

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

**VARIABILIDADE TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO ATMOSFÉRICA DE CO₂,
FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA INDUZIDA PELO SOL E NDVI EM ÁREAS
COM DIFERENTES USOS AGRÍCOLAS NO CENTRO-SUL DO BRASIL**

Luiz Fernando Favacho Morais Filho
Engenheiro Agrônomo

2018

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

**VARIABILIDADE TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO ATMOSFÉRICA DE CO₂,
FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA INDUZIDA PELO SOL E NDVI EM ÁREAS
COM DIFERENTES USOS AGRÍCOLAS NO CENTRO-SUL DO BRASIL**

Luiz Fernando Favacho Morais Filho

Orientador: Newton La Scala Júnior

Coorientador: Glauco de Souza Rolim

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

2018

M827v Morais Filho, Luiz Fernando Favacho
Variabilidade temporal da concentração atmosférica de CO₂,
fluorescência da clorofila induzida pelo sol e NDVI em áreas com
diferentes usos agrícolas no centro-sul do Brasil / Luiz Fernando
Favacho Morais Filho. -- Jaboticabal, 2018
xvi, 57 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2018
Orientador: Newton La Scala Junior
Coorientador: Glauco de Souza Rolim
Banca examinadora: Alan Rodrigo Panosso, Jansle Vieira Rocha
Bibliografia

1. OCO-2. 2. Sensoriamento remoto. 3. Mudanças climáticas. I.
Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU-631.4:528.8

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Jaboticabal/SP - Karina Gimenes Fernandes - CRB 8/7418



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: VARIABILIDADE TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO ATMOSFÉRICA DE CO₂, FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA INDUZIDA PELO SOL E NDVI EM ÁREAS COM DIFERENTES USOS AGRÍCOLAS NO CENTRO-SUL DO BRASIL

AUTOR: LUIZ FERNANDO FAVACHO MORAIS FILHO

ORIENTADOR: NEWTON LA SCALA JUNIOR

COORIENTADOR: GLAUCO DE SOUZA ROLIM

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Prof. Dr. JANSLE VIEIRA ROCHA (Videoconferência)
Departamento de Planejamento da Produção Agropecuária/Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP / Campinas/SP

Prof. Dr. ALAN RODRIGO PANOSSO
Departamento de Ciências Exatas / FCAV-UNESP/Jaboticabal-SP

Jaboticabal, 01 de agosto de 2018

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Luiz Fernando Favacho Morais Filho – Filho de Rosa Maria Ribeiro Morais e Luiz Fernando Favacho Morais, nascido em Belém, Pará, no dia 24 de junho de 1994. Formado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA, campus Belém, em 16 de fevereiro de 2017. Foi membro não-bolsista do Programa de Educação Tutorial em Ciências do Solo – PET Solos da UFRA em 2013, onde desenvolveu ações de educação ambiental, reflorestamento e assistência técnica à pequenos produtores familiares na região. Foi bolsista de iniciação científica do CNPq durante os anos 2013 – 2017, onde desenvolveu pesquisas voltadas à propriedades químicas e biológicas de solos em sistema plantio direto no estado do Pará, e nutrição e manejo da cultura da soja, além de continuar desenvolvendo ações no grupo PET Solos. Foi membro do grupo de pesquisa “Solos e Nutrição de Plantas” na UFRA. Em março de 2017 ingressou no curso de mestrado em Agronomia (Ciência do Solo) na Universidade Estadual Paulista – UNESP, campus de Jaboticabal. É integrante do grupo Caracterização de aspectos diversos da emissão de CO₂ do solo.

*“Das dores vêm os sonhos
Dos sonhos, vêm as visões
Das visões, vêm as pessoas
Das pessoas, vem o poder
E deste poder, vem a mudança”*

**Peter Gabriel – Four Black
Paintings**

DEDICO

Às pessoas que sempre foram e sempre serão minha base e minha fonte de forças em tudo o que faço: minha mãe, Rosa Maria, meu Pai, Luiz Fernando e minhas irmãs, Carla e Camilla.

AGREDECIMENTOS

A Deus, por sempre ter estado comigo, pela força e determinação, e pelas bênçãos.

À minha mãe, Rosa Maria Ribeiro Morais, por ter contribuído muito em minha formação pessoal, por ter abdicado de muito em prol de minhas irmãs e eu, e por sempre ter me motivado em tudo o que faço. Sou muito grato por tudo o que a senhora fez e tem feito por mim, espero um dia poder retribuir.

Ao meu pai, Luiz Fernando Favacho, que sempre se preocupou comigo e mesmo distante se fez presente em muitos momentos. Por me apoiar sempre mesmo em situações onde a minha vontade se fez contrária à sua.

Às minhas irmãs, Carla e Camilla, que são as melhores irmãs que eu poderia ter! Que sempre me motivaram a seguir, que muito fizeram por mim quando não havia necessidade. Além disto, me deram sobrinhos que eu amo demais e fico morrendo de saudades sempre! Gostaria de expressar aqui minha gratidão a vocês duas, vocês são incríveis.

Ao meu orientador, Professor Newton La Scala Júnior, pelas contribuições científicas, companheirismo e por ser este orientador presente, que sempre me motivou no desenvolvimento dessa pesquisa, e não mediu esforços durante essa caminhada.

Ao professor Glauco de Souza Rolim, meu co orientador, que muito se dispôs em prol deste trabalho, tornando a sua execução possível. Obrigado pelos momentos de apoio, suporte e descontração.

À minha madrinha, tia Lúcia Ribeiro, que foi quase que uma segunda mãe em muitos momentos da minha vida, que sempre cuidou, olhou por mim e acreditou em mim.

À minha tia Fabiola Ribeiro, que durante este curso me apoio muito, mesmo à distância, mandando palavras de motivação e por cuidar da minha mãe em momentos que foram necessários.

Aos meus tios, tias, primos e primas, minha eterna gratidão a todos vocês, pelos momentos de companhia e lazer que tivemos ao longo de toda minha vida, por serem essa família incrível que vocês são.

Às minhas maiores e melhores amigas de infância Paula e Mariana, que são amizades que cultivo até hoje. Agradeço a todos os momentos que tivemos, e pelo apoio que vocês me deram em várias etapas da minha vida. Arrisco a dizer que muitas vezes acreditaram mais em mim do que eu mesmo.

À minha amiga Marcilene Machado dos Santos, por ter me motivado em diversas escalas da vida, por ter me acolhido em Jaboticabal e por providenciar o suporte que eu precisei em muitos momentos. Agradeço a ti por tudo isso e pelos milhares de lanchinhos que fizemos durante esse curso.

Aos (incríveis) amigos que fiz durante a graduação, e que pretendo levar para toda a vida: Amanda de Castro Segtowich, Ana Renata Abreu de Moraes, Diego Luiz Pureza Barreiras, Larissa da Silva Miranda, Maynara Santos Gomes, Mila Façanha Gomes. Obrigado por serem esses amigos presentes mesmo com a distância em que nos encontramos.

À Kamila Cunha de Meneses, pela amizade e contribuição intelectual. Esta pesquisa não teria caminhado se não fosse o teu suporte, sou muito grato!

Aos “amigos de orientador”, Bruna Oliveira da Silva e Gustavo André de Araujo dos Santos, pelas contribuições científicas e momentos de descontração.

Aos amigos de departamento: Katharine Viana, Taynara Valeriano, Thiago Águas, José Reinaldo Moraes, Maria Elisa Vincentini, Clariana Valadares, Aline Ferreira, Kárita Almeida pela amizade, contribuições científicas e apoio.

Aos amigos que fiz durante essa jornada de mestrado: Bruno Sousa, Gelza Teixeira, Márcia Masson e Sabrina Nascimento, as nossas noites em claro estudando para as disciplinas jamais serão esquecidas! Muito obrigado pelo suporte e companheirismo nessa caminhada.

À Valquíria Santos, por ter me acolhido em Jaboticabal e por ter praticamente se tornado uma mãe que eu encontrei aqui.

Às funcionárias do Departamento de Ciências Exatas, Maria José Servidone Trizólio, Shirley Aparecida Martineli de Sousa, Adriana Elisabete Takakura.

Ao meu orientador de graduação e iniciação científica, Professor Mário Lopes, por ter acreditado em mim, e por ter sido responsável pelo meu ingresso nesta carreira científica.

Ao professor Rafael Gomes Viana, que em muito me ajudou durante a graduação, pelas palavras de motivação e por ser sempre disponível quando precisava. O meu muito obrigado.

Ao programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo) pela oportunidade de realizar a minha pesquisa, e pelo incentivo durante a realização deste estudo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado, 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

| | |
|---|-----|
| Resumo | X |
| Abstract | XI |
| Lista de abreviaturas e siglas | XII |
| Lista de tabelas | XIV |
| Lista de figuras | XV |
| 1 Introdução | 16 |
| 2 Revisão de literatura | 19 |
| 2.1 Fluxos de CO ₂ na agricultura..... | 19 |
| 2.2 Densoriamento remoto na estimação da concentração de CO ₂ atmosférico | 20 |
| 2.3 Fluorescência Da Clorofila Induzida Pelo Sol (SIF)..... | 22 |
| 2.4 Índice De Vegetação Por Diferença Normalizada – NDVI..... | 23 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS | 24 |
| 3.1 Áreas de estudo | 24 |
| 3.2 Dados meteorológicos, NDVI, SIF E X _{CO2} | 25 |
| 3.3 Estádios fenológicos e desenvolvimento dos cultivos | 26 |
| 3.3.1 Estádios fenológicos e desenvolvimento da cana-de-açúcar no estado de são paulo | 26 |
| 3.3.2 Estádios fenológicos e desenvolvimento da soja e do milho no estado do paraná | 27 |
| 3.3.3 Desenvolvimento das Pastagens | 28 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 28 |
| 4.1 Características Climáticas | 28 |
| 4.1.1 Pradópolis – SP (Cana-de-açúcar)..... | 28 |
| 4.1.2 Santo Antônio Do Paraíso – PR (Rotação Soja-Milho) | 29 |
| 4.1.3 Águas Claras – MS (Pastagem) | 30 |
| 4.2 NDVI..... | 31 |
| 4.2.1. Pradópolis – SP (Cana-de-açúcar)..... | 31 |
| 4.2.2. Santo Antônio Do Paraíso – PR (Rotação Soja-Milho) | 32 |
| 4.2.3. Águas Claras – MS (Pastagem) | 34 |
| 4.3. SIF E X _{CO2} | 35 |
| 4.3.1. Pradópolis – SP (Cana-de-açúcar)..... | 35 |
| 4.3.2. Santo Antônio do Paraíso – PR (Rotação Soja-Milho) | 38 |

| | |
|---|-----------|
| 4.3.3. Águas Claras – MS (Pastagem) | 40 |
| Conclusões | 44 |
| Referências Bibliográficas | 45 |

VARIABILIDADE TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO ATMOSFÉRICA DE CO₂, FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA INDUZIDA PELO SOL E NDVI EM ÁREAS COM DIFERENTES USOS AGRÍCOLAS NO CENTRO-SUL DO BRASIL.

RESUMO – O Brasil é um país que apresenta grande parte do seu território destinado a atividades agrícolas. Os cultivos de cana-de-açúcar, soja e milho têm grande importância na economia nacional. As práticas de manejo de cultivos e do solo estão intimamente ligadas à emissão de CO₂ e a produtividade dos cultivos. Essas práticas também interferem no potencial de fotossíntese, que pode ser medido remotamente por satélites pela fluorescência da clorofila induzida pelo sol (SIF), e pelo Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada (NDVI). O monitoramento do CO₂ atmosférico via satélite vem sendo amplamente utilizado na compreensão dos fluxos de carbono. Neste estudo investigamos a variabilidade temporal do X_{CO₂}, o SIF e o NDVI em áreas com os principais cultivos do centro sul do Brasil, cana-de-açúcar, rotação soja-milho e pastagens. O estudo foi realizado em áreas correspondentes à três usos agrícolas, sendo cana-de-açúcar (Pradópolis – SP), rotação soja-milho (Santo Antônio do Paraíso – PR) e pastagens (Águas Claras – MS). As variáveis analisadas foram Temperatura do ar, Pluviosidade, NDVI, SIF e X_{CO₂}. Todos os dados foram ajustados em escalas mensais. A Temperatura do ar foi obtida através da plataforma NASAPOWER, a Pluviosidade através da plataforma NASA GIOVANNI, NDVI via SATveg EMBRAPA e SIF e X_{CO₂} a partir da plataforma OCO-2 da NASA. O período de estudo foi de outubro/2014 a outubro/2016, totalizando uma série temporal de dois anos e todos os dados foram estratificados em escala mensal. Nas séries temporais de NDVI, SIF e X_{CO₂} foram removidas as tendências pelo método da regressão. A SIF variou de 0.141 a 0.6 W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹ na cana-de-açúcar, 0.01 a 0.724 W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹ em grãos e 0.02 a 2.24 W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹ na pastagem. O X_{CO₂} oscilou de 397.9 a 400.5 ppm na cana-de-açúcar, de 396.8 a 404.201 ppm em grãos, e de 400.4 a 407.3 ppm na pastagem. A SIF apresentou correlação linear positiva significativa com o NDVI na cana-de-açúcar e nas pastagens, ao passo que apresentou correlação linear negativa com o X_{CO₂} nas três áreas de estudo. O NDVI e a SIF acompanharam a fenologia dos cultivos nas regiões. O pasto apresentou o maior pico de SIF entre as três áreas de estudo.

Palavras-chave: OCO-2, Sensoriamento Remoto, Mudanças Climáticas, Gases de Efeito Estufa.

