

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta
Tese será disponibilizado somente a
partir de 09/02/2026.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**INDICADORES DE QUALIDADE AMBIENTAL E DINÂMICA
DE CARBONO NOS BIOMAS AMAZÔNIA E CERRADO:
MÚLTIPLAS ABORDAGENS**

Kleve Freddy Ferreira Canteral
Engenheiro Ambiental e de Energias Renováveis
Mestre em Agronomia (Ciência do Solo)

2024

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**INDICADORES DE QUALIDADE AMBIENTAL E DINÂMICA
DE CARBONO NOS BIOMAS AMAZÔNIA E CERRADO:
MÚLTIPLAS ABORDAGENS**

MSc. Kleve Freddy Ferreira Canteral

Orientador: Prof. Dr. Alan Rodrigo Panosso

Coorientador: Prof. Dr. Newton La Scala Júnior

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo).

C229i	Canteral, Kleve Freddy Ferreira Indicadores de qualidade ambiental e dinâmica de carbono nos biomas Amazônia e Cerrado : múltiplas abordagens / Kleve Freddy Ferreira Canteral. -- , 2024 103 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, Orientador: Alan Rodrigo Panosso Coorientador: Newton La Scala Júnior 1. Índices de qualidade. 2. Ecossistemas tropicais. 3. Sustentabilidade. 4. Sensoriamento remoto. 5. Anomalias Xco2. I. Título.
-------	--

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: INDICADORES DE QUALIDADE AMBIENTAL E DINÂMICA DE CARBONO NOS BIOMAS AMAZÔNIA E CERRADO: MÚLTIPLAS ABORDAGENS

AUTOR: KLEVE FREDDY FERREIRA CANTERAL

ORIENTADOR: ALAN RODRIGO PANOSSO

COORIENTADOR: NELSON JOSÉ PERUZZI

COORIENTADOR: NEWTON LA SCALA JUNIOR

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

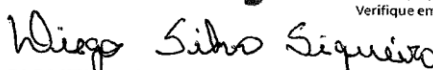


Prof. Dr. ALAN RODRIGO PANOSSO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente

Dra. MARIA ELISA VICENTINI (Participação Virtual) **gov.br**
Autônoma / Jales/SP

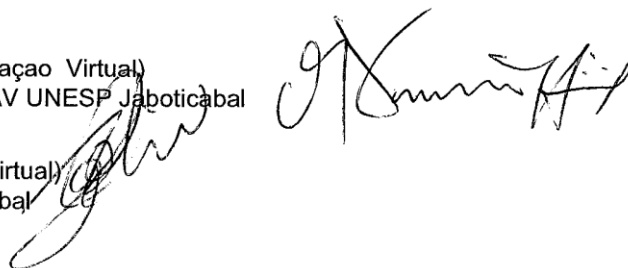
MARIA ELISA VICENTINI
Data: 09/08/2024 11:10:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



Diretor Executivo DIEGO SILVA SIQUEIRA (Participação Virtual)
Quanticum Inteligência em Solos / Ribeirão Preto/SP

Prof. Dr. MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal

Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia / FCAV UNESP Jaboticabal



Jaboticabal, 09 de agosto de 2024

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

KLEVE FREDDY FERREIRA CANTERAL - Filho de Maria Cleide dos Santos Ferreira e Kleber Freddy Eslao Canteral, nasceu em Vigia de Nazaré, Pará, no dia 01 de outubro de 1996. Em março de 2014, ingressou no curso de Engenharia Ambiental e Energias Renováveis pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Câmpus de Belém, Pará. Foi bolsista pelo Programa de Educação Tutorial em Ciência do Solo (PET Solos) durante o período de julho de 2016 a fevereiro de 2019, no qual desenvolveu atividades voltadas à educação ambiental, reflorestamento e sustentabilidade de solos no contexto da agricultura familiar na Amazônia Oriental. Foi membro do Plano de Logística Sustentável (PLS) da UFRA (2016 a 2018), atuando na dimensão de resíduos sólidos e coleta seletiva. Além disso, de 2018 a 2019, foi voluntário do Laboratório de Elementos Traços no Ambiente (LETAM) da UFRA, no qual desenvolveu pesquisas com a síntese de biocarvões oriundos de resíduos agroindustriais e adsorção de fósforo. Iniciou em março de 2019 o curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo), da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV-UNESP), Câmpus de Jaboticabal-SP, no Departamento de Ciências Exatas, sob a orientação do Prof. Dr Alan Rodrigo Panosso. Em julho de 2020, submeteu-se à banca para a defesa de dissertação, sendo aprovado como Mestre em Agronomia (Ciência do Solo). Iniciou o curso de Doutorado em Agronomia (Ciência do Solo) em agosto de 2020 pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV-UNESP), Câmpus de Jaboticabal-SP, no Departamento de Ciências Exatas, sob a orientação do Prof. Dr Alan Rodrigo Panosso. Em agosto de 2024, recebeu o título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo). Atuou principalmente nos seguintes temas: emissão de CO₂ do solo, variabilidade espacial e temporal de atributos do solo, estoque de carbono do solo, qualidade ambiental do solo, sensoriamento remoto, geoprocessamento e modelagem ambiental aplicada às ciências agrárias e ambientais.

“Quando a educação não é libertadora, o sonho do oprimido é ser o opressor”

(Paulo Freire)

DEDICO

À minha mãe, Maria Cleide dos Santos Ferreira;
minhas irmãs, Cleidiane Ferreira e Eduarda
Ferreira; e aos amados sobrinhos, João Miguel
Ferreira e Luna Victória Ferreira, que eu tanto amo.

OFEREÇO

Aos meus bondosos avós, Maria Ernestina
dos Santos (*in memoriam*) e João Pereira
Ferreira (*in memoriam*). Vocês são minha
fonte infinita de inspiração.

