

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 28/02/2019.

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

**FLUORESCÊNCIA INDUZIDA PELO SOL, XCO_2 E NDVI EM
CANA-DE-AÇÚCAR DO CENTRO-SUL DO BRASIL**

Kamila Cunha de Meneses
Engenheira Agrônoma

2018

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

**FLUORESCÊNCIA INDUZIDA PELO SOL, XCO₂ E NDVI EM
CANA-DE-AÇÚCAR DO CENTRO-SUL DO BRASIL**

Kamila Cunha de Meneses

Orientador: Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim

Coorientador: Prof. Dr. Newton La Scala Júnior

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

2018

M543f Meneses, Kamila Cunha de
Fluorescência induzida pelo sol, Xco₂ e NDVI em cana-de-açúcar
do Centro-Sul do Brasil / Kamila Cunha de Meneses. – – Jaboticabal,
2018
xix, 84 p. : il. ; 29 cm

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

1. Fenologia. 2. MODIS. 3. NASA/POWER. 4. OCO-2. 5.
Produtividade. 6. Sacarose I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.4: 633.61

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

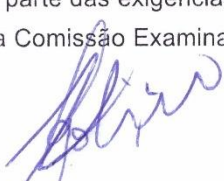
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: FLUORESCÊNCIA INDUZIDA PELO SOL, XCO₂ E NDVI EM CANA-DE-AÇÚCAR DO CENTRO-SUL DO BRASIL

AUTORA: KAMILA CUNHA DE MENESES

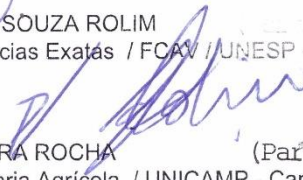
ORIENTADOR: GLAUCO DE SOUZA ROLIM

COORIENTADOR: NEWTON LA SCALA JUNIOR

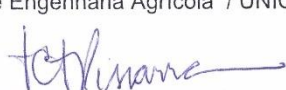
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Prof. Dr. JANSLE VIEIRA ROCHA (Participação por Videoconferência)
Faculdade de Engenharia Agrícola / UNICAMP - Campinas/SP



Profa. Dra. TERESA CRISTINA TARLE PISSARRA
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 28 de fevereiro de 2018

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

Kamila Cunha de Meneses – Filha de Francisco Feitosa de Meneses e Maria dos Milagres dos Santos Cunha, nasceu em Alcântara, Maranhão, no dia 06 de novembro de 1991. cursou Agronomia pela Universidade Federal do Maranhão – Câmpus IV, de Chapadinha – MA, de 2009 a 2013. Foi bolsista de extensão da PROEX-UFMA, no período de 2011 a 2013, voluntária de projetos de iniciação científica e monitora das disciplinas Hidráulica Agrícola e Irrigação e Drenagem. Em 2013 e 2014, foi Assistente da Equipe de pesquisa da empresa ECODIMENSÃO, na área de meio ambiente e produção para coleta de dados e auxílio na elaboração de Relatórios Antropológicos de quatro comunidades remanescentes de Quilombo, no Estado do Maranhão. Em 2014 e 2015, participou da Equipe Técnica da Cooperativa de Trabalho e Serviços Técnicos – COOSERT, desenvolvendo atividades de Assistência Técnica e Extensão Rural, no âmbito do contrato INCRA/COOSERT/CRT-MA N° 25.000/2014. Em 2015, foi professora de matemática e física da Casa Familiar Rural do município de Chapadinha - MA. Em agosto de 2016, ingressou no Curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo), na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP. É Integrante dos grupos de pesquisa: i) “Group of Agrometeorological Studies” (GAS); ii) Caracterização de Aspectos Diversos da Emissão de CO₂ do Solo, ambos da Unesp – Câmpus de Jaboticabal, e iii) Manejo Sustentável de Sistemas Agropecuários da UFMA – Câmpus IV. Em fevereiro de 2018, submeteu-se à banca para a defesa de Dissertação.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

DEDICO

A Deus, pela força, coragem, saúde e sabedoria para não desistir de meus sonhos.

Aos meus pais, Maria dos Milagres dos Santos Cunha e Francisco Feitosa de Meneses, que são meus maiores exemplos de simplicidade, humildade e amor incondicional.

OFEREÇO

À minha família, por ser meu porto seguro e aconchego.

À professora Maryzélia Furtado de Farias, pelo apoio e incentivo incondicional na continuação de meus estudos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, acima de tudo pelo dom da vida e por ter mantido acesa minha fé, pela reabilitação de minha saúde para a continuação desta jornada e por estar sempre presente em minhas orações, acalmando meu coração nos momentos de saudades.

A meus pais, Francisco Feitosa de Meneses e Maria dos Milagres dos Santos Cunha, por todo apoio e pelos esforços que realizaram durante esta jornada. Sinto-me honrada pela alegria de vocês perante minhas conquistas. Muito obrigada e amo muito vocês!

Ao professor Glauco de Souza Rolim, meu orientador, pela competência científica, amizade, dedicação, ensinamentos e por possibilitar a realização de mais uma etapa de minha vida. Por ser esse “líder” que incentiva em seguir em frente e por fazer toda diferença em minha vida.

Ao professor Newton La Scala Júnior, meu coorientador, pela competência científica, pela disponibilidade de orientação, ensinamentos, amizade e dedicação demonstrados nesta jornada. Obrigada pelo incentivo e pelo apoio de sempre!

Aos professores membros da banca de qualificação, Marcílio Vieira Martins Filho e Cristiano Zerbato, por terem aceitado fazer parte da banca e pelas contribuições que engradeceram este estudo e aos professores membros da banca de defesa, Teresa Cristina Tarle Pissara e Jansle Vieira Rocha. Muito obrigada!

A meus irmãos, Klara Cunha de Meneses, Matheus Cunha de Meneses e Anderson Cunha de Meneses, pela torcida e pelo apoio durante esta jornada. Sou grata por vocês serem meus irmãos!

A meus primos de coração, Sérgio Ercílio Simões Machado e Pietro Bittencourt Almeida Simões, Emília Victória Simões Cabral Coimbra e Antônio Cabral Coimbra Júnior, pelos momentos de diversão durante as férias.

À Maria das Graças Ribeiro Simões (mamãe dois), Keillany Ribeiro Simões, Kelly Cristina Ribeiro Simões e Elizângela Ribeiro Simões, pelo carinho e pelo cuidado comigo durante todos estes anos.

Ao Osvaldo da Costa Simões Segundo e Aída Maria Bittencourt Almeida Simões pelo apoio, pela amizade e pelo cuidado nesta jornada. Muito obrigada!

A todos os meus familiares que me apoiaram nesta jornada com palavras de incentivo, mesmo distantes, em especial a meus avós.

À Katharine Viana Batista, “roommate” e amiga, pela amizade e pelos cuidados durante esta jornada.

Ao Gustavo André de Araújo Santos e à Camila Vieira da Silva, pela amizade, pelos momentos de descontração e pelos convites aos melhores almoços, em estilo maranhense.

A meus amigos e parceiros científicos, Tayanara Tuany Borges Valeriano, José Reinaldo da Silva Cabral de Moraes, Lucas Eduardo de Oliveira Aparecido, Víctor Brunini Moreto e João Trevizoli Esteves, pelo aprendizado, pelo carinho e pelos momentos de descontração, por nunca terem poupado esforços para me auxiliar durante esta etapa. Vocês são feras!

Ao Grupo de Pesquisa em Agrometeorologia da Unesp – GAS, por todo suporte e contribuição em meu crescimento profissional.

À Bruna de Oliveira Silva e Ludhanna Marinho Veras, pela amizade e pelos convites que quase sempre eu “furava”, mas com o término desta pesquisa tenho a certeza de que eu aceitarei.

A meus amigos e colegas de departamento, Luiz Fernando Favacho Moraes Filho, Thiago de Andrade Águas, Maria Elisa Vicentini, Paulo Alexandre da Silva, Deise Cristina Santos Nogueira, Aline Moreno Ferreira, Kárita Almeida Silva, Valter Barbosa dos Santos e Clariana Valadares Xavier, pelo carinho, pelos cuidados, pelo apoio e pelos conselhos nesta jornada.

À Mara Regina Moitinho, ao Daniel de Bortoli Teixeira e Diego Silva Siqueira, pela amizade e por compartilhar ensinamentos e experiências, que enriqueceram tanto minha vida profissional como pessoal.

Aos professores do Departamento de Ciências Exatas, em especial, aos professores Gener Tadeu Pereira, Euclides Braga Malheiros, Ademar Sanches, Antônio Sérgio Ferraud e Alan Rodrigo Panosso, pelos ensinamentos, pelo convívio e pelas palavras de incentivo.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Exatas, Maria José Servidone Trizólio, Shirley Aparecida Martineli de Sousa, Adriana Elisabete Takakura e Norival

Ignácio, pela amizade, pelo profissionalismo, pela recepção e pelos cuidados que sempre tiveram comigo.

