impactaram a variabilidade do X_{CO2}, reforçando que o estresse climático pode limitar a capacidade das coberturas vegetais de absorver carbono. Houve também forte relação entre as anomalias e os valores médios de X_{CO2}, demonstrando que as flutuações observadas refletem variações reais nas concentrações atmosféricas. Além disso, as análises climáticas evidenciaram que precipitação, temperatura e umidade relativa influenciam o fluxo de carbono.

Este estudo abre caminhos para avanços em três principais direções como a Integração com modelagem de cenários climáticos a fim de explorar como projeções de mudanças no regime de precipitação e temperatura podem afetar o sequestro e a emissão de carbono nos diferentes sistemas de uso da terra; análise multiescala, ou seja, combinar dados de satélites de maior resolução espacial e temporal para detalhar processos locais e reduzir incertezas.; e avaliação do manejo sustentável para investigar como práticas agrícolas, como rotação de culturas, integração lavoura-pecuária e recuperação de pastagens, influenciam na mitigação das emissões de CO₂.

Além disso, é viável a conexão socioeconômica a fim de relacionar os padrões de X_{CO2} à expansão agrícola, à demanda global por commodities e às políticas públicas voltadas à neutralidade de carbono. Essas perspectivas reforçam a relevância do uso de sensoriamento remoto aliado a dados climáticos no acompanhamento das emissões e do sequestro de carbono. A incorporação de novas ferramentas analíticas e de diferentes escalas de observação também contribuirá para a formulação de estratégias de mitigação mais eficazes, assegurando maior sustentabilidade dos agroecossistemas e reduzindo a vulnerabilidade às mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- Ainsworth, E.A., Long, S.P. (2021). 30 years of free-air carbon dioxide enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? *Global Change Biology* v.27, p.27-49. <https://doi.org/10.1111/gcb.15375>
- Antunes, J.F.G., et al. (2019). Análise das mudanças do uso e cobertura da terra no Estado de Mato Grosso por meio do geoportal Terraclass. In: *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Santos, Brasil, p. 30.
- Aragão, L.E.O.C., et al. (2020). Environmental change and the carbon balance of the Amazon Basin. *Nature Climate Change* v.10, p.531-539. <https://doi.org/10.1111/brv.12088>
- ARCGIS, (2025). ArcGIS Software. Disponível em: <http://www.esri.com/software/arcgis/index.html> (acessado em 25 fevereiro 2025).
- Assad, E. D.; Assad, M. R. L. C. L. (2024) Mudanças do clima e agropecuária: impactos, mitigação e adaptação. Desafios e oportunidades. *Estud. av.* 38 (112). <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.202438112.015>
- Baldocchi, D., (2020). How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of Global Change Biology. *Global Change Biology* v.26, p.242-260. <https://doi.org/10.1111/gcb.14807>
- Bastos, A. et al. (2020). Impacts of extreme summers on European ecosystems: a comparative analysis of 2003, 2010 and 2018. Impacts of extreme summers on European ecosystems: a comparative analysis of 2003, 2010 and 2018. *Phil. Trans. R. Soc.* B37520190507. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0507>
- Bastos, A. et al. (2020). Direct and seasonal legacy effects of the 2018 heat wave and drought on European ecosystem productivity. *Science Advances* v.6, eaba2724. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba2724>
- Beer, C. et al. (2010). Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate. *Science* 329, 834–838. <https://doi.org/10.1126/science.1184984>
- Beguiría, S. et al. (2010): Um conjunto multiescalar de dados globais sobre secas: o SPEIbase: um novo produto em grade para a análise da variabilidade e dos impactos da seca. Boletim da Sociedade Meteorológica Americana. 91, 1351-1354. <https://doi.org/10.20350%2FdigitalCSIC%2F5577>
- Besen, R.M., (2018). Práticas conservacionistas do solo e emissão de gases do efeito estufa no. *Scientia Agropecuaria* 9, 331–339. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.03.15>
- Borges, C., et al. (2015). Agregação do solo, carbono orgânico e emissão de CO₂ em áreas sob diferentes usos no Cerrado, região do Triângulo Mineiro. *Revista Ambiente & Água* 10, 660–675. <https://doi.org/10.4136/ambiagua.1573>
- Bourns, M. A. et al. (2024). Cover crops impact phosphorus cycling and environmental efficiency in a corn–soybean system. *Agronomy Journal*, v. 116, n. 1, p. 109–120.
- Brito, A. J. S. et al. (2025). Análise espaço-temporal do fluxo de CO₂ em florestas semidecidual e decidual na bahia. *Nativa*, v. 13, n.3, p.413-421. <https://doi.org/10.31413/nat.v13i3.19602>
- Bustamante, M.M.C., et al. (2012). Toward an integrated monitoring framework to assess the effects of tropical forest degradation and recovery on carbon stocks and biodiversity. *Global Change Biology* v.22, p.92-109. <https://doi.org/10.1111/gcb.13087>

