

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NA MENSURAÇÃO DO ESTOQUE DE
CARBONO EM ÁREAS COM CANA-DE-AÇÚCAR**

VANESSA DURANTE POLONIO

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção de título de Mestre em Agronomia: Energia na Agricultura

BOTUCATU – SP
Junho – 2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NA MENSURAÇÃO DO ESTOQUE DE
CARBONO EM ÁREAS COM CANA-DE-AÇÚCAR**

VANESSA DURANTE POLONIO

Orientadora: Profª. Dra. Célia Regina Lopes Zimback

Co-orientador: Prof. Dr. Anderson Antonio da Conceição Sartori

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus
de Botucatu, para obtenção de título de
Mestre em Agronomia: Energia na
Agricultura

BOTUCATU – SP
Junho - 2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO- BOTUCATU (SP)

P778i Polonio, Vanessa Durante, 1987-
Índices de vegetação na mensuração do estoque de carbono em áreas com cana-de-açúcar / Vanessa Durante Polonio. - Botucatu : [s.n.], 2015
iii, 74 f. : il., grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2015
Orientador: Célia Regina Lopes Zimback
Coorientador: Anderson Antonio da Conceição Sartori
Inclui bibliografia

1. Cana-de-açúcar. 2. Carbono. 3. Vegetação e clima. 4. Sensoriamento remoto. I. Zimback, Célia Regina Lopes . II. Sartori, Anderson Antonio da Conceição. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu. IV. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE BOTUCATU
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NA MENSURAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO EM ÁREAS COM CANA-DE-AÇÚCAR”

AUTORA: VANESSA DURANTE POLONIO

ORIENTADORA: Profa. Dra. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. ANDERSON ANTONIO DA CONCEIÇÃO SARTORI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA) , pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ANDERSON ANTONIO DA CONCEIÇÃO SARTORI

Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas, Bloco G / Universidade do Sagrado Coração

Prof. Dr. LUÍS GUSTAVO FREDIANI LESSA

Depto de Solos e Recursos Ambientais - FCA

Prof. Dr. OSMAR DELMANTO JUNIOR

Departamento De / Faculdade de Tecnologia de Botucatu

Data da realização: 24 de julho de 2015.

“Cada sonho que você deixa pra trás, é um pedaço do seu futuro que deixa de existir”
(Steve Jobs).

Aos meus pais Elza Durante Polonio e
Julio Polonio Junior, minha eterna
gratidão,

Com amor,

Dedico.

AGRADECIMENTO ESPECIAL

À minha orientadora Dra. Célia Regina Lopes Zimback pela orientação, confiança, amizade, apoio e por compartilhar seus conhecimentos para o desenvolvimento desse trabalho.

Ao meu co-orientador Dr. Anderson Antonio da Conceição Sartori, pelas contribuições dadas ao trabalho, pela amizade, apoio e conselhos.

Serei sempre grata!

AGRADECIMENTOS

Aos alunos de mestrado Victor Costa Leda, Roberto Filgueiras e alunos de doutorado Tânia Maria de Carvalho e Diego Moraes pelas dúvidas sanadas e presteza em me ajudar e amizade.

Ao grupo de estudo GEPAG por todos os dias agradáveis, pela amizade que fiz e aprendizados, pois em uma ambiente onde há harmonia só prospera bem estar de todos.

Aos meus pais, Elza Durante Polonio e Julio Polonio Junior, pelos esforços, apoio e incentivo, sem isso não conseguiria conquistar todo esse esforço.

À família de Botucatu, Sofia Domiciano, Thais Regina Alves, Livia Gramolini Baptistão e Rafael Reginato Ávila pela companhia e bons momentos que dividimos ao longo desse tempo.

Ao Marcelo, pelas palavras de incentivo, paciência e bons momentos que passamos nesse período.

Aos meus amigos e familiares de Jaú – SP pelos momentos de distração e fins de semana agradáveis.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo apoio financeiro.

A todos que contribuíram de alguma forma para realização desta pesquisa.

Muito Obrigada!

SUMÁRIO

AGRADECIMENTO ESPECIAL.....	IV
AGRADECIMENTOS	V
1 RESUMO	1
2 SUMMARY	3
3 INTRODUÇÃO.....	5
4 REVISÃO DE LITERATURA	8
4.1 Cana-de-Açúcar	8
4.1.1 Sistema fotossintético C4	12
4.2 Carbono.....	14
4.2.1 Ciclo do Carbono	15
4.2.2 Efeito Estufa.....	18
4.2.3 Sequestro de Carbono.....	20
4.3 Sensoriamento Remoto	21
4.3.1 Conceitos.....	22
4.3.2 Índices de Vegetação.....	25
4.4 Índices de Vegetação em Cana-de-Açúcar	32
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	36
5.1 Área de estudo	36
5.1.1 Município de São Manuel	36
5.1.2 Áreas para a correlação e validação dos resultados localizadas no Município de Botucatu	37
5.1.3 Clima	38
5.1.4 Geologia	39
5.1.5 Solos.....	39
5.2 Materiais	41
5.2.1 Programas.....	41

5.2.2	Imagens	41
5.2.3	Áreas para comparação entre índices de vegetação	42
5.3	Metodologia	43
5.3.1	Elaboração do banco de dados com os talhões de cana-de-açúcar	43
5.3.2	Geração dos Índices de Vegetação nos talhões de cana-de-açúcar	43
5.3.3	Geração dos Índices de Vegetação nas áreas para validação	44
5.3.4	Dados amostrais de solo	45
5.3.5	Interpolação dos dados de amostra de solo	45
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
6.1	Áreas cultivadas com cana-de-açúcar no município de São Manuel.....	47
6.2	Índices de Vegetação nos talhões de cana-de-açúcar no município de São Manuel .	48
6.3	Índices de Vegetação nas áreas no município de Botucatu – SP.....	54
7	CONCLUSÃO	63
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo do carbono	15
Figura 2. Formação do efeito estufa.	19
Figura 3. Obtenção de imagens por sensoriamento remoto.....	22
Figura 4. Variação espectral da cana-de-açúcar em imagem MODIS (bandas: 3 – 459-479 nm; 4 –545-565 nm; 1 –620-670 nm; 2 –841-876 nm; 5 –1230-1250 nm; 6 –1628-1652 nm) em três idades (31 dias após o plantio - 216/03; 175 dias após o plantio – 360/03 e 364 dias após o plantio / 12 dias antes da colheita – 185/04) (RUDORFF E BATISTA 1985).....	33
Figura 5. Localização da área cultivada com cana-de-açúcar no município de São Manuel – SP.....	37
Figura 6. Localização das áreas para correlação e validação dos resultados.	38
Figura 7. Áreas de correlação e validação de talhões de cana-de-açúcar em Botucatu – SP.	43
Figura 8. Áreas de 50 metros gerados em cada ponto amostral nas áreas de correlação e validação de talhões de cana-de-açúcar em Botucatu – SP.....	46
Figura 9. Grade de pontos gerados em cada polígono (área de 50 metros) nas áreas de correlação e validação de talhões de cana-de-açúcar em Botucatu – SP.....	46
Figura 10. Cultura de cana-de-açúcar no município de São Manuel – SP. Alguns talhões apresentam-se como solo exposto ou com início de crescimento da cultura. Composição das bandas RGB/432 da imagem de 30 de janeiro de 2014 do satélite LANDSAT 8.	48
Figura 11. Índice de vegetação NDVI nos talhões de cana-de-açúcar no município de São Manuel-SP.....	49
Figura 12. Índice de vegetação CO ₂ flux nos talhões de cana-de-açúcar no município de São Manuel –SP.	51
Figura 13. Índice de vegetação IAF nos talhões de cana-de-açúcar no município de São Manuel - SP.	52
Figura 14. Índice de vegetação SAVI nos talhões de cana-de-açúcar no município de São Manuel – SP.	53
Figura 15. Áreas de validação (Área 1 e 2) cultivadas com cana-de-açúcar no município de Botucatu – SP. As áreas mais escuras correspondem ao maior vigor vegetativo da cultura	