TEMPORAL VARIABILITY OF CO₂ ATMOSPHERIC CONCENTRATION, SOLAR INDUCED FLUORESCENCE AND NDVI IN AREAS UNDER DIFFERENT AGRICULTURAL USES IN THE SOUTH-CENTRAL OF BRAZIL

ABSTRACT – Brazil's territory is covered, mostly, by agricultural activities. Sugarcane, soybean and corn cultivation and livestock plays a major role in the national economy. Management practices in the agricultural activity are correlated to CO₂ emission. These practices can affect the crop biomass production and photosynthesis activity. Solar-induced Chlorophyll Fluorescence (SIF) can be used to estimate photosynthesis in cultivation areas. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) has been used to estimate biomass production, soil coverage and crops phenology. Recently, atmospheric CO₂ monitored using remote sensing has been widely used in the understanding of carbon fluxes, correlating it to other parameter such as gross and net primary production or even the SIF. The aim of this study was to understand the temporal variability of X_{CO₂}, SIF and NDVI in areas under sugarcane cultivation, soybean-corn rotation and grassland to livestock production in the South-Central region of Brazil. This research was conducted in three localities, each one corresponding to one agricultural use: Pradópolis – SP (sugarcane cultivation), Santo Antônio do Paraíso (soybean-corn) and Águas Claras – MS (grassland and pasture to livestock). We analyzed temperature, pluviosity, NDVI, SIF and X_{CO₂}. Temperature and pluviosity data were obtained using the NASAPOWER and NASA GIOVANNI platform, respectively. NDVI was obtained in the SATveg project (EMBRAPA). SIF and X_{CO₂} data were obtained in the OCO-2 program. We collected data of a 2-year time series (from October/2014 to October/2016). All these data were transformed to monthly scale. The SIF values of sugarcane varied from 0.141 to 0.6 W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹, from 0.01 to 0.724 W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹ in cropland (soybean-corn), and 0.02 a 2.24 W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹ in the pasture. The X_{CO₂} varied from 397.9 to 400.5 ppm in the sugarcane cultivation, from 396.8 to 404.201 ppm in the cropland and 400.4 to 407.3 ppm in the pasture. SIF showed a significative positive linear correlation to NDVI in sugarcane and pasture, and a significative negative linear correlation to X_{CO₂} in all áreas. The NDVI and SIF parameters were sensible to the plants phenology.

Keywords: OCO-2, Remote Sensing, Climate Change, Greenhouse Gases

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

% - Porcentagem

°C – Grau Celsius

CANASAT – Monitoramento da Cana-de-açúcar via imagens de satélite

CO₂ – Dióxido de carbono

EVI - Índice de Vegetação Melhorado

GOME-2 - Global Ozone Monitoring Experiment–2

GOSAT - Greenhouse gases Observing SATellite

GPP - Produtividade Primária Bruta

ha – Hectare

km – Quilômetro

LANDSAT - Land --Remote Sensing Satellite

Lat – Latitude

Long – Longitude

mm – Milímetro

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NASA / GIOVANNI – Geospatial Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure

NASA / POWER – NASA's Prediction of Worldwide Energy Resources

NDVI – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada

nm – NANÔMETRO

OCO-2 – Orbiting Carbon Observatory 2

r - Coeficiente de correlação de Pearson

SATveg – Sistema de Análise Temporal da Vegetação

SCIAMACHY - SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartography

SIF - Fluorescência da Clorofila Induzida pelo Sol

T – Temperatura

W m⁻² sr⁻¹ μn⁻¹ - Watt por metro quadrado por esterradiano por micrômetro

X_{CO2} - Coluna média de CO₂ atmosférico

LISTA DE TABELAS

| | Página |
|---|---------------|
| Tabela 1 - Sensores e plataformas utilizados de acordo com cada variável, com suas respectivas resoluções temporais e espaciais..... | 26 |
| Tabela 2: Estatística descritiva dos valores de NDVI na cana-de-açúcar..... | 31 |
| Tabela 3: Estatística descritiva dos valores de NDVI na rotação soja-milho..... | 33 |
| Tabela 4: Estatística descritiva dos valores de NDVI no pasto | 34 |
| Tabela 5: Estatística descritiva dos valores de SIF e X_{CO_2} na cana-de-açúcar | 35 |
| Tabela 6: Tabela de correlação de Pearson para as variáveis SIF e X_{CO_2} na cana-de-açúcar | 38 |
| Tabela 7: Análise de Variância da regressão linear de X_{CO_2} em função de SIF na cana-de-açúcar | 38 |
| Tabela 8: Estatística descritiva dos valores de SIF e X_{CO_2} na rotação soja-milho ... | 38 |
| Tabela 9: Tabela de correlação de Pearson para as variáveis SIF e X_{CO_2} na rotação soja-milho | 40 |
| Tabela 10: Análise de Variância da regressão linear de X_{CO_2} em função de SIF na rotação soja-milho..... | 40 |
| Tabela 11: Estatística descritiva dos valores de SIF e X_{CO_2} no pasto..... | 41 |
| Tabela 12: Tabela de correlação de Pearson para as variáveis SIF e X_{CO_2} no pasto | 43 |
| Tabela 13: Análise de Variância da regressão linear de X_{CO_2} em função de SIF no pasto | 43 |

LISTA DE FIGURAS

| | Página |
|---|---------------|
| Figura 1 – Mapa de localização dos municípios referentes às superfícies estudadas, onde predominam os usos agrícolas de pasto, cana-de-açúcar e rotação soja-milho..... | 25 |
| Figura 2 – Fenologia da Cana-de-Açúcar na região centro-sul. | 27 |
| Figura 3 – Fenologia da cultura da soja e do milho no Paraná. | 28 |
| Figura 4 – Temperatura média e precipitação mensal em Pradópolis – SP. | 29 |
| Figura 5 – Temperatura média e precipitação mensal em Santo Antônio do Paraíso – PR. | 30 |
| Figura 6 – Temperatura média e precipitação mensal em Águas Claras – MS. | 31 |
| Figura 7 – NDVI mensal na cana-de-açúcar. | 32 |
| Figura 8 – NDVI mensal na rotação soja-milho. | 34 |
| Figura 9 – NDVI mensal em pastagens. | 35 |
| Figura 10 – Médias mensais de Fluorescência da Clorofila Induzida pelo Sol (SIF) e Coluna Média de CO ₂ (X _{CO2}) na localidade de Pradópolis – SP. | 37 |
| Figura 11 – Relação entre a coluna média de CO ₂ (X _{CO2}) e a fluorescência da clorofila induzida pelo sol (SIF) na localidade de Pradópolis – SP. | 37 |
| Figura 12 – Médias mensais de Fluorescência da Clorofila Induzida pelo Sol (SIF) e Coluna Média de CO ₂ (X _{CO2}) na localidade de Santo Antônio do Paraíso – PR. | 39 |
| Figura 13 – Relação entre a coluna média de CO ₂ (X _{CO2}) e a fluorescência da clorofila induzida pelo sol (SIF) na localidade de Santo Antônio do Paraíso – PR. | 40 |
| Figura 14 - Médias mensais de Fluorescência da Clorofila Induzida pelo Sol (SIF) e Coluna Média de CO ₂ (X _{CO2}) na localidade de Águas Claras – MS. | 42 |

Figura 15 - Relação entre a coluna média de CO_2 (X_{CO_2}) e a fluorescência da clorofila induzida pelo sol (SIF) na localidade de Águas Claras - MS.43

1 INTRODUÇÃO

A agricultura é uma atividade que contribui significativamente para a emissão de CO₂ para a atmosfera, assim como também tem um importante papel na mitigação do mesmo. Algumas práticas, como a substituição de adubos químicos por esterco animal, e manutenção dos restos vegetais sobre o solo após o ciclo da cultura tem grande impacto sobre o estoque de carbono do solo, aumentando gradativamente a concentração deste (Lun et al., 2016). Recentemente, tem-se notado uma redução nas taxas de aumento de CO₂ atmosférico, e, que poderia estar diretamente envolvido com a utilização de práticas na agricultura mais sustentáveis, que favorecem o acúmulo de carbono no solo (Keenan et al., 2016).

Práticas de uso e manejo da terra na agricultura podem afetar diretamente a emissão de CO₂, possibilitando o acúmulo deste na atmosfera e, conseqüentemente, impactando no efeito estufa (Lal, 2009). Por menores que possam parecer, as mudanças no fluxo de CO₂ emitido pelo solo podem ser consideradas implicações na concentração de CO₂ atmosférico, e, conseqüentemente, no efeito estufa (Song et al., 2012).

A cana-de-açúcar é a principal cultura produtora de açúcar e bioenergia mundial, fornecendo cerca de 75% do açúcar produzido para o consumo humano (Phan et al., 2016). O uso da cana-de-açúcar como fonte de bioenergia se justifica especialmente pelo balanço favorável quando se considera os gases de efeito estufa associados ao processo de produção (Fargione et al., 2008). Além disto, o etanol oriundo da cana-de-açúcar já vem sendo amplamente utilizado em diversos setores, descartando-se o de transportes, e, tem sido considerado como uma alternativa sustentável à utilização de combustíveis fósseis na mitigação de gases de efeito estufa, e, também, o cultivo de cana-de-açúcar possui um alto índice de absorção de CO₂, tornando o balanço de carbono da atividade positivo (La Scala Júnior et al., 2012; Jaiswal et al., 2017). A opção de manejo associada a colheita mecanizada, ao invés de queima prévia do canavial, resulta em menores emissões de CO₂ para a atmosfera e, conseqüentemente, menor pegada de CO₂ associada ao etanol produzido nessas áreas (Bordonal et al. 2017; Bordonal et al., 2018).

As culturas anuais, como soja e milho, possuem também fundamental importância no Brasil (Zhong et al., 2016). No Brasil, a área plantada de soja em 2017

foi de quase 34 milhões de hectares, estando mais da metade concentrada principalmente nos estados do Mato Grosso (9.4 milhões), Rio Grande do Sul (5.7 milhões) e Paraná (5.5 milhões). Já o milho, em 2017 alcançou a marca de 12.35 milhões de hectares de área plantada, tendo como principais estados o Mato Grosso (4.7 milhões), o Paraná (2.41 milhões), Mato Grosso do Sul (1.8 milhões) e Goiás (1.36 milhões) (IBGE, 2018).

A maior extensão de áreas agrícolas no Brasil é destinada ao cultivo de pastagens para a atividade pecuária e esta atividade é, economicamente, uma das mais importantes do País (Scaramuzza *et al.*, 2017). Segundo o IBGE (2006) as áreas de pastagens no território brasileiro durante o censo agropecuário de 2006, somando as plantadas e naturais, se deu na faixa dos 160 milhões de hectares. Os estados que compõem a maior parte da área de pastagens plantadas são o Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás, com 15.8, 13.9 e 11.6 milhões de hectares, respectivamente, destinados à atividade. O uso da terra com finalidade para pastagem no país foi muito caracterizado por processos de desmatamentos, de modo que para a implantação da atividade pecuária, muitas áreas de mata nativa tiveram que ser abertas, e conseqüentemente, desmatadas (Domingues e Bermann, 2005; Carvalho e Domingues, 2016).

Observações globais de satélites sensíveis às variações de CO₂ atmosférico vêm contribuindo significativamente para a melhor compreensão de fontes de emissão de CO₂ e regiões de sumidouros destes gases (Buchwitz *et al.*, 2015; Nelson *et al.*, 2016; Fischer *et al.*, 2017; Kohler *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2018).

Muitos satélites e plataformas foram lançados com a finalidade de quantificar e estimar os fluxos de CO₂, como o SCIAMACHY (Bovensmann *et al.*, 1999), o GOSAT (Kasuya *et al.*, 2009) e o OCO-2 (O'dell *et al.*, 2012). Apesar de todos os esforços, poucos trabalhos têm sido destinados à investigação do papel de culturas agrícolas e ciclos de manejo associados à sua produção, sobre a concentração regional de CO₂ atmosférico.

Durante a fotossíntese, parte da radiação solar absorvida pela molécula de clorofila é reemitida num processo de fluorescência nos comprimentos de ondas entre 690 e 800nm. Fazendo uso de espectrômetros de alta resolução é possível quantificar esta fluorescência da clorofila do espaço, o que possibilita, indiretamente, mensurar e

quantificar a atividade e eficiência fotossintética a nível global (Frankenberg et al., 2013, Sun et al., 2017).

Existem muitos estudos realizados visando a compreensão da SIF em diversas situações (Frankenberg et al., 2011; Verma et al., 2017; Köhler et al., 2018), porém, poucos relacionam diretamente esta variável com culturas agrícolas e a coluna média de CO₂ atmosférico.

O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) é uma informação que tem como principal utilização o monitoramento de vegetações. A partir do NDVI é possível constatar se há cobertura vegetal em determinada superfície, quanto possivelmente está coberto, e até mesmo, qual a principal vegetação responsável por esta cobertura, utilizando-se de padrões e séries temporais características de determinadas culturas (You et al., 2013; Mulianga et al., 2015; Guan et al., 2016; Wang et al., 2018).

Além disto, o NDVI é amplamente utilizado na indicação de biomassa de ecossistemas (He et al., 2018; May et al., 2018; Wagle et al., 2018) e, recentemente, os dados de NDVI obtidos de sensores como o Landsat e o Modis estão sendo cruzados com a SIF – Resultantes do GOSAT, GOME e OCO-2, por exemplo – de modo a explicar mais precisamente a produtividade primária bruta (Jeong et al., 2017; Li et al., 2018; Macbean et al., 2018), porém, poucos são as pesquisas que utilizam estas variáveis conjuntamente, e, menos frequentes ainda, aplicam-se à áreas de cultivos agrícolas.

Desta forma, objetivando o estudo dos fluxos de carbono na atmosfera a partir de variáveis obtidas por sensores orbitais, buscamos, neste estudo, investigar a variabilidade temporal da coluna média de CO₂ atmosférico (X_{CO_2}), da fluorescência da clorofila induzida pelo sol (SIF) e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em áreas com os principais cultivos do centro sul do Brasil: cana-de-açúcar, rotação soja-milho e pastagens.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Fluxos de CO₂ na agricultura

A agricultura mundial contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa, com emissões estimadas, para o ano de 2005, entre 5.1 a 6.1 Gt CO₂eq ano⁻¹, e, em 2015, a concentração de CO₂ atmosférico atingiu a marca de 400ppm, onde, este aumento se deu, principalmente, devido a atividades antropogênicas. Estima-se que a maior parcela deste aumento se deu por atividades de queima de combustível fóssil, desmatamento e mudança de uso da terra (IPCC, 2007; Lybbert e Sumner, 2012; WMO, 2016).