AGRADECIMENTOS

Aos meus avós, Maria Ernestina dos Santos (*in memoriam*) e João Pereira Ferreira (*in memoriam*), por serem meus moldes de caráter e humildade e por continuarem sendo o meu alicerce para enfrentar as dificuldades diárias.

À minha mãe, Maria Cleide dos Santos Ferreira, por todo o amor, suporte e incentivo durante a minha trajetória. Às minhas irmãs, Cleidiane Ferreira e Maria Eduarda Ferreira, pelo companheirismo, carinho e por compreenderem a minha ausência em muitos momentos.

Aos meus queridos sobrinhos, João Miguel e Luna Victória, que me motivam a superar inúmeros desafios. O sorriso de vocês acalenta os meus dias e torna tudo mais agradável.

Ao meu orientador e amigo, Alan Rodrigo Panosso, pela amizade, paciência e sabedoria compartilhada ao longo dessa jornada. Lembrarei com muito carinho dos nossos diálogos, que perpassavam o âmbito da ciência.

Ao meu coorientador, Newton La Scala Júnior, pela disponibilidade em colaborar com este trabalho e pelos valiosos ensinamentos repassados.

Aos membros do Exame Geral de Qualificação: Marcílio Martins Filho e Mara Moitinho. E aos professores membros da Banca de Defesa: Marcílio Martins Filho, Glauco Rolim, Diego Siqueira e Maria Elisa Vicentini, pela disponibilidade, sugestões e críticas, que certamente contribuíram muito para a qualidade final deste estudo.

Aos amigos que me acompanham desde a graduação, Eduarda Reis, João Duarte e Marcilene Sarah, minha gratidão por serem bons ouvintes e por saberem o que dizer em momentos desafiadores.

À minha amiga, Arianis Nicolella, com quem eu tive o privilégio de compartilhar momentos inesquecíveis e fortalecer laços que pretendo levar para toda a vida.

Ao meu namorado, Clebson Praxedes, por segurar a minha mão e caminhar comigo ao longo dessa jornada. Seu amor, apoio e empatia foram fundamentais para o desenvolvimento deste estudo. Você continua me inspirando!!

Às funcionárias e amigas do Departamento de Engenharia e Ciências Exatas: Adriana Takakura e Shirley de Sousa. Obrigado por serem tão receptivas e tornarem o convívio mais leve e agradável.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) pela oportunidade de realizar esta pesquisa e por todo o conhecimento que me foi transmitido por meio dos docentes da FCAV/UNESP.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão de bolsa de doutorado, o que possibilitou a minha permanência em Jaboticabal e consequente execução deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

	Página
Resumo	iii
Abstract.....	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
1.1 Introdução	1
1.2 Revisão de literatura.....	3
1.2.1 Desmatamento em florestas tropicais e mudanças climáticas	3
1.2.2 Estoques de carbono do solo em sistemas naturais e agrícolas	5
1.2.3 Qualidade do solo e indicadores químicos e físicos do solo.....	8
1.2.4 Monitoramento de indicadores ambientais via sensoriamento remoto	10
1.3 Referências	13
CAPÍTULO 2 – Estoques de carbono e indicadores de qualidade do solo após mudanças de uso da terra de longo prazo no Cerrado brasileiro	21
Resumo	21
Abstract.....	22
2.1 Introdução	23
2.2 Material e métodos	26
2.2.1 Localização e caracterização da área experimental.....	26
2.2.2 Histórico dos agroecossistemas.....	27
2.2.3 Amostragem e análise do solo	29
2.2.4 Processamento e análise dos dados.....	31
2.3 Resultados	32
2.3.1 Atributos químicos e físicos do solo	32
2.3.2 Estoque de carbono e estabilidade de agregados do solo	36
2.3.3 Abordagem multivariada.....	37
2.3.3.1 Análise de componentes principais (ACP)	37
2.3.3.2 Análise de agrupamento hierárquico	42
2.4 Discussão.....	44
2.4.1 Efeitos da MUT nos indicadores de qualidade química e física do solo	44

2.4.2 Relação multivariada entre os indicadores de qualidade do solo e estoques de carbono do solo.....	47
2.4.3 Alterações nos estoques de carbono e agregados do solo induzidas pela MUT.....	49
2.5 Conclusão	52
2.6 Referências bibliográficas	52
CAPÍTULO 3 – Padrões espaciais e temporais dos índices de vegetação, clima e anomalias de CO₂ no arco do desmatamento, Amazônia Legal brasileira	61
Resumo.....	61
Abstract.....	62
3.1 Introdução	63
3.2 Material e métodos	66
3.2.1 Área de estudo	66
3.2.2 Sensoriamento remoto e clima.....	67
3.2.2.1 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)	67
3.2.2.2 Observatório de Carbono em Órbita-2 (OCO-2).....	67
3.2.2.3 Sensor MODIS	68
3.2.3 Análise e processamento dos dados.....	70
3.2.3.1 Estatística descritiva e análise de correlação linear	70
3.2.3.2 Anomalias de Xco ₂	71
3.2.3.3 Variabilidade espacial.....	71
3.3 Resultados	72
3.3.1 Variabilidade temporal e efeito sazonal.....	72
3.3.2 Variabilidade espacial.....	76
3.3.3 Anomalias de Xco ₂ na Amazônia Legal.....	81
3.4 Discussão	83
3.4.1 Dinâmica sazonal dos índices de vegetação e clima	83
3.4.2 Desmatamento na Amazônia Legal e anomalias de Xco ₂	86
3.5 Conclusões	88
3.6 Referências Bibliográficas.....	89
CAPÍTULO 4 – Considerações finais	96