de cana-de-açúcar. Composição das bandas RGB/432 da imagem de 30 de janeiro de 2014 do satélite Landsat 8.	54
Figura 16. Índices de vegetação (NDVI, CO ₂ flux, IAF e SAVI) na Área 1 em Botucatu – SP.	55
Figura 17. Índices de vegetação (NDVI, CO ₂ flux, IAF e SAVI) na Área 2 em Botucatu – SP.	56
Figura 18. Espacialização de Estoque de Carbono no Solo em diferentes profundidades (0-20 e 20-40) e média na Área 1 em Botucatu – SP.	59
Figura 19. Espacialização de Estoque de Carbono no Solo em diferentes profundidades (0-20 e 20-40) e média na Área 1 em Botucatu – SP.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Percentual e estoque de carbono no solo cultivado por 16 anos com cana-de-açúcar, submetido a prática de colheita crua ou queimada.....	11
Tabela 2. Emissões líquidas de CO ₂ durante o ciclo produtivo da cana-de-açúcar no Brasil em 1996 – Dados convertidos para Carbono.....	12
Tabela 3. Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) e Thermal Infrared Sensor (TIRS) ..	42
Tabela 4. Matriz de correlação entre os índices de vegetação na Área 1 em Botucatu – SP	57
Tabela 5. Matriz de correlação entre os índices de vegetação na Área 2 em Botucatu - SP	58
Tabela 6. Correlação de Pearson entre os valores de estoque de carbono no solo e os índices de vegetação na Área 1 em Botucatu - SP	61
Tabela 7. Correlação de Pearson entre os valores de estoque de carbono no solo e os índices de vegetação na Área 2 em Botucatu - SP	61

1 RESUMO

A cultura de cana-de-açúcar tem grande influência ambiental no Brasil, pois a colheita manual da cana-de-açúcar vem sendo substituída pela mecanizada no Estado de São Paulo e isso tem provocado uma grande queda nas emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE's). Desta forma, estudos recentes salientam a possibilidade da utilização dos índices de vegetação espectrais para estimar a biomassa, o estoque e o sequestro de carbono no monitoramento da cultura de cana-de-açúcar. Mediante avanços tecnológicos de sensores remotos que permitem analisar, por meio de imagem de satélites, a distribuição espacial de áreas cultivadas e as possíveis modificações da cobertura vegetal em diversas épocas, tem possibilitado o fornecimento quanto ao monitoramento das áreas vegetadas. Assim, como hipótese principal de estudo foi estabelecido que índices de vegetação podem discriminar diferentes áreas com distintos estoques de carbono em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, para o município de São Manuel –SP. A partir de imagens do satélite Landsat 8 foram gerados os seguintes índices de vegetação: NDVI, PRI, CO₂ flux, IAF e SAVI baseado em metodologia propostas por vários autores. O processamento e avaliação dos dados obtidos para a geração dos índices de vegetação, foram elaborados pelo programa ArcGIS 10.2.2 para a validação foram utilizadas duas áreas de cana-de-açúcar em Botucatu

– SP para a comparação das análises. Foram determinadas as correlações entre os índices de vegetação nas áreas de validação, onde houve alta correlação, com isso foi possível confirmar os valores apresentados para o município de São Manuel – SP e interpretá-los com a garantia das respostas espectrais. Através dos valores de estoque de carbono no solo nessas áreas em Botucatu – SP foi realizada a correlação com os valores dos índices de vegetação gerados, neste caso não houve correlação. Uma explicação para a baixa correlação entre índices relacionados à biomassa e teor de carbono no solo é que as áreas são cultivadas com cultura semiperene, que demanda revolvimento sistemático do solo além do manejo ser convencional outra vez com revolvimento do solo (sem deixar acumular material orgânico no solo). As análises dos índices gerados apresentaram o esperado, pois, em São Manuel, grandes áreas possuíam valores maiores ou iguais aos valores apresentados nas áreas de validação, onde havia presença da cultura de cana-de-açúcar e, com isso, pode-se indicar o uso de índices na mensuração de biomassa e sequestro de carbono no monitoramento e análise temporal da cultura.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar; sequestro de carbono; índice de vegetação.

VEGETATION INDICES IN THE MEASUREMENT OF CARBON STOCK IN AREAS WITH SUGAR CANE. Botucatu, 2015. 73 p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: VANESSA DURANTE POLONIO

Adviser: CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

Co-Advisor: ANDERSON ANTONIO DA CONCEIÇÃO SARTORI

2 SUMMARY

The cultivation of sugarcane has great environmental influence in Brazil, because sugarcane manual harvesting has been replaced by mechanized harvesting in São Paulo and this has caused a major drop in greenhouse gas emissions. Since 2007 the agreement was signed in the Environmental Protocol of the sugarcane industry. Thus, recent studies highlight the possibility of using spectral vegetation indices to estimate the biomass, the stock and carbon sequestration in monitoring the sugarcane crop. Through technological advances of remote sensors that allow to analyze, through satellite image, the spatial distribution of cultivated areas and possible changes in vegetation cover at different times, enable the monitoring of vegetated areas. As well as the main study hypothesis was that vegetation indices can discriminate different areas with different carbon stocks in areas cultivated with sugarcane, for the municipality of São Manuel – SP. The study area is located in the municipality of São Manuel - SP, were used to validate two areas of sugarcane in Botucatu - SP for comparison analysis. The processing and evaluation of data, generation of vegetation indices were prepared by ArcGIS 10.2.2 programs using satellite Landsat 8 bands. Were prepared correlation between vegetation indices in the validation of areas where there was a high correlation, it was possible to confirm the figures for the municipality of São Manuel - SP and interpret them with the assurance of spectral responses. Through the carbon inventory values in the soil in these areas in Botucatu - SP was performed with the correlation values of vegetation indexes generated in this case there was no correlation. One explanation for the low correlation between indexes related to biomass and carbon content in the soil is that the areas are cultivated with semi-perennial crop, which systematic soil disturbance beyond the demand management be beaten again with soil disturbance (no Stacking organic material soil). Analyses of indices generated had expected because, in São Manuel, large areas had values greater than or

equal to the amounts presented in the validation of areas where there was presence of vegetation sugarcane and, therefore , can be indicated the use of indices to measure biomass, and carbon stock monitoring and temporal analysis of culture.

Keywords: Sugar cane; carbon sequestration; Vegetation Index.

3 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de açúcar do mundo e o segundo maior produtor de etanol, tornando a cana-de-açúcar uma cultura de grande importância econômica para o país. São Paulo é o principal Estado produtor, responsável por quase 51% da cana processada no Brasil para produção de açúcar e álcool.

Além do uso comercial para açúcar, etanol e cogeração nas usinas, a cana é amplamente utilizada por pequenos agricultores, em todo o país, como fonte de alimento para animais ou como matéria-prima para açúcar mascavo e a cachaça artesanal.

Como a estimativa da produção para determinada cultura é um dos dados mais importantes para planejamento no setor público e para a iniciativa privada, o monitoramento de áreas agrícolas e estimativas da produtividade com o uso de sensoriamento remoto e geotecnologias contribuem significativamente para se obter metodologias eficazes e de baixo custo, especialmente no Brasil, que possui grande extensão territorial.