Aos funcionários da Estação Meteorológica da FCAV/Unesp, Vanessa Sayury Souza e Carlos Alberto Santa Capita (Carlão), pelo apoio e pela amizade de sempre.

À Simone da Silva Gomes e Nélida Elizabeth Quiñonez Silvero, pela amizade, pelo companheirismo e por me ensinarem a apreciar e a preparar um bom tereré.

À Juliana Mariano Carvalho, por ser essa pessoa querida, amiga e cuidadosa comigo.

À Ana Carolina Lobo, Jéssica Brito e Geziel Silva, pela amizade, pelo carinho e por deixarem minhas férias mais animadas.

A todos os amigos que eu fiz durante estes anos, obrigada por vocês compreenderem minha ausência, pelas mensagens, pela torcida e pelo carinho que vocês sempre demonstraram por mim.

À Milene Moara e Elizabeth Kazama, ao Reginaldo Oliveira e Laércio Santos, pela amizade e apoio.

À dona Marisa, pelo acolhimento e pelos cuidados que prestou nas primeiras semanas em que cheguei a Jaboticabal.

Ao fisioterapeuta Pedro Luiz Franchini e suas assistentes, Isabel e Cláudia, pelos cuidados, amizade, profissionalismo e pelas tardes agradáveis de fisioterapia.

À neurologista Iara Grisi Souza e Silva, por cuidar de meu caso, pela esperança em mim depositada e pelo incentivo em continuar a lutar por este meu sonho.

Aos professores da Universidade Federal do Maranhão – Câmpus IV, pelos ensinamentos, pelo incentivo e por despertar meu interesse pela pesquisa e pelo ensino.

Ao programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), pela oportunidade em cursar o mestrado e por utilizar uma ferramenta de comunicação via Internet, nas entrevistas, assim diminuindo as barreiras dos candidatos com pouco poder aquisitivo e de regiões distantes em participar de todas as etapas do processo seletivo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa para a condução deste estudo.

A vocês, minha Gratidão!

SUMÁRIO

RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xv
LISTA DE FIGURAS	xvii
CAPÍTULO 1 – Considerações gerais.....	19
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	19
1.1 A importância da cultura da cana-de-açúcar	19
1.2 Cana-de-açúcar e os aspectos climáticos	21
1.3 Modelos de Circulação Geral – GCMs	24
1.4 Satélite Observatório do Carbono Orbital 2 - OCO-2	25
1.5 Dados orbitais para a compreensão da dinâmica fotossintética.....	26
1.5.1 Fluorescência da clorofila induzida pelo Sol - SIF	26
1.5.2 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – NDVI	31
1.5.3 Coluna média de CO ₂ – Xco ₂	34
1.6 Objetivo geral	35
REFERÊNCIAS.....	36
CAPÍTULO 2 – Satellite-based Solar-induced Chlorophyll Fluorescence, NDVI, and column-averaged CO₂ concentration over sugarcane areas in South-Central Brazil	54
Abstract.....	54
2.1 Introduction.....	55
2.2 Material and methods.....	56
2.2.1 Location and Description of the Study Area	57
2.2.2 Meteorological data, SIF, Xco ₂ , and NDVI	58
2.2.3 Analysis of Results	60
2.3 Results	60
2.4 Discussion	72
2.4.1 Temperature and precipitation.....	72
2.4.2 Hydric balance.....	72
2.4.3 Sugarcane yield and quality	73
2.4.4 SIF, XCO ₂ , and NDVI.....	73

2.4.5 Principal Component Analysis (PCA)	74
2.5 Conclusion.....	76
References	77

FLUORESCÊNCIA INDUZIDA PELO SOL, XCO₂ E NDVI EM CANA-DE-AÇÚCAR DO CENTRO-SUL DO BRASIL

RESUMO - O sensoriamento remoto é uma ferramenta importante no monitoramento e na previsão da qualidade e da quantidade de cultivos. Nos últimos anos, surgiram satélites com melhores resoluções espaciais, temporais e, principalmente, novos produtos, como a fluorescência da clorofila induzida pelo sol (SIF), a coluna média de CO₂ atmosférico (XCO₂), além do Índice da Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI). A cana-de-açúcar é o principal cultivo para a produção de açúcar e bioenergia no mundo. A hipótese deste estudo é que o SIF e o Xco₂ têm correlação com a taxa fotossintética, e o NDVI avalia o vigor do dossel ligado à biomassa verde. O estudo teve como objetivo analisar a relação entre SIF, Xco₂ e NDVI com a produtividade e o nível de açúcar da cana-de-açúcar. O estudo foi realizado em locais representativos de uma das principais regiões de produção de cana-de-açúcar do mundo, na região Centro-Sul do Brasil. Quatro locais de estudo foram identificados para representar a região, sendo Pradópolis, Araraquara e Iracemápolis, no Estado de São Paulo, e Quirinópolis, no Estado Goiás, Brasil. Os dados foram coletados no período de 2015 a 2016, em sistemas de dados orbitais. Para as análises meteorológicas, foram utilizados dados diários ajustados na escala mensal. Os dados de toneladas de cana por hectare (TCH, em t ha⁻¹) e o açúcar total recuperável (TSR, em kg t⁻¹) foram coletados de talhões de cana-de-açúcar de empresas da região e estratificados por nível de município, no período entre abril e novembro dos anos agrícolas de 2015/2016 e 2016/2017. Foram observadas fortes correlações lineares negativas entre os valores médios de SIF e Xco₂, provavelmente devido à forte taxa fotossintética associada à cultura da cana-de-açúcar. Ocorreram correlações negativas entre SIF e NDVI, devido à natural senescência das folhas em talhões maduros, compreendendo um grande período no ciclo da planta. O período de maturação também resultou numa correlação positiva entre Xco₂ e NDVI devido à diminuição de atividade fotossintética em talhões. Houve relação de SIF, Xco₂ e NDVI com a produtividade e a quantidade de açúcar em cana-de-açúcar. O aumento de SIF correspondeu ao crescimento vegetativo da cana-de-açúcar, os valores de Xco₂ indicaram o estabelecimento e a colheita do cultivo, e o NDVI, a fase de maturação da área. Foi possível estabelecer padrões sazonais de SIF, Xco₂ e NDVI para o desenvolvimento do cultivo da cana-de-açúcar. Esses resultados indicam o potencial da SIF, Xco₂ e NDVI na previsibilidade e no monitoramento de cultivos agrícolas.

Palavras-chave: fenologia, MODIS, NASA/POWER, OCO-2, produtividade, sacarose

SOLAR-INDUCED FLUORESCENCE, XCO₂ AND NDVI IN SUGARCANE IN THE SOUTH-CENTRAL OF BRAZIL

ABSTRACT - Remote sensing is an important tool for monitoring and forecasting the quality and quantity of crops. In recent years, satellites with better spatial and temporal resolutions and, mainly, new products, such as the Solar-induced chlorophyll Fluorescence (SIF), the average column of atmospheric CO₂ and normalized difference vegetation index. The Sugarcane is the main crop for sugar and bioenergy production in the world. Our hypothesis is that SIF and Xco₂ have a correlation with the photosynthetic rate and NDVI evaluate the canopy vigor, linked to the green biomass of crops. Thus, the objective of this study was to analyze the relationship between SIF, Xco₂, and NDVI with sugarcane yield and sugar level. The study was conducted in representative locations of one of the main regions of sugarcane production in the world, in the Center-South region of Brazil. Four study locations were identified to represent the region being, Pradópolis, Araraquara, and Itacemópolis in the São Paulo (SP) state and Quirinópolis in the Goiás (GO) state, Brazil. The data were collected in the period from 2015 to 2016 in orbital data systems. The meteorological analyses were used daily data adjusted in the monthly scale. The data of tons of cane per hectare (TCH, in t ha⁻¹) and total sugar recovery (TSR, in kg t⁻¹) were collected from sugarcane plots of companies in the region and stratified by level of the municipality in the period between April and November of the growing seasons 2015/2016 and 2016/2017. We observed strong negative linear correlations between the mean values of SIF and Xco₂, probably due to the strong photosynthetic rate associated with the sugarcane crop. Negative correlations occurred between SIF and NDVI, due to the natural senescence of the leaves in mature plots comprising a large period in the vegetative cycle of the plant. The maturation period also resulted in a positive correlation between Xco₂ and NDVI due to the decrease of photosynthetic activity in plots. There was a relationship of SIF, Xco₂, and NDVI with the yield and sugar quantity in sugarcane. The increase of SIF corresponded to the vegetative growth of the sugarcane, the values of Xco₂ indicated the establishment and harvest of the crop and NDVI, the maturation phase of the area. It was possible to establish seasonal patterns of SIF, Xco₂ and for the development of sugarcane crop. These results indicate the potential of SIF, Xco₂, and NDVI in the predictability and monitoring of agricultural crops.