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas agrícolas da região sudeste do Brasil, sendo este o maior produtor mundial (Bordonal et al., 2018). A opção de manejo adotada durante o seu cultivo pode resultar em maiores emissões de CO₂, principalmente aqueles relacionados à colheita (Tavares et al., 2015; Bordonal et al., 2017). Práticas como a queima da cana-de-açúcar na colheita podem influenciar positivamente nas emissões de CO₂ (Panosso et al., 2011; De Figueiredo et al., 2014), assim como a manutenção dos restos vegetais podem reduzir esta emissão (Moitinho et al., 2013).

Além disto, a cana-de-açúcar apresenta um alto potencial na mitigação dos gases de efeito estufa, pois, este cultivo possui uma alta taxa de sequestro de CO₂, de modo que, somente no estado de São Paulo, esta cultura contribui com um sequestro de aproximadamente 107 Mg CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹ (La Scala Júnior et al., 2012). Um dos principais produtos da cana-de-açúcar é o etanol, que vem sendo amplamente utilizado em substituição à gasolina no setor de transportes, e, pode compensar em até 87% a emissão de CO₂ oriunda de combustíveis fósseis (Bordonal et al., 2017; Jaiswal et al., 2017)

Outra cultura que tem grande importância econômica para o país é a soja, e que em 2017 alcançou a marca de 34 milhões de hectares de área plantada (IBGE, 2018). O cultivo de soja é um dos mais mecanizados e tecnológicos do país, de modo que esta atividade se tornou altamente dependente de insumos como fertilizantes, maquinários, combustíveis e pesticidas, apresentando um alto impacto na emissão de

CO₂ (Raucci et al., 2014). A cultura da soja é uma das principais matérias-primas para a produção de biodiesel no Brasil (Nogueira, 2011), e, sua utilização representa uma redução de até 72% das emissões de CO₂ quando comparado a utilização de diesel fóssil (Cerri et al., 2017).

A atividade pecuária é a atividade que detém maior parte dos territórios agrícolas do Brasil, com cerca de 160 milhões de hectares destinados à atividade (IBGE, 2006). O avanço das pastagens no país foi muito marcado pela conversão de mata em pasto, através de processos de desmatamento (Domingues e Bermann, 2005; Carvalho e Domingues, 2016), tal conversão exerce uma influência direta nas emissões de CO₂ (IPCC, 2007). Estima-se que 18% das emissões de CO₂ anuais do Brasil são provenientes das atividades relacionadas à pecuária (Bogaerts et al., 2017). Muitas práticas de manejo das pastagens também podem afetar a emissão de CO₂, como o pastejo animal apenas quando o pasto está se apresenta com altura elevada (Brito et al., 2015), ou o manejo inadequado e conseqüente degradação (De Figueiredo et al., 2017).

A agricultura tem grande potencial para contribuir significativamente na mitigação de mudanças climáticas e redução de emissão de CO₂ a partir do sequestro deste, utilizando-se de práticas e manejos adequados (Funk et al., 2015). Práticas agrícolas que consistem em reduzir a intensidade e frequência do revolvimento do solo vem sendo utilizadas como forma de possível mitigação destes gases (La Scala Júnior et al., 2012).

Recentemente, observou-se um decréscimo nas taxas de aumento da concentração de CO₂ atmosférico, e, isto vem ocorrendo paralelamente ao aumento dos estoques de carbono em áreas agrícolas, o que pode indicar que as práticas adotadas com o intuito de mitigar este gás estão sendo positivas (Keenan et al., 2017).

2.2 Sensoriamento remoto na estimativa da concentração de CO₂ atmosférico

Recentemente o sensoriamento remoto tem contribuído muito com o estudo das quantificações das concentrações atmosféricas de CO₂ (Buchwitz et al., 2015; Nelson et al., 2016; Fischer et al., 2017; Kohler et al., 2018; Li et al., 2018). Muitas missões espaciais foram projetadas e realizadas com o intuito de quantificar e estimar

estas concentrações através de satélites e plataformas como 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).

O SCIAMACHY foi um dos primeiros satélites lançados com enfoque em compreender muitos aspectos físico-químicos do planeta Terra. Foi lançado em março de 2002 pela Agência Espacial Europeia – ESA (*European Space Agency*) dentro do programa ENVIRONMENTAL SATellite e serviu de base para outros instrumentos que viriam posteriormente (Bovensmann et al., 1999). O satélite foi terminado em maio de 2012 após perder contato.

O GOSAT é um satélite cujo principal propósito é o de monitorar as concentrações de CO₂ e CH₄ na atmosfera, acompanhado de alta resolução espectral para estimação destes dois gases e outras variáveis. Foi lançado em janeiro de 2009 com o objetivo de contribuir para administração ambiental através do monitoramento global dos principais gases de efeito estufa (Kuze et al., 2009). O GOSAT é muito utilizado para monitorar as concentrações atmosféricas de CO₂ (Guo et al., 2012), monitorar a fotossíntese através da fluorescência da clorofila induzida pelo sol (Yang et al., 2015), estimar a produtividade primária bruta (Parazoo et al., 2014) e dentre muitos outros usos.

O OCO-2 é um satélite que foi lançado em órbita em julho de 2014 pela NASA, e oferece um grande potencial nas estimativas dos fluxos de CO₂, pois, apresenta alta resolução espectral e acurácia, e uma elevada gama de dados que possibilitam uma melhor compreensão do ciclo do carbono (Frankenberg et al., 2016; Fischer et al., 2017). O OCO-2 mede a concentração de CO₂ atmosférico indiretamente através da intensidade da radiação solar refletida em função da presença de CO₂ em uma coluna de ar. Desta forma, faz-se a leitura em três faixas de comprimento de onda: a do O₂, na faixa de 0.757 a 0.775 μm, e as do CO₂, que são subdivididas em banda fraca (1.594 – 1.627 μm) e banda forte (2.043 – 2.087 μm) (Frankenberg et al., 2016). O OCO-2 é o primeiro satélite da NASA direcionado para o monitoramento dos fluxos de CO₂ atmosférico, e é um dos mais recentes atualmente, e vem apresentando usos bem diversificados, se mostrando capaz de monitorar as emissões de combustíveis fósseis

(Fischer et al., 2017), fotossíntese (Sun et al., 2017), e produção de biomassa (Li et al., 2018).

Apesar da grande variedade de estudos realizados utilizando estas ferramentas para a quantificação da concentração atmosférica de CO₂, poucos são aqueles que visam caracterizar o comportamento destes em áreas agrícolas ao longo do tempo.

2.3 Fluorescência Da Clorofila Induzida Pelo Sol (SIF)

A clorofila absorve a radiação solar para a realização da fotossíntese, e, durante este processo, parte dessa energia que foi absorvida é reemitida em comprimentos de onda maiores aos iniciais, caracterizando o fenômeno da fluorescência. Esta fluorescência ocorre em uma faixa de comprimento de onda que vai de 690 a 800 nm e, somente cerca de 1% da energia que foi absorvida é reemitida pela clorofila (Frankenberg et al., 2013).

A fluorescência da clorofila induzida pelo sol, por sua vez, se dá na faixa de sinais eletromagnéticos com comprimento de onda entre 660 e 850nm, que compreende a o vermelho e o infravermelho próximo (Sun et al., 2017).

A fluorescência da clorofila é amplamente utilizada em nível de laboratório, em escalas mais locais, e, atualmente, com o desenvolvimento de sensores específicos, foi-se possível obter estas informações a nível global, como o GOSAT e o SCIAMACHY, e, mais recentemente, o OCO-2 (Frankenberg et al., 2013; Frankenberg et al., 2014; Zhang et al., 2014).

A SIF tem muitas aplicações, mas, vem se destacando fortemente nas relações encontradas com a produtividade primária bruta (GPP). Muitos estudos indicam que estas estão intimamente ligadas, apresentando correlações lineares positivas entre as duas variáveis (Köhler et al., 2018; Li et al., 2018).

As primeiras missões espaciais que possuíam sensibilidade espectral e radiométrica que possibilitaram as mensurações da fluorescência da clorofila induzida pelo sol incluem SCIAMACHY, GOSAT e GOME-2. Porém, inicialmente, nenhum destes foi projetado especificamente para a obtenção e estudo desta variável especificamente (Sun et al., 2018).

A SIF é uma variável que está diretamente relacionada a processos fisiológicos da planta, e, devido a isto, apresenta grandes vantagens em relação ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI e o Índice de vegetação melhorado – EVI quando relacionado com a produtividade primária bruta, porém, muitos avanços ainda são necessários para utilizar todo o potencial que a SIF representa (Wood et al., 2017).

Além de estar ligado à produção de biomassa e possibilitar maior compreensão dos processos fotossintéticos a nível global, a SIF apresenta outros usos ainda mais diversificados, como suporte para a compreensão das sazonalidades de fluxos de carbono em ambientes (Parazoo et al., 2013), fenologia e variações de fotossíntese em florestas (Jeong et al., 2017) ou até mesmo verificar a sensibilidade hídrica de espécies vegetais em grandes florestas (Köhler et al., 2018).

Apesar dos diversos usos encontrados para esta variável, poucos são os estudos que relacionam este com a concentração de CO₂ atmosférico, e, mais escassos ainda são os que relacionam estas duas variáveis em ambientes agrícolas.

2.4 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI

O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) é uma informação espectral que tem como principal utilização o monitoramento de vegetações (Wang et al., 2018). O NDVI é obtido a partir de duas faixas de bandas: o vermelho e o infravermelho próximo e é amplamente utilizado para mapeamento de áreas agrícolas, monitoramento de biomassa e produtividade (Wang et al., 2016).

Este índice é calculado conforme a (Equação 1):

$$\text{NDVI} = (\text{R}_{\text{NIR}} - \text{R}_{\text{red}}) / (\text{R}_{\text{NIR}} + \text{R}_{\text{red}}) \quad (1)$$

Onde: NDVI = Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; R_{NIR} = Reflectância na faixa do infravermelho próximo; R_{red} = Reflectância na faixa do vermelho.

Deste modo, os valores de NDVI sempre estarão entre -1 e 1. Valores mais próximos de representam altos valores de reflectância nestas bandas, o que,

diretamente indica que há uma grande quantidade de cobertura vegetal e/ou biomassa sobre a superfície (Wang et al., 2016; You et al., 2013)

Além de constatar a presença (e a quantidade) de cobertura vegetal, é possível compreender ciclos e estádios fenológicos de várias culturas utilizando o NDVI (Wang et al., 2018). A partir de padrões e séries temporais de NDVI, faz-se possível a caracterização dos estádios fenológicos de algumas culturas, pois, espera-se que o comportamento destas culturas em condições semelhantes venha ser parecido (Mulianga et al., 2015; Guan et al., 2016; Wang et al., 2018). Isto também permite avaliar as variações na produção de biomassa em cultivos durante o ano, por exemplo, possibilitando maior compreensão destes ciclos.

Outra grande utilização do NDVI está na quantificação de biomassa de ecossistemas e produtividade primária bruta (Ricotta et al., 1998; He et al., 2018; May et al., 2018; Wagle et al., 2018). Alguns estudos mostram que o NDVI apresenta correlação positiva com a produção de biomassa, possibilitando estimar, indiretamente, estas produtividades (Günlü et al., 2014).

Recentemente, os dados de NDVI obtidos de sensores como o LANDSAT e o MODIS estão sendo cruzados com a SIF – obtidos de outras plataformas, como o SCIAMACHY, GOSAT, GOME e OCO-2, por exemplo – com a finalidade de compreender mais precisamente a produtividade primária bruta e os ciclos de CO₂ atmosférico (Jeong et al., 2017; Li et al., 2018; Macbean et al., 2018).

Desta forma, o NDVI vem assumindo grande espaço nos estudos de quantificação de biomassa e estimação dos fluxos de CO₂ atmosférico, o que nos permite analisa-lo junto à outras variáveis resultantes de sensores orbitais para compreender mais precisamente as variações de concentração deste gás na atmosfera.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Áreas de estudo

O estudo foi conduzido em quadrantes de 1600 km², em três localidades que representam zonas de concentração de diferentes usos agrícolas no centro sul do

país. A área voltada a produção de cana-de-açúcar localiza-se em Pradópolis – SP (lat: 21°30’S; 21°11’S / lon: 48°12’W; 47°54’W) (Figura 1) onde se concentra boa parte da produção e do complexo agroindustrial de cana-de-açúcar no estado de São Paulo (IBGE, 2017); A segunda, localiza-se no município de Santo Antônio do Paraíso – PR (lat: 23°41’S; 23°18’S / lon: 50°49’W; 50°28’W) (Figura 1) a qual está incluída na mesorregião do Norte Pioneiro Paranaense, e, de acordo com o IBGE (2017) corresponde a uma das regiões com maior área destinada ao cultivo de grãos no estado (soja e milho); Por fim, a última área de estudo situa-se no município de Águas Claras – MS (lat: 20°45’S; 20°25’S / lon: 52°40’W; 52°21’W) (Figura 1) e compreende a uma área onde concentra-se grande parte da atividade agropecuária no estado do Mato Grosso do Sul, apresentando grandes extensões de terra utilizadas no cultivo de pastagens para alimentação animal (IBGE, 2017).