- Bustamante, M.M.C., et al. (2012). Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil. *Climatic Change* v.115, p.559-577. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0443-3>
- Cabral Júnior, J. B.; Lucena, R. L. (2020). Análises das precipitações pelos testes não paramétricos de Mann-Kendall e Kruskal-Wallis. *Mercator* (Fortaleza), v. 19, p.e19001.
- Carmo, M. V. N. S. do; Lima, C. H. R. (2020). Caracterização Espaço-Temporal das Secas no Nordeste a partir da Análise do índice SPI. *Rev. bras. meteorol.* v.35, n.2. <https://doi.org/10.1590/0102-7786352016>
- Carvalhais, N. et al. (2014). Global covariation of carbon turnover times with climate in terrestrial ecosystems. *Nature*, v.514,n.7521, p.213-217. <https://doi.org/10.1038/nature13731>
- Carvalho, A. L. de, et al. (2020). Impacts of extreme climate events on Brazilian agricultural production. *Sustainability in Debate*, v.11,n.3, p.197-224. <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33814>
- Carvalho M.L. et al. (2022). Guia prático de plantas de cobertura: aspectos fitotécnicos e impactos sobre a saúde do solo. Piracicaba-SP, ESALQ-USP. Disponível em:https://www.esalq.usp.br/biblioteca/pdf/Livro_Plantas_de_Cobertura_completo.pdf
- Carlson, K. et al. (2017). Greenhouse gas emissions intensity of global croplands. *Nature Clim Change* 7, 63–68. <https://doi.org/10.1038/nclimate3158>
- Cechi, L., & Sanches, F. de O. (2013). O Uso do Índice de Anomalia de Chuva (IAC) na Avaliação do Fenômeno do El Niño Oscilação Sul (ENOS) no Alto Uruguai Gaúcho entre 1957-2012 (Using the Rainfall Anomaly Index (RAI) in evaluating the El Niño Southern Oscillation (ENSO) in the Upper.). *Revista Brasileira De Geografia Física*, 6(6), 1586–1597. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20130049>
- Conant, R. T., et al. (2017). Grassland management impacts on soil carbon stocks: A new synthesis. *Ecological Applications*, v.27, n.2, p.662-668. <https://doi.org/10.1002/eap.1473>
- Costa, C. M. M., et al. (2019). Transição do uso e cobertura da terra do município de São Félix do Xingu-PA no período de 2008 a 2017. In: *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Santos, Brasil, p. 3573-3576.
- Crivelari-Costa, P. M., et al. (2023). Changes in carbon dioxide balance associated with land use and land cover in Brazilian Legal Amazon based on remotely sensed imagery. *Remote Sensing*, v.15, p.1-28. <https://doi.org/10.3390/rs15112780>
- Crisp, D., et al. (2012). The ACOS CO₂ retrieval algorithm – Part II: global XCO₂ data characterization. *Atmospheric Measurement Techniques*, v.5, p.687-707. <https://doi.org/10.5194/amt-5-687-2012>
- Crisp, D., et al. (2017). The on-orbit performance of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) instrument and its radiometrically calibrated products. *Atmospheric Measurement Techniques*, v.10, p.59-81. <https://doi.org/10.5194/amt-10-59-2017>
- Cunha, A. P. et al. (2020). Monitoring droughts in the Brazilian semiarid region. *Weather and Climate Extremes*, v.28, 100249. <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201720170209>
- Cunha, A. P. M. A. et al. (2020). Monitoramento das secas no Brasil: impactos e recomendações. Brasília: Embrapa.
- Cunha, D. A. P. et al. (2019). Impacto do fenômeno El Niño na agricultura brasileira: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental -Agriambi*, v. 23, n. 5, p. 361–370.

- Davidson, E., Janssens, I. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* v.440, p.165-173. <https://doi.org/10.1038/nature04514>
- De Oliveira Aparecido, L. E. et al. (2023) Climate change in MATOPIBA region of Brazil: a study on climate extremes in agriculture. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 153, p. 87-100. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04509-x>
- EMAP, (2018). Política do Sistema de Gestão Ambiental. In: Relatório de Sustentabilidade 2018. Empresa Maranhense de Administração Portuária, São Luís. Disponível em: <https://www.portodoitaqui.com/emap/gestao/meio-ambiente>. (Acesso em 10 de junho de 2024).
- EMAP, (2022). Movimentação de Cargas: Relatório de Movimentação de Cargas. Empresa Maranhense de Administração Portuária, São Luís. Disponível em: https://www.portodoitaqui.com/public/_files/arquivos/HIST%C3%93RICO%20DE%20MOVIMENTA%C3%87%C3%83O%20%202001%20A%202021_6203b9392236e.pdf. (Acesso em 10 de junho de 2024).
- Freibauer, A. et al. (2004). Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma*, v. 122, n. 1, p. 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.021>
- Falahatkar, S., et al. (2017). Spatial and temporal distribution of carbon dioxide gas using GOSAT data over IRAN. *Environmental Monitoring and Assessment* v.189, p.627. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6285-8>
- Falcão, K.S., et al. (2020). Carbon stock and soil aggregation under different use systems in the cerrado. *Brazilian Journal of Environmental Sciences (RBCIAMB)* v.55, n.2, p.242-255. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820200695>.
- Fidalgo, E. C. C. et al. (2023) Carbon balance of land use, land-use change and forestry (lulucf) in the brazilian Chaco. *Rev. Árvore*, v.47. <https://doi.org/10.1590/1806-908820230000020>
- Filho, L.F.F.M., et al., (2021). X_{CO2} temporal variability above Brazilian agroecosystems: A remote sensing approach. *Journal of Environmental Management* v.288, 112433. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112433>
- Fontão, P.A.B et al. (2022). Avaliação dos riscos de secas na região metropolitana de São Paulo. RA'EGA - O Espaço Geográfico em Análise, v. 55, p. 3-24. <https://doi.org/10.5380/raega.v55i0.77449>
- Friedlingstein, P., et al., (2020). Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data* 12 (4), 3269–3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- Friedlingstein, P., et al., (2022). Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data* 14, 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>
- Friedlingstein, P., et al., (2023). Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data* 15, 5301–5332. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>
- Gatti, L.V. et al., (2021). Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature* v.595, p.388-393. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>
- Gao, X. et al. (2017) Temporal and spatial evolution of the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in the Loess Plateau under climate change from 2001 to 2050. *Science of The Total Environment*. V. 595, p.191-200. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.226>