INDICADORES DE QUALIDADE AMBIENTAL E DINÂMICA DE CARBONO NOS BIOMAS AMAZÔNIA E CERRADO: MÚLTIPLAS ABORDAGENS

Resumo – As mudanças de uso da terra desencadeiam alterações nos ciclos biogeoquímicos e em indicadores de qualidade ambiental. Assim, compreender esse efeito sob diferentes cenários e abordagens é indispensável para propor manejos sustentáveis com o intuito de melhorar a saúde do solo e mitigar a emissão de gases de efeito estufa (GEE). Deste modo, o objetivo do primeiro capítulo foi investigar os efeitos da conversão a longo prazo de diferentes agroecossistemas quanto aos estoques de carbono e indicadores químicos e físicos do solo, enquanto o segundo capítulo teve enfoque sobre a qualidade ambiental, expressa por índices espectrais de saúde e densidade da vegetação e clima, bem como na variabilidade espacial e temporal de X_{CO_2} e anomalias de X_{CO_2} no arco do desmatamento na Amazônia Legal. Foi investigada a dinâmica de indicadores de qualidade ambiental. A abordagem *in situ* (primeiro capítulo) foi realizada em um Latossolo Vermelho, com textura variando entre franco argiloso arenoso e argila arenoso, em áreas pareadas e nos seguintes usos da terra: vegetação nativa de savana brasileira (VN), pastagem manejada com *Brachiaria decumbens* (PM) e reflorestamento com *Eucalyptus camaldulensis* (RE). Os atributos químicos e físicos do solo foram determinados a partir de amostras de solo coletadas em superfície (0-0,10 m) e subsuperfície (0,10-0,40 m). A segunda proposta (dados orbitais) contemplou uma série temporal de seis anos (2015 – 2020) e considerou as variações sazonais (seca e chuvosa) de variáveis obtidas a partir de diferentes sensores orbitais. A análise incluiu estatísticas descritivas, análise espacial, temporal e correlação de Spearman. Além disso, calculamos as anomalias de X_{CO_2} para identificar fontes e sumidouros de C em áreas desmatadas. Nossas descobertas revelaram que os estoques de carbono do solo foram afetados distintamente, dependendo do uso da terra. Conversões de VN para RE levaram a uma perda de $\sim 7 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C (17 %) em 36 anos (por exemplo, redução de 49,88 para 42,73 Mg ha^{-1}). Por outro lado, a conversão para pastagem bem manejada promoveu a manutenção e incremento médio nos estoques de C de $\sim 4 \text{ Mg ha}^{-1}$ (0-40 cm), com diferenças significativas na camada 0-0,20 m. A relação entre os indicadores químicos e físicos de qualidade do solo variou de acordo com o MUT, mas foi semelhante entre as camadas superficial e subsuperficial. A acidez potencial, soma de bases e estabilidade de agregados do solo foram os indicadores mais sensíveis associados ao EC após MUT de longo prazo. Além disso, nosso estudo detectou que a distribuição espacial de X_{CO_2} variou de 392,5 a 406 ppm durante a série temporal, com picos em 2019 (402,82 ppm) e 2020 (402,95 ppm), coincidindo com os níveis mais críticos de desmatamento na Amazônia. A fluorescência induzida pela luz solar (SIF) exibiu um padrão sazonal consistente, com médias anuais variando de 0,75 a 0,79 $\text{Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$. O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de área foliar (LAI) e amplitude de temperatura da superfície terrestre (LST Amp) apresentaram padrões espaciais semelhantes, sendo mais pronunciados no período seco. As anomalias positivas de X_{CO_2} (fontes de C) concentraram-se em unidades de conservação (UC) e terras indígenas (TI) desmatadas, enquanto as UC e TI mais preservadas parecem atuar como sumidouros de C. Nossos resultados revelam que o reflorestamento com eucalipto, mesmo após 36 anos de conversão, não resulta em ganhos de C no solo. Diferentemente, pastagens bem manejadas podem promover melhorias nos indicadores químicos do solo e sustentar estoques de C similares à

vegetação nativa de Cerrado. Adicionalmente, índices vegetativos e climáticos são mais sensíveis na estação seca, e as anomalias de X_{CO_2} são mais pronunciadas em áreas de proteção ambiental desmatadas, evidenciando maior vulnerabilidade desses ambientes em condições climáticas extremas.

Palavras-chave: índices de qualidade, ecossistemas tropicais, sustentabilidade, sensoriamento remoto; anomalias de X_{CO_2} .