Keywords: phenology, MODIS, NASA/POWER, OCO-2, yield, sucrose

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- %** - Porcentagem
- °C** – Grau Celsius
- A – train** – Afternoon Constellation
- AET** – Actual evapotranspiration
- APAR** – Absorbed photosynthetically active Radiation
- CAD** – Capacidade de Água Disponível
- CANASAT** – Monitoramento da Cana-de-açúcar via imagens de satélite
- CO₂** – Dióxido de carbono
- DEF** – Deficiência hídrica
- EOS** - Earth Observing System
- EVI** - Índice de Vegetação Melhorado
- EXC** – Excedente hídrico
- FQY** - Rendimento Quântico de Fluorescência
- GAS** - Group of Agrometeorological Studies
- GCMs** - Modelos de Circulação Geral
- GEOS-5** - NASA Goddard's Global Modeling and Assimilation Office, version 5
- GOME-2** - Global Ozone Monitoring Experiment–2
- GOSAT** - Greenhouse gases Observing SATellite
- GPP** - Produtividade Primária Bruta
- ha** - Hectare
- Kg t⁻¹** – Quilograma por tonelada
- Km** – Quilômetro
- Lat** - Latitude
- LIF** - Fluorescência Induzida por Laser
- Long** - Longitude
- LUE** - Eficiência energética
- MCRs** – Modelos de Circulação Regional
- MJ m⁻² dia⁻¹** - Megajoule por metro quadrado por dia
- mm** - Milímetro
- MODIS** – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
- MODIS / AQUA** - Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer, a bordo do satélite Aqua (EOS PM-1)

MODIS / TERRA – Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer, a bordo do satélite Terra (EOS AM-1)

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 – NANÓMETRO

OCO-2 – Orbiting Carbon Observatory 2

P - Precipitação

PC1 - Principal Component 1

PC2 - Principal Components 2

PCA - Principal Component Analysis

PET - Potential Evapotranspiration

PIB – Produto Interno Bruto

ppm - Partes por Milhão

Qg - Global Solar Radiation

r - Coeficiente de correlação de Pearson

R² - Coeficiente de determinação

RH - Relative Humidity

SATveg – Sistema de Análise Temporal da Vegetação

SCIAMACHY - SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY

SIF - Fluorescência da Clorofila Induzida pelo Sol

STO - Water storage in the soil

T - Temperatura

TCCON - Total Carbon Column Observing Network

TCH – Tons of Sugarcane per Hectare

TRMM - Tropical Rainfall Measuring Mission

TRS – Total Recoverable Sugars

u₂ - Wind speed

W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹ - Watt por metro quadrado por esterradiano por micrómetro

XCO₂ - Coluna média de CO₂ atmosférico

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. (Capítulo 1) - Área de expansão da cana-de-açúcar durante 2003-2014 no Centro-Sul do Brasil.	20
Figura 2. (Capítulo 1) - Excitação da molécula da clorofila isolada.	27
Figura 3. (Capítulo 1) - Linhas de Fraunhofer no espectro.	29
Figura 4. (Capítulo 1) - Análise bibliométrica da “Solar-Induced chlorophyll Fluorescence”, pesquisada na Scopus, em dezembro de 2017.	31
Figura 5. (Capítulo 1) - Os efeitos da absorção e da reflectância nas plantas e os princípios básicos e valores do NDVI.	33
Figure 1. (Capítulo 2) - Main sugarcane-producing regions in Brazil and localities used in this study.	57
Figure 2. (Capítulo 2) - Average temperature (°C) and precipitation (mm) in a monthly period of 2015 - 2016 in localities: a) Araraquara–SP, b) Iracemápolis – SP, c) Pradópolis–SP and d) Quirinópolis–GO.	61
Figure 3. (Capítulo 2) - Surplus (EXC) (mm) e monthly water deficit (DEF) (mm) in localities: a) Araraquara – SP, b) Iracemápolis – SP, c) Pradópolis – SP, and d) Quirinópolis – GO in period de 2015 – 2016, estimated by Thornthwaite and Mather model (1955) with available water capacity equal to 100 mm.	62
Figure 4. (Capítulo 2) - Monthly Average Tons of Sugarcane per Hectare (TCH) and Total Recoverable Sugars (TRS) in relation to the analyzed localities: Araraquara-SP, Iracemápolis-SP, Pradópolis-SP, and Quirinópolis-GO in the 2015-2016 period.	63
Figure 5. (Capítulo 2) - Monthly average of tons of sugarcane per hectare (TCH) and Total Recoverable Sugars (TRS) in the localities: a) Araraquara-SP, b) Iracemápolis-SP, c) Pradópolis-SP and d) Quirinópolis-GO in the 2015-2016 period.	64
Figure 6. (Capítulo 2) - Monthly average of SIF-757nm, Xco ₂ , and NDVI of four sugarcane producing localities between 2015 and 2016. P= Planting, B= Budburst, T= Tillering, D= Development, M= Maturation, H= Harvest.	65

Figure 7. (Capítulo 2) - Monthly moving averages of solar-induced Chlorophyll Fluorescence (SIF 757nm), Column-Averaged CO ₂ (Xco ₂) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of the localities: a) Araraquara-SP, b) Iracemápolis-SP, c) Pradópolis-SP and d) Quirinópolis-GO, between 2015 and 2016.	68
Figure 8. (Capítulo 2) - Principal components analysis with variables. NDVI= Normalized Difference Vegetation Index, Xco ₂ = Column-Averaged CO ₂ , SIF= Solar-induced Chlorophyll Fluorescence, EXC= Water Surplus, P= Precipitation, TCH= Tons of Sugarcane per Hectare, T= Temperature, TRS= Total Recovered Sugars, DEF= Water deficit, PC1= Principal Components 1, and PC2= Principal Components 2.	69
Figure 9. (Capítulo 2) - Response surface for Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence (SIF) estimation in function Column-Averaged CO ₂ (Xco ₂) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).	70
Figure 10. (Capítulo 2) - Response surface for Tons of Sugarcane per Hectare (TCH) and Total Recoverable Sugars (TRS) estimation in function of Solar-induced Chlorophyll Fluorescence (SIF), Column-averaged CO ₂ (XCO ₂) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). a) TCH in function with NDVI and SIF, b) TRS in function with NDVI and SIF, c) TCH in function with SIF and Xco ₂ , d) TRS in function with Xco ₂ and SIF, e) TCH in function with Xco ₂ and NDVI, and f) TRS in function with Xco ₂ and NDVI.	71

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M.; AB, W. Allen_FAO1998. p. 1–15, 1998.

ALMEIDA, A. C. D. S.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G. V. S.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R. A. Vegetative Development and Production of Sugarcane Varieties as a Function of Water Availability and Thermic Units. **Ciênc. agrotec., Lavras**, p. 1441–1448, 2008.

ANACHE, J. A. A.; FLANAGAN, D. C.; SRIVASTAVA, A.; WENDLAND, E. C. Land Use and Climate Change Impacts on Runoff and Soil Erosion at the Hillslope Scale in the Brazilian Cerrado. **Science of the Total Environment**, v. 622–623, p. 140–151, 2018.

ANTUNES, J. F. G.; LAMPARELLI, R. A. C.; RODRIGUES, L. H. A. Assessing of the Sugarcane Cultivation Dynamics in São Paulo State by Modis Data Temporal Profiles | Avaliação Da Dinâmica Do Cultivo Da Cana-de-Açúcar No Estado de São Paulo Por Meio de Perfis Temporais de Dados Modis. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 6, p. 1127–1136, 2015.

ARAÚJO, R.; ALVES JUNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P. Variation in the Sugar Yield in Response to Drying-off of Sugarcane before Harvest and the Occurrence of Low Air Temperatures. **Bragantia**, v. 75, n. 1, p. 118–127, 2016.

BAO, J.; MCINERNEY, D. J.; STEIN, M. L. A Spatial-dependent Model for Climate Emulation. **Environmetrics**, v. 27, n. 7, p. 396–408, 2016.

BELLO, Z. A.; WALKER, S. Calibration and Validation of AquaCrop for Pearl Millet (*Pennisetum Glaucum*). **Crop and Pasture Science**, v. 67, n. 9, p. 948, 2016.

BORDONAL, R. de O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; DE FIGUEIREDO, E. B.; DE OLIVEIRA, B. G.; LA SCALA, N. Sustainability of Sugarcane Production in Brazil. A Review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 38, n. 2, 2018.

BORDONAL, R. de O.; LAL, R.; RONQUIM, C. C.; DE FIGUEIREDO, E. B.; CARVALHO, J. L. N.; MALDONADO, W.; MILORI, D. M. B. P.; LA SCALA, N. Changes in Quantity and Quality of Soil Carbon due to the Land-Use Conversion to Sugarcane (*Saccharum Officinarum*) Plantation in Southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 240, p. 54–65, 2017.

CANASAT – Mapeamento da cana via imagens de satélite de observação da Terra. INPE – Instituto Espacial de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/tabelas.html>>. Acesso em: 01 abr 2018.

CARDOZO, N. P.; SENTELHAS, P. C. Climatic Effects on Sugarcane Ripening under the Influence of Cultivars and Crop Age. **Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)**, v. 70, n. 6, p. 449–456, 2013.