O projeto CANASAT, desde 2003, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em conjunto com a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (ÚNICA), o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) e com Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA), vem mapeando, por meio de métodos de

sensoriamento remoto, as áreas cultivadas com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo e, desde 2006, vem monitorando o modo de colheita dessas áreas. Novos avanços são esperados no que se refere ao potencial do uso de imagens obtidas por satélites orbitais em modelos agrônômicos, na estimativa de produtividade de culturas agrícolas.

Com a proibição da queimada e a substituição da colheita manual da cana-de-açúcar pela mecanizada no Estado de São Paulo nos últimos sete anos, por força do Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético, houve uma queda crescente das emissões de gases de efeito estufa (GEE) pelo setor. Cresce consideravelmente, a cada ano, a área de cana colhida com máquinas que não requerem a queima da palha para a colheita dos colmos.

A queima da cana é usada para facilitar o corte manual da cana-de-açúcar, porém, libera para a atmosfera grande quantidade de gás carbônico (CO_2), óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4). O efeito estufa aumenta com elevadas concentrações desses gases na atmosfera, constituindo um dos principais problemas ambientais atuais.

Com o progresso das informações sobre o efeito estufa, pesquisas vêm sendo realizadas no sentido de se buscar alternativas que tornem o solo menos emissor e mais absorvedor de gases. A implantação dessas alternativas, além dos benefícios que podem trazer para os solos, pode conferir aos agricultores Reduções Certificadas de Emissão (RCE), negociáveis em bolsas de valores. Este processo é o denominado Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), uma das opções incluídas no Protocolo de Kyoto para abater as metas de redução de emissão de países industrializados.

Em função do aumento excessivo destes gases na atmosfera pela ação antrópica e consequências negativas que têm sido observadas mundialmente, diversas medidas estão sendo adotadas para a redução destas emissões. Uma das maneiras para a redução do principal gás de efeito estufa (CO_2) da atmosfera é o sequestro geológico de carbono, o qual consiste na captura deste gás de fontes emissoras estacionárias (indústrias, por exemplo), transporte e armazenamento em reservatórios geológicos.

Diante dos progressos tecnológicos de sensores remotos, que permitem analisar através de imagem de satélites a distribuição espacial de áreas cultivadas e as possíveis mudanças da cobertura vegetal em distintas épocas, é possível realizar o monitoramento das áreas vegetadas.

Estudos recentes salientam a possibilidade da utilização dos índices de vegetação espectrais para estimar a biomassa, o estoque e o sequestro de carbono, os

quais têm sido muito utilizados no monitoramento de áreas vegetadas, na determinação e estimativa do índice de área foliar, biomassa e radiação fotossinteticamente ativa.

Como hipótese principal do estudo tem-se que índices de vegetação podem discriminar diferentes áreas com distintos estoques de carbono em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, no município de São Manuel – SP.

Para tanto, os objetivos específicos foram:

- Confecção e manipulação das imagens para determinação dos índices de vegetação da cultura de cana-de-açúcar em São Manuel – SP;
- Confecção de mapa de estoque de carbono a partir de dados de análise química do solo nas áreas de validação;
- Verificar se existe correlação entre os índices de vegetação NDVI, CO₂ flux, SAVI e IAF nas áreas de validação;
- Verificar se existe correlação entre o sequestro de C obtidos por sensoriamento remoto com o estoque de carbono no solo, em áreas com plantio de cana-de-açúcar.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Cana-de-Açúcar

A história da cana-de-açúcar no Brasil teve início logo após a chegada dos portugueses e, vem-se mantendo até hoje como um dos principais cultivos agrícolas do país. No século XX, até o início da década de 70, a economia do setor açucareiro passou por diversas crises (CANA-DE-AÇÚCAR, 1997), entretanto, em meados daquela década, o país implantou o maior programa de combustível renovável do mundo, o PROÁLCOOL, que, além de reduzir a dependência do Brasil pelo petróleo dos países do oriente médio, (na época, o País importava aproximadamente 84% de sua necessidade diária de petróleo), o álcool produzido a partir da cana-de-açúcar passou a ser usado como fonte de combustível. Assim, permitiu a redução da emissão de monóxido de carbono em 57%, de hidrocarbonetos em 64% e de óxidos de nitrogênio em cerca de 13%, quando comparados com carros movidos à gasolina (BOHM, 1986).

A cultura da cana-de-açúcar tem um papel ambiental importante, visto que o etanol, um dos subprodutos, é uma das alternativas para a diminuição a emissão de gases causadores do efeito estufa, haja vista que a sua queima como combustível reduz em 70% a emissão de CO₂ na atmosfera em relação à gasolina (CONAB, 2014).

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), devido à sua importância na agroindústria por produzir e comercializar açúcar e etanol é uma das principais culturas cultivadas no Brasil, no Caribe e nos países da América Central (COELHO et al., 2003).

Durante a safra brasileira de 2013/2014, 597 milhões de toneladas de cana-de-açúcar colhidas produziram aproximadamente 37,88 milhões de toneladas de açúcar e cerca de 27,96 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2014).

O etanol, produzido a partir da cana-de-açúcar no Brasil, conta com valores positivos para os anos seguintes, devidos principalmente, ao crescimento do consumo interno. A produção estimada para 2019 é de 58,8 bilhões de litros, mais que o dobro da registrada em 2008. O consumo interno está estimado em 50 bilhões de litros e as exportações em 8,8 bilhões (MAPA, 2015).

A política nacional para o cultivo da cana-de-açúcar orienta-se no desenvolvimento sustentável da cultura, embasado em critérios econômicos, ambientais e sociais. O programa Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar (ZAEcana) regulamenta o plantio da cana, levando em consideração o meio ambiente e a aptidão econômica da região. A partir de um levantamento minucioso, são estipuladas as áreas favoráveis ao plantio com base nos tipos de clima, solo, biomas e necessidades de irrigação (MAPA, 2015).

Ainda de acordo com o mesmo autor, está previsto um calendário para redução gradual, até 2017, da queima da cana-de-açúcar em áreas onde a colheita é mecanizada, impedindo o plantio na Amazônia, no Pantanal, na Bacia do Alto Paraguai (BAP) e em áreas com cobertura vegetal nativa.

Para fins de produção de bioenergia, uma cultura precisa ser de desenvolvimento rápido e de produção de biomassa com elevado rendimento na colheita e, em termos de energia produzida, deve exceder os combustíveis de origem mineral. Exercendo os critérios citados, a cana-de-açúcar é a cultura energética mais promissora (WACLAWOVSKY et al., 2010).

A cana-de-açúcar é uma gramínea semiperene e expressa um bom desenvolvimento em solos onde há boa aeração, boa drenagem, o que exige solos com profundidade superior a um metro. O desenvolvimento da cana deve-se em dois ciclos. O primeiro ciclo da cultura é chamado de cana-planta, ou seja, quando a cultura ainda não teve o primeiro corte. O período da cana-planta pode ser de 12 ou 18 meses, conforme a variedade (CONAB, 2014).

Após o primeiro corte encerra-se o ciclo da cana-planta e se inicia o ciclo da cana-soca. Neste ciclo o período passa a ser de 12 meses para todas as variedades. A cultura tem como característica permitir vários cortes, sem a necessidade de replantio, porém, a cada safra é necessária a aplicação de insumos agrícolas de forma que a cultura continue com patamares de produtividades vantajosos. Quanto maior o número de cortes, menor é a resposta da cultura à aplicação desses insumos, o que faz com que em determinado momento seja necessária a renovação desses canaviais (CONAB, 2014).

As condições climáticas da região sudeste do Brasil, principalmente no Estado de São Paulo, são favoráveis à maturação fisiológica natural da cana-de-açúcar com início nos meses de abril/maio e clímax no mês de agosto. A somatória das quedas gradativas da temperatura com a redução e interrupção da precipitação retarda e/ou inibe o desenvolvimento vegetativo da planta, enquanto o processo de fotossíntese prossegue normalmente, com a produção de sacarose, a qual é transportada e armazenada no vacúolo das células parenquimáticas nos entrenós do colmo (GHELLER, 2001).