- Gentine, P. et al. (2019). Coupling between the terrestrial carbon and water cycles — a review. *Environmental Research Letters* v.14, n.8, 083003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab22d6>
- Gloor, M., et al. (2018). Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophysical Research Letters* v.40, n.9, p.1729-1733. <https://doi.org/10.1002/grl.50377>
- Golkar, F., et al., (2020). Using OCO-2 Satellite Data for Investigating the Variability of Atmospheric CO₂ Concentration in Relationship with Precipitation, Relative Humidity, and Vegetation over Oman. *Water* v.12,n. 1, p.101. <https://doi.org/10.3390/w12010101>
- Guanter, L., Zhang, Y., Jung, M., et al. (2014). Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* v.111, n.14 E1327-E1333, <https://doi.org/10.1073/pnas.1320008111>
- Gutiérrez, A.P.A., et al. (2021). Drought preparedness in Brazil. *Weather and Climate Extremes* 32, 100324. <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/59372>
- Hakkarainen, J. et al. (2016). Direct space-based observations of anthropogenic CO₂ emission areas from OCO-2. *Geophysical Research Letters* <https://doi.org/10.1002/2016GL070885>
- Hao, Y., Mao, J., Bachmann, C.M. et al. (2025). Soil moisture controls over carbon sequestration and greenhouse gas emissions: a review. *npj Clim Atmos Sci* v.8, n.16 <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00888-8>
- Houghton, R. A., Nassikas, A. A., (2017). Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850–2015. *Global Biogeochemical Cycles* v.31,n. 3, p.456-472. <https://doi.org/10.1002/2016GB005546>
- Huete, A. R., et al. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* v.83, n. 2, p.195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- IPCC, (2019). Climate Change and Land: An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.
- IPCC, (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. *Cambridge University Press*. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- IPCC, (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Jin, Z., T. et al. (2021). A global CO₂ flux dataset (2015–2019) inferred from OCO-2 retrievals using the Tan-Tracker inversion system, *Earth Syst. Sci. Data Discuss*. <https://doi.org/10.5194/essd-2021-210>.
- Kendall, M. G., (1975). Rank Correlation Methods, 4th ed., Charles Griffin: London.
- Kunchala, R. K. et al. (2022) Spatio-temporal variability of X_{CO2} over Indian region inferred from Orbiting Carbon Observatory (OCO-2) satellite and Chemistry Transport Model. *Atmospheric Research*, volume 269, 106044. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106044>
- Latawiec, A. E., et al. (2017). Intensification of cattle ranching production systems: socioeconomic and environmental synergies and risks in Brazil. *Animal*, v.8, n.8, 1255-63. <https://doi.org/10.1017/S1751731114001566>

- Le Quéré, C. et al. (2019). Drivers of declining CO₂ emissions in 18 developed economies. *Nature Climate Change*, v.9, n.3, p.213-217. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0419-7>
- Li, L. et al. Decreased land use intensity improves surface soil quality on marginal lands. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 2021. <https://doi.org/10.1002/agg2.20226>
- Liu, J., et al., (2017). Contrasting carbon cycle responses of the tropical continents to the 2015–2016 El Niño. *Science* 358, eaam5690. <https://doi.org/10.1126/science.aam5690>
- Liu, H. et al. (2020): Annual dynamics of global land cover and its long-term changes from 1982 to 2015, Data Publisher for *Earth & Environmental Science*. PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.913496>
- Longo, M., et al., (2020). Impacts of degradation on water, energy, and carbon cycling of the Amazon tropical forests. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* v.125, n.8, e2020JG005677. <https://doi.org/10.1029/2020jg005677>.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, v.13, n. 3, p. 245-259.
- MapBiomass, 2023. Relatório de Transições de Uso e Cobertura da Terra – Edição 2023.
- Morsy, M. et al. (2022). Climatological study of SPEI drought index using observed and CRU gridded dataset over Ethiopia. *Pure and Applied Geophysics*, v. 179, n. 8, p. 3055-3073. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03091-z>
- Marengo, J., et al. (2024) The drought of Amazonia in 2023-2024. *American Journal of Climate Change*, 13, 567-597. 10.4236/ajcc.2024.133026.
- Marengo J. et al. (2024). Long-term variability, extremes and changes in temperature and hydrometeorology in the Amazon region: A review. *cta Amaz.* v.54, <https://doi.org/10.1590/1809-4392202200980>
- Marengo, J.A. et al. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region (2018). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 90, p. 1973-1985. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>
- Marengo, J.A. et al. (2016). Seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. *Revista Climanalise*, v. 3, n. 1, p. 49-54.
- Medeiros, M.E.N.O. et al. (2025). Cenários climáticos e fatores antropogênicos no semiárido brasileiro: emissão de CO₂, seca, desmatamento e queimadas. *Cuadernos de educación y desarrollo*, v.17, n.5, p. 01-20.
- Myneni, R. B. et al. , (2002), Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, v 83, n. 1-2, p. 214-231. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00074-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00074-3)
- Morais Filho, L. F. F. et al. (2021). X_{CO2} temporal variability above Brazilian agroecosystems: A remote sensing approach. *Journal of Environmental Management* v.288, 112433. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112433>
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, p.179-184.
- Nascimento, M. R. (2023) Influência da variabilidade climática sobre a linha de costa, riscos e vulnerabilidades do litoral de Maceió, Alagoas. 2023. 143 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