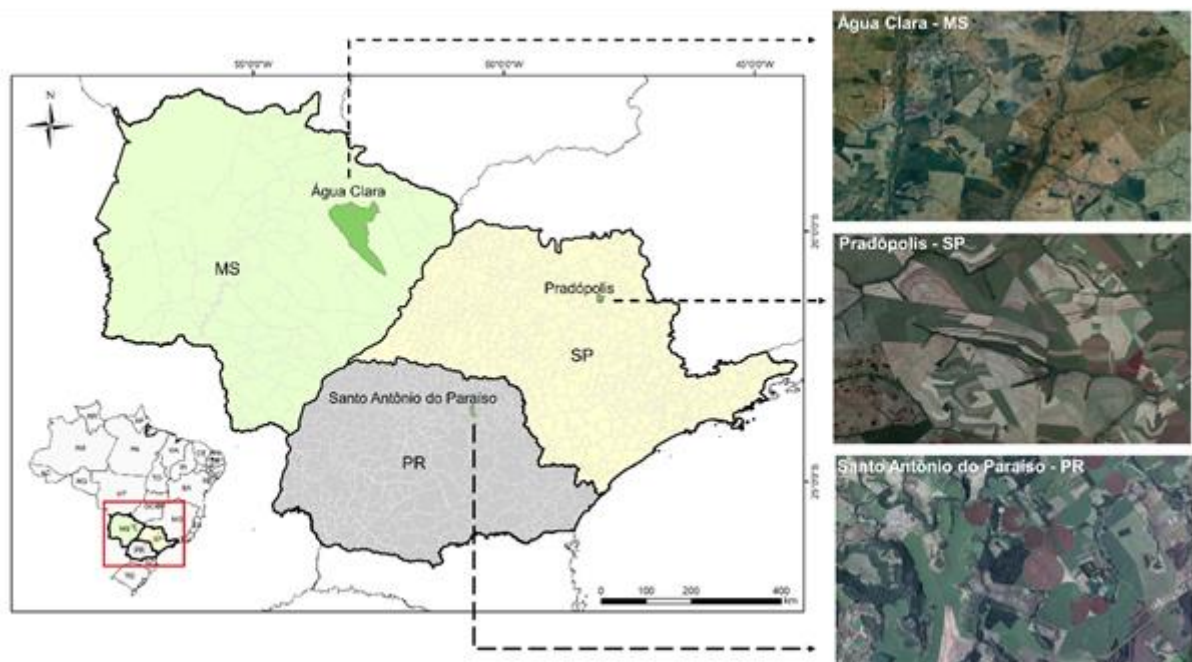


Figura 1: Mapa de localização dos municípios referentes às superfícies estudadas, onde predominam os usos agrícolas de pasto, cana-de-açúcar e rotação soja-milho.

3.2 Dados Meteorológicos, NDVI, SIF e X_{CO_2}

Os dados meteorológicos de Fluorescência da Clorofila Induzida pelo Sol (SIF) e Coluna média de CO_2 atmosférico (X_{CO_2}) considerados nesse estudo foram obtidos no período de out/2014 a out/2016 em sistemas de dados orbitais (Tabela 1). O OCO-

2 possui uma resolução temporal de 16 dias, desta forma, todos os dados obtidos foram estratificados na escala mensal. Em meses que ocorreram mais de uma amostragem foi utilizado a média dos dados.

Tabela 1: Sensores e plataformas utilizados de acordo com cada variável, com suas respectivas resoluções temporais e espaciais

| Variable | Source | Temporal Resolution | Spatial grid Resolution | Measurement Period |
|--|---|---------------------|-------------------------|------------------------------|
| Temperatura média do ar a 2 m (°C) | GEOS-5 FP-IT (NASA/POWER) (Stackhouse et al., 2017) | Daily | 1° | Oct, 1, 2014 – Oct. 31, 2016 |
| Precipitação (mm) | TRMM_3B42_Daily v7) (NASA Giovanni, 2016) | Daily | 0.25 ° | Oct, 1, 2014 – Oct. 31, 2016 |
| NDVI (Rouse et al., 1974) | (MOD13C2 v5) MODIS – Terra (SATVeg, 2016) | 16-day | 0.25° | Oct, 1, 2014 – Oct. 31, 2016 |
| SIF 757 nm (W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹) | OCO-2 (O'Dell et al., 2012) | 16 day repeat cycle | 1 km x 2 km | Oct, 1, 2014 – Oct. 31, 2016 |
| Xco₂ (ppm) | OCO-2 (O'Dell et al., 2012) | 16 day repeat cycle | 1 km x 2 km | Oct, 1, 2014 – Oct. 31, 2016 |

Nas séries temporais de NDVI, SIF e Xco₂ foram removidas as tendências temporais pelo método da regressão de acordo com Gujarati e Porter (2011).

3.3 Estádios Fenológicos e desenvolvimento dos cultivos

A fenologia e desenvolvimento dos cultivos em cada região foram obtidos de modo a compreender as possíveis relações existentes entre as variáveis analisadas e o desenvolvimento dos cultivos.

3.3.1 Estádios Fenológicos e desenvolvimento da Cana-de-açúcar no estado de São Paulo

Marcari et al. (2015) relataram que na região de Pradópolis, o cultivo da cana-de-açúcar na região pode ser compreendido em quatro estádios fenológicos (brotação, perfilhamento, desenvolvimento e maturação) além da colheita e o plantio, e cada estágio ocorre em um determinado período do ano. No primeiro ano de

milho não coincide com a safra de soja, anteriormente citada, sendo cultivado, então, após a sua retirada (EMBRAPA, 2011) (Figura 3).

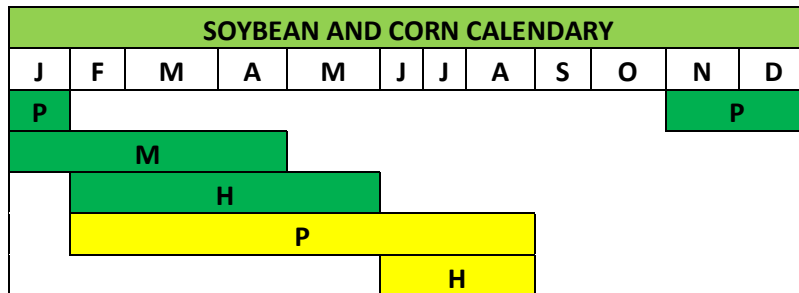


Figura 3: Fenologia da cultura da soja e do milho no Paraná. (P = Plantio; M = Maturação; C = Colheita. Em verde: Soja; em amarelo: Milho)

3.3.3 Desenvolvimento das pastagens

As pastagens não seguem um ciclo propriamente definido com as culturas acima citadas, porém, por se tratar de uma cultura que permanece por longos períodos na mesma área, sofre influência direta de variáveis como clima e solo, por exemplo. Dentre as variáveis que mais afetam o crescimento das pastagens, podemos citar a disponibilidade hídrica (De Araújo et al., 2011), e a temperatura (Da Cruz et al., 2011; De Araújo et al., 2013). Desta forma, deve-se atentar fortemente à época do ano e suas características climáticas, pois, a redução ou o aumento destas variáveis pode resultar diretamente na queda da produção de biomassa das pastagens (De Araújo et al., 2018).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

AQUI

4.1 Características Climáticas

4.1.1 Pradópolis – SP (Cana-de-Açúcar)

A temperatura média em Pradópolis foi de aproximadamente 23 °C durante o período estudado, sendo as maiores temperaturas médias encontradas nos meses de janeiro de 2015 (26,1 °C) e outubro de 2015 (27,8 °C). Por sua vez, as menores temperaturas médias foram observadas em junho de 2015 (19,6 °C) e junho de 2016 (17 °C) (Figura 4).

Durante o mesmo período a precipitação total em Pradópolis foi de 3341 mm, e os maiores índices pluviométricos ocorreram no período de novembro de 2015 a janeiro de 2016, onde chovera 342, 305 e 411 mm em cada mês, totalizando 1058mm. Já os menores foram em junho de 2015 e julho de 2016 (4 e 6 mm respectivamente) (Figura 4).

Almeida et al. (2008) indicam que a cana-de-açúcar necessita de, no mínimo, 1000 mm de chuvas bem distribuídas para um bom desenvolvimento da mesma. A região apresenta boas condições climáticas para o plantio e desenvolvimento da cana de açúcar, possibilitando atingir níveis de produtividade de até 200 t/ha (Monteiro e Sentelhas, 2014).

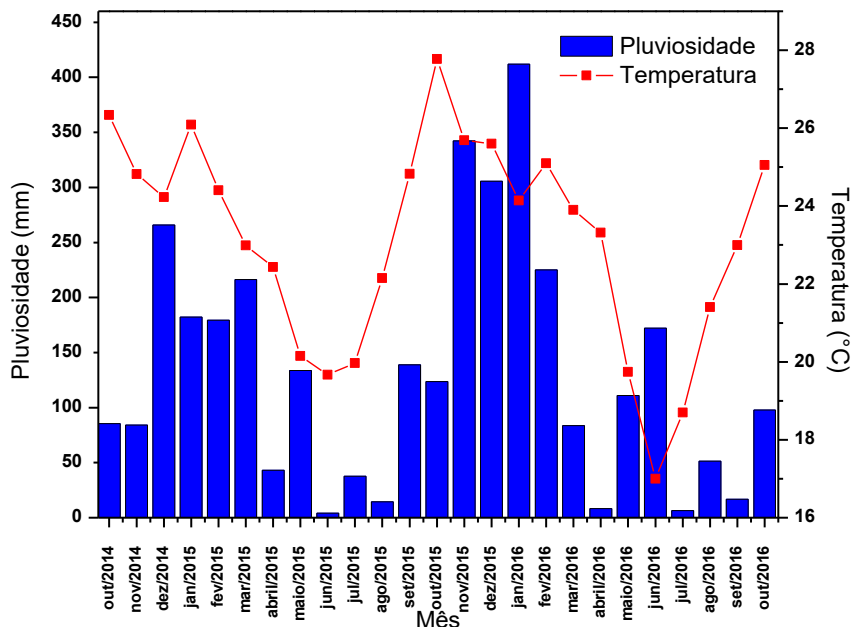


Figura 4: Temperatura média e precipitação mensal em Pradópolis – SP

4.1.2 Santo Antônio do Paraíso – PR (Rotação soja-milho)

A temperatura média em Santo Antônio do Paraíso foi de 20.2 °C. As maiores temperaturas médias foram em janeiro de 2015 e fevereiro de 2016 (23.9°C e 23.4°C respectivamente), enquanto que julho de 2015 e junho de 2016 registraram as menores temperaturas (16.5°C e 13.7°C) (Figura 5).

Choveu aproximadamente 4017mm no município entre o intervalo estudado, de modo que a maior quantidade de chuva ocorreu em novembro de 2015, onde chovera 382

mm, ao passo que os meses de agosto de 2015 e julho de 2016 tiveram os menores índices pluviométricos registrados (40.46 e 37.24 mm, respectivamente) (Figura 5).

A região do estudo apresenta uma boa configuração para o plantio de soja, favorecendo grandes níveis de produtividade potencial de até 5 toneladas por hectare, e real, próxima a 3 toneladas por hectare. Além disso, a região ainda apresenta baixo risco climático (<40%) para este cultivo (Do Rio et al., 2016).

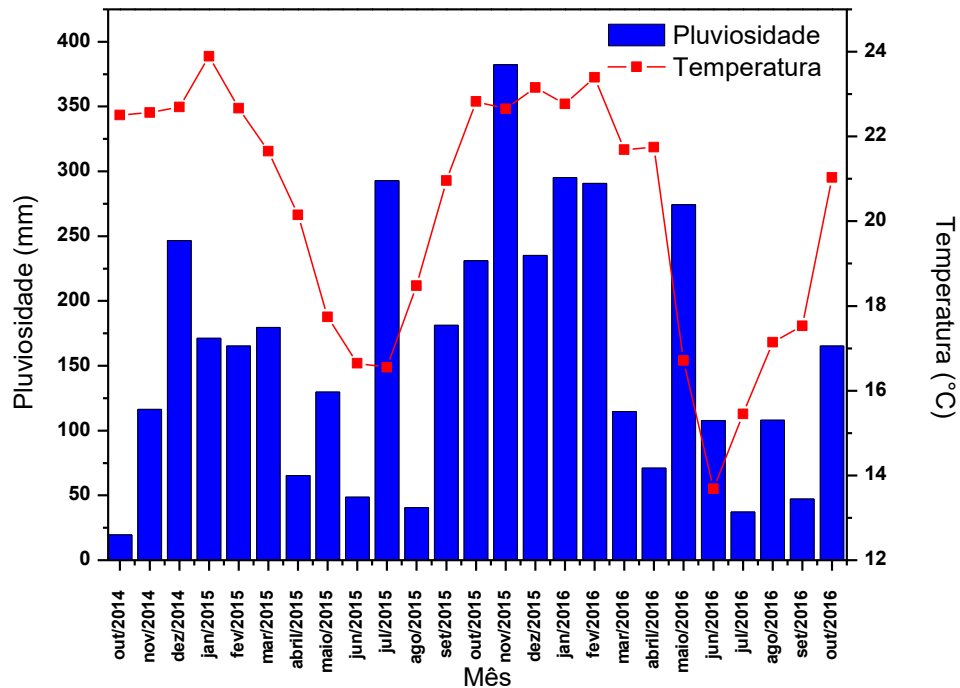


Figura 5: Temperatura média e precipitação mensal Santo Antônio do Paraíso – PR

4.1.3 Águas Claras – MS (Pastagem)

No município de Águas Claras, a temperatura média foi de 24.9°C. As maiores temperaturas médias mensais ocorreram em outubro de 2014 (29.5°C), outubro de 2015 (28.1°C) e outubro de 2016 (27.3°C) e as menores, em julho de 2015 (20.7°C) e junho de 2016 (18.2°C) (Figura 6).

A precipitação total foi de 3576 mm durante o período estudado, de modo que, as maiores quantidades de chuva foram em fevereiro de 2015 (265mm), janeiro, fevereiro e maio de 2016 (306 mm, 276 mm e 294 mm respectivamente). Os menores índices pluviométricos foram registrados em agosto de 2015 e julho de 2016 (14 mm e 2 mm, respectivamente) (Figura 6).

As pastagens normalmente não são muito exigentes quanto as condições climáticas, porém, deve-se atentar para eventuais períodos de estiagem e/ou redução

das chuvas, pois, podem acarretar em redução da produtividade a partir do comprometimento de algumas das suas atividades fisiológicas (Cavalcante et al., 2009; Seixas et al., 2015).