Por ser classificada como uma planta C4, a cana apresenta taxa de crescimento e uso da água altamente eficiente. Rockstrom et al (1999) citam uma eficiência de uso de água de 123 a 168 L por kg de massa seca. Yates e Taylor (1988) publicaram registro de gasto bem inferior na Austrália (entre 69 e 111 litros por tonelada de cana), sendo que a média das plantas C4 está entre 250 a 350 L kg⁻¹ de massa seca e a das plantas C3 está entre 450 a 1000 litros de água por tonelada de massa seca.

A cana-de-açúcar, pelo mesmo motivo, é considerada altamente eficiente na conversão de energia radiante em energia química, com taxas fotossintéticas calculadas em até 100 mg de CO₂ fixado por dm² de área foliar por hora, para efeito de parâmetro, chega a acumular o dobro de biomassa que uma planta C3, como a soja. Além disso, as plantas C4 possuem um mecanismo que diminui a perda de água em ambientes secos (ALENCAR, 2012; RODRIGUES, 1995). Os processos de bioconversão de energia na cana-de-açúcar são mais efetivamente afetados pelos seguintes parâmetros ambientais: luz (intensidade e quantidade), concentração de CO₂, disponibilidade de água, nutrientes e temperatura.

Entretanto, esta alta atividade fotossintética, não se correlaciona diretamente com a elevada produtividade de biomassa. A grande capacidade da cana-de-açúcar, para a produção de matéria orgânica, reside na alta taxa de fotossíntese por unidade

de superfície de terreno, que é influenciado pelo Índice de Área Foliar (RODRIGUES, 1995).

Em termos de uso de água, esse fato possui implicações relevantes, pois para fixar, por meio da fotossíntese, uma mesma quantidade de CO₂ que uma planta C3, a planta C4 pode manter a abertura estomática menor, o que, necessariamente implica em menores perdas de água. Com isso, pode-se dizer que as plantas C4 possuem maior eficiência de uso de água (RODRIGUES, 1995).

Casagrande e Vasconcelos (2008) afirmaram que o limite superior de temperatura das plantas C4 está em torno de 45°C (C3 tem limite de aproximadamente 30°C) e apresentaram ausência de fotorrespiração, ou seja, mesmo em situação de estresse hídrico, consegue fazer a fotossíntese com mecanismo eficiente de reunir e transportar CO₂.

A partir de 1980, a cultura canavieira tem gerado grandes expectativas pelas potenciais possibilidades para a produção de energia sustentável (ARRUDA, 2011).

Em estudo de balanço energético na cultura de cana-de-açúcar, Macedo (1998) determinou as emissões líquidas de carbono para atmosfera. Em adição a este estudo, introduziu-se uma nova variável, a partir dos dados de carbono no solo em função de dados referentes a 16 anos do manejo, cana crua x queimada, na região nordeste do Brasil. Neste experimento, encontrou-se um aumento do C no solo no sistema cana crua da ordem de 270 kg ha⁻¹ ano⁻¹ à 20 cm (Tabela 1), em média, nos 16 anos de estudo. Neste sentido, a manutenção da palhada no sistema favorece o acúmulo de matéria orgânica no solo, reduzindo ainda mais a emissão líquida de C via queima de combustíveis fósseis (Tabela 2).

Tabela 1. Percentual e estoque de carbono no solo cultivado por 16 anos com cana-de-açúcar, submetido a prática de colheita crua ou queimada

Profundidade (cm)	Sistema de Colheita				% de diferença
	Queimada		Crua		
	%	Kg ha ⁻¹	%	Kg ha ⁻¹	
0 – 10	1,16	15776	1,334	17475	11
10 - 20	1,102	15538	1,276	18119	17
Total	-	31314	-	35594	14

Adaptado de Macedo (1998).

Tabela 2. Emissões líquidas de CO₂ durante o ciclo produtivo da cana-de-açúcar no Brasil em 1996 – Dados convertidos para Carbono

		10 ⁶ Mg C (equivalente) ano ⁻¹	
		Com queima	Sem queima
Combustíveis fósseis utilizados na agroindústria		+ 1,28	+ 1,28
Emissões de metano (CH ₄) – com a queima da palhada		+0,06	0
Emissões de N ₂ O		+ 0,24	+ 0,24
Álcool substituindo a gasolina		- 9,13	- 9,13
Substituição do óleo combustível por bagaço		- 5,20	- 5,20
Contribuição do C na MOS após 16 anos		0	- 1,34
Sequestro de Carbono		- 12,74	-14,15

Adaptado de Macedo (1998). Onde MOS: Matéria Orgânica do Solo

4.1.1 Sistema fotossintético C4

A fotossíntese consiste em dois procedimentos acoplados. Um deles é de caráter fotoquímico e envolve a absorção de luz e o transporte de elétrons e o outro é bioquímico, com a absorção do gás carbônico e a formação de compostos que encadeiam os átomos de carbono e retêm a energia absorvida a partir da luz nas ligações químicas das moléculas formadas (BUCKERIDGE, 2011).

O gás carbônico penetra no mesofilo por meio dos estômatos, sendo, essencial que estes estejam abertos. A partir da câmara subestomática, o CO₂ entra nas células é capturado por um complexo enzimático altamente sofisticado chamado de Ribulose 1,5 bisfosfato carboxilase (RUBISCO) que está presente nas membranas dos tilacóides. Este complexo enzimático tem dois substratos, o CO₂ e a RuBP, sendo portanto o elemento que fecha o ciclo de carboxilação (BUCKERIDGE, 2011).

Existem dois caminhos de carboxilação, um deles, a via tem início com um composto de 3 carbonos (3PGA) e por isto é denominada de via C3. Plantas como soja, milho, feijão e todas as árvores que realizam o processo de fotossíntese, usam a via C3 para a fotossíntese (BUCKERIDGE, 2011).

Determinadas plantas, principalmente gramíneas (cana-de-açúcar, milho...) e parte das bromélias, desenvolveram um sistema complementar à via C3 chamado de via C4. Este sistema permite à folha o armazenamento de ácidos com 4

carbonos antes de estes serem captados pela RUBISCO. Neste caso há uma mudança morfológica importante que é a existência de uma bainha vascular, uma camada adicional de células que envolve os feixes vasculares. O gás carbônico é capturado nas células do mesofilo pela enzima Fosfo Enol Piruvato carboxilase (PEPc), presente nas células do mesofilo, formando um composto de quatro carbonos que poderá ser descarboxilado a 3PGA e utilizado pela RUBISCO, presente nas células da bainha vascular. Nas células da bainha vascular, o ácido (malato, por exemplo) é descarboxilado, formando CO_2 novamente (BUCKERIDGE, 2011).

Segundo o mesmo autor, este mecanismo causa um aumento espetacular na concentração de CO_2 na célula da bainha em relação à do mesofilo. Enquanto a pressão parcial de CO_2 no mesofilo é da ordem de 150 μbar , na bainha vascular chega ser dez vezes maior (1500 μbar). Com isto, a RUBISCO fica em uma situação em que a concentração de substrato é muito alta, evitando a competição do oxigênio que leva à fotorrespiração. Como um dos grandes problemas das plantas é a perda de água pelos estômatos quando estes estão abertos para permitir a entrada do CO_2 , o mecanismo C4, ao aumentar em dez vezes a concentração deste gás nas células da bainha vascular, acaba evitando a perda de água, pois o aproveitamento do CO_2 é muito melhor do que em plantas C3.