- NASA, 2016–2023. Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) Level 2 Data. Greenbelt, MD: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?keywords=OCO-2&page=1>
- Neumaier, N. et al. (2020). Ecofisiologia da soja. Londrina: *Embrapa Soja*. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/223209/1/SP-17-2020-online-1>
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), (2023). Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. *Earth System Research Laboratory*. Disponível em: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>
- Paredes-Trejo, F., et al. (2021). Long-Term Spatiotemporal Variation of Droughts in the Amazon River Basin. *Water*, v.13, n.3, p. 351. <https://doi.org/10.3390/w13030351>
- Pastorello, G., et al., (2020). The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data. *Scientific Data* v.7, p.225. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0534-3>
- Patra, N.K. et al. The Orbiting Carbon Observatory (OCO-2) tracks 2-3 peta-gram increase in carbon release to the atmosphere during the 2014-2016 El Niño. *Sci. Rep.* v. 7, p. 1-12, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13459-0>
- Piao, S. et al. (2020). Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nat Rev Earth Environ* v.1, p.14-27 <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0001-x>
- Poulter, B., Frank, D., Ciais, P., Myneni, R. B., et al., 2014. Contribution of semi-arid ecosystems to interannual variability of global carbon cycle. *Atmospheric Research* v.216, p.38-45. <https://doi.org/10.1038/nature13376>
- Pugh, T. A. M., et al.(2021). Important role of forest disturbances in the global biomass turnover and carbon sinks. *Nature Geoscience* v.12, n.9, p.730-735. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0427-2>
- Pugh, T.A.M. et al. (2019). Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* v.116, n. 10, p. 4382-4387, <https://doi.org/10.1073/pnas.1810512116>
- QGIS Development Team, (2025). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.
- R Core Team, (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. <http://www.r-project.org/>.
- Razali, N. M., Wah, Y. B., (2011). Power comparisons of Shapiro–Wilk, Kolmogorov–Smirnov, Lilliefors and Anderson–Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics* v.2, p.21-33.
- Rosset, J. S., et al., (2019). Matéria orgânica e agregação do solo em sistemas agrícolas com diferentes tempos de adoção. *Seminário: Ciências Agrárias* v.40, p.3443–3460. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n6Supl3p3443>
- Rossi, F. S., et al., (2022). Carbon dioxide spatial variability and dynamics for contrasting land uses in central Brazil agricultural frontier from remote sensing data. *Journal of South American Earth Sciences* 116, 103809. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103809>.
- Rouse, J. W., et al. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, p. 309–317. NASA.

- Rosa, I. M. D. et al. (2011). Atmospheric emissions from vegetation fires in Portugal (1990–2008): estimates, uncertainty analysis, and sensitivity analysis, *Atmos. Chem. Phys.*, v.11, p.2625-2640, <https://doi.org/10.5194/acp-11-2625-2011>.
- Rosa, R. et al. (2014). Estoque de carbono em solos sob pastagens cultivadas na bacia hidrográfica do Rio Paranaíba. *oc. nat.* v.26,n. 2,. <https://doi.org/10.1590/1982-451320140210>
- Santos, G. A. de A., et al. (2022). Hot-spots and anomalies of CO₂ over eastern Amazonia, Brazil: A time series from 2015 to 2018. *Environmental Research* v.215, 114379. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114379>.
- Scholes, R. J., Archer, S. R., (1997). Tree-grass interactions in savannas. *Annual Review of Ecology and Systematics* v.28,n.1,p. 517-544. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.28.1.517>
- Siabi, Z., et al., (2019). Spatial distribution of X_{CO2} using OCO-2 data in growing seasons. *Journal of Environmental Management* v.244, p.110-118. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.049>
- Silva, A. C., et al., (2021). Northeast Brazil's imperiled Cerrado. *Science* 372, 139–140. <https://doi.org/10.1126/science.abg0556>
- Silva, L. da L. et al. (2023). Carbono e matéria orgânica do solo em sistema de manejo de produção de pastagem: uma revisão sistemática com meta-análise. *Agrarian*, Dourados, v. 16, n. 56, e17176. <https://doi.org/10.30612/agrarian.v16i56.17176>
- Silva Junior, C.H.L. et al. (2021). The Brazilian Amazon deforestation rate in 2020 is the greatest of the decade. *Nat Ecol Evol* v.5, p.144-145. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-01368-x>
- Silva, J. L. C. et al. (2018). Aspectos da degradação ambiental no nordeste do brasil. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 180. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v7e22018180-191>
- Soares, T.O., et al. (2019). Impactos Ambientais Causados Pelo Desmatamento: Uma Revisão Sistemática Da Literatura. *Revista Saúde e Meio Ambiente*, v. 9, n. 2, p 60-73. Disponível em: <https://periodicos.ufms.br/index.php/sameamb/article/view/7675>.
- Sitch, S., et al. (2020). Recent trends and drivers of regional sources and sinks of carbon dioxide. *Biogeosciences*, v.17, n.6, p.1583–1607. <https://doi.org/10.5194/bg-17-1583-2020>
- Sousa, J. W. et al. (2021). Análise de episódios El Niño Oscilação Sul (ENOS) e a variabilidade interanual de chuvas em Rio Branco, Acre, intervalo 1971-2010. *Scientia Naturalis*, v. 3, n. 5,. <https://periodicos.ufac.br/index.php/SciNat/article/view/5281>.
- Smith, P., et al., (2019). How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. *Global Change Biology* v.26,n.1,p. 219-241. <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>
- Spera, S.A.et al. (2016). Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. *Global Change Biology* v.22, p.3405-3413. <https://doi.org/10.1111/gcb.13298>
- Stackhouse, P., et al. (2016), Earth Radiation Budget at Top-of-Atmosphere [in "State of the Climate in 2015"], *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v.97, S41-S43.