INDICATORS OF ENVIRONMENTAL QUALITY AND CARBON DYNAMICS IN THE AMAZON AND CERRADO BIOMES: MULTIPLE APPROACHES

Abstract - Land use change trigger changes in biogeochemical cycles and environmental quality indicators. Therefore, understanding this effect under different scenarios and approaches is essential to propose sustainable management with the aim of improving soil health and mitigating greenhouse gas (GHG) emissions. Thus, the objective of the first chapter was to investigate the effects of the long-term conversion of different agroecosystems in terms of carbon stocks and soil chemical and physical indicators, while the second chapter focused on environmental quality, expressed by spectral health indices and vegetation density and climate, as well as the spatial and temporal variability of X_{CO_2} and X_{CO_2} anomalies in the arc of deforestation in the Legal Amazon. was to investigate the dynamics of environmental quality indicators. The in situ approach (first chapter) was carried out in a Red Oxisol, with texture varying between sandy clay loam and sandy clay, in paired areas and in the following land uses: native vegetation of Brazilian savanna (VN), pasture managed with *Brachiaria decumbens* (PM) and reforestation with *Eucalyptus camaldulensis* (RE). The chemical and physical attributes of the soil were determined from soil samples collected at the surface (0-0.10 m) and subsurface (0.10-0.40 m). The second proposal (orbital data) included a time series of six years (2015 – 2020) and considered seasonal variations (dry and rainy) of variables obtained from different orbital sensors. The analysis included descriptive statistics, spatial and temporal analysis and Spearman correlation. Additionally, we calculated X_{CO_2} anomalies to identify C sources and sinks in deforested areas. Our findings revealed that soil carbon stocks were distinctly affected depending on land use. Conversions from VN to RE led to a loss of $\sim 7 \text{ Mg ha}^{-1}$ of C (17 %) in 36 years (e.g., reduction from 49.88 to 42.73 Mg ha^{-1}). On the other hand, conversion to well-managed pasture promoted the maintenance and average increase in C stocks of $\sim 4 \text{ Mg ha}^{-1}$ (0-40 cm), with significant differences in the 0-0.20 m layer. The relationship between chemical and physical indicators of soil quality varied according to LUC, but was similar between the surface and subsurface layers. Potential acidity, base sum and soil aggregate stability were the most sensitive indicators associated with EC after long-term LUC. Furthermore, our study detected that the spatial distribution of X_{CO_2} varied from 392.5 to 406 ppm during the time series, with peaks in 2019 (402.82 ppm) and 2020 (402.95 ppm), coinciding with the most critical levels of deforestation in the Amazon. Sunlight-induced fluorescence (SIF) exhibited a consistent seasonal pattern, with annual averages ranging from 0.75 to 0.79 $\text{Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$. The normalized difference vegetation index (NDVI), leaf area index (LAI) and land surface temperature amplitude (LST Amp) showed similar spatial patterns, being more pronounced in the dry period. The positive anomalies of, even after 36 years of conversion, does not result in C gains in the soil. In contrast, well-managed pastures can promote improvements in soil chemical indicators and sustain C stocks similar to native Cerrado vegetation. Additionally, vegetative and climatic indices are more sensitive in the dry season, and X_{CO_2} anomalies are more pronounced in deforested environmental protection areas, showing greater vulnerability of these environments in extreme climatic conditions.

Keywords: index of quality, tropical ecosystems, sustainability, remote sensing; Xco₂ anomalies.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- Ca²⁺** – Cálcio trocável
- CH₄** – Metano
- CO₂** – Dióxido de carbono
- CTC** – Capacidade de troca de cátions
- Ds** – Densidade do solo
- EC** – Estoque de carbono do solo
- FCO₂** – Emissão de CO₂ do solo
- GEE** – Gases de Efeito Estufa
- H + AI** – Acidez potencial
- H_{LIFS}** – Grau de humificação da matéria orgânica do solo
- IPCC** – *Intergovernmental Panel on Climate Change*
- IPCC** – Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
- K** – Potássio
- LAI** – *Leaf area index*
- Macro** – Macroporosidade do solo
- Mg²⁺** – Magnésio trocável
- Micro** – Microporosidade do solo
- MOS** – Matéria orgânica do solo
- MUT** – Mudanças de uso da terra
- N₂O** – Óxido nitroso
- NDVI** – *Normalized difference vegetation index*
- OCO-2** – *Orbiting Carbon Observatory-2*
- P** – Fósforo disponível
- pH** – Potencial hidrogeniônico
- PLA** – Porosidade livre de água
- r** – Coeficiente de correlação de Pearson
- R²** – Coeficiente de determinação
- SIF** – *Solar-Induced chlorophyll Fluorescence*
- UNFCCC** – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima
- Us** – Umidade do solo

VTP – Volume total de poros

Xco₂ – Concentração média de CO₂ em uma coluna de ar seco

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Teores de argila, silte e areia nas áreas de vegetação nativa do Cerrado (VN), pastagem manejada (PM) e reflorestamento com eucalipto (RE) em superfície (0-0,10 m) e subsuperfície (0,10-0,40 m).	26
Tabela 2.2. Estatística descritiva da umidade do solo, atributos químicos e físicos do solo nas áreas de vegetação nativa do Cerrado (VN), pastagem manejada (PM) e reflorestamento com eucalipto (RE) em superfície (0-0,10 m).	34
Tabela 2.3. Estatística descritiva dos atributos químicos e físicos do solo nas áreas de vegetação nativa do Cerrado (VN), pastagem manejada (PM) e reflorestamento com eucalipto (RE) em subsuperfície (0,10-0,40 m).	35
Tabela 2.4. Coeficientes de correlação linear entre os indicadores químicos e físicos do solo nas duas primeiras componentes principais (CP1 e CP2) para as profundidades de 0-0,10 m e 0,10-0,40 m, respectivamente	39
Tabela 3.2. Variáveis de estudo, unidades, sensores e suas respectivas resoluções temporais e espaciais.....	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. a) Incrementos anuais de desmatamento na Amazônia Legal; b) incrementos de desmatamento acumulado por estados na Amazônia Legal; c) Série temporal de incrementos anuais de desmatamento por estados na Amazônia Legal. Fonte: INPE, 2023 (adaptado).....	4
Figura 2.1. Localização geográfica da área experimental em Selvíria, Mato Grosso do Sul (MS), Brasil. a) delimitação do estado do Mato Grosso do Sul (MS), Brasil e indicação do município de Selvíria; b) perímetro do município de Selvíria; c) localização e demarcação das áreas experimentais do estudo	27
Figura 2.2. Fluxograma do histórico das mudanças de uso da terra dos agroecossistemas avaliados no presente estudo.....	28
Figura 2.3. Equipamento de reflectometria no domínio do tempo (TDR) utilizado para medir a umidade do solo nas áreas de estudo	29
Figura 2.4. Representação da amostragem de solo nas profundidades 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m nos locais estudados	30
Figura 2.5. Gráficos de violino do estoque de carbono do solo nas profundidades de 0-0,10 m (a), 0,10-0,20 m (b), 0,20-0,40 m (c) e 0-0,40 m (d), com barras de erro padrão da média, para os diferentes usos da terra. RE: reflorestamento com eucalipto; VN: vegetação nativa; PM: pastagem manejada.....	37
Figura 2.6. Gráfico biplot com os atributos químicos e físicos do solo para os diferentes usos da terra e com elipses de confiança (95% de confiança), em superfície (a) e em subsuperfície (b). RE: reflorestamento com eucalipto; VN: vegetação nativa; PM: pastagem manejada	38
Figura 2.7. a) Contribuição percentual das variáveis com maior relevância para a componente principal 1 em superfície; b) Contribuição percentual das variáveis com maior relevância para a componente principal 2 em superfície; c) Porcentagem de variância explicada para as dimensões extraídas na ACP em superfície; d) Autovalores extraídos para as dimensões extraídas na ACP em superfície	40
Figura 2.8. a) Contribuição percentual das variáveis com maior relevância para a componente principal 1 em subsuperfície; b) Contribuição percentual das variáveis com maior relevância para a componente principal 2 em subsuperfície; c)	