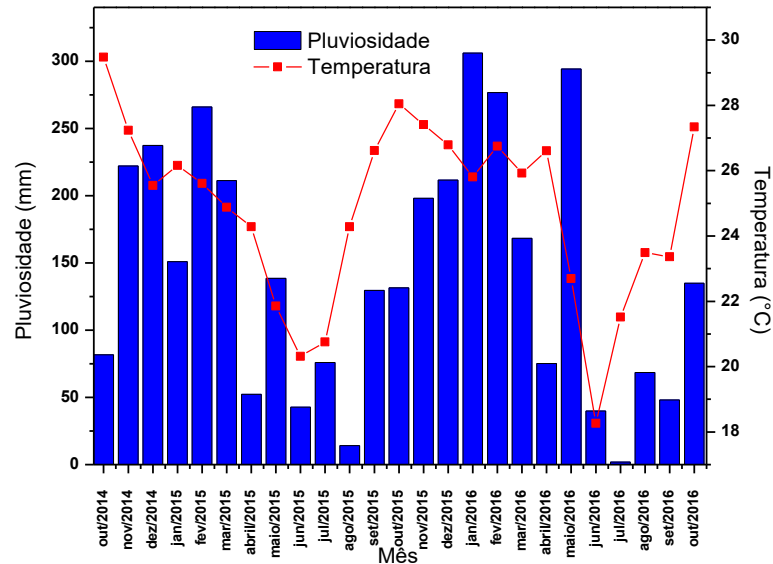


Figura 6: Temperatura média e precipitação mensal em Águas Claras – MS

4.2 NDVI

4.2.1. Pradópolis – SP (Cana-de-açúcar)

A Tabela 2 mostra os resultados da estatística descritiva realizada utilizando as médias mensais de NDVI encontrados na cultura da cana-de-açúcar. De modo geral, a média encontrada no período estudado foi de 0,611, apresentando valores mínimos e máximos de 0,360 e 0,748 respectivamente, abrangendo um intervalo corresponde a 0,389. A variância dos dados foi de 0,0133.

Tabela 2: Estatística descritiva dos valores de NDVI na cana-de-açúcar

| NDVI - Cana-de-açúcar | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------|---------|--------|-----------|---------|------------|-----------|--------|--------|
| Média | Erro P. | Mediana | Desvio | Variância | Curtose | Assimetria | Intervalo | Mínimo | Máximo |
| 0,611 | 0,022 | 0,622 | 0,1152 | 0,0133 | -0,891 | -0,49198 | 0,389 | 0,360 | 0,748 |

A análise das médias mensais de NDVI na cana-de-açúcar (Figura 7) mostrou dois picos bem evidentes: em março de 2015 (0.75) e em fevereiro de 2016 (0.74), coincidindo em proximidade com a brotação em canas recém-plantadas, e maturação

nas introduzidas no ano anterior. Estima-se que a cana-de-açúcar atinja a sua maior taxa de área foliar cerca de 360 a 420 dias após o plantio (Simões et al., 2005; Pereira et al., 2016), o que justificaria os altos índices encontrados, considerando que o cultivo de cana-de-açúcar é um sistema cíclico aberto e que sempre ocorrerão estádios fenológicos simultaneamente (brotação e maturação, a exemplo). Por outro lado, os menores valores mensais de NDVI foram obtidos no período de agosto a setembro em 2015 apresentando valores próximos de 0.48, e em julho a agosto de 2016, com médias por volta de 0.45, o que pode ser explicado pelo fato da colheita da cana-de-açúcar na região ser neste período (Marcari et al., 2015).

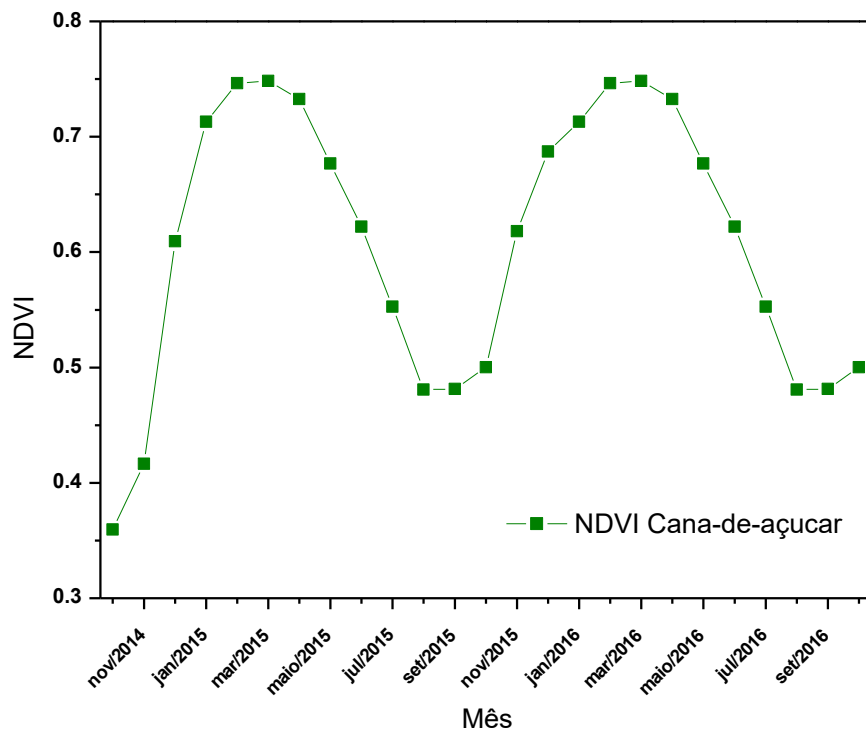


Figura 7: NDVI mensal na cana-de-açúcar.

4.2.2. Santo Antônio do Paraíso – PR (Rotação soja-milho)

A Tabela 3 expõe os resultados da estatística descritiva realizada utilizando as médias mensais de NDVI encontrados nas áreas de rotação soja-milho, no Paraná. A média durante o período estudado foi de 0,640, o menor valor foi 0,466 e o máximo 0,810, tendo como variação 0,343. A variância dos dados foi de 0,011.

Tabela 3: Estatística descritiva dos valores de NDVI na rotação soja-milho

| NDVI - Rotação soja-milho | | | | | | | | | |
|---------------------------|---------|---------|--------|-----------|---------|------------|-----------|--------|--------|
| Média | Erro P. | Mediana | Desvio | Variância | Curtose | Assimetria | Intervalo | Mínimo | Máximo |
| 0,640 | 0,021 | 0,644 | 0,103 | 0,011 | -1,004 | 0,046 | 0,343 | 0,466 | 0,810 |

A partir dos resultados, nota-se o aumento súbito do NDVI em meados de novembro-dezembro de ambos os anos estudados na região (Figura 8), alcançando os maiores valores em fevereiro de 2015 (0.81) e janeiro de 2016 (0.80), caracterizando o período de maior acúmulo de biomassa da cultura, relacionando-se com o final do estágio vegetativo da mesma. Após isto, observa-se uma queda neste índice, a qual está intimamente ligada com o restante do ciclo da cultura da soja, tendo como estádios seguintes o reprodutivo e a maturação, onde ocorre a redução do vigor das plantas e consequente senescência, o que ocasiona redução da biomassa e área foliar (Rodrigues et al., 2013; Fontana et al., 2015; Beneduzzi et al., 2017).

Após esta queda, é notável a ocorrência de um pequeno aumento no índice novamente, ocorrendo a partir de abril e maio em 2015 e 2016, respectivamente, sinalizando a entrada do milho nas áreas. Na fenologia do milho, durante o estado vegetativo, há a ocorrência de um acúmulo de biomassa por volta dos 20 aos 80 dias após a semeadura, podendo atingir valores de NDVI na faixa de 0.7 a 0.8, e posteriormente, há a redução deste índice no período vegetativo, seguido então da colheita (Hatfield et al., 2010; Wang et al., 2016).

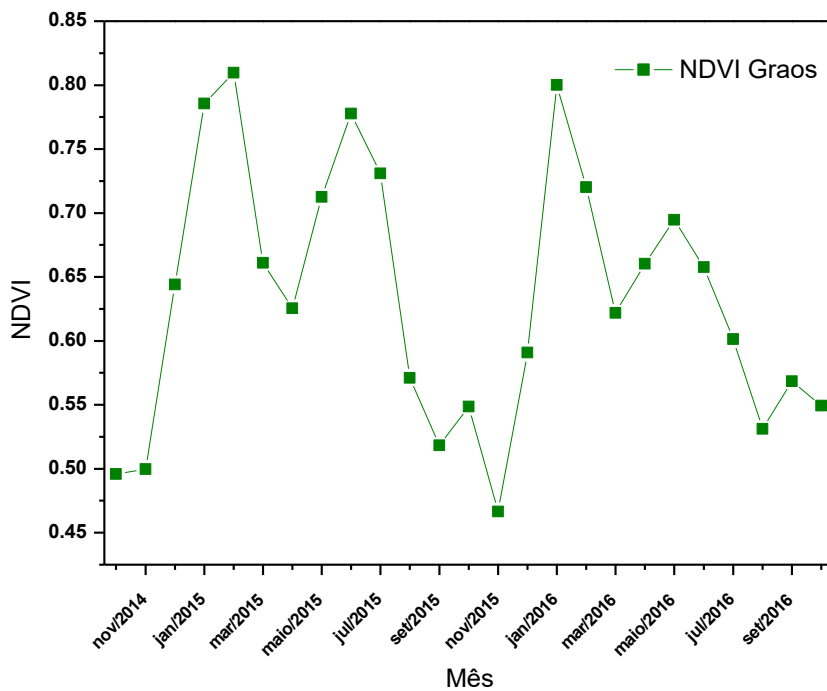


Figura 8: NDVI mensal na rotação soja-milho.

4.2.3. Águas Claras – MS (Pastagem)

Nas pastagens, o valor médio de NDVI encontrado durante o período estudado foi de 0,5698. Por sua vez, o menor valor foi 0,4092 e o maior 0,668, significando uma variação de 0,2588 entre o menor e maior valor de NDVI. A variância obtida na análise destes dados foi de 0,0053 (Tabela 4).

Tabela 4: Estatística descritiva dos valores de NDVI no pasto

| NDVI - Pasto | | | | | | | | | |
|--------------|---------|---------|--------|-----------|---------|------------|-----------|--------|--------|
| Média | Erro P. | Mediana | Desvio | Variância | Curtose | Assimetria | Intervalo | Mínimo | Máximo |
| 0,5698 | 0,0146 | 0,5907 | 0,0731 | 0,0053 | -0,3319 | -0,7268 | 0,2588 | 0,4092 | 0,6680 |

O NDVI mensal na área de pasto teve seus maiores valores em março de 2015 (0,66), novembro de 2015 (0,65) e fevereiro de 2016 (0,64). Já os menores valores, foram obtidos em julho e setembro de 2016 (0,44 e 0,40 respectivamente) (Figura 9). Agosto de 2015 e junho de 2016 foram os meses com menores chuvas registradas na região, o que pode ter ocasionado esta queda abrupta no NDVI do pasto, visto que a redução da disponibilidade hídrica é altamente prejudicial às pastagens, prejudicando a sua produção de biomassa (Kroth et al., 2015) e área foliar (Pezzopane et al., 2015).

É válido ressaltar que, diferentemente das outras regiões, o pasto não apresentou casos de sazonalidade desta variável, não havendo a ocorrência de padrões durante o período estudado. Isto pode ser explicado pelo fato de as pastagens, em sua maioria, não seguirem um calendário de execuções pré-definido, além do fato do pastejo animal não ser uniforme.

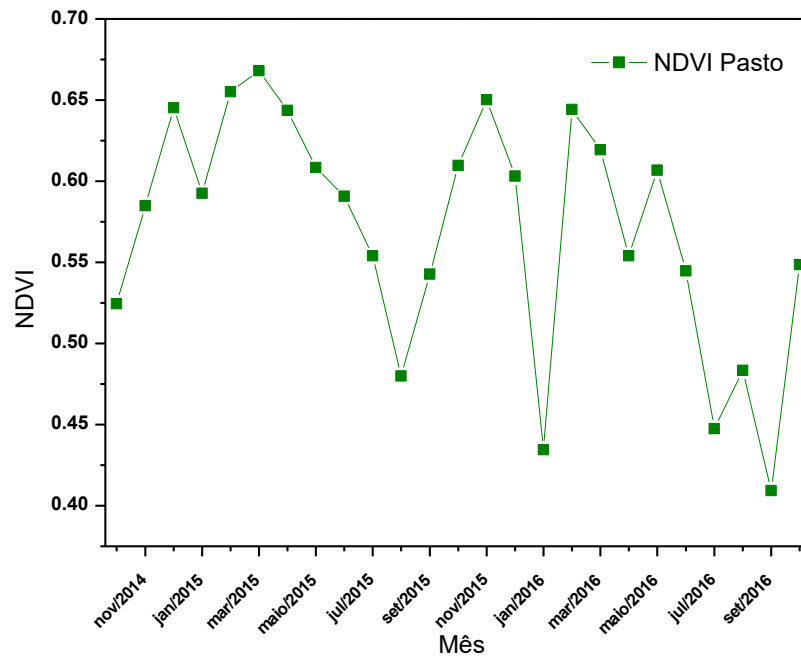


Figura 9: NDVI mensal em pastagens.

4.3. SIF e X_{CO_2}

4.3.1. Pradópolis – SP (Cana-de-açúcar)

A tabela 5 mostra os resultados da estatística descritiva dos dados de SIF e X_{CO_2} na cultura da cana-de-açúcar durante o período estudado.

Tabela 5: Estatística descritiva dos valores de SIF e X_{CO_2} na cana-de-açúcar

| SIF - Cana-de-açúcar | | | | | | | | | |
|-----------------------------|---------|---------|--------|-----------|---------|------------|-----------|---------|---------|
| Média | Erro P. | Mediana | Desvio | Variância | Curtose | Assimetria | Intervalo | Mín. | Máx. |
| 0,3243 | 0,0281 | 0,339 | 0,1463 | 0,0214 | -0,214 | -0,228 | 0,602 | 0 | 0,6 |
| X_{CO_2} - Cana-de-açúcar | | | | | | | | | |
| Média | Erro P. | Mediana | Desvio | Variância | Curtose | Assimetria | Intervalo | Mínimo | Máximo |
| 403,16 | 0,3523 | 403,309 | 1,8310 | 3,3527 | 2,1657 | 0,053 | 9,584 | 398,453 | 408,038 |

A SIF apresentou aumento a partir de março-abril tanto em 2015, quanto em 2016, coincidindo com a brotação e perfilhamento da cana-de-açúcar na região (Figura 10). Valores máximos de SIF foram registrados em maio de 2015, outubro de 2015 e junho de 2016, 0.51, 0.60 e 0.47 $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ (Figura 10), respectivamente, sendo maio e junho caracterizados pelo perfilhamento da cana, e outubro como o início do desenvolvimento dos colmos. O perfilhamento é uma das fases que mais demanda energia no desenvolvimento desta cultura, juntamente ao desenvolvimento e maturação dos colmos, o que possibilita um aumento da atividade fotossintética, e consequente aumento nas taxas de SIF (André et al., 2010).