CARVALHO, J. L. N.; NOGUEIROL, R. C.; MENANDRO, L. M. S.; BORDONAL, R. de O.; BORGES, C. D.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J. Agronomic and Environmental Implications of Sugarcane Straw Removal: A Major Review. **GCB Bioenergy**, v. 9, n. 7, p. 1181–1195, 2016.

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada-Esalq/Usp. **PIB ano 2017 da cana-de-açúcar**. 2017. Disponível em:< <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-de-cadeias-agropecuarias.aspx>>. Acesso em: 17 out. 2017.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-açúcar, Safra 2015/2016, **terceiro levantamento**. Brasília, v.2, n.3, p. 70, 2016.

CHANCE, K. V.; MARTIN, R. V. **Spectroscopy and radiative transfer of planetary atmospheres**. 1. ed. [s.l.] Oxford University Press, 2017.

CLERICI, N.; WEISSTEINER, C. J.; GERARD, F. Exploring the Use of MODIS NDVI-Based Phenology Indicators for Classifying Forest General Habitat Categories. n. i, p. 1781–1803, 2012.

DA SILVA, V. de P. R.; DA SILVA, B. B.; ALBUQUERQUE, W. G.; BORGES, C. J. R.; DE SOUSA, I. F.; NETO, J. D. Crop Coefficient, Water Requirements, Yield and Water Use Efficiency of Sugarcane Growth in Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 128, p. 102–109, 2013.

DAUMARD, F.; CHAMPAGNE, S.; FOURNIER, A.; GOULAS, Y.; OUNIS, A.; HANOCQ, J. F.; MOYA, I. A Field Platform for Continuous Measurement of Canopy Fluorescence. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 48, n. 9, p. 3358–3368, 2010.

DE SOUZA, A. P.; GASPAR, M.; DA SILVA, E. A.; ULIAN, E. C.; WACLAWOVSKY, A. J.; NISHIYAMA, M. Y.; DOS SANTOS, R. V.; TEIXEIRA, M. M.; SOUZA, G. M.; BUCKERIDGE, M. S. Elevated CO₂ Increases Photosynthesis, Biomass and Productivity, and Modifies Gene Expression in Sugarcane. **Plant, Cell and Environment**, v. 31, n. 8, p. 1116–1127, 2008.

DEMARCHI, J. C.; PIROLI, E. L. ANÁLISE DOS EFEITOS DE GEADAS NA COBERTURA VEGETAL DO MUNICÍPIO DE CÂNDIDO MOTA–SP, BRASIL, POR MEIO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 35, n. 3, p. 554–573, 2015.

DEMATTE, J. A. M.; TERRA, F. da S.; OTTO, R.; TOMA, R. S.; PEREIRA, L. H.; NASCIMENTO, A. F. do; BORTOLETTO, M. A. M. Assessment of Sugarcane Harvesting Residue Effects on Soil Spectral Behavior. **Scientia Agricola**, v. 73, n. 2, p. 159–168, 2016.

DU, S.; LIU, L.; LIU, X.; HU, J. Response of Canopy Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence to the Absorbed Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Chlorophyll. **Remote Sensing**, v. 9, n. 9, 2017.

DUDU, H.; ÇAKMAK, E. H. Climate Change and Agriculture: An Integrated Approach to Evaluate Economy-Wide Effects for Turkey. **Climate and Development**, v. 5529, p. 1–14, 2017.

EASTERLING, W. E.; MEARNS, L. O.; HAYS, C. J.; MARX, D. Comparison of Agricultural Impacts of Climate Change Calculated from High and Low Resolution Climate Change Scenarios: Part II. Accounting for Adaptation and CO₂ Direct Effects. **Climatic Change**, v. 51, n. 2, p. 173–197, Nov. 2001.

ELDERING, A.; O'DELL, C. W.; WENNBURG, P. O.; CRISP, D.; GUNSON, M. R.; VIATTE, C.; AVIS, C.; BRAVERMAN, A.; CASTANO, R.; CHANG, A.; CHAPSKY, L.; CHENG, C.; CONNOR, B.; DANG, L.; DORAN, G.; FISHER, B.; FRANKENBERG, C.; FU, D.; GRANAT, R.; HOBBS, J.; LEE, R. A. M.; MANDRAKE, L.; MCDUFFIE, J.; MILLER, C. E.; MYERS, V.; NATRAJ, V.; O'BRIEN, D.; OSTERMAN, G. B.; OYAFUSO, F.; PAYNE, V. H.; POLLOCK, H. R.; POLONSKY, I.; ROEHL, C. M.; ROSENBERG, R.; SCHWANDNER, F.; SMYTH, M.; TANG, V.; TAYLOR, T. E.; TO, C.; WUNCH, D.; YOSHIMIZU, J. The Orbiting Carbon Observatory-2: First 18 Months of Science Data Products. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 10, n. 2, p. 549–563, 2017.

ESTEVEZ, B. dos S.; DE SOUSA, E. F.; MENDONÇA, J. C.; DE LIMA LOUSADA, L.; MARCIANO, C. R.; SIQUEIRA, D. P. Coeficiente de Cultivo Da Cana-de-Açúcar Utilizando a Razão de Bowen. **Irriga**, v. 19, n. 3, p. 441–452, 2014.

FAGUNDES, E. A. A.; SILVA, T. J. A. da; BONFIM-SILVA, E. M. Desenvolvimento Inicial de Variedades de Cana-de-Açúcar Em Latossolo Submetidas a Níveis de Compactação Do Solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 188–193, 2014.

FERREIRA JUNIOR, R. A.; SOUZA, J. L. de; LYRA, G. B.; TEODORO, I.; SANTOS, M. A. dos; PORFIRIO, A. C. S. Crescimento E Fotossíntese de Cana-de-Açúcar Em Função de Variáveis Biométricas E Meteorológicas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 11, p. 1229–1236, 2012.

FRANKENBERG, C.; BERRY, J.; GUANTER, L.; JOINER, J. Remote Sensing of Terrestrial Chlorophyll Fluorescence from Space. **SPIE Newsroom**, p. 2–5, 2013.

FRANKENBERG, C.; FISHER, J. B.; WORDEN, J.; BADGLEY, G.; SAATCHI, S. S.; LEE, J. E.; TOON, G. C.; BUTZ, A.; JUNG, M.; KUZE, A.; YOKOTA, T. 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.

FRANKENBERG, C.; O'DELL, C.; BERRY, J.; GUANTER, L.; JOINER, J.; KÖHLER, P.; POLLOCK, R.; TAYLOR, T. E. Prospects for Chlorophyll Fluorescence Remote Sensing from the Orbiting Carbon Observatory-2. **Remote Sensing of Environment**, v. 147, n. Supplement C, p. 1–12, 2014.

FRONZEK, S.; CARTER, T. R. Assessing Uncertainties in Climate Change Impacts on Resource Potential for Europe Based on Projections from RCMs and GCMs. **Climatic Change**, v. 81, n. 1, p. 357–371, 2007.

GOLDEMBERG, J.; MELLO, F. F. C.; CERRI, C. E. P.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Meeting the Global Demand for Biofuels in 2021 through Sustainable Land Use Change Policy. **Energy Policy**, v. 69, n. Supplement C, p. 14–18, 2014.

GROSSI, M. C.; JUSTINO, F.; RODRIGUES, R. D. Á.; ANDRADE, C. L. T. Sensitivity of the Sorghum Yield to Individual Changes in Climate Parameters: Modelling Based Approach. **Bragantia**, v. 74, n. 3, p. 341–349, 2015.

GUAN, K.; WU, J.; KIMBALL, J. S.; ANDERSON, M. C.; FROLKING, S.; LI, B.; HAIN, C. R.; LOBELL, D. B. The Shared and Unique Values of Optical, Fluorescence, Thermal and Microwave Satellite Data for Estimating Large-Scale Crop Yields. **Remote Sensing of Environment**, v. 199, p. 333–349, 2017.

GUAN, X.; HUANG, C.; LIU, G.; MENG, X.; LIU, Q. 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.

GUANTER, L.; ZHANG, Y.; JUNG, M.; JOINER, J.; VOIGT, M.; BERRY, J. A.; FRANKENBERG, C.; HUETE, A. R.; ZARCO-TEJADA, P.; LEE, J.-E.; MORAN, M. S.; PONCE-CAMPOS, G.; BEER, C.; CAMPS-VALLS, G.; BUCHMANN, N.; GIANELLE, D.; KLUMPP, K.; CESCATTI, A.; BAKER, J. M.; GRIFFIS, T. J. Global and Time-Resolved Monitoring of Crop Photosynthesis with Chlorophyll Fluorescence. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 14, p. E1327–E1333, 8 Apr. 2014.

GUEVARA, A. J. D. H.; SILVA, O. R. D.; HASEGAWA, H. L.; VENANZI, D. Evaluation of Sustainability of Brazilian Ethanol Production: A model in System Dynamics. **BBR. Brazilian Business Review**, v. 14, n. 4, p. 435-447, 2017.