Porcentagem de variância explicada para as dimensões extraídas na ACP em subsuperfície; d) Autovalores extraídos para as dimensões extraídas na ACP em subsuperfície42

Figura 2.9. Gráfico de mapa de calor com atributos do solo para os diferentes usos da terra em superfície (a) e em subsuperfície (b). RE: reflorestamento com eucalipto; VN: vegetação nativa; PM: pastagem manejada. O dendrograma acima do mapa de calor representa as variações dos atributos do solo em função do uso da terra, enquanto o dendrograma ao lado do mapa de calor refere-se ao agrupamento do uso da terra com maior ou menor grau de similaridade entre si43

Figura 3.1 Mapa de localização da Amazônia Legal brasileira com a delimitação do “arco do desmatamento”, unidades de conservação (UC), terras indígenas (TI) e focos de desmatamento entre os anos de 2015 a 2020.66

Figura 3.2. Fluxograma da metodologia empregada para aquisição e processamento dos dados.....70

Figura 3.3. Variabilidade temporal das médias mensais e gráficos de violino para as variações sazonais da concentração de X_{CO_2} (a, b), fluorescência da clorofila induzida pelo sol (c, d), índice de vegetação por diferença normalizada (e, f), índice de área foliar (g, h) e amplitude da temperatura de superfície terrestre (i, j), respectivamente. Legenda: (— interno) representa o segundo quartil ou a mediana; (⊥ e ⊤) terceiro e primeiro quartis até os limites superior e inferior); (●) discrepâncias ou valores atípicos.74

Figura 3.4. Mapa de calor da matriz de correlação linear de Spearman (5% de probabilidade) para as variáveis vegetativas e climáticas durante as estações chuvosa e seca no arco do desmatamento, Amazônia Legal. X_{CO_2} : concentração média de CO_2 em uma coluna de ar seco (ppm), SIF: fluorescência induzida pelo sol ($Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), NDVI: índice de vegetação por diferença normalizada (adimensional), LAI: índice de área foliar ($m^2 m^{-2}$) e amplitude LST: amplitude da temperatura de superfície terrestre ($^{\circ}C$).....76

Figura 3.5. Variabilidade espacial anual da concentração de X_{CO_2} (ppm) no arco do desmatamento da Amazônia Legal entre os anos de 2015 a 2020.....77

Figura 3.6. Distribuição espacial da SIF ($W m^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1}$) entre os anos de 2015 a 2020 no arco do desmatamento, Amazônia Legal.78

Figura 3.7. Distribuição espacial do NDVI (adimensional) entre os anos de 2015 a 2020 no arco do desmatamento, Amazônia Legal.	79
Figura 3.8. Distribuição espacial da LAI ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$) entre os anos de 2015 a 2020 no arco do desmatamento, Amazônia Legal.	80
Figura 3.9. Distribuição espacial da LST amplitude ($^{\circ} \text{C}$) entre os anos de 2015 a 2020 no arco do desmatamento, Amazônia Legal.	81
Figura 3.10. Distribuição espacial de anomalias Xco_2 para os anos de 2015 a 2020 no arco do desmatamento, Amazônia Legal.	82
Figura 3.11. Ridgelines da série temporal (2015-2020) para áreas conservadas e áreas desmatadas na Amazônia Legal brasileira. a) concentração atmosférica de Xco_2 (ppm); b) anomalias de Xco_2	83

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1.1 Introdução

A contribuição de fontes antropogênicas tem aumentado consideravelmente a concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, especialmente de dióxido de carbono (CO₂) (Paustian et al., 2016; IPCC, 2021). CO₂ é responsável por aproximadamente 65% das emissões globais, sendo 24% correspondente ao setor de Agricultura, Silvicultura e Outros Usos da Terra (AFOLU) (IPCC, 2014; Rogelj et al., 2018). A conversão da vegetação nativa para ambientes de produção (Tavanti et al., 2020; Rossi et al., 2023), o preparo do solo (La Scala Jr. et al., 2006; Silva et al., 2019), tipos de culturas (Santos et al., 2019; Xavier et al., 2019; 2020), uso de insumos agrícolas e de combustíveis fósseis (Yadav e Wang, 2017; Bordonal et al., 2018) são as principais vias de emissão de GEE provenientes de atividades agrícolas.

Essas atividades são ainda mais preocupantes em países em desenvolvimento (por exemplo, Brasil, México e Argentina) que baseiam suas economias na exportação de commodities agrícolas e, portanto, são mais vulneráveis às consequências das mudanças climáticas (Bhattacharyya et al., 2021). Segundo Sá et al. (2017), a adoção em larga escala de práticas agrícolas de baixo carbono (C) na América do Sul poderia alterar a tendência de aumento das emissões pela AFOLU e compensar as emissões anuais globais em cerca de 7,5% (2016-2020), 22,3% (2021-2035) e 25,2% (2036-2050), mitigando 8,24 Pg C até 2050. A quantidade de carbono orgânico presente no solo até uma profundidade de 1 metro é estimada em 1505 Pg. Isso representa 1,71 vezes a quantidade de carbono na atmosfera e 2,68 vezes o estoque de carbono biótico (Faucon et al., 2017; IPCC, 2021; Pinheiro et al., 2021; Batjes, 1996; Lal, 2018).