A existência da via C4 é um exemplar interessante da relação estrutura-função em plantas. A bainha vascular e suas estruturas bioquímicas acopladas à via C3 desenvolveram, durante a evolução, uma espécie de “bomba” que torna o sistema fotossintético mais eficiente em certas situações, praticamente eliminando a fotorrespiração. Há várias consequências importantes da presença da bainha vascular. Uma delas é que as taxas de absorção de CO_2 são muito mais altas, pois o sistema pode armazenar mais carbono de forma intermediária (no ácido C4) tornando a planta relativamente menos dependente de controlar a abertura e fechamento de estômatos para prevenir a perda de água (BUCKERIDGE, 2011).

Essas condições beneficiam a maior fixação de carbono pela planta refletido pelo aumento da produção de biomassa total (raízes, colmo e folhas) e consequentemente na produtividade. Estas mudanças climáticas proporcionam alteração no balanço de carbono da cultura, retirando mais CO_2 da atmosfera fixando-o em maior proporção (MAGRO et al., 2011).

A cana-de-açúcar tem capacidade para fixar carbono e potencial para aumento de produtividade em condições de alta concentração de CO₂ (MAGRO et al., 2011).

4.2 Carbono

O carbono é considerado um dos elementos mais abundantes no Universo e pode ser encontrado, tanto na sua forma orgânica presentes nos organismos vivos e mortos não decompostos, bem como na forma inorgânica presente nas rochas (SILVA, 2013).

A importância do carbono e seus compostos são indiscutíveis. Esse é onipresente na natureza e seus compostos (proteínas, carboidratos e gorduras) são constituintes essenciais de toda matéria viva e fundamentais na respiração, fotossíntese e regulação do clima (MARTINS et al., 2003).

De acordo com Tonello (2007), o carbono está presente na biosfera nas moléculas orgânicas com estado reduzido gerado na fotossíntese, nos solos como matéria orgânica; na litosfera, como combustíveis fósseis e depósitos (rochas sedimentares); nos oceanos como carbonato de cálcio nas conchas e; na atmosfera, como monóxido de carbono, CO (gás traço presente na atmosfera), gás carbônico, CO₂ (conexão entre os diversos reservatórios de carbono) e metano, CH₄ (forma mais reduzida de carbono, produzida durante a fermentação da matéria orgânica).

O dióxido de carbono (CO₂) é naturalmente liberado na atmosfera em decorrência dos processos de respiração e decomposição de seres vivos – animais e plantas. Em contrapartida, a atividade humana é a grande responsável pela maior parte da produção de CO₂ no planeta, graças a atividades relacionadas ao desmatamento (queimadas e conversão de florestas em solo para atividade agropecuária), atividades industriais e queima de combustíveis fósseis, como petróleo, carvão e gás natural para produção de energia. Conforme dados do Ministério do Meio Ambiente, o CO₂ é o mais abundante dos gases de efeito estufa e é utilizado como referência para classificação do poder de aquecimento dos demais gases (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2013).

As áreas florestais exercem papel relevante no ciclo global de carbono. As árvores, pela fotossíntese, absorvem o CO₂ atmosférico e o armazenam na sua

biomassa (SILVA, 2013). Segundo Ketterings et al. (2001), a estimativa de biomassa acima do solo é imprescindível aos estudos do balanço global de carbono, e de acordo com Cerri et al. (2001), o carbono estocado em ecossistemas tropicais (solo e vegetação) representa cerca de 20 a 25% do carbono terrestre mundial.

4.2.1 Ciclo do Carbono

Os reservatórios de CO_2 na atmosfera, litosfera e oceanos são extremamente grandes. Os fluxos entre estes compartimentos são bidirecionais e quase em balanço, o que faz com que as estimativas de troca sejam difíceis (MARTINS et al, 2003). A Figura 1 ilustra as principais rotas de troca estabelecidas.

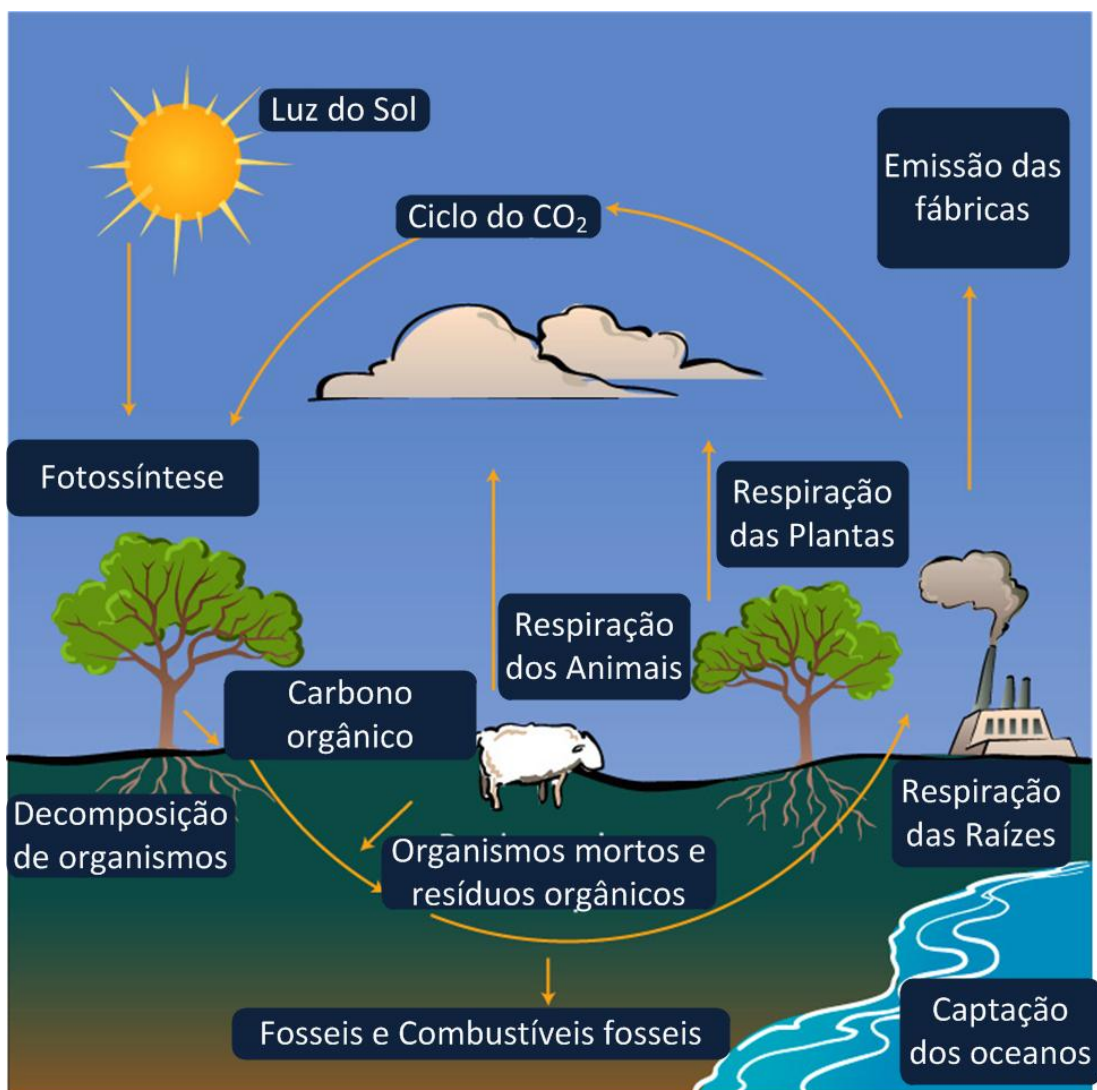
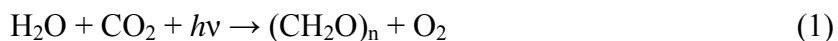