Além disto, observou-se quedas nos períodos de maio de 2015, setembro de 2015 e maio de 2016. Os menores valores de SIF foram obtidos nos meses de fevereiro de 2015, setembro de 2015 e julho de 2016, apresentando valores de 0.172, 0.141 e 0.189 $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ (Figura 10).

Por sua vez, o X_{CO_2} apresentou elevação no período de março de 2015 a julho do mesmo ano, o mesmo ocorreu em março de 2016, podendo estar relacionado com o fato de, neste período, se iniciarem a colheita na região, o que pode propiciar uma maior emissão de CO_2 (Panosso et al., 2011; Bordonal et al., 2017). Os menores valores de X_{CO_2} foram encontrados em maio e julho de 2015, e maio de 2016, com concentrações de 400.477 ppm, 400.495 ppm e 398.453 ppm respectivamente (Figura 10).

Além disso, a SIF apresentou correlação linear positiva de 0.2459 quando comparado com os valores de NDVI, indicando que possivelmente o comportamento da SIF possa ser explicado pela condição em que a vegetação se encontra na superfície. Correlações similares entre estas variáveis foram encontradas em Van Leth (2014) ao analisar as características destas variáveis e sensores, Irteza e Nicol (2016) em florestas, e Wood et al. (2017) em pradarias.

Quando se considera SIF e X_{CO_2} sobre áreas de cana-de-açúcar, nossos resultados indicam uma correlação linear significativa de -0.5127 (Figura 11, Tabela 6, Tabela 7). Esta correlação entre as variáveis já fora observada anteriormente por Parazoo et al. (2013) ao estudar a sazonalidade destas variáveis na floresta amazônica utilizando o GOSAT, onde obteve um valor de -0.536, indicando que a diminuição da concentração de CO_2 pode estar ligada ao aumento da SIF.

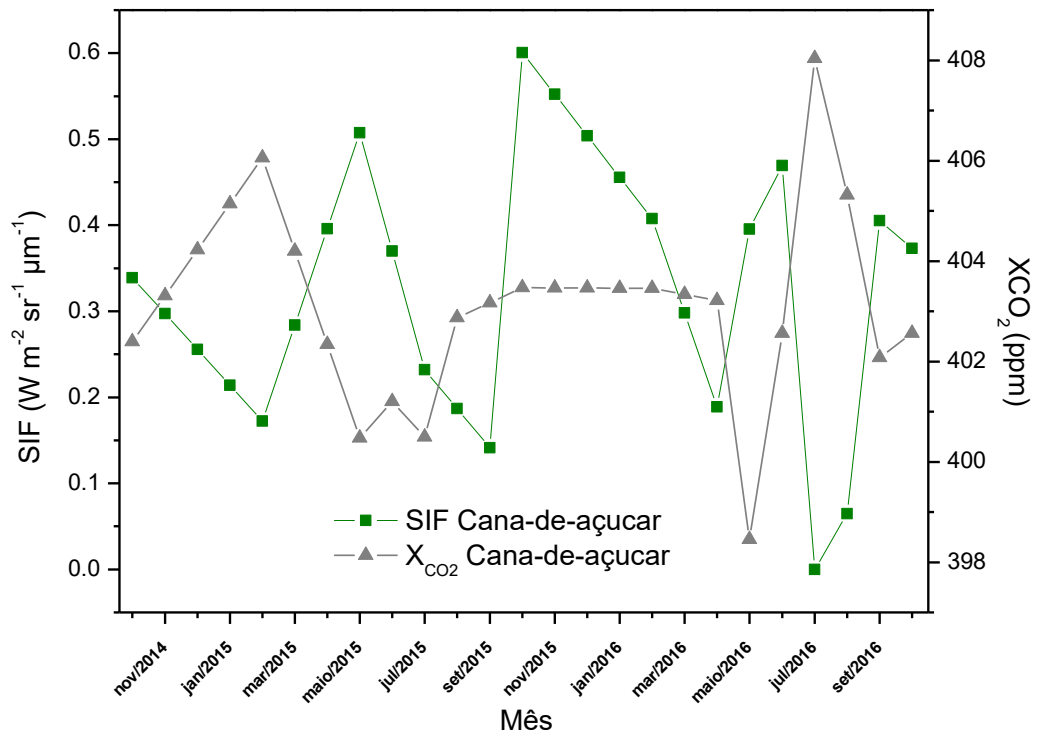


Figura 10: Médias mensais de Fluorescência da Clorofila Induzida pelo Sol (SIF) e Coluna Média de CO₂ (XCO₂) na localidade de Pradópolis - SP

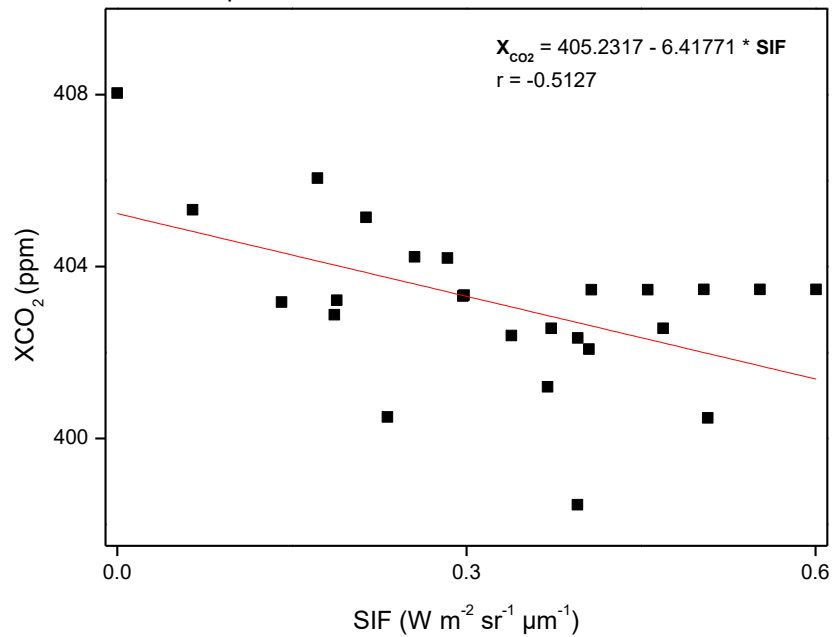


Figura 11: Relação entre a coluna média de CO₂ (XCO₂) e a fluorescência da clorofila induzida pelo sol (SIF) na localidade de Pradópolis – SP

Tabela 6: Tabela de correlação de Pearson para as variáveis SIF e X_{CO_2} na cana-de-açúcar.

| | | SIF CANA | X_{CO_2} CANA |
|---------------------------------------|---------------|----------|-----------------|
| SIF CANA | Pearson Corr. | 1 | -0.5127 |
| | Sig. | -- | 0.00878 |
| X_{CO_2} CANA | Pearson Corr. | -0.5127 | 1 |
| | Sig. | 0.00878 | -- |
| 2-tailed test of significance is used | | | |

Tabela 7: Análise de variância da regressão linear de X_{CO_2} em função de SIF na cana-de-açúcar

| | | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Value | Prob>F |
|-----------------|-------|----|----------------|-------------|---------|---------|
| X_{CO_2} CANA | Model | 1 | 22.87269 | 22.87269 | 8.20175 | 0.00878 |
| | Error | 23 | 64.14139 | 2.78876 | | |
| | Total | 24 | 87.01408 | | | |

4.3.2. Santo Antônio do Paraíso – PR (Rotação soja-milho)

A tabela 8 expõe os resultados da estatística descritiva dos dados de SIF e X_{CO_2} na cultura nas áreas de rotação soja-milho durante o período estudado.

Tabela 8: Estatística descritiva dos valores de SIF e X_{CO_2} na rotação soja-milho

| SIF - Rotação soja-milho | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------------|---------|--------|-----------|---------|------------|-----------|--------|--------|
| Média | Erro padrão | Mediana | Desvio | Variância | Curtose | Assimetria | Intervalo | Mínimo | Máximo |
| 0,261 | 0,04308 | 0,213 | 0,2066 | 0,0427 | -0,126 | 0,763 | 0,724 | 0,000 | 0,724 |
| X_{CO_2} - Rotação soja-milho | | | | | | | | | |
| Média | Erro padrão | Mediana | Desvio | Variância | Curtose | Assimetria | Intervalo | Mínimo | Máximo |
| 401,03 | 0,51953 | 401,515 | 2,4916 | 6,2079 | -1,224 | -0,468 | 7,511 | 396,69 | 404,20 |

A SIF e o X_{CO_2} tiveram comportamentos similares aos encontrados nas áreas de cana-de-açúcar, apresentando correlação significativa de -0.47823 expressos na Tabela 9 e na Tabela 10, indicando que a redução de concentração de CO_2 possa ocorrer simultaneamente ao aumento de fluorescência induzida pelo sol, fenômeno semelhante ao citado por Parazoo et al. (2013) (Figura 13).

Foi possível observar diminuições nas taxas de SIF nos períodos de dezembro de 2014 a fevereiro de 2015, e em janeiro a maio de 2016, onde, nota-se também que estas reduções foram seguidas de um leve aumento da variável durante um curto espaço de tempo, como o observado de fevereiro a maio de 2015 e em maio de 2016. Estas oscilações podem estar intimamente ligadas com o ciclo das culturas instaladas proposto por Zhong et al. (2016), visto que o plantio da soja se dá entre dezembro e fevereiro, o que caracteriza uma baixa atividade fotossintética na região, de modo que

o posterior aumento ocorra em função do desenvolvimento da cultura da soja. Note-se também que, após o período de colheita, ocorre novamente o aumento desta variável, podendo caracterizar já a entrada do milho na área.

Os maiores valores de SIF foram observados no período de novembro de 2015 a março de 2016, com o valor máximo ocorrendo em janeiro deste ano ($0.724 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$). Por sua vez, os menores valores foram observados de fevereiro e setembro de 2015 e maio de 2016, onde apresentaram valores bem próximos de $0 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ (Figura 12).

Por apresentar uma correlação negativa com a SIF, a concentração de X_{CO_2} foi menor onde houve aumento da SIF, e maior onde houve redução da mesma. Deste modo, as maiores concentrações de X_{CO_2} foram encontradas no período de janeiro a setembro de 2015 (variando de 402.74 a 404.201 ppm) e em junho e julho de 2016 (402.377 e 403.240 ppm respectivamente). Já as menores taxas de X_{CO_2} foram obtidas em janeiro de 2015 (396.690 ppm), fevereiro de 2016 (397.571 ppm) e outubro de 2016 (396.870 ppm) (Figura 12).

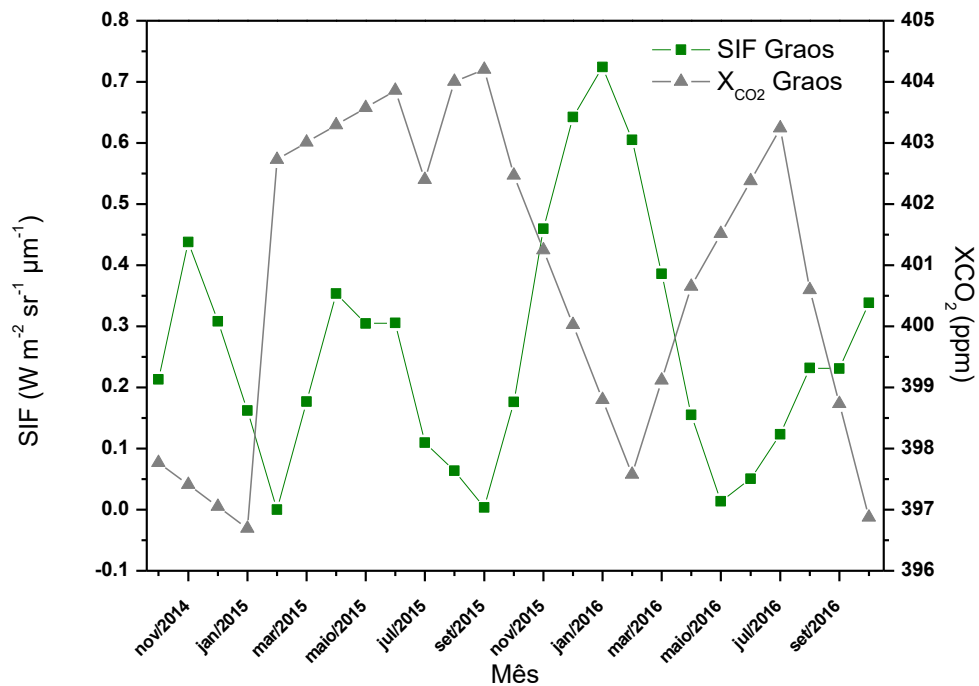


Figura 12: Médias mensais de Fluorescência da Clorofila Induzida pelo Sol (SIF) e Coluna Média de CO_2 (X_{CO_2}) na localidade de Santo Antônio do Paraíso – PR.