O Brasil apresenta um padrão de emissões de GEE distinto da média global, principalmente devido o cenário agrícola (Medeiros et al., 2021). Grande parte dessas emissões está relacionada ao desmatamento, o qual é impulsionado principalmente pela conversão de florestas para agricultura e pecuária, tem impactos significativos no ciclo hidrológico, na qualidade ambiental e na biodiversidade (Heinrich et al., 2021; Baccini et al., 2012; Gatti et al., 2021), além de aumentar as perdas de C via CO₂ do solo, especialmente nos biomas Cerrado e Amazônia (Medeiros et al., 2022).

Na última década, esses biomas passaram por mudanças significativas quanto ao uso e cobertura do solo devido às políticas de expansão de fronteiras agrícolas e incentivo governamental à ocupação dessas regiões (Arantes et al., 2016; Bonini et al., 2018; Bonanomi et al., 2019). Esses biomas são importantes reservatórios de carbono e desempenham um papel crucial na regulação climática global. No entanto, o desmatamento e a degradação florestal têm levantado preocupações sobre seu papel na mitigação das mudanças climáticas (Heinrich et al., 2021; Baccini et al., 2012; Gatti et al., 2021).

As mudanças de uso da terra comprometem o funcionamento de serviços ecossistêmicos, alteram a dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS) e geralmente têm efeitos negativos sobre a integridade dos ciclos biogeoquímicos, especialmente o de C (Faucon et al., 2017; Wieder et al., 2017; Bonini et al., 2018; Lal et al., 2018). Entretanto, evidências revelam que, dependendo do tipo de manejo e tempo de conversão, alguns agroecossistemas podem apresentar melhorias em determinados indicadores de qualidade do solo (Arantes et al., 2016; Bonanomi et al., 2019; Pinheiro et al., 2021).

Pinheiro et al. (2021) observaram que após 13 anos, as pastagens estocaram quantidades de carbono superiores (260 Mg ha^{-1}) ao sistema silvipastoril ($\sim 195 \text{ Mg ha}^{-1}$) e plantio de eucalipto (174 Mg ha^{-1}), sendo as diferenças mais pronunciadas em subsuperfície. Portanto, o fomento e incentivo de práticas agrícolas sustentáveis são importantes para garantir a produção de alimentos, aumentar o sequestro de C no solo e mitigar os GEE, em conformidade com a Agenda 2030 e os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) estabelecidos pela ONU (2020).

Nos últimos anos, a utilização de satélites orbitais para monitorar o desmatamento, a qualidade ambiental e a saúde dos cultivos agrícolas tem se destacado (Gatti et al., 2021; Moraes Filho et al., 2021; Rossi et al., 2022; Santos et al., 2022; Da Costa et al., 2023; De Souza Maria et al., 2023). As ferramentas de geotecnologia permitem avaliar a dinâmica espacial e temporal de fenômenos altamente complexos. Com isso, é possível melhorar o entendimento a respeito do fenômeno estudado, bem como integrar diferentes indicadores de avaliação e, consequentemente, ter decisões mais assertivas em cenários distintos.

3.5 Conclusões

Os maiores picos de X_{CO_2} foram concentrados no final da estação seca e início da chuvosa, entre os meses de outubro a dezembro. Os anos de 2019 e 2020 corresponderam às maiores concentrações de X_{CO_2} , coincidindo com os níveis mais críticos de desmatamento na Amazônia brasileira. Além disso, os índices de vegetação foram mais sensíveis na estação seca, que por sua vez também apresentou a maior amplitude térmica e resultou em níveis mais elevados de X_{CO_2} . Identificamos que os sinais de SIF foram inversamente relacionados com X_{CO_2} , indicando que a atividade fotossintética contribui para o sequestro de carbono e redução da concentração de CO_2 atmosférico.

Detectamos uma relação espacial direta de anomalias positivas de X_{CO_2} (fontes de emissão de carbono) próximas aos cultivos agrícolas, unidades de conservação e terras indígenas afetadas pelo desmatamento, especialmente nas regiões sudeste do

Pará e norte do Mato Grosso. Por outro lado, as unidades de conservação mais preservadas, como a do norte do estado de Rondônia, parecem atuar como sumidouros de carbono. Essa dinâmica destaca a maior suscetibilidade e vulnerabilidade de áreas legalmente protegidas, que podem mudar de sumidouros para fontes significativas de carbono para a atmosfera.

Desse modo, o sensoriamento remoto é uma ferramenta estratégica para o monitoramento da dinâmica espacial e temporal dos índices de vegetação e fluxos de carbono, principalmente em áreas naturais, auxiliando na identificação de potenciais fontes e sumidouros de carbono. Diante do cenário crescente de desmatamento da Amazônia, essas descobertas reforçam a importância da adoção e implementação de políticas de conservação e manejo sustentável para proteger esse bioma e mitigar as mudanças climáticas.

3.6 Referências Bibliográficas

Agbeshie AA, Abugre S, Atta-Darkwa T, Awuah R (2022) A review of the effects of forest fire on soil properties. **Journal of Forestry Research** 33:1419–1441. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01475-4>

Almeida CA de, Coutinho AC, Esquerdo JC dalla M, Adami M, Venturieri A, Diniz CG, et al. (2016) High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data. **Acta Amazonica** 46:291–302. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201505504>

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, De Moraes Gonçalves JL, Sparovek G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 22:711–28. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

Aragão LEOC, Anderson LO, et al (2018) 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications** 9:536. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>

Barbosa MLF, Delgado RC, Forsad de Andrade C, Teodoro PE, Silva Junior CA, Wanderley HS, Capristo-Silva GF (2021) Recent trends in the fire dynamics in Brazilian Legal Amazon: Interaction between the ENSO phenomenon, climate and land use.