Tian, H., et al. (2020). A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature* v.586, n.7828, p. 248-256. <https://dx.doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0>

Vicente-Serrano, S.M., S. Begueria and J.I. Lopez-Moreno, 2010: A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23: 1696–1718. doi: <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

Virkkala, A. M. et al. (2022). The ABC flux database: Arctic–boreal CO₂ flux observations and ancillary information aggregated to monthly time steps across terrestrial ecosystems, *Earth Syst. Sci. Data*, v.14, p.179-208, <https://doi.org/10.5194/essd-14-179-2022>

Wang, J. et al. (2016) Interannual variability of the atmospheric CO₂ growth rate: roles of precipitation and temperature, *Biogeosciences*, v.13, p.2339-2352, <https://doi.org/10.5194/bg-13-2339-2016>

Zhang, E.L.E. et al. (2023). Uso de florestas aleatórias com base nos efeitos dos elementos de governança urbana para prever as emissões de CO₂ nas cidades chinesas. *Heliyon* v.9, e16693. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16693>

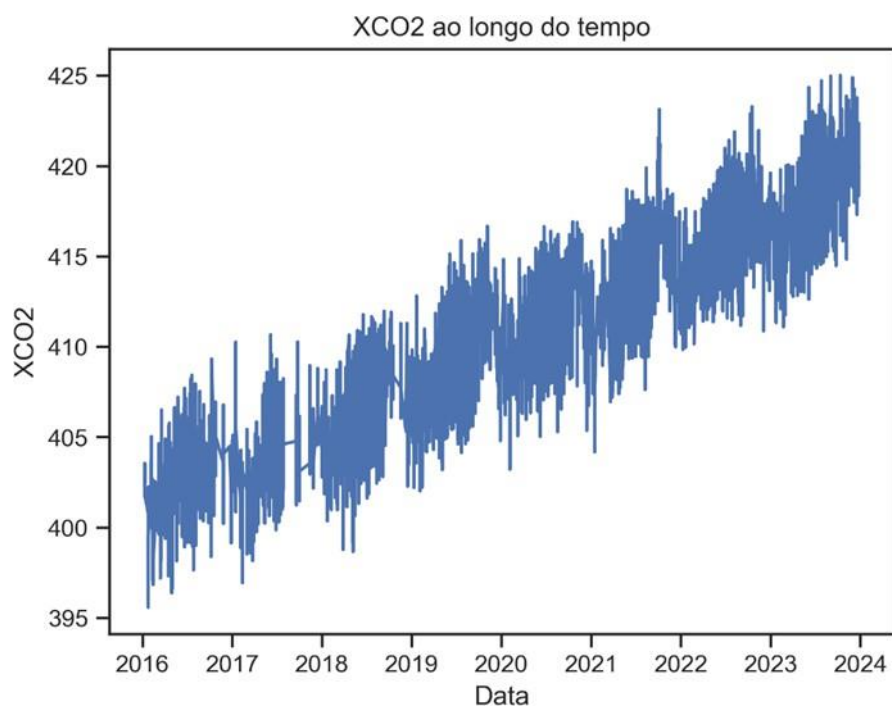
Zhang J. et al. (2024). Effects of Land Use/Cover Change on Terrestrial Carbon Stocks in the Yellow River Basin of China from 2000 to 2030. *Remote Sens.* V. 16, n.10, 1810. <https://doi.org/10.3390/rs16101810>

Zhao, C., et al. (2017). Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v.114, n.35, p.9326-9331. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>

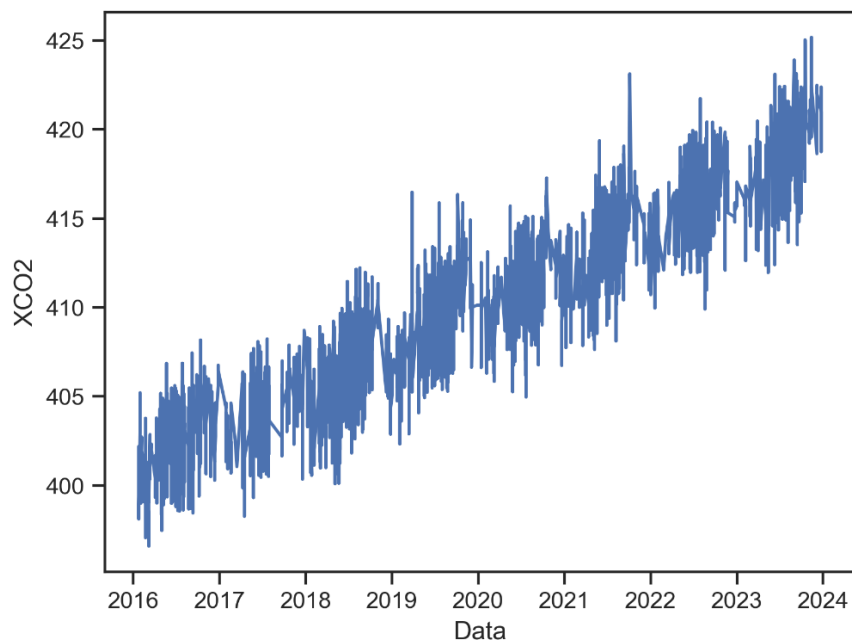
Zimbres, B., et al., (2024). Improving estimations of GHG emissions and removals from land use change and forests in Brazil. *Environmental Research Letters* v.19. 10.1088/1748-9326/ad64ea

Zeri, M. et al. (2021) Importance of including soil moisture in drought monitoring over the Brazilian semiarid region: An evaluation using the JULES model, in situ observations, and remote sensing. *Climate Resilience and Sustainability*. <https://doi.org/10.1002/cli2.7>