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria Básica-5**. [s.l.] AMGH Editora, 2011.

GUNST, R. F. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments** Taylor & Francis Group, , 1996.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. [s.l.] Bookman Editora, 2009.

HE, Z.; ZENG, Z. C.; LEI, L.; BIE, N.; YANG, S. A Data-Driven Assessment of Biosphere-Atmosphere Interaction Impact on Seasonal Cycle Patterns of XCO₂ Using GOSAT and MODIS Observations. **Remote Sensing**, v. 9, n. 3, 2017.

HEDELIUS, J. K.; FENG, S.; ROEHL, C. M.; WUNCH, D.; HILLYARD, P. W.; PODOLSKE, J. R.; IRACI, L. T.; PATARASUK, R.; RAO, P.; O'KEEFFE, D.; GURNEY, K. R.; LAUVAUX, T.; WENNERBERG, P. O. Emissions and Topographic Effects on Column CO₂(XCO₂) Variations, with a Focus on the Southern California Megacity. **Journal of Geophysical Research**, v. 122, n. 13, p. 7200–7215, 2017.

HU, J.; LIU, L.; LIU, X. Improving the Retrieval of Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence at Canopy Level by Modeling the Relative Peak Height of the Apparent Reflectance. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 11, n. 2, p. 26032, 2017.

HU, J.; LIU, X.; LIU, L.; GUAN, L. Evaluating the Performance of the SCOPE Model in Simulating Canopy Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence. **Remote Sensing**, v. 10, n. 2, 2018.

HUANG, C.; ZHANG, L.; CEN, Y.; TONG, Q. INVESTIGATING FRAUNHOFER LINE BASED FLUORESCENCE RETRIEVAL IN O₂-B BAND WITH HYPERSPECTRAL RADIATIVE TRANSFER SIMULATIONS Changping Huang , Lifu Zhang , Yi Cen , Qingxi Tong State Key Laboratory of Remote Sensing Science , Institute of Remote Sensing an. In: Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), 2015 7th Workshop on, **Anais...**2017.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema do IBGE de Recuperação Automática**. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela>. Acesso em: 16 out. 2017.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change: **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report** of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014.

JAIN, R.; CHANDRA, A.; VENUGOPALAN, V. K.; SOLOMON, S. Physiological Changes and Expression of SOD and P5CS Genes in Response to Water Deficit in Sugarcane. **Sugar Tech**, v. 17, n. 3, p. 276–282, 2015.

JENSEN, R.; HERBST, M.; FRIBORG, T. Direct and Indirect Controls of the Interannual Variability in Atmospheric CO₂ Exchange of Three Contrasting Ecosystems in Denmark. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 233, p. 12–31, 2017.

JEONG, S. J.; SCHIMEL, D.; FRANKENBERG, C.; DREWRY, D. T.; FISHER, J. B.; VERMA, M.; BERRY, J. A.; LEE, J. E.; JOINER, J. 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.

JOHNSON, D. M. An Assessment of Pre- and within-Season Remotely Sensed Variables for Forecasting Corn and Soybean Yields in the United States. **Remote Sensing of Environment**, v. 141, n. Supplement C, p. 116–128, 2014.

JOINER, J.; GUANTER, L.; LINDSTROT, R.; VOIGT, M.; VASILKOV, A. P.; MIDDLETON, E. M.; HUENNRICH, K. F.; YOSHIDA, Y.; FRANKENBERG, C. Global Monitoring of Terrestrial Chlorophyll Fluorescence from Moderate Spectral Resolution near-Infrared Satellite Measurements: Methodology, Simulations, and Application to GOME-2. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 6, n. 2, p. 2803–2823, 2013.

JOINER, J.; YOSHIDA, Y.; GUANTER, L.; MIDDLETON, E. M. New Methods for the Retrieval of Chlorophyll Red Fluorescence from Hyperspectral Satellite Instruments: Simulations and Application to GOME-2 and SCIAMACHY. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 9, n. 8, p. 3939–3967, 2016.

JOINER, J.; YOSHIDA, Y.; VASILKOV, A. P.; SCHAEFER, K.; JUNG, M.; GUANTER, L.; ZHANG, Y.; GARRITY, S.; MIDDLETON, E. M.; HUENNRICH, K. F.; GU, L.; BELELLI MARCHESINI, L. The Seasonal Cycle of Satellite Chlorophyll Fluorescence Observations and Its Relationship to Vegetation Phenology and Ecosystem Atmosphere Carbon Exchange. **Remote Sensing of Environment**, v. 152, p. 375–391, 2014.

JONES, M. R.; SINGELS, A.; RUANE, A. C. Simulated Impacts of Climate Change on Water Use and Yield of Irrigated Sugarcane in South Africa. **Agricultural Systems**, v. 139, n. Supplement C, p. 260–270, 2015.

JULITTA, T.; CORP, L. A.; ROSSINI, M.; BURKART, A.; COGLIATI, S.; DAVIES, N.; HOM, M.; ARTHUR, A. Mac; MIDDLETON, E. M.; RASCHER, U.; SCHICKLING, A.; COLOMBO, R. Comparison of Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence Estimates Obtained from Four Portable Field Spectroradiometers. **Remote Sensing**, v. 8, n. 2, p. 1–14, 2016.

KAISER, H. F. The Varimax Criterion for Analytic Rotation in Factor Analysis. **Psychometrika**, v. 23, n. 3, p. 187–200, 1958.

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

KRAUSE, G. H.; WEIS, E. Chlorophyll Fluorescence and Photosynthesis: The Basics. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 42, n. 1, p. 313–349, 1991.

LA SCALA JÚNIOR, N.; DE FIGUEIREDO, E.; PANOSSO, A. A Review on Soil Carbon Accumulation due to the Management Change of Major Brazilian Agricultural Activities. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, n. 3 suppl, p. 775–785, 2012.

LEE, B.; HYUJUNG, K.; MIYATA, A.; LINDNER, S.; TENHUNEN, J. Evaluation of a Phenology-Dependent Response Method for Estimating Leaf Area Index of Rice Across Climate Gradients. **Remote Sensing**, v. 9, p. 1–16, 2017.

LEE, J.-E.; BERRY, J. A.; VAN DER TOL, C.; YANG, X.; GUANTER, L.; DAMM, A.; BAKER, I.; FRANKENBERG, C. Simulations of Chlorophyll Fluorescence Incorporated into the Community Land Model Version 4. **Global Change Biology**, v. 21, n. 9, p. 3469–3477, 2015.

LEE, J.-E.; FRANKENBERG, C.; VAN DER TOL, C.; BERRY, J. A.; GUANTER, L.; BOYCE, C. K.; FISHER, J. B.; MORROW, E.; WORDEN, J. R.; ASEFI, S. Forest Productivity and Water Stress in Amazonia: Observations from GOSAT Chlorophyll Fluorescence. **Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences**, v. 280, n. 1761, p. 20130171, 2013.

LIANG, A.; HAN, G.; GONG, W.; YANG, J.; XIANG, C. Comparison of Global XCO₂ Concentrations From OCO-2 With TCCON Data in Terms of Latitude Zones. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 2491–2498, 2017.

LIU, L.; GUAN, L.; LIU, X. Directly Estimating Diurnal Changes in GPP for C3 and C4 Crops Using Far-Red Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence. *Agric. For. Meteorol.* 232, 1–9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agrmet.2017.05.011>. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, n. Supplement C, p. 1–9, 2017.

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

LIU, L.; YANG, X.; ZHOU, H.; LIU, S.; ZHOU, L.; LI, X.; YANG, J.; HAN, X.; WU, J. Evaluating the Utility of Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence for Drought Monitoring by Comparison with NDVI Derived from Wheat Canopy. **Science of the Total Environment**, v. 625, p. 1208–1217, 2018a.

LIU, L.; YANG, X.; ZHOU, H.; LIU, S.; ZHOU, L.; LI, X.; YANG, J.; WU, J. Relationship of Root Zone Soil Moisture with Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence and Vegetation Indices in Winter Wheat: A Comparative Study Based on Continuous Ground-Measurements. **Ecological Indicators**, v. 90, n. February, p. 9–17, 2018b.

LIU, Z.; WU, C.; PENG, D.; WANG, S.; GONSAMO, A.; FANG, B.; YUAN, W. Agricultural and Forest Meteorology Improved Modeling of Gross Primary Production from a Better Representation of Photosynthetic Components in Vegetation Canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 233, p. 222–234, 2017.

LOBELL, D. B.; ORTIZ-MONASTERIO, J. I.; SIBLEY, A. M.; SOHU, V. S. Satellite Detection of Earlier Wheat Sowing in India and Implications for Yield Trends. **Agricultural Systems**, v. 115, n. Supplement C, p. 137–143, 2013.