Environmental Development 39:200648.
<https://doi.org/10.1016/j.envdev.2021.100648>

Blackman A, Veit P (2018) Titled Amazon Indigenous Communities Cut Forest Carbon Emissions. **Ecological Economics** 153:56–67.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.06.016>

Bordonal R de O, Carvalho JLN, Lal R, de Figueiredo EB, de Oliveira BG, La Scala N (2018) Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development** 38:13. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0490-x>

Canteral KFF, Vicentini ME, De Lucena WB, De Moraes MLT, Ferraudo AS, Peruzzi NJ, La Scala Jr. N, Panosso AR (2023) Machine learning for prediction of soil CO₂ emission in tropical forests in the Brazilian Cerrado. **Environmental Science and Pollution Research** 30:61052–61071. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26824-6>

Crisp D, Fisher BM, et al. (2012) The ACOS CO₂ retrieval algorithm - Part II: Global X CO₂ data characterization. **Atmospheric Measurement Techniques** 5:687–707. <https://doi.org/10.5194/amt-5-687-2012>

Da Costa LM, de Araújo Santos GA, de Mendonça GC, Moraes Filho LF, De Meneses KC, Rolim G de S, La Scala Jr. N (2022) Spatiotemporal variability of atmospheric CO₂ concentration and controlling factors over sugarcane cultivation areas in southern Brazil. **Environment, Development and Sustainability** 24:5694–5717. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01677-6>

Da Costa LM, de Mendonça GC, Araújo Santos GA de, Moraes JR da SC de, Colombo R, Panosso AR, La Scala Jr. N (2023) High spatial resolution solar-induced chlorophyll fluorescence and its relation to rainfall precipitation across Brazilian ecosystems. **Environmental Research** 218: 114991. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114991>

Da Silva RM, Lopes AG, Santos CAG (2023) Deforestation and fires in the Brazilian Amazon from 2001 to 2020: Impacts on rainfall variability and land surface temperature. **Journal of Environmental Management** 326: 116664. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116664>

De Campos MO, Pellegrino Cerri CE, La Scala Jr. N (2022) Atmospheric CO₂, soil carbon stock and control variables in managed and degraded pastures in central Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment** 28:100848. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100848>

De Sales F, Santiago T, Biggs TW, Mullan K, Sills EO, Monteverde C (2020) Impacts of Protected Area Deforestation on Dry-Season Regional Climate in the Brazilian Amazon. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres** 125: e2020JD033048. <https://doi.org/10.1029/2020JD033048>

De Souza Maria L, Rossi FS, Costa LM da, Campos MO, Blas JCG, Panosso AR, La Scala Jr. N (2023) Spatiotemporal analysis of atmospheric XCH₄ as related to fires in the Amazon biome during 2015–2020. **Remote Sensing Applications: Society and Environment** 30:100967. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100967>

De Souza TAF, Silva LJR da, Nascimento G dos S (2023) Amazonian deforestation and its influence on soil biotic factors and abiotic properties. **Pedobiologia** 97–98:150865. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2023.150865>

Dos Santos AM, da Silva CFA, de Melo SN, de Almeida Junior PM, Bueno LF (2022) Influence of deforestation inside and outside indigenous lands in the Brazilian Amazon Biome. **Regional Environmental Change** 22:77. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01937-9>

Frankenberg C, O'Dell C, Berry J, Guanter L, Joiner J, Köhler P, Pollock R, Taylor TE (2014) Prospects for chlorophyll fluorescence remote sensing from the Orbiting Carbon Observatory-2. **Remote Sensing of Environment** 147:1–12. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.007>

Gatti LV., Basso LS, et al. (2021) Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature** 595:388–93. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>

Gatti LV, Gloor M, et al. (2014) Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. **Nature** 506:76–80. <https://doi.org/10.1038/nature12957>

Gujarati DN, Dawn C, Porter (2011) *Econometria básica-5*. Editora Amgh.

Hakkarainen J, Ialongo I, Tamminen J (2016) Direct space-based observations of anthropogenic CO₂ emission areas from OCO-2. **Geophysical Research Letters** 43:11,400–11,406. <https://doi.org/10.1002/2016GL070885>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023). Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/mapas-regionais/15819-amazonia-legal.html>. Acessado em 10 de dezembro de 2023.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Projeto PRODES: Monitoramento da floresta Amazônica brasileira por meio de satélite (2023). Disponível em: http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/legal_amazon/increments. Acessado em 12 de dezembro de 2023.

La Scala Jr. N, Bolonhezi D, Pereira GT (2006) Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. **Soil and Tillage Research** 91:244–8. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.11.012>

Lima LS, Coe MT, Soares Filho BS, Cuadra S V., Dias LCP, Costa MH, Lima LS, Rodrigues HO (2014) Feedbacks between deforestation, climate, and hydrology in the Southwestern Amazon: Implications for the provision of ecosystem services. **Landscape Ecology** 29:261–74. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9962-1>

Luo, Y., Zhou, X.U., 2006. Soil respiration and the environment. Academic Press. Elsevier, San Diego.

MapBiomas, 2023. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/estatisticas/>. Acessado em 17 de dezembro de 2023.