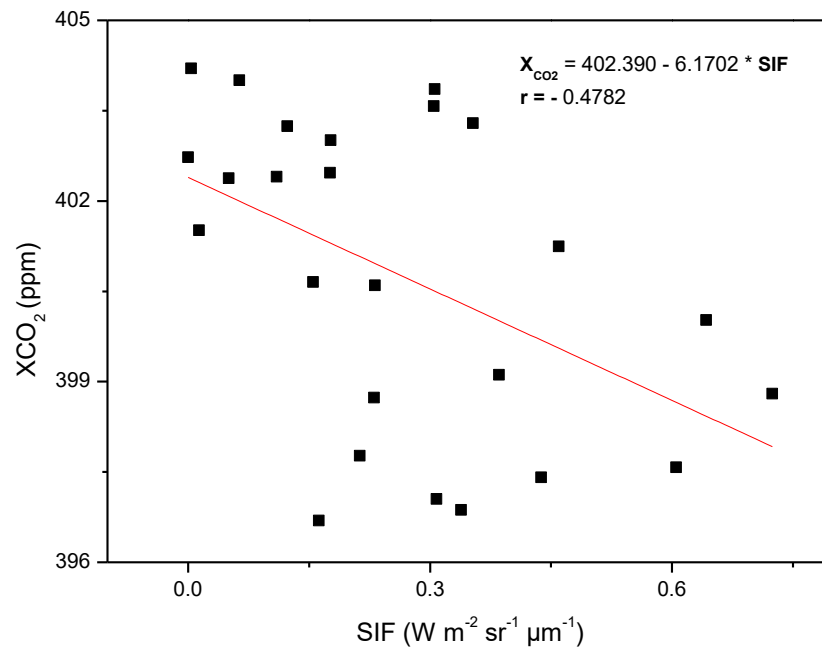


Figura 13: Correlação entre a coluna média de CO₂ (X_{CO2}) e a fluorescência da clorofila induzida pelo sol (SIF) na localidade de Santo Antônio do Paraíso – PR.

Tabela 9: Tabela de correlação de Pearson para as variáveis SIF e X_{CO2} na rotação soja-milho.

| | | SIF GR'OS | XCO2 GR'OS |
|---------------------------------------|---------------|-----------|------------|
| SIF GR'OS | Pearson Corr. | 1 | -0.47823 |
| | Sig. | -- | 0.0156 |
| XCO2 GR'OS | Pearson Corr. | -0.47823 | 1 |
| | Sig. | 0.0156 | -- |
| 2-tailed test of significance is used | | | |

Tabela 10: Análise de variância da regressão linear de X_{CO2} em função de SIF na rotação soja-milho.

| | | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Value | Prob>F |
|------------|-------|----|----------------|-------------|---------|--------|
| XCO2 GR'OS | Model | 1 | 36.00352 | 36.00352 | 6.82006 | 0.0156 |
| | Error | 23 | 121.41838 | 5.27906 | | |
| | Total | 24 | 157.42189 | | | |

4.3.3. Águas Claras – MS (Pastagem)

Na Tabela 11 estão expressos os resultados da estatística descritiva dos valores de SIF e X_{CO2} nas áreas de pastagens.

Tabela 11: Estatística descritiva dos valores de SIF e X_{CO2} no pasto

| SIF - Pasto | | | | | | | | | |
|--------------|-------------|---------|--------|-----------|---------|------------|-----------|---------|---------|
| Média | Erro padrão | Mediana | Desvio | Variância | Curtose | Assimetria | Intervalo | Mínimo | Máximo |
| 0.7718 | 0.1122 | 0.6640 | 0.5609 | 0.3146 | 0.6190 | 0.8328 | 2.2248 | 0.0130 | 2.2379 |
| XCO2 - Pasto | | | | | | | | | |
| Média | Erro padrão | Mediana | Desvio | Variância | Curtose | Assimetria | Intervalo | Mínimo | Máximo |
| 403.693 | 0.428 | 403.642 | 2.140 | 4.578 | -1.151 | 0.138 | 7.067 | 400.202 | 407.269 |

A área de pastagem também apresentou correlação linear negativa (Figura 15) entre as variáveis SIF e X_{CO2}, porém, diferentemente das anteriores, não houve um grau de significância elevado (Tabelas 12 e 13).

Desta forma, a SIF apresentou o seu maior pico no período de setembro a novembro, com valores em torno de 1.439 a 2.238 W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹. Este aumento súbito nas taxas de SIF pode ter ocorrido em função da recuperação das pastagens, pois, os meses anteriores a este período foram caracterizados por uma redução no teor de chuvas, o que inibe diretamente as atividades fisiológicas destas plantas, de modo que o aumento das chuvas favorece o rápido crescimento vegetativo destas (Cavalcante et al., 2009) (Figura 14).

A SIF é uma variável que apresenta um alto nível de correlação com a produtividade primária bruta, o que está diretamente ligado à produção de biomassa das culturas, como o exposto por Migliavacca et al., (2017) e Verma et al. (2017). A concentração de X_{CO2} foi crescente entre outubro de 2014 e março de 2015, com valores entre 401.787 e 407.269 ppm (este último, sendo a maior concentração de X_{CO2} encontrada para a região estudada) e entre novembro de 2015 e março de 2016, com valores partindo de 400.387 a 406.432 ppm.

Seguidos destes períodos onde ocorreram elevações nas concentrações de X_{CO2}, observou-se uma drástica queda na mesma, em ambos os casos. A primeira diminuição ocorreu a partir de abril de 2015, onde, a concentração inicial era de 407.269 ppm, chegando a 400.387 ppm em novembro do mesmo ano. A segunda diminuição ocorreu em abril de 2016, partindo de 405.894 e atingindo 400.20 ppm em agosto (Figura 14).

Similarmente ao ocorrido na cana-de-açúcar, a SIF da área de pastagens também apresentou uma correlação linear positiva com o NDVI, tendo um valor de 0.2499, comportamento semelhante ao encontrado por Wood et al. (2017).

É válido ressaltar que se tratando de pastagens, muitos fatores podem contribuir para a possível oscilação destas variáveis, pois, as configurações dos pastos não tendem a ser muito padronizadas (em grande escala), como é o caso das outras culturas supracitadas. Atrelado ao fato de grande parte das pastagens não serem tão tecnificadas, estas ainda divergem mesmo entre vizinhos, não seguindo um calendário pré-definido, além de muitas se encontrarem em estado de degradação. Isto acarreta em uma utilização distinta da pastagem de acordo com o produtor (Rutledge et al., 2014; De Figueiredo et al., 2017; Scaramuzza et al., 2017).

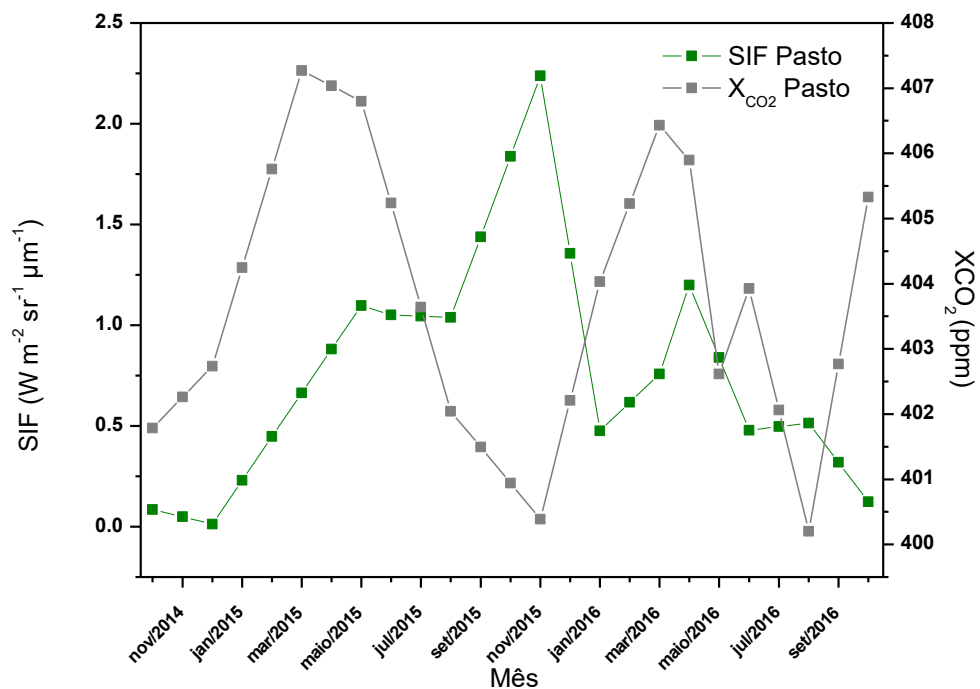


Figura 14: Médias mensais de Fluorescência da Clorofila Induzida pelo Sol (SIF) e Coluna Média de CO_2 (X_{CO_2}) na localidade de Águas Claras – MS.

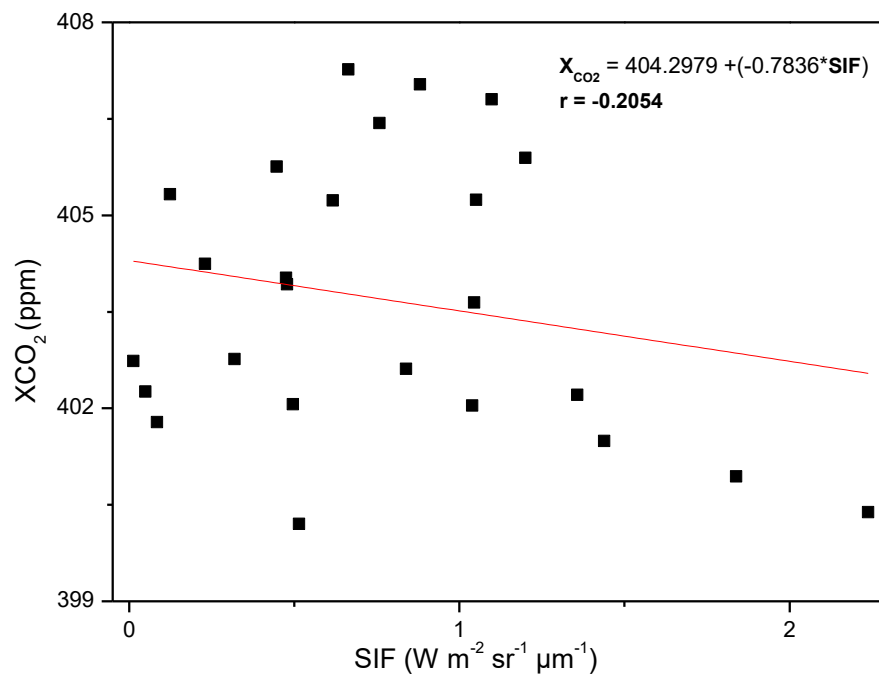


Figura 15: Relação entre a coluna média de CO₂ (X_{CO₂}) e a fluorescência da clorofila induzida pelo sol (SIF) na localidade de Águas Claras – MS.

Tabela 12: Tabela de correlação de Pearson para as variáveis SIF e X_{CO₂} na pastagem.

| | | SIF PASTO | XCO2 PASTO |
|---------------------------------------|---------------|-----------|------------|
| SIF PASTO | Pearson Corr. | 1 | -0.20542 |
| | Sig. | -- | 0.32459 |
| XCO2 PASTO | Pearson Corr. | -0.20542 | 1 |
| | Sig. | 0.32459 | -- |
| 2-tailed test of significance is used | | | |

Tabela 13: Análise de variância da regressão linear de X_{CO₂} em função de SIF na pastagem.

| | | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Value | Prob>F |
|------------|-------|----|----------------|-------------|---------|---------|
| XCO2 PASTO | Model | 1 | 4.63674 | 4.63674 | 1.0133 | 0.32459 |
| | Error | 23 | 105.24485 | 4.57586 | | |
| | Total | 24 | 109.88159 | | | |

CONCLUSÕES

A coluna média de CO₂ atmosférico apresentou correlação negativa significativa com a SIF na cana-de-açúcar e na rotação soja-milho;

Foi possível observar alguns padrões de queda e aumento de SIF e X_{CO2} na cana-de-açúcar e na rotação soja-milho ao longo do período estudado.

Muitas das variações ocorridas nas variáveis NDVI, SIF e X_{CO2} coincidiram com o calendário agrícola das regiões estudadas.

O pasto apresentou o maior pico de SIF;

O Pasto não apresentou oscilações sazonais das variáveis estudadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA DO PARANÁ, A. **Portaria nº 202, de 19 de julho de 2017**, 2017. Disponível em: http://www.adapar.pr.gov.br/arquivos/File/GABINETE/PORTARIAS/2017/202_17.pdf

ALMEIDA, A. C. D. S. E. A. Vegetative development and production of sugarcane varieties as a function of water availability and thermic units. **Ciênc. agrotec., Lavras**, p. 1441–1448, 2008.

ANDRÉ, R. G. B. et al. BALANÇO DE ENERGIA E PARÂMETROS DERIVADOS Instituto Nacional de Meteorologia (INMET/MAPA), Brasília , DF Laboratório de Meteorologia , Universidade Estadual Norte Fluminense (LAME/CCT/UENF), Macaé , RJ Consultor , Rio de Janeiro , RJ Recebido S. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 4, p. 535–542, 2010.

BENEDUZZI, H M; SOUZA, E G; BAZZI, C L; SCHENATTO, K. Temporal variability in active reflectance sensor-measured ndvi in soybean and wheat crops. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v. 47, n. 4, p. 771–781, 2017.

BOGAERTS, M. et al. Climate change mitigation through intensified pasture management: Estimating greenhouse gas emissions on cattle farms in the Brazilian Amazon. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 1539–1550, 2017.

BORDONAL, R. DE O. et al. Greenhouse gas balance from cultivation and direct land use change of recently established sugarcane (*Saccharum officinarum*) plantation in south-central Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 547–556, 2015.

BORDONAL, R. D. O. et al. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. 2018.

BOVENSMANN, H., J. P.; BURROWS, M.; BUCHWITZ, J.; FRERICK, S.; NOËL, V. V.; ROZANOV, K. V.; SCIAMACHY— Mission objectives and measurement modes, **J. Atmos. Sci.**, 56, 127 – 150, 1999.

BRITO, L. F. et al. Seasonal fluctuation of soil carbon dioxide emission in differently managed pastures. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 3, p. 957–962, 2015.

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.

BURROWS, J. P.; WEBER, M.; BUCHWITZ, M.; ROZANOV, V. **Journal of the Atmospheric Sciences**; Boston Vol. 56, Iss. 2, p.151-175. 1999.