LUUS, K. A.; COMMANE, R.; PARAZOO, N. C.; BENMERGUI, J.; EUSKIRCHEN, E. S.; FRANKENBERG, C.; JOINER, J.; LINDAAS, J.; MILLER, C. E.; OECHEL, W. C.; ZONA, D.; WOFSY, S.; LIN, J. C. Tundra Photosynthesis Captured by Satellite-Observed Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 3, p. 1564–1573, 2017.

MACHADO, R. S.; RIBEIRO, R. V.; RIBEIRO MARCHIORI, P. E.; PEDRO MACHADO, D. F. S.; MACHADO, E. C.; DE ANDRADE LANDELL, M. G. Respostas Biométricas E Fisiológicas Ao Deficit Hídrico Em Cana-de-Açúcar Em Diferentes Fases Fenológicas. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 44, n. 12, p. 1575–1582, 2009.

MADONSELA, S.; CHO, M. A.; RAMOELO, A.; MUTANGA, O.; NAIDOO, L. Estimating Tree Species Diversity in the Savannah Using NDVI and Woody Canopy Cover. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 66, p. 106–115, Apr. 2018.

MAGRO, F. J.; TAKAO, G.; CAMARGO, P. E.; TAKAMATSU, S. Y. Biometria Em Cana-de-Açúcar. p. 1–18, 2011.

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.

MAXWELL, K.; JOHNSON, G. N. Chlorophyll Fluorescence—a Practical Guide. **Journal of experimental botany**, v. 51, n. 345, p. 659–668, 2000.

MCCORMICK, A. J.; WATT, D. A.; CRAMER, M. D. Supply and Demand: Sink Regulation of Sugar Accumulation in Sugarcane. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n. 2, p. 357–364, 2009.

MONTEIRO, L. A. **Modelagem agrometeorológica como base para a definição de ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo**. 2012. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz,” 2012.

MULIANGA, B.; BÉGUÉ, A.; CLOUVEL, P.; TODOROFF, P. Mapping Cropping Practices of a Sugarcane-Based Cropping System in Kenya Using Remote Sensing. **Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p. 14428–14444, 2015.

NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G.; SIMPRINI, E. S.; RODRIGUES, O. M.; CANTO, F.; ROVANHOL, P.; CONSOL, M. H. **A dimensão do setor sucroenergético: mapeamento e quantificação da safra 2013/14**. Ribeirão Preto: Markestrat, Fundace. [s.l: s.n.].

O'DELL, C. W.; CONNOR, B.; BÖSCH, H.; O'BRIEN, D.; FRANKENBERG, C.; CASTANO, R.; CHRISTI, M.; ELDERING, D.; FISHER, B.; GUNSON, M.; MCDUFFIE, J.; MILLER, C. E.; NATRAJ, V.; OYAFUSO, F.; POLONSKY, I.; SMYTH, M.; TAYLOR, T.; TOON, G. C.; WENNERBERG, P. O.; WUNCH, D. The ACOS CO₂ Retrieval Algorithm-Part 1: Description and Validation against Synthetic Observations. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 5, n. 1, p. 99–121, 2012.

OCO-2 Data Product User's Guid., 2016. Disponível em: <https://co2.jpl.nasa.gov/static/docs/OCO2_DUG_150911_VerF2.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2017.

OLIVEIRA, A. J. de;; RAMALHO, J. **Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011 / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Produção e Agroenergia**. Embrapa In ed. [s.l: s.n.]

OLIVEIRA, L. A.; MIRANDA, J. H.; COOKE, R. A. C. Water Management for Sugarcane and Corn under Future Climate Scenarios in Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 201, p. 199–206, 2018.

OUNIS, A.; BACH, J.; MAHJOUB; DAUMARD, F.; MOYA; GOULAS, Y. Combined Use of LIDAR and Hyperspectral Measurements for Remote Sensing of Fluorescence and Vertical Profile of Canopies. **Association of Remote Sensing**, v. 45, p. 87–94, 2016.

PANDEY, P. C.; MANDAL, V. P.; KATIYAR, S.; KUMAR, P.; TOMAR, V.; PATAIRIYA, S.; RAVISANKAR, N.; GANGWAR, B. Geospatial Approach to Assess the Impact of Nutrients on Rice Equivalent Yield Using MODIS Sensors'-based MOD13Q1-NDVI Data. **IEEE Sensors Journal**, v. 15, n. 11, p. 6108–6115, 2015.

PARAZOO, N. C.; BOWMAN, K.; FRANKENBERG, C.; LEE, J. E.; FISHER, J. B.; WORDEN, J.; JONES, D. B. A.; BERRY, J.; COLLATZ, G. J.; BAKER, I. T.; JUNG, M.; LIU, J.; OSTERMAN, G.; O'DELL, C.; SPARKS, A.; BUTZ, A.; GUERLET, S.; YOSHIDA, Y.; CHEN, H.; GERBIG, C. 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.

PATRA, P. K.; CRISP, D.; KAISER, J. W.; WUNCH, D.; SAEKI, T.; ICHII, K.; SEKIYA, T.; WENNERBERG, P. O.; FEIST, D. G.; POLLARD, D. F. The Orbiting Carbon Observatory (OCO-2) Tracks 2–3 Peta-Gram Increase in Carbon Release to the Atmosphere during the 2014–2016 El Niño. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 13567, 2017.

PEREIRA, V. R.; BLAIN, G. C.; DE AVILA, A. M. H.; PIRES, R. C. de M.; PINTO, H. S. Impacts of Climate Change on Drought: Changes to Drier Conditions at the Beginning of the Crop Growing Season in Southern Brazil. **Bragantia**, v. 77, n. 1, p. 201–211, 2018.

PHAN, T. T.; SUN, B.; NIU, J. Q.; TAN, Q. L.; LI, J.; YANG, L. T.; LI, Y. R. Overexpression of Sugarcane Gene SoSnRK2.1 Confers Drought Tolerance in Transgenic Tobacco. **Plant Cell Reports**, v. 35, n. 9, p. 1891–1905, 2016.

PINHEIRO, M. P. M. A.; CRUZ, R. L.; SIMÕES, W. L. Comportamento Do Teor de Água Num Solo Cultivado Com Cana-de-Açúcar Irrigada Com Diferentes Lâminas. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 4, p. 30–42, 2015.
PINTO, H. M. S. **Projeções de risco de produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo baseadas em simulações multimodelos e cenários climáticos futuros** Universidade de São Paulo, , 2015. .

PLASCYK, J. A.; GABRIEL, F. C. The Fraunhofer Line Discriminator MKII-An Airborne Instrument for Precise and Standardized Ecological Luminescence Measurement. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 24, n. 4, p. 306–313, 1975.

PORCAR-CASTELL, A.; TYYSTJÄRVI, E.; ATHERTON, J.; VAN DER TOL, C.; FLEXAS, J.; PFÜNDEL, E. E.; MORENO, J.; FRANKENBERG, C.; BERRY, J. A. Linking Chlorophyll a Fluorescence to Photosynthesis for Remote Sensing Applications: Mechanisms and Challenges. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 15, p. 4065–4095, 2014.

QADER, S. H.; DASH, J.; ATKINSON, P. M. Forecasting Wheat and Barley Crop Production in Arid and Semi-Arid Regions Using Remotely Sensed Primary Productivity and Crop Phenology: A Case Study in Iraq. **Science of The Total Environment**, v. 613–614, n. Supplement C, p. 250–262, 2018.

RASCHER, U.; ALONSO, L.; BURKART, A.; CILIA, C.; COGLIATI, S.; COLOMBO, R.; DAMM, A.; DRUSCH, M.; GUANTER, L.; HANUS, J.; HYVÄRINEN, T.; JULITTA, T.; JUSSILA, J.; KATAJA, K.; KOKKALIS, P.; KRAFT, S.; KRASKA, T.; MATVEEVA, M.; MORENO, J.; MULLER, O.; PANIGADA, C.; PIKL, M.; PINTO, F.; PREY, L.; PUDE, R.; ROSSINI, M.;

SCHICKLING, A.; SCHURR, U.; SCHÜTTEMEYER, D.; VERRELST, J.; ZEMEK, F. Sun-Induced Fluorescence - a New Probe of Photosynthesis: First Maps from the Imaging Spectrometer HyPlant. **Global Change Biology**, v. 21, n. 12, p. 4673–4684, 2015.

REECE, J. B.; WASSERMAN, S. A.; URRY, L. A.; CAIN, M. L.; MINORSKY, P. V.; JACKSON, R. B. **Biologia de Campbell**. [s.l.] Artmed Editora, 2015.

REHANA, S.; MUJUMDAR, P. P. Regional Impacts of Climate Change on Irrigation Water Demands. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 20, p. 2918–2933, 2013.

RISSINI, A. L. L.; KAWAKAMI, J.; GENÚ, A. M. Índice De Vegetação Por Diferença Normalizada E Produtividade De Cultivares De Trigo Submetidas a Doses De Nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1703–1713, 2015.