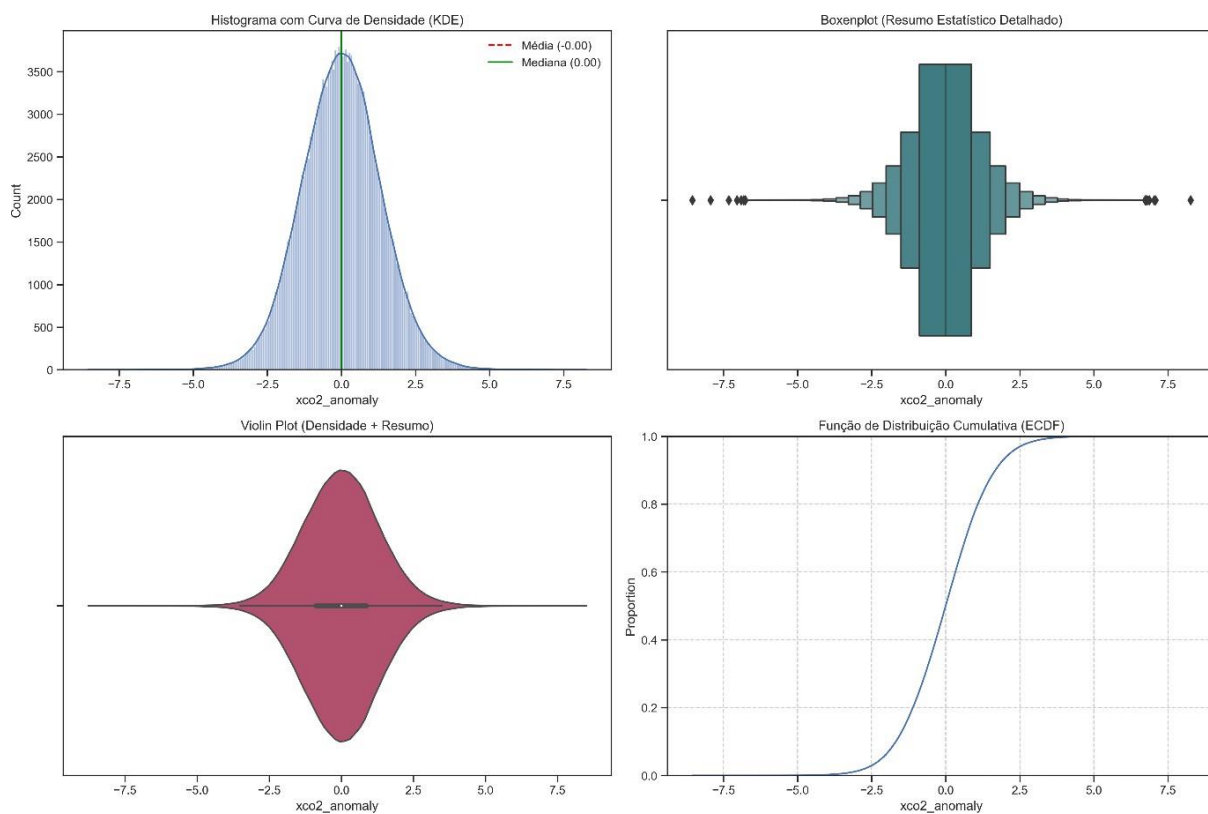
APÊNDICE



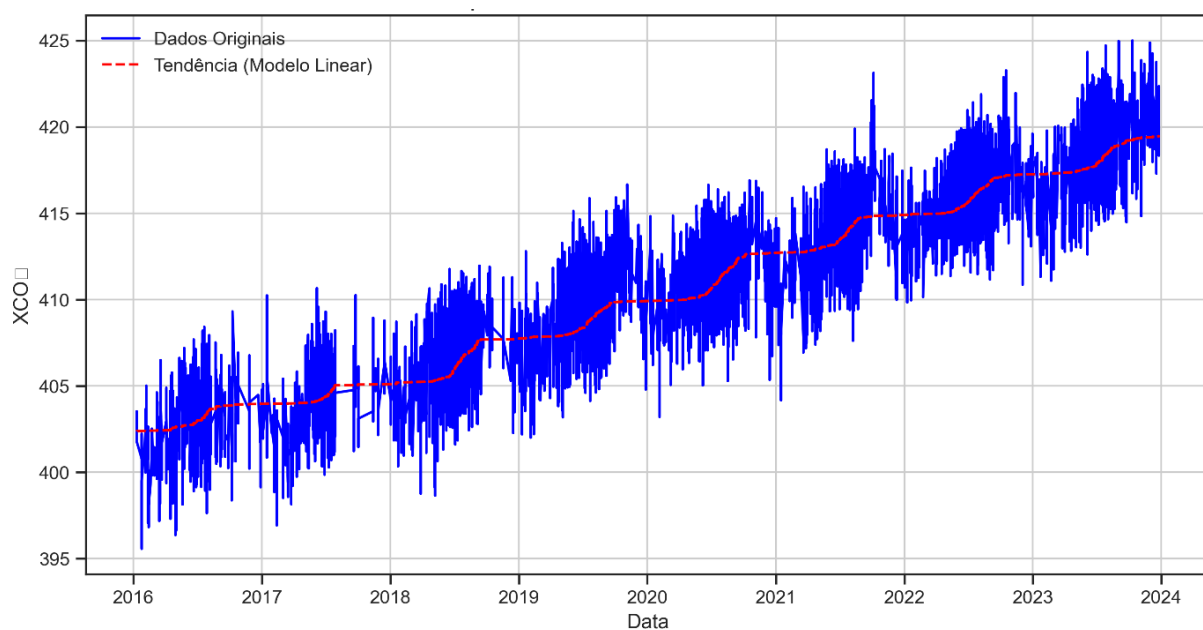
APÊNDICE A. Série temporal de X_{CO₂} para a área de pastagem.