Figura 1. Ciclo do carbono

Disponível em: <http://claudioauer.blogspot.com.br/2013/05/ciclo-do-carbono.html>

As trocas de CO₂ entre a atmosfera e a biosfera terrestre ocorrem principalmente através da fotossíntese e a respiração das plantas. Estes dois processos podem ser resumidos pelas seguintes Equações 1 e 2:

Fotossíntese:



Onde: $h\nu$: energia solar; $(\text{CH}_2\text{O})_n$ = fórmula geral dos monossacarídeos

Respiração:



Onde: $h\nu$: energia solar; $(\text{CH}_2\text{O})_n$ = fórmula geral dos monossacarídeos

Dessa maneira, parte do CO₂ fixado, segundo a Equação 1, é reemitido segundo a Equação 2. O restante será armazenado, na forma de biomassa, pelas folhas, caules, raízes, etc, no que é chamado de Produção Primária Líquida (PPL). Essa biomassa, ao ser consumida como alimento por organismos heterotróficos, é parcialmente reconvertida de forma imediata a CO₂ pela respiração e, posteriormente, por processos de decomposição da matéria orgânica, através da morte de animais e plantas e ataque por microrganismos (MARTINS et al., 2003).

Tonello (2007) confirmou que o carbono, que faz parte de dois gases, metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂), é o elemento mestre nos ciclos globais chamados ciclos biogeoquímicos. Estes envolvem a vida (bio), a terra (geo) e a química. O ciclo global do carbono é composto de vários ciclos simples. O ciclo simples mais importante é denominado fotossíntese – respiração e depende intimamente da presença de plantas, animais e bactérias. Plantas sejam na terra ou nos oceanos, absorvem gás carbônico e usando água e luz do sol, convertem o gás carbônico em tecido vivo (CH₂O), chamado frequentemente de biomassa ou matéria orgânica. O oxigênio (O₂) é liberado durante a produção de biomassa. Se somente a fotossíntese ocorresse, não teríamos mais gás carbônico (CO₂) na atmosfera. Como consequência disso, haveria uma queda na temperatura da Terra por falta deste gás. Mas, existe um processo que complementa a fotossíntese: a respiração. Neste processo, a biomassa e a matéria orgânica reagem com o oxigênio e liberam gás carbônico e energia.

Como resultado da fotossíntese tem-se a liberação de O₂ em quantidade proporcional ao de CO₂ absorvido pelo vegetal. Na ausência de luz, um processo inverso acontece, o da respiração, onde os vegetais absorvem O₂ presente na atmosfera para que juntamente com a glicose produzida durante a fotossíntese, seja produzida a energia necessária à manutenção da vida (CARNEIRO, 2007). Este processo é fundamental para o ciclo do carbono (Figura 1), onde o carbono é absorvido pelas plantas e finalizado pelos decompositores, reiniciando todo o processo, com a devolução de todos os nutrientes para o meio ambiente.

As florestas estão presentes no ciclo biológico do carbono e desempenham papel importante para o equilíbrio do estoque de carbono global. Segundo relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC (2000), as plantas e os solos armazenam mais carbono do que o existente atualmente na atmosfera. As florestas estão ligadas ao ciclo do carbono global pela fotossíntese, respiração e decomposição. Segundo Martinelli e Camargo (1996), a forma pela qual as florestas estão intimamente ligadas ao ciclo do carbono pode ser vista pela Equação 3:

$$\Delta\text{CO}_2 = \text{CF} + \text{UT} + \text{OC} \pm \text{FO} \quad (3)$$

onde:

ΔCO_2 = variação na concentração de CO₂ na atmosfera;

CF = quantidade de CO₂ lançado na atmosfera devido à queima de combustível fóssil;

UT = quantidade de CO₂ lançado na atmosfera devido às mudanças no uso da terra;

OC = quantidade de CO₂ “absorvida” pelo oceano e;

FO = balanço fotossíntese e respiração.

Para a Equação 3, se o balanço for positivo, a respiração seria maior que a fotossíntese e CO₂ estaria sendo lançado na atmosfera. Por outro lado, em casos que a fotossíntese fosse maior que a respiração, o CO₂ estaria sendo retirado da atmosfera. Desta forma, os processos de fotossíntese, respiração, assim como decomposição e combustão são os principais meios de troca de carbono entre atmosfera e entre os sistemas ecológicos terrestres. A emissão de CO₂ provocada pelo desmatamento na região dos trópicos corresponde cerca de 20% do total das emissões provocadas pelas ações antrópicas nestas regiões (IPCC, 2000).

As árvores absorvem CO₂ da atmosfera através do processo de fotossíntese durante seu crescimento, armazenando, portanto, consideráveis quantidades de

carbono na biomassa de folhas, galhos, troncos e raízes e liberando oxigênio de volta a atmosfera (YU, 2004). Sendo assim, despontam como uma das alternativas viáveis para mitigar o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera via fixação de carbono pelas plantas arbóreas, principalmente (GATTO et al., 2011).

4.2.2 Efeito Estufa

O efeito estufa é um processo natural e intrínseco do meio ambiente, onde a perda de radiação infravermelha (calor) emitida pelo Planeta Terra é reduzida pela presença de gases na atmosfera (AREVALO et al., 2002). Dessa forma, o planeta mantém-se aquecido em consequência do calor que é retido.

A Figura 2 ilustra a formação do efeito estufa. A atmosfera – a fina camada de gases que envolvem o planeta Terra – é constituída principalmente por Nitrogênio (N₂) e Oxigênio (O₂) que, juntos, compõem cerca de 99% da atmosfera. Alguns outros gases encontram-se presentes em pequenas quantidades, incluindo os conhecidos como “gases de efeito estufa”. Tais gases, contudo, são essenciais para a manutenção da estabilidade do clima e dos ecossistemas terrestres (IPAM, 2002).

Ainda segundo o mesmo autor, dentre estes, estão o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O) e também o vapor d’água (H₂O). Esses gases são denominados gases de efeito estufa por terem a capacidade de reter o calor na atmosfera, do mesmo modo que o revestimento de vidro de uma estufa para o cultivo de plantas o faz. O vapor d’água e o dióxido de carbono têm a propriedade de permitir que as ondas eletromagnéticas que chegam do Sol atravessem a atmosfera e aqueçam a superfície terrestre. Contudo, esta mesma camada dificulta a saída de calor (radiação infravermelha) emitida pela Terra impedindo que ocorra uma perda demasiada de calor irradiado para o espaço. Isso mantém a Terra aquecida. O efeito estufa é um fenômeno natural que acontece há milhões de anos e é necessário, pois sem ele a temperatura média da Terra seria 33°C mais baixa e a vida no planeta, tal como a conhecemos, não seria possível.