ROBERTO, G. G.; CUNHA, C.; SALES, C. R. G.; SILVEIRA, N. M.; RIBEIRO, R. V.; MACHADO, E. C.; LAGÔA, A. M. M. A. Variation of Photosynthesis and Carbohydrate Levels Induced by Ethephon and Water Deficit on the Ripening Stage of Sugarcane. **Bragantia**, v. 74, n. 4, p. 379–386, 2015.

ROLIM, G. de S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas No Ambiente EXCEL Para Os Cálculos de Balanços Hídricos: Normal, Sequencial, de Cultura E de Produtividade Real E Potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria**, v. 6, n. 1, p. 133–137, 1998.

ROSA, H. J. A.; DO AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P.; CANTARELLA, H. Sugarcane Response to Nitrogen Rates, Measured by a Canopy Reflectance Sensor. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 50, n. 9, p. 840–848, 2015.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, In: FREDEN, S.C.; MERCANTI E.P.; BECKER, M. (eds) **Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium**. v. 1: Technical Presentations, NASA SP-351, NASA, Washington, D.C., pp. 309-317. 1974.

RUIZ-VERA, U. M.; SIEBERS, M. H.; DRAG, D. W.; ORT, D. R.; BERNACCHI, C. J. Canopy Warming Caused Photosynthetic Acclimation and Reduced Seed Yield in Maize Grown at Ambient and Elevated [CO₂]. **Global Change Biology**, v. 21, n. 11, p. 4237–4249, 2015.

SABATER, N.; VICENT, J.; ALONSO, L.; COGLIATI, S.; VERRELST, J.; MORENO, J. Impact of Atmospheric Inversion Effects on Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence: Exploitation of the Apparent Reflectance as a Quality Indicator. **Remote Sensing**, v. 9, n. 6, p. 1–20, 2017.

SANTOS, C. M. dos; DE ALMEIDA SILVA, M.; LIMA, G. P. P.; DE ALMEIDA PRADO BORTOLHEIRO, F. P.; BRUNELLI, M. C.; DE HOLANDA, L. A.; OLIVER, R. Physiological Changes Associated with Antioxidant Enzymes in Response to Sugarcane Tolerance to Water Deficit and Rehydration. **Sugar Tech**, v. 17, n. 3, p. 291–304, 2015.

SEGATO, S. V.; PINTO, A. de S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. de. Atualização Em Produção de Cana-de-Açúcar. **Piracicaba: CP**, v. 2, p. 415, 2006.

SHRESTHA, R.; DI, L.; YU, E. G.; KANG, L.; SHAO, Y.; BAI, Y. Regression Model to Estimate Flood Impact on Corn Yield Using MODIS NDVI and USDA Cropland Data Layer. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 16, n. 2, p. 398–407, 2017.

SHRUTI, Y.; GOUDA, K. C.; BHAT, N. Impact of Climate Change on Sugarcane Crop at Regional Scale: A Study with Remote Sensing and GIS. In: AGU Fall Meeting Abstracts, **Anais...**2014.

SILVA, M. de A.; DOS SANTOS, C. M.; VITORINO, H. dos S.; RHEIN, A. F. de L. Pigmentos Fotossintéticos E Índice SPAD Como Descritores de Intensidade Do Estresse Por Deficiência Hídrica Em Cana-de-Açúcar. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 1, p. 173–181, 2014.

SILVA, L. L. da; COSTA, R. F. da; CAMPOS, J. H. B. da C.; DANTAS, R. T. Influence of Precipitations on Agricultural Productivity in Paraiba State. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 454–461, 2009.

SILVA, V. de P. R. da; OLIVEIRA, S. D. de; SANTOS, C. A. C. dos; SILVA, M. T. Risco Climático Da Cana-de-Açúcar Cultivada Na Região Nordeste Do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 180–189, 2013.

SINGH, P.; KIKON, N.; VERMA, P. Impact of Land Use Change and Urbanization on Urban Heat Island in Lucknow City, Central India. A Remote Sensing Based Estimate. **Sustainable Cities and Society**, v. 32, n. Supplement C, p. 100–114, 2017.

SIQUEIRA NETO, M.; GALDOS, M. V.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Direct N₂O Emission Factors for Synthetic N-Fertilizer and Organic Residues Applied on Sugarcane for Bioethanol Production in Central-Southern Brazil. **GCB Bioenergy**, v. 8, n. 2, p. 269–280, 2016.

SPRINGER, K. R.; WANG, R.; GAMON, J. A. Parallel Seasonal Patterns of Photosynthesis, Fluorescence, and Reflectance Indices in Boreal Trees. **Remote Sensing**, v. 9, n. 7, p. 1–18, 2017.

STACKHOUSE, P. W.; WESTBERG, D.; CHANDLER, W. S.; ZHANG, T.; HOELL, J. M. **Prediction Of Worldwide Energy Resource (POWER) --- Agroclimatology Methodology --- (1 . 0 Latitude by 1 . 0 Longitude Spatial Resolution)**. 2017. Disponível em: <https://power.larc.nasa.gov/documents/Agroclimatology_Methodology.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2017.

STOKES, C. J.; INMAN-BAMBER, N. G.; EVERINGHAM, Y. L.; SEXTON, J. Measuring and Modelling CO₂ Effects on Sugarcane. **Environmental Modelling & Software**, v. 78, p. 68–78, 2016. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364815215301110>>.

STREIT, N. M.; CANTERLE, L. P.; CANTO, M. W. do; HECKTHEUER, L. H. H. As Clorofilas. **Ciência Rural**, v. 35, n. 3, p. 748–755, 2005.

SUN, Y.; FRANKENBERG, C.; JUNG, M.; JOINER, J.; GUANTER, L.; KÖHLER, P.; MAGNEY, T. Overview of Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence (SIF) from the Orbiting Carbon Observatory-2: Retrieval, Cross-Mission Comparison, and Global Monitoring for GPP. **Remote Sensing of Environment**, v. 209, n. February, p. 808–823, 2018.

SUN, Y.; FRANKENBERG, C.; WOOD, J. D.; SCHIMEL, D. S.; JUNG, M.; GUANTER, L.; DREWRY, D. T.; VERMA, M.; PORCAR-CASTELL, A.; GRIFFIS, T. J.; GU, L.; MAGNEY, T. S.; KÖHLER, P.; EVANS, B.; YUEN, K. OCO-2 Advances Photosynthesis Observation from Space via Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence. **Science**, v. 358, n. 6360, 2017.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia Vegetal 5ªed. **Porto Alegre: Editora Artmed**, 2013.

TEIXEIRA, G. C. da S.; STONE, L. F.; HEINEMANN, A. B. Eficiência Do Uso Da Radiação Solar E Índices Morfofisiológicos Em Cultivares de Feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 1, p. 9–17, 2015.

TEODORO, I.; NETO, J. D.; DE HOLANDA, L. A.; NETO, G. D. S.; DE SOUZA, J. L.; BARBOSA, G. V. D.; LYRA, G. B. Weather Variables, Water Balance, Growth, and Agro Industrial Yield of Sugarcane. **Engenharia Agricola**, v. 35, n. 1, p. 76–88, 2015.

THORNTON, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical review**, v. 38, n. 1, p. 55–94, 1948.

THORNTON, C. W.; MATHER, J. R. **The Water Balance**. [s.l.] Drexel Institute of Technology, Laboratory of Technology, 1955.

THUM, T.; ZAEHLE, S.; KÖHLER, P.; AALTO, T.; AURELA, M.; GUANTER, L.; KOLARI, P.; LAURILA, T.; LOHILA, A.; MAGNANI, F.; VAN DER TOL, C.; MARKKANEN, T. Modelling Sun-Induced Fluorescence and Photosynthesis with a Land Surface Model at Local and Regional Scales in Northern Europe. **Biogeosciences**, v. 14, n. 7, p. 1969–1984, 2017.

TIWARI, P. R.; KAR, S. C.; MOHANTY, U. C.; DEY, S.; KUMARI, S.; SINHA, P. Seasonal Prediction Skill of Winter Temperature over North India. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 124, n. 1, p. 15–29, 2016.

UDOP - União dos Produtores de Bioenergia. **A história da cana-de-açúcar - da antiguidade aos dias atuais**. Disponível em: <<http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=993>>. Acesso em: 15 out. 2017.

VANUYTRECHT, E.; RAES, D.; WILLEMS, P. Regional and Global Climate Projections Increase Mid-Century Yield Variability and Crop Productivity in Belgium. **Regional Environmental Change**, v. 16, n. 3, p. 659–672, 2016.

VEIGA, J. P. S.; MALIK, A.; LENZEN, M.; FERREIRA FILHO, J. B. de S.; ROMANELLI, T. L. Triple-Bottom-Line Assessment of São Paulo State's Sugarcane Production Based on a Brazilian Multi-Regional Input-Output Matrix. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. June 2017, p. 666–680, 2018.

VERMA, M.; SCHIMEL, D.; EVANS, B.; FRANKENBERG, C.; BERINGER, J.; DREWRY, D. T.; MAGNEY, T.; MARANG, I.; HUTLEY, L.; MOORE, C.; ELDERING, A. 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**, v. 122, n. 3, p. 716–733, 2017.