Migliavacca M, Perez-Priego O, et al. (2017) Plant functional traits and canopy structure control the relationship between photosynthetic CO₂ uptake and far-red sun-induced fluorescence in a Mediterranean grassland under different nutrient availability. **New Phytologist** 214:1078–1091. <https://doi.org/10.1111/nph.14437>

Morais Filho LFF, Meneses KC de, Santos GA de A, Bicalho E da S, Rolim G de S, La Scala Jr. N (2021) xCO₂ temporal variability above Brazilian agroecosystems: A remote sensing approach. **Journal of Environmental Management** 288: 112433. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112433>

Nepstad DC, De Carvalho CR, Davidson EA, Jipp PH, Lefebvre PA, Negreiros GH, Vieira S (1994) The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. **Nature** 372:666-669. <https://doi.org/10.1038/372666a0>

Parazoo NC, Bowman K, et al. (2013) Interpreting seasonal changes in the carbon balance of southern Amazonia using measurements of XCO₂ and chlorophyll fluorescence from GOSAT. **Geophysical Research Letters** 40:2829–33. <https://doi.org/10.1002/grl.50452>

Pereira EJAL, Silveira Ferreira PJ, de Santana Ribeiro LC, Sabadini Carvalho T, de Barros Pereira HB (2019) Policy in Brazil (2016–2019) threaten conservation of the Amazon rainforest. **Environmental Science & Policy** 100:8–12. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.06.001>

Qin Y, Xiao X, Wigneron JP, et al. (2021) Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon. **Nature Climate Change** 11:442–448. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01026-5>

R Core Team (2023) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <https://www.R-project.org/>. Acessado em 8 de março de 2023.

Reygadas Y, Spera SA, Salisbury DS (2023) Effects of deforestation and forest degradation on ecosystem service indicators across the Southwestern Amazon. **Ecological Indicators** 147:109996. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109996>

Rossi FS, Santos GAA, et al. (2022) Carbon dioxide spatial variability and dynamics for contrasting land uses in central Brazil agricultural frontier from remote sensing data. **Journal South American Earth Sciences** 116:103809. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103809>

Rossi FS, La Scala Jr. N, Capristo-Silva GF, Della-Silva JL, Teodoro LPR, Almeida G, Tiago AV, Teodoro PE, Da Silva Junior CA (2023) Implications of CO₂ emissions on the main land and forest uses in the Brazilian Amazon. **Environmental Research** 227:115729. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115729>

Santos GAA, Moitinho MR, de Oliveira Silva B, Xavier CV, Teixeira DDB, Corá JE, La Scala Jr. N (2019) Effects of long-term no-tillage systems with different succession cropping strategies on the variation of soil CO₂ emission. **Science of the Total Environment** 686:413–24. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.398>

Santos GA de A, Morais Filho LFF, Meneses KC de, Silva Junior CA da, Rolim G de S, La Scala Jr. N (2022) Hot spots and anomalies of CO₂ over eastern Amazonia,

Brazil: A time series from 2015 to 2018. **Environmental Research** 215: 114379. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114379>

Silva B de O, Moitinho MR, Santos GA de A, Teixeira DDB, Fernandes C, La Scala Jr. N (2019) Soil CO₂ emission and short-term soil pore class distribution after tillage operations. **Soil and Tillage Research** 186:224–32. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.10.019>

Silva-Junior CHL, Silva FB, et al. (2023) Brazilian Amazon indigenous territories under deforestation pressure **Scientific Reports** 13: 5851. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32746-7>

Soares-Filho B, Moutinho P, et al. (2010) Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. **Proceedings of the National Academy of Sciences** 107:10821–10826. <https://doi.org/10.1073/pnas.0913048107>

Staal A, Flores BM, Aguiar APD, Bosmans JHC, Fetzer I, Tuinenburg AO (2020) Feedback between drought and deforestation in the Amazon. **Environmental Research Letters** 15: 044024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab738e>

Tavanti RFR, Montanari R, et al (2020) What is the impact of pasture reform on organic carbon compartments and CO₂ emissions in the Brazilian Cerrado? **Catena** 194:104702. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104702>

Ussiri DAN, Lal R (2009) Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio. **Soil and Tillage Research** 104:39–47. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.11.008>

Verma M, Schimel D, et al. (2017) Effect of environmental conditions on the relationship between solar-induced fluorescence and gross primary productivity at an OzFlux grassland site. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences** 122:716–733. <https://doi.org/10.1002/2016JG003580>

Vicentini ME, Pinotti CR, Hirai WY, de Moraes MLT, Montanari R, Filho MCMT, Milori DMBP, La Scala Jr. N, Panosso AR (2019) CO₂ emission and its relation to soil temperature, moisture, and O₂ absorption in the reforested areas of Cerrado biome, Central Brazil. **Plant and Soil** 444:193–211. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04262-z>

Wan Z, Hook S, Hulley G (2015) MOD11A2 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A2.006>

Xavier CV, Moitinho MR, Teixeira DDB, de Araújo Santos GA, Corá JE, La Scala Jr. N (2020) Crop rotation and sequence effects on temporal variation of CO₂ emissions after long-term no-till application. **Science of the Total Environment** 709:136107. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136107>

Xiao X, Zhang Q, Saleska S, Hutyrá L, De Camargo P, Wofsy S, Frolking S, Boles S, Keller M, Moore B (2005) Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. **Remote Sensing of Environment** 94:105–122. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.08.015>

Yu L, Wen J, Chang CY, Frankenberg C, Sun Y (2019) High-Resolution Global Contiguous SIF of OCO-2. **Geophysical Research Letters** 46:1449–1458. <https://doi.org/10.1029/2018GL081109>

Zemp DC, Schleussner CF, Barbosa HMJ, Hirota M, Montade V, Sampaio G, Staal A, Wang-Erlandsson, Ramming A (2017) Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. **Nature Communications** 8:14681. <https://doi.org/10.1038/ncomms14681>

Zhang P, Bounoua L, Imhoff ML, Wolfe RE, Thome K (2014) Comparison of MODIS Land Surface Temperature and Air Temperature over the Continental USA Meteorological Stations. **Canadian Journal of Remote Sensing** 40:110–22. <https://doi.org/10.1080/07038992.2014.935934>