CAVALCANTE, A. N. R.; CAVALLINI, M. C.; LIMA, N. R. C. B. Estresse por déficit hídrico em plantas forrageiras. **Embrapa Caprinos e Ovinos - Documentos on line**, n. 89, 2009.

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

CERRI, C. E. P. et al. Assessing the greenhouse gas emissions of Brazilian soybean biodiesel production. **PLoS ONE**, v. 12, n. 5, p. 1–14, 2017.

DA CRUZ, P. G. et al. Modelos empíricos para estimar o acúmulo de matéria seca de capim-marandu com variáveis agrometeorológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 7, p. 675–681, 2011.

DE ARAUJO, L. C. et al. Establishment of *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, under levels of soil water availability in stages of growth of the plants. **Revista Brasileira De Zootecnia-Brazilian Journal of Animal Science**, v. 40, n. 7, p. 1405–1411, 2011.

DE ARAUJO, L. C. et al. Key factors that influence for seasonal production of Guinea grass. **Scientia Agricola**, v. 75, n. June, p. 191–196, 2018.

DE FIGUEIREDO, E. B.; LA, N.; JR, S. Agriculture , Ecosystems and Environment Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest in Brazil. **“Agriculture, Ecosystems and Environment”**, v. 141, n. 1–2, p. 77–85, 2014.

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.

DO RIO, A. et al. Alternative sowing dates as a mitigation measure to reduce climate change impacts on soybean yields in southern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 11, p. 3664–3672, 2016.

DOMINGUES, MARIANA SOARES; BERMAN, C. O ARCO DE DESFLORESTAMENTO NA AMAZÔNIA: DA PECUÁRIA À SOJA. **Ambiente & Sociedade**, v. XV, n. 2, p. 1–22, 2005.

FARGIONE, JOSEPH; HILL, JASON; TILMAN, DAVID; POLASKY, STEPHN; HAWTHORNE, P. Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt. **Science**, v. 319, p. 1235–1237, 2008.

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.

FRANCHINI, J. C. et al. Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná. **Embrapa Soja, Documentos**, p. 52, 2011.

FRANKENBERG, C. et al. REMOTE SENSING OF SOLAR INDUCED CHLOROPHYLL FLUORESCENCE FROM SATELLITES, AIRPLANES AND GROUND-BASED STATIONS University of California Los Angeles Atmospheric and Oceanic Sciences Los Angeles , CA , USA California Institute of Technology Jet Propulsion L. **Igrass**, p. 1707–1710, 2016.

FRANKENBERG, C. et al. Remote sensing of terrestrial chlorophyll fluorescence from space. **SPIE Newsroom**, p. 2–5, 2013.

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**, v. 38, n. 17, p. 1–6, 2011.

FUNK, R.; PASCUAL, U.; JOOSTEN. H.; DUFFY, C.; PAN, G.; LA SCALA, N.; GOTTSCHALK, P.; BANWART, S. A.; BATJES, N.; CAI, Z.; NOELLEMAYER; E. From Potential to Implementation: An Innovation Framework to Realize the Benefits of Soil Carbon. **Soil carbon: science, management and policy for multiple benefits**. p. 47-59. 2015.

GUAN, X. et al. Mapping rice cropping systems in Vietnam using an NDVI-based time-series similarity measurement based on DTW distance. **Remote Sensing**, v. 8, n. 1, 2016.

GUJARATI, D.N., PORTER, D.C., 2011. *Econometria Básica-5*. **AMGH Editora**.

GÜNLÜ, A. et al. Estimating aboveground biomass using landsat TM imagery: A case study of Anatolian Crimean pine forests in Turkey. **Annals of Forest Research**, v. 57, n. 2, p. 289–298, 2014.

GUO, M. et al. Assessment of Global Carbon Dioxide Concentration Using MODIS and GOSAT Data. **Sensors**, v. 12, n. 12, p. 16368–16389, 2012.

HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J. H. Value of Using Different Vegetative Indices to Quantify Agricultural Crop Characteristics at Different Growth Stages under Varying Management Practices. **Remote Sensing**, v. 2, p. 562–578, 2010.

HE, M. et al. Regional Crop Gross Primary Productivity and Yield Estimation Using Fused Landsat-MODIS Data. **Remote Sensing**, v. 10, n. 372, p. 1–21, 2018.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Agropecuário 2006 – Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação. Rio de Janeiro p. 1–777, 2006.

IPCC, INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change Adaptation and Vulnerability*. 976p. 2007.

IRTEZA, S. M.; NICHOL, J. E. Measurement of sun induced chlorophyll fluorescence using hyperspectral satellite imagery. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**, v. 41, n. July, p. 911–913, 2016.

JAISSWAL, D. et al. Brazilian sugarcane ethanol as an expandable green alternative to crude oil use. **Nature Climate Change**, v. 7, n. 11, p. 788–792, 2017.

JEONG, S. et al. Remote Sensing of Environment Application of satellite solar-induced chlorophyll fluorescence to understanding large-scale variations in vegetation phenology and function over northern high latitude forests. **Remote Sensing of Environment**, v. 190, p. 178–187, 2017.

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. ists26, p. To_4_5-To_4_10, 2009.

KEENAN, T. F. et al. CO₂ due to enhanced terrestrial carbon uptake. **Nature Publishing Group**, v. 7, p. 1–9, 2016.

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.

KROTH, B. E. et al. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental Cultivares de *Brachiaria brizantha* sob diferentes disponibilidades hídricas em Neossolo Flúvico under different water availability in Entisol. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 5, p. 464–469, 2015.

KUZE, A. et al. Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring. **Applied Optics**, v. 48, n. 35, p. 6716, 2009.

LA SCALA JÚNIOR, N.; DE FIGUEIREDO, E. B.; PANOSSO, A. R. A review on soil carbon accumulation due to the management change of major Brazilian agricultural activities. v. 72, n. 3, p. 775–785, 2012.

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. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. **Sustainability (Switzerland)**, v. 7, n. 5, p. 5875–5895, 2015.

LI, X.; XIAO, J.; HE, B. Remote Sensing of Environment Chlorophyll fluorescence observed by OCO-2 is strongly related to gross primary productivity estimated from flux towers in temperate forests. **Remote Sensing of Environment**, v. 204, n. September 2017, p. 659–671, 2018.

LUN, FEI; CANADELL, JOSEPH G; HE, LU; YANG, BO; LIU, MOU-CHENG; YUAN, ZHENF. TIAN, MI; LIU, JUN-GUO; LI, W. Estimating cropland carbon mitigation potentials in China affected by three improved cropland practices. **Journal of Mountain Science**, v. 13, n. 2, p. 1840–1854, 2016.

LUUS, K. A. et al. Tundra photosynthesis captured by satellite-observed solar-induced chlorophyll fluorescence. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 3, p. 1564–1573, 2017.

LYBBERT, T. J.; SUMNER, D. A. Agricultural technologies for climate change in developing countries: Policy options for innovation and technology diffusion. **Food Policy**, v. 37, n. 1, p. 114–123, 2012.

MACBEAN, N. et al. Strong constraint on modelled global carbon uptake using solar-induced chlorophyll fluorescence data. n. November 2017, p. 1–12, 2018.

MARCARI, M. A.; ROLIM, G. DE S.; APARECIDO, L. E. DE O. Agrometeorological models for forecasting yield and quality of sugarcane. **Australian Journal of Crop Science**, v. 9, n. 11, p. 1049–1056, 2015.

MAY, J. L. et al. Remote Sensing of Environment Short term changes in moisture content drive strong changes in Normalized Difference Vegetation Index and gross primary productivity in four Arctic moss communities. **Remote Sensing of Environment**, v. 212, n. April, p. 114–120, 2018.

MIGLIAVACCA, M. et al. 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**, v. 214, n. 3, p. 1078–1091, 2017.

MOITINHO, M. R. et al. Efeito do preparo do solo e resíduo da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO₂. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1720–1728, 2013.

MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Potential and Actual Sugarcane Yields in Southern Brazil as a Function of Climate Conditions and Crop Management. **Sugar Tech**, v. 16, n. 3, p. 264–276, 2014.

MULIANGA, B. et al. Mapping cropping practices of a sugarcane-based cropping system in Kenya using remote sensing. **Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p. 14428–14444, 2015.

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.

NOGUEIRA, L. A. H. Does biodiesel make sense? **Energy**, v. 36, n. 6, p. 3659–3666, 2011.

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.

PANOSSO, A. R. et al. Soil CO₂ emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under Slash-and-burn and Green harvest. **Soil and Tillage Research**, v. 111, n. 2, p. 190–196, 2011.

PANOSSO, A. R. et al. Variabilidade espacial da emissão de CO₂ em Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 2, p. 227–236, 2008.

PARAZOO, N. C. et al. Interpreting seasonal changes in the carbon balance of southern Amazonia using measurements of XCO₂ and chlorophyll fluorescence from GOSAT. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 11, p. 2829–2833, 2013.

PARAZOO, N. C. et al. Interpreting seasonal changes in the carbon balance of southern Amazonia using measurements of XCO₂ and chlorophyll fluorescence from GOSAT. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 11, p. 2829–2833, 2013.

PEREIRA, R. M.; CASAROLI, DERBLAI; VELLAME, LUCAS MELO; ALVES JÚNIOR, J. E. A. W. P. Sugarcane leaf area estimate obtained from the corrected Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) 1. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 46, n. 2, p. 140–148, 2016.

PEZZOPANE, CRISTIANA DE GASPARI; SANTOS, PATRÍCIA MENEZES; DA CRUZ, PEDRO GROMES; ALTOÉ, JONAS; RIBEIRO, FELIPE AZEVEDO; DO VALE, C. B. Estresse por deficiência hídrica em genótipos de. **Ciência Rural**, v. 45, n. 5, p. 871–876, 2015.

PHAN, T.; Sun, B.; Niu, J.; TAN, Q.; Li, J.; Yang, L.; LI, Y. Overexpression of sugarcane gene SoSnRK2.1 confers drought tolerance in transgenic tobacco. *Plant Cell Rep*, v. 35, p.1891–1905, 2016.

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.

RICOTTA, CARLO; AVENA, GIANCARLO; DE PALMA, A. Mapping and monitoring net primary productivity with AVHRR NDVI time-series: statistical equivalence of cumulative vegetation indices. **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 54, p. 325–331, 1999.

RODRIGUES, C. P. et al. NDVI E FLUXO DE CO₂ EM LAVOURA DE SOJA NO RIO GRANDE DO SUL Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Centro de Ciências Naturais e Exatas, Santa Mari. p. 95–104, 2013.

RUTLEDGE, S. et al. CO₂emissions following cultivation of a temperate permanent pasture. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 184, p. 21–33, 2014.

SCARAMUZZA, C. A. DE M. et al. LAND-USE AND LAND-COVER MAPPING OF THE BRAZILIAN CERRADO BASED MAINLY ON LANDSAT-8 SATELLITE IMAGES Mapeamento de Uso e Cobertura de Terras do Cerrado com Base Principalmente em Imagens do Satélite Landsat-8 Ministério do Meio Ambiente - MMA Instituto Bra. **Revista Brasileira de Cartografia (2017), Edição de Fotogrametia e Sensoriamento Remoto**, v. 69, n. 6, p. 1041–1051, 2017.

SEIXAS, A. A. et al. Déficit hídrico em plantas forrageiras – Revisão de literatura. **Revista Científica Eletrônica de Medicina Veterinária**, v. 8, n. 1, p. 1–14, 2015.

SIMÕES, MAURÍCIO DOS SANTOS; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, A. R. C. SPECTRAL VARIABLES, GROWTH ANALYSIS. **Scientia Agricola**, v. 62, n. 3, p. 199–207, 2005.

STACKHOUSE, P. W. et al. Prediction Of Worldwide Energy Resource (POWER) --- Agroclimatology Methodology --- (1.0 Latitude by 1.0 Longitude Spatial Resolution). 2017.

STUTZ, J.; Grossmann, K. Remote sensing of solar induced chlorophyll fluorescence from satellites, airplanes and ground-based stations. 2016. International **Geoscience And Remote Sensing Symposium (igarss)**, p.1707-1710, 2016. IEEE.

SUN, Y. et al. OCO-2 advances photosynthesis observation from space via solar-induced chlorophyll fluorescence. **Science**, v. 358, n. 6360, 2017.

TAVARES, R. L. M. et al. Soil CO₂ emission in sugarcane management systems. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science**, v. 65, n. 8, p. 755–762, 2015.

VAN LETH, T. C. **Remote Sensing of Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence**. [s.l.] Universiteit Utrecht, 2014.

VERMA, M. et al. Effect of environmental conditions on the relationship between solar-induced fluorescence and gross primary productivity at an Oz Flux grassland site. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 122, n. 3, p. 716–733, 2017.

WAGLE, P. et al. Variability in carbon dioxide fluxes among six winter wheat paddocks managed under different tillage and grazing practices. **Atmospheric Environment**, v. 185, n. April, p. 100–108, 2018.

WANG, C. et al. A Novel Method for Removing Snow Melting-Induced Fluctuation in GIMMS NDVI3g Data for Vegetation Phenology Monitoring: A Case Study in Deciduous Forests of North America. v. 11, n. 3, p. 800–807, 2018.

WANG, R.; CHERKAUER, K.; BOWLING, L. Corn Response to Climate Stress Detected with Satellite-Based NDVI Time Series. **Remote Sensing**, v. 6, n. 269, p. 1–22, 2016.

WMO, W. M. O. WMO GREENHOUSE GAS BULLETIN. v. 13, 2016.

WOOD, J. D. et al. Multiscale analyses of solar-induced fluorescence and gross primary production. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 1, p. 533–541, 2017.

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.

YOU, X. et al. Remote Sensing Based Detection of Crop Phenology for Agricultural Zones in China Using a New Threshold Method. p. 3190–3211, 2013.

ZHANG, Y. et al. Estimation of vegetation photosynthetic capacity from space-based measurements of chlorophyll fluorescence for terrestrial biosphere models. **Global Change Biology**, v. 20, n. 12, p. 3727–3742, 2014.

ZHONG, L. et al. Automated mapping of soybean and corn using phenology. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 119, p. 151–164, 2016.