VERMA, R. R.; SRIVASTAVA, T. K.; SINGH, P. Climate Change Impacts on Rainfall and Temperature in Sugarcane Growing Upper Gangetic Plains of India. **Theoretical and Applied Climatology**, n. Koshal 2014, p. 1–14, 2018.

VIANNA, M. dos S.; SENTELHAS, P. C. Simulação Do Risco de Deficit Hídrico Em Regiões de Expansão Do Cultivo de Cana-de-Açúcar No Brasil. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 49, n. 4, p. 237–246, 2014.

VICENTE, L. E.; GOMESDANIEL, D.; VICTORIA, D. D. C.; GARÇON, E. A. M.; BOLF, E. L.; ANDRADE, R. G.; DA SILVA, G. B. S. Séries Temporais de NDVI Do Sensor SPOT Vegetation E Algoritmo SAM Aplicados Ao Mapeamento de Cana-de-Açúcar. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1337–1345, 2012.

VU, J. C. V.; ALLEN, L. H. Growth at Elevated CO₂ Delays the Adverse Effects of Drought Stress on Leaf Photosynthesis of the C₄ Sugarcane. **Journal of Plant Physiology**, v. 166, n. 2, p. 107–116, 2009.

WANG, S.; HUANG, C.; ZHANG, L.; LIN, Y.; CEN, Y.; WU, T. Monitoring and Assessing the 2012 Drought in the Great Plains: Analyzing Satellite-Retrieved Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence, Drought Indices, and Gross Primary Production. **Remote Sensing**, v. 8, n. 2, 2016.

WANG, S.; ZHANG, L.; HUANG, C.; QIAO, N. An NDVI-Based Vegetation Phenology Is Improved to Be More Consistent with Photosynthesis Dynamics through Applying a Light Use Efficiency Model over Boreal High-Latitude Forests. **Remote Sensing**, v. 9, n. 7, 2017a.

WANG, W.; TIAN, Y.; LIU, C.; SUN, Y.; LIU, W.; XIE, P.; LIU, J.; XU, J.; MORINO, I.; VELAZCO, V. A.; GRIFFITH, D. W. T.; NOTHOLT, J.; WARNEKE, T. Investigating the Performance of a Greenhouse Gas Observatory in Hefei, China. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 10, n. 7, p. 2627–2643, 2017b.

WETTERICH, C. B. **Uso de imagens de fluorescência para monitoramento da evolução do cancro cítrico**. 2012. 92 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

WOOD, J. D.; GRIFFIS, T. J.; BAKER, J. M.; FRANKENBERG, C.; VERMA, M.; YUEN, K. Multiscale Analyses of Solar-induced Florescence and Gross Primary Production. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 1, p. 533–541, 2017.

YANG, H.; YANG, X.; ZHANG, Y.; HESKEL, M. A.; LU, X.; MUNGER, J. W.; SUN, S.; TANG, J. 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.

ZHANG, Y.; GUANTER, L.; BERRY, J. A.; JOINER, J.; TOL, C.; HUETE, A.; GITELSON, A.; VOIGT, M.; KÖHLER, P. 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.

ZHANG, Y.; GUANTER, L.; BERRY, J. A.; VAN DER TOL, C.; YANG, X.; TANG, J.; ZHANG, F. Model-Based Analysis of the Relationship between Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence and Gross Primary Production for Remote Sensing Applications. **Remote Sensing of Environment**, v. 187, n. Supplement C, p. 145–155, 2016.

ZHAO, D.; IREY, M.; LABORDE, C.; HU, C.-J. Identifying Physiological and Yield Related Traits in Sugarcane and Energy Cane. **Agronomy Journal**, v. 109, 2017a.

ZHAO, M. W.; ZHANG, X. Y.; YUE, T. X.; WANG, C.; JIANG, L.; SUN, J. L. A High-Accuracy Method for Simulating the XCO₂global Distribution Using GOSAT Retrieval Data. **Science China Earth Sciences**, v. 60, n. 1, p. 143–155, 2017b.

2.1 Introduction

Climate change has caused a major impact on the economy and agricultural production, affecting sustainability in agricultural areas (DUDU; ÇAKMAK, 2017). One of the aspects, climate regulates the photosynthetic assimilation of CO₂ and consequently the yield and quality of agricultural crops (SILVA et al., 2013; JENSEN; HERBST; FRIBORG, 2017).

Sugarcane is the main crop of sugar and bioenergy (PHAN et al., 2016). With high global demand for biofuels, Brazil and the United States, main ethanol producers, will need to increase production from 80 to approximately 200 billion liters by 2021 (GOLDEMBERG et al., 2014; CARVALHO et al., 2016).

Brazil stands out worldwide for the greater quantity of sugarcane areas, 73.35 million tons in a harvested area around 10 million hectares. South-central Brazil (São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná, Mato Grosso, Espírito Santo and Rio de Janeiro, respectively) is responsible for 91% of the Brazilian production (IBGE, 2017).

Sugarcane for being a C₄ grass, has a high photosynthetic rate and high efficiency in the fixation of CO₂ from the atmosphere, reaching about 100 tons of CO₂ captured and fixed in biomass per hectare a year (LA SCALA JÚNIOR; DE FIGUEIREDO; PANOSSO, 2012).

In the photosynthetic process, chlorophyll absorbs part of the solar radiation that re-emitted at longer wavelengths, with the peak at 757 nm, in a fluorescence process, enabling it to measure by high-resolution spectrometers due to atmospheric transparency at such wavelength. (KRAUSE; WEIS, 1991).

These evaluations have been correlated to photosynthetic activity and the efficiency in biomass conversion on a global scale (GUAN et al., 2017; VERMA et al., 2017). In addition, Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence (SIF) becomes an important measure in carbon cycling studies in the biosphere, linked to the issue of global climate change (FRANKENBERG et al., 2013). Several authors acknowledge the linear relationship of SIF with gross primary productivity (GPP) in C₃ and C₄ crops (Liu et al., 2017a; Thum et al., 2017; Yang et al., 2017) and drought monitoring over croplands (LIU et al., 2018a, 2018b).

In recent years, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) has been widely used in the estimation of GPP (WANG et al., 2017a), visualization of land use (SINGH; KIKON; VERMA, 2017), determination of phenological stages (CLERICI; WEISSTEINER; GERARD, 2012), leaf area index (LEE et al., 2017), biomass (LIU et al., 2017b), the percentage of ground cover with plant residues (DEMATTE et al., 2016; GUAN et al., 2016), besides to the yields of crops such as maize (SHRESTHA et al., 2017), soybean (JOHNSON, 2014), and sugarcane (ZHAO et al., 2017a). Despite all efforts, this technique is not a direct indication of photosynthetic activity and primary productivity such as SIF and X_{CO_2} (GUAN et al., 2017).

Recently, Column-averaged CO_2 (X_{CO_2}) can be evaluated by satellites. Currently, there are six CO_2 measuring instruments, the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS), Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography (SCIAMACHY), Tropospheric Emissions Spectrometer (TES), Global Ozone Monitoring Experiment-2 (GOME-2), Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observations (TANSO-FTS), and Orbiting Carbon Observatory 2 (OCO-2) (CHANCE; MARTIN, 2017). It is also noted that temporal variations of X_{CO_2} are relevant, as CO_2 is the main gas of additional greenhouse effect, responsible for additional heating observed on the planet (HE et al., 2017).

In the literature, there are studies that relate X_{CO_2} in diverse environments with vegetable biomass (PARAZOO et al., 2013; HE et al., 2017), however, no study has been found relating X_{CO_2} to agricultural crops, and a possible controlling factor such as SIF.

Based on this information, our hypotheses are SIF correlates directly with the photosynthetic potential of the crops. X_{CO_2} despite being an advective influence it is inversely correlated with the effective photosynthesis of vegetated surface, and NDVI correlates directly with canopy vigor and biomass. Thus, the objective of this study was to analyze the relationship between SIF, X_{CO_2} , and NDVI with sugarcane yield and sugar level.

CAPÍTULO 3 – Considerações finais

A adaptação dos cultivos à variabilidade climática, principalmente em relação ao aumento do CO₂ atmosférico, torna-se importante para o suprimento da alta demanda de alimentos devido ao crescimento populacional. O fornecimento de grandes quantidades de dados em tempo real, com ótimas resoluções espaciais e temporais por meio de ferramentas de sensoriamento remoto, contribui para o entendimento dos processos fotossintéticos em função das fases fenológicas dos cultivos em escalas globais, regionais e locais.

Este estudo mostrou que há uma relação da Fluorescência de Clorofila Induzida pelo Sol (SIF), coluna média do CO₂ (Xco₂) e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) com a produção de açúcar e a qualidade da cana-de-açúcar. Pois o aumento do SIF indicou o crescimento vegetativo da cana-de-açúcar, os valores de Xco₂ indicaram o estabelecimento e a colheita, e o NDVI, a maturação da cultura.