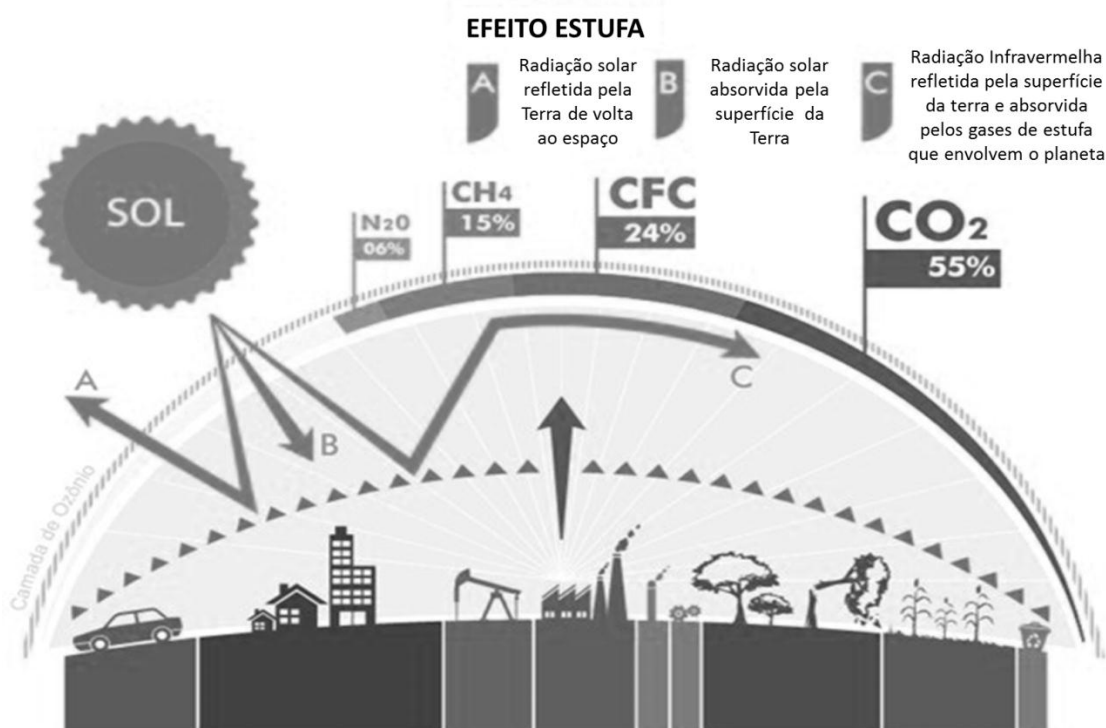


Figura 2. Formação do efeito estufa.
Fonte: SUZANO, 2013.

O dióxido de carbono, metano e o óxido nítrico são os contribuintes gasosos da atmosfera que mais têm sido discutidos. No entanto, atenção prioritária tem sido dedicada ao dióxido de carbono, uma vez que o volume de suas emissões para a atmosfera representa algo em torno de 55% do total das emissões de gases de efeito estufa e seu tempo de permanência na atmosfera estende-se por pelo menos 10 décadas. Somando-se ao processo natural, as atividades antrópicas estão resultando em contribuições adicionais de gases de efeito estufa, acentuando a concentração dos mesmos na atmosfera e, conseqüentemente, ampliando a capacidade de absorção de energia que naturalmente já possuem. Reservatórios naturais e sumidouros que têm a propriedade de absorver o CO₂ do ar são também afetados por ação antrópica, como as queimadas e os desmatamentos (MCT, 1999; IPAM, 2002).

O aumento do efeito estufa é conseqüência do aumento da queima de combustíveis fósseis como os derivados do petróleo, gás natural e carvão mineral, para a produção de energia que movimenta indústrias, automóveis, aparelhos domésticos e também da derrubada e queimada de florestas (KIRCHHOFF, 1992).

Conseqüentemente, os impactos da variação da concentração dos gases de efeito estufa não são imediatamente conhecidos, mas serão sentidos de alguma

forma no futuro pois, é o estoque destes gases na atmosfera que conduz o aquecimento global ao invés do fluxo das emissões (ARATANGY, 2007).

4.2.3 Sequestro de Carbono

O sequestro de carbono em um determinado ambiente é quantificado pela estimativa da biomassa vegetal acima e abaixo do solo, pelo cálculo do carbono estocado nos produtos madeireiros e pela quantidade de CO₂ absorvido no processo de fotossíntese (ANDRADE; IBRAHIM, 2003). Estima-se que aproximadamente 40% da massa seca de uma planta é formada por carbono fixado na fotossíntese (DIAS FILHO, 2006).

O grande responsável pela manutenção e sequestro do carbono é a fotossíntese, cujo CO₂ é retirado da atmosfera por este fenômeno, em que a fotossíntese é a reação química mais importante do planeta, sendo o único processo capaz de absorver a energia luminosa proveniente do sol, e que todos os processos vitais dependem da fotossíntese para a formação de alimentos na forma de carboidratos e também para a formação do oxigênio (BARBOSA et al., 2013).

O conceito “Sequestro de Carbono” foi lançado desde o princípio da Convenção do Clima e se consagrou somente a partir da Conferência de Kyoto, em 1997, quando foram aprovados os mecanismos de flexibilização dos mecanismos de redução do GEE, que incorporam o sequestro florestal de carbono (YU, 2004). Trata-se de uma modalidade dentro do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) do protocolo de Kyoto.

O sequestro de carbono em ecossistemas terrestres engloba tanto a captura de carbono da atmosfera quanto a prevenção de emissão de gases de efeito estufa dos ecossistemas. A fixação do carbono pode se dar tanto na planta como no solo. O total de carbono armazenado em um sistema reflete o balanço, em longo prazo, entre a absorção da planta, a fixação de carbono no solo e as perdas por respiração e decomposição (MAPA, 2001).

Estudos sobre a absorção, distribuição e fixação de CO₂ conduzidos em diversas regiões e com diversas espécies vegetais (Eucalipto, Dendê e Florestas Naturais) apresentam resultados altamente variáveis.

O sequestro de carbono refere-se aos processos de absorção e armazenamento de CO₂ atmosférico, com intenção de minimizar seus impactos no ambiente, já que se trata de um GEE. A finalidade desse processo é conter e reverter o acúmulo de CO₂ atmosférico, visando a diminuição do efeito estufa (RENNER, 2004).

Segundo Baird (2002), o dióxido de carbono pode ser removido da atmosfera por meio do crescimento de plantas selecionadas especialmente para essa finalidade. Quanto mais rápido o crescimento mais rápida é a absorção de CO₂ devido ao vigoroso crescimento das árvores nos trópicos, onde um hectare desta floresta sequestra muito mais carbono do que um hectare de floresta temperada.

Yu (2004) comenta que no que se refere ao objetivo central da convenção do clima, o sequestro de carbono trata-se de uma medida paliativa e não permanente, embora possa trazer benefícios ecológicos secundários. Existe uma variação no custo de absorção de CO₂ que estão associados aos diversos fatores como: diferenças regionais no clima, variações existentes na qualidade do solo, diferenças no manejo, tempo para corte e tecnologias utilizadas.

4.3 Sensoriamento Remoto

A *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) definiu formalmente que o sensoriamento remoto é a medição ou aquisição de informação de alguma propriedade de um objeto ou fenômeno, por um dispositivo de registro que não esteja em contato físico ou íntimo com o objeto ou fenômeno em estudo (JENSEN, 2009).

Para Crepani em 1983, citado por Vettorazzi (1992), o sensoriamento remoto é a ciência e a arte de se obter informações sobre um objeto, área ou fenômeno, pela análise de dados coletados por aparelhos denominados sensores, que não entram em contato direto com os alvos em estudo, como mostrado na Figura 3.

Moreira (2001) resumiu o sensoriamento remoto como um conjunto de atividades utilizado para a obtenção de informações a respeito dos recursos naturais, renováveis e não renováveis, por meio da utilização de dispositivos sensores colocados em aviões, satélites ou até mesmo na superfície.