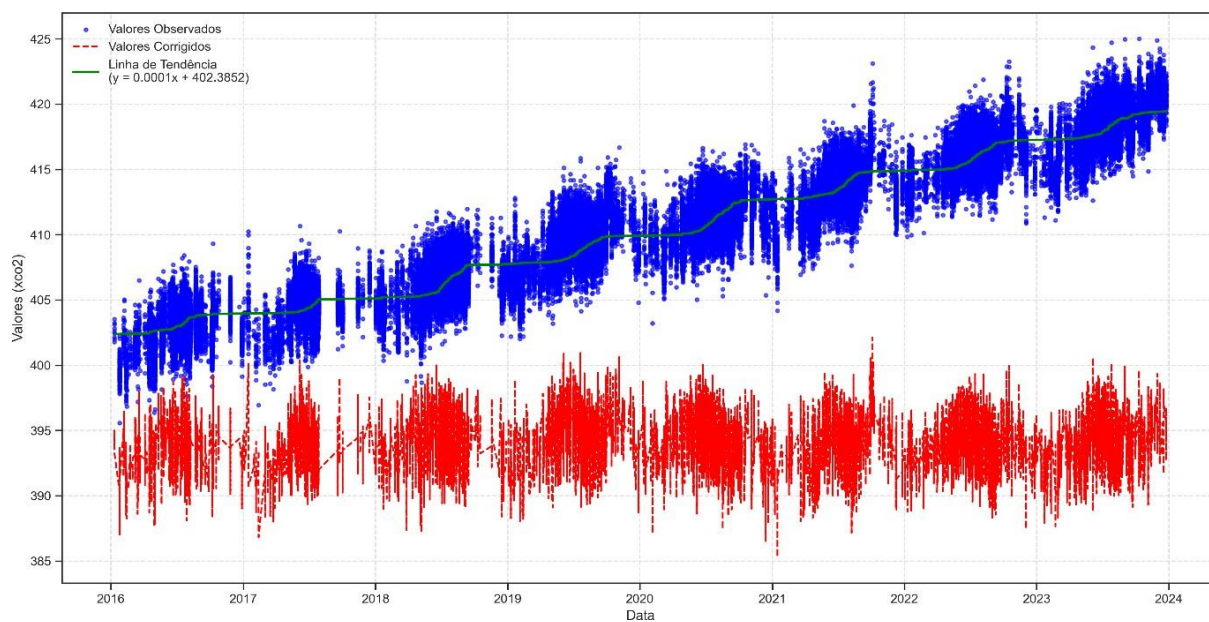
APÊNDICE B. Série temporal de X_{CO₂} para a área de soja.



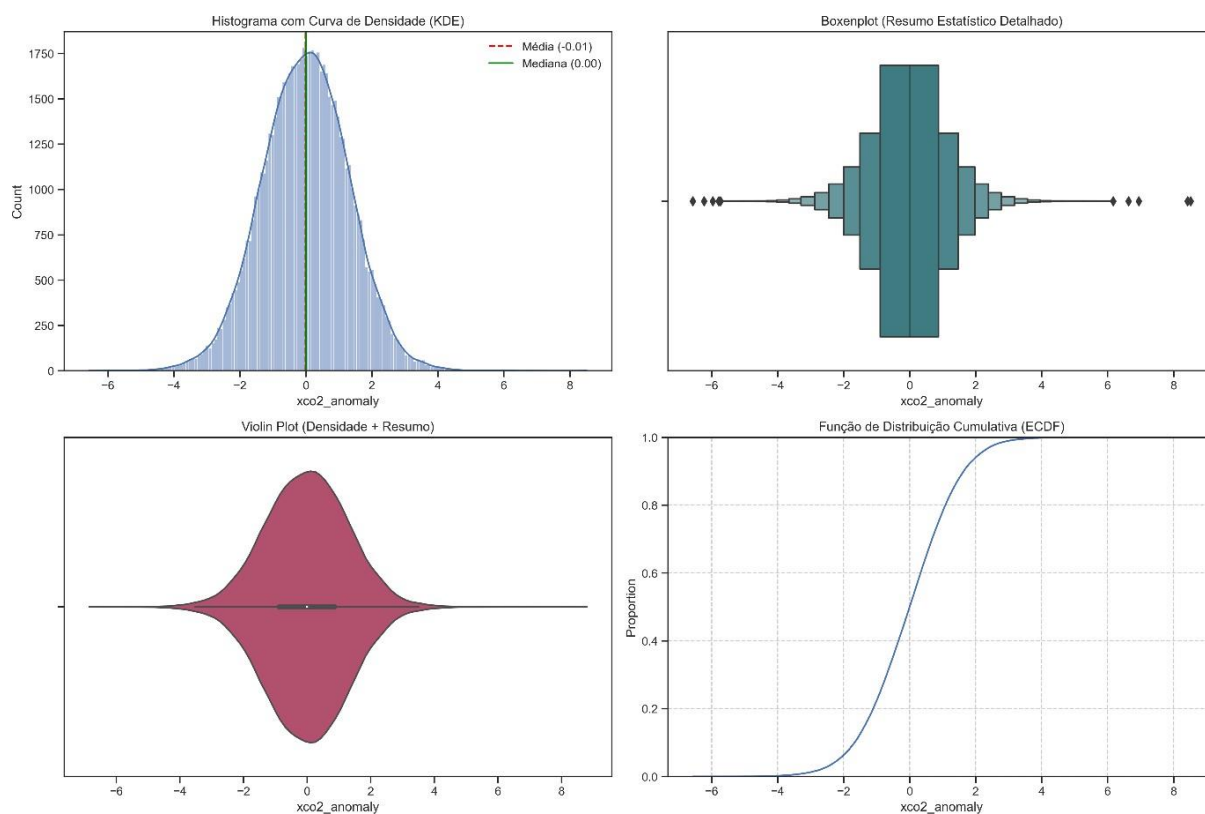
APÊNDICE C. Análise de distribuição da coluna de anomalia de X_{CO_2} para área de pastagem



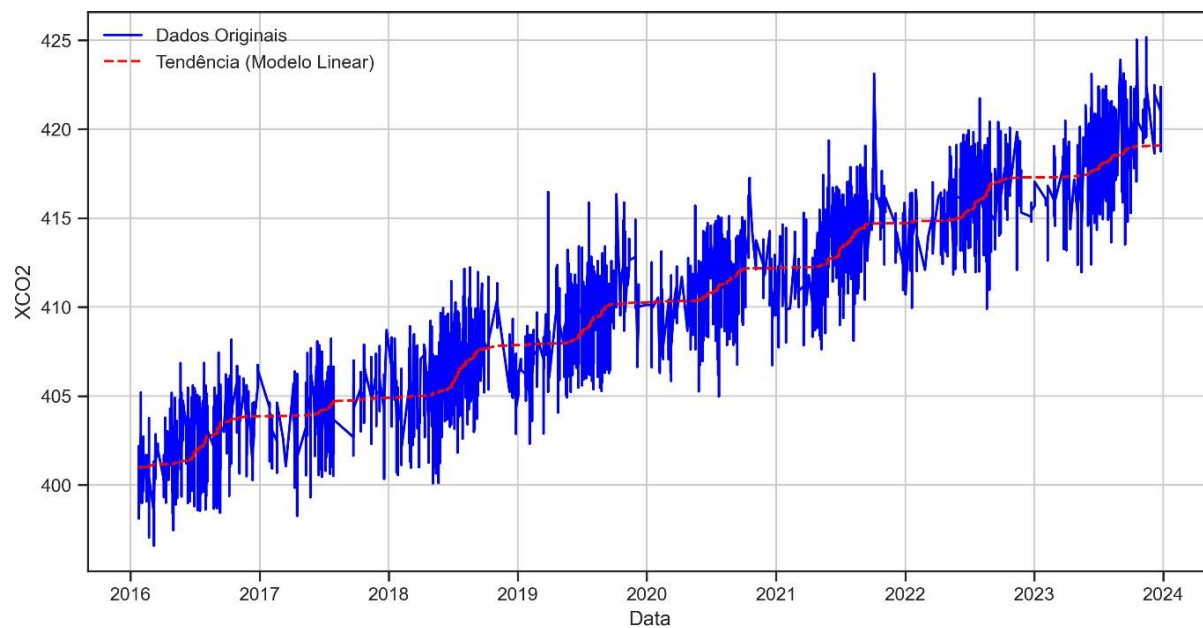
APÊNDICE D. Série temporal de X_{CO_2} com linha de tendência em áreas de pastagem



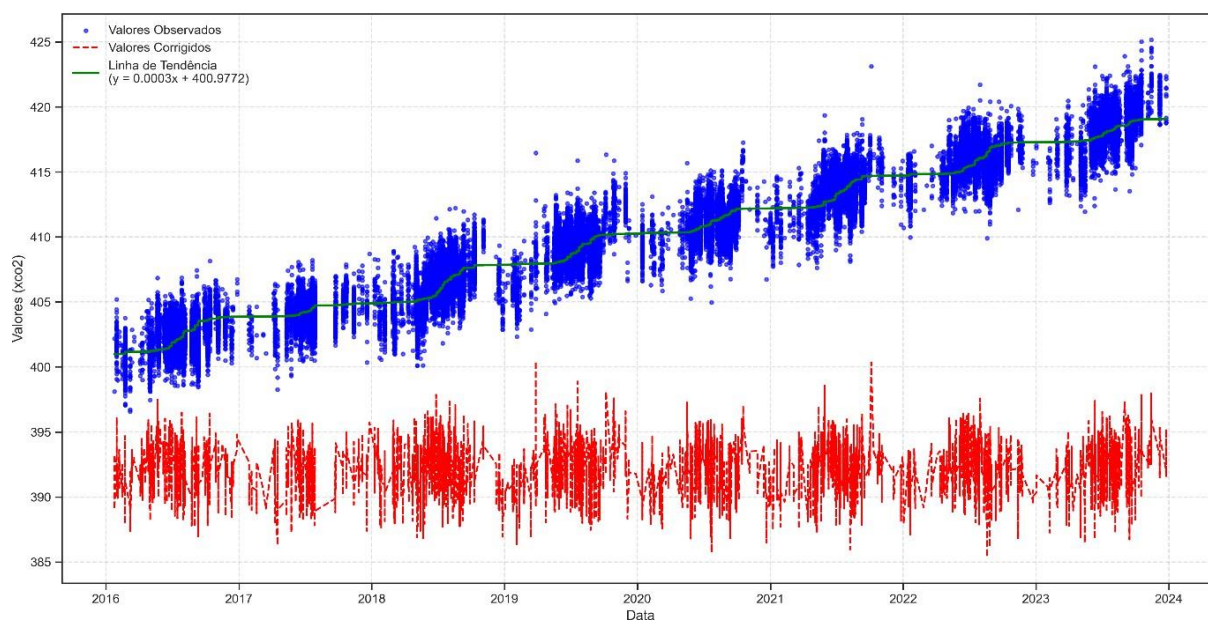
APÊNDICE E. Valores corrigidos de X_{CO_2} em áreas de pastagem



APÊNDICE F. Análise de distribuição da coluna de anomalia de X_{CO_2} para área de soja



APÊNDICE G. Série temporal de X_{CO_2} com linha de tendência em áreas de soja



APÊNDICE H. Valores corrigidos de X_{CO_2} em áreas de soja.