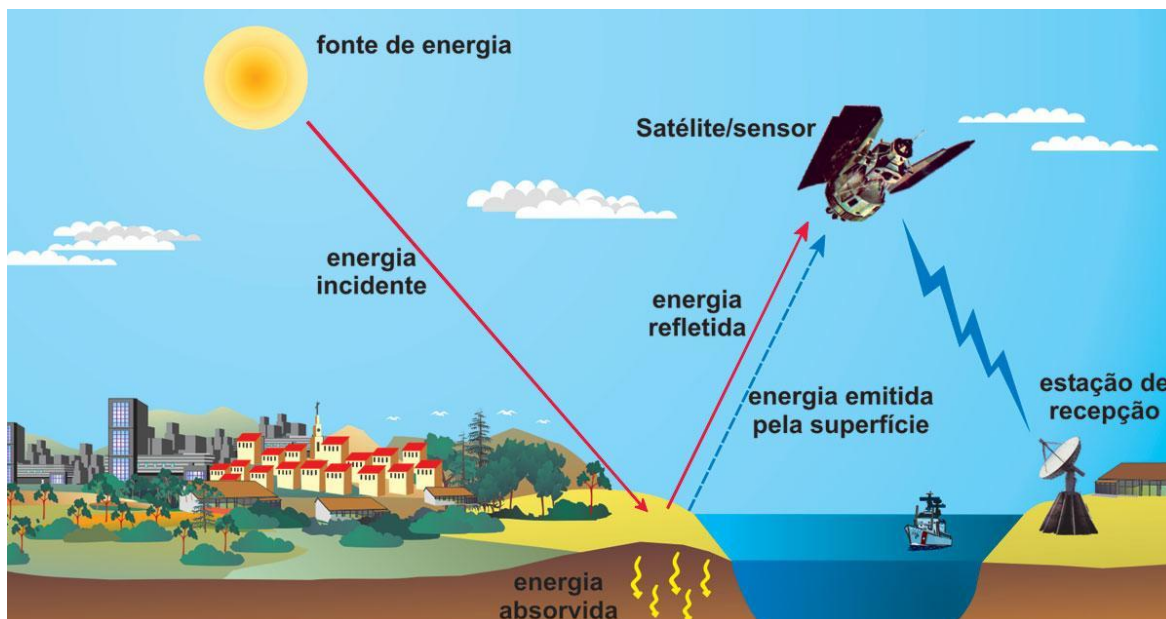


Figura 3. Obtenção de imagens por sensoriamento remoto.

Fonte: FLORENZANO, 2002.

Sensoriamento remoto é a tecnologia espacial que permite a aquisição de informações sobre a superfície terrestre à distância, pela interpretação dos dados captados por sensores instalados em aeronaves ou satélites. O seu registro gráfico dá-se por meio de diversos produtos, tais como: fotografias aéreas, imagens de satélites, imagens de radar, etc (BROLLO, 2001).

4.3.1 Conceitos

O Sol constitui-se na mais importante fonte de radiação natural para a Terra; a radiação eletromagnética (REM) é definida como sendo a forma de energia que se move à velocidade da luz, sendo em forma de ondas ou de partículas eletromagnéticas, não necessitando de um meio material para se propagar no espaço (ROSENDO, 2005).

A representação contínua da radiação eletromagnética, em termos de comprimento de onda, frequência ou energia, é denominada espectro eletromagnético. O espectro eletromagnético é subdividido em faixas que representam regiões com características próprias, em termos de processos físicos de detecção de energia, como pode ser observado a seguir (ROSENDO, 2005):

- Raios Cósmicos, raios γ : ($< 0,003 - 0,4 \mu\text{m}$);

- Raios X: (0,03 – 3,0 nm);
- Ultravioleta: (0,003 – 0,4 μm);
- Visível: (0,4 – 0,72 μm), azul (0,45 – 0,50 μm), verde (0,50 – 0,54 μm), vermelho (0,65 – 0,72 μm);
- Infravermelho Próximo: (0,72 – 1,3 μm);
- Infravermelho Médio: (1,3 – 4,0 μm);
- Infravermelho Distante: (4,0 – 300 μm);
- Microondas: (1,0 – 100 cm);
- Ondas de Rádio: (> 100 cm).

Dentre essas divisões do espectro eletromagnético, as mais utilizadas em Sensoriamento Remoto compreendem as faixas do visível, infravermelho próximo, infravermelho médio, infravermelho distante e micro-ondas.

No momento em que a radiação solar incide no topo da atmosfera, parte dessa radiação é espalhada e/ou refletida pelas partículas atmosféricas, outra parte atravessa a atmosfera e atinge o alvo; a partir daí, podemos observar três fenômenos que podem ocorrer com um fluxo de radiação eletromagnética ao interagir com um alvo e que são de extrema importância para o Sensoriamento Remoto (ROSA, 2003) destacando:

- Reflectância: sendo o quociente entre o fluxo de radiação refletido pelo alvo dividido pelo fluxo de radiação eletromagnética incidente.
- Transmitância: o fluxo de radiação transmitido pelo alvo dividido pelo fluxo de radiação incidente.
- Absortância: a razão entre o fluxo de radiação absorvido pelo alvo dividido pelo fluxo de radiação incidente.

O princípio básico que possibilita a obtenção de informações sobre o levantamento dos recursos naturais por meio de tecnologia do sensoriamento remoto é fundamental no comportamento espectral dos alvos terrestres, que é registrado por um sistema sensor. A característica espectral típica de cada alvo (água, solo, vegetação) é resultante da interação da energia eletromagnética, proveniente do sol, com as propriedades físicas e químicas inerentes aos alvos terrestres, que são registradas pelos

sensores (passivos) que operam em diferentes faixas ópticas do espectro eletromagnético. As características espectrais dos alvos são registradas por diferentes sensores, em diferentes bandas ou canais, de acordo com as suas distintas configurações (VALÉRIO FILHO, 1998).

De modo geral, pode-se dizer que o sensoriamento remoto engloba, além de uma nova tecnologia (programas e hardwares), o conhecimento básico de todos os componentes que direta ou indiretamente fazem parte do “sistema” sensoriamento remoto, como, a radiação, a atmosfera terrestre, o solo, a vegetação e a água (BARBOSA, 2009).

Existem várias séries de satélites de sensoriamento remoto em operação, entre eles podemos citar: Landsat, Spot, CBERS, Ikonos, Quickbird e NOAA. Os satélites das cinco primeiras séries são destinados ao monitoramento e levantamento dos recursos naturais terrestres, enquanto os a série NOAA fazem parte dos satélites meteorológicos, destinados principalmente aos estudos climáticos e atmosféricos, mas são também utilizados em estudos dos recursos terrestres (MOREIRA, 2011).

Os sistemas sensores colocados nas plataformas orbitais dos satélites são radiômetros imageadores, isto é, a informação coletadas por estes sensores permite gerar uma imagem (MENESES, 2012).

A principal função dos sistemas imageadores é captar a radiação eletromagnética (REM), transformá-la em um sinal elétrico e transmitir este sinal a uma estação remota. Já os sensores fotográficos não são capazes de transformar a REM em sinal elétrico porque o detector é fotoquímico (o filme), que funciona diferentemente dos sistemas imageadores (MENESES, 2012).

Os sensores orbitais operam em faixas espectrais desde o visível até o micro-ondas. Os sensores passivos operam na faixa espectral que vai do visível até o infravermelho termal. Os sensores que operam na região do visível até o infravermelho médio coletam informações da energia refletida, ou seja, a porção da energia que é refletida pelos alvos da superfície terrestre. Por outro lado, os sensores passivos que operam no infravermelho distante (faixa do termal) coletam informações da energia emitida pelos alvos da superfície terrestre. Já os sensores ativos (Radares) operam na faixa do micro-ondas (EMBRAPA, 2014).

De modo geral os sistemas sensores podem ser classificados em sistemas de varredura (scanning) e não varredura (non scanning). Na categoria do não varredura têm-se os radiômetro que não formam imagens (ex. radiômetro de micro-ondas,

sensor magnético, espectralradiômetros, Thermopoint, sensor quântico etc.) e os que formam imagem, enquadrando aí todas as modalidades das câmeras fotográficas (monocromáticas, coloridas normais, infravermelhas, infravermelhas coloridas etc.). Nestes sistemas, a radiação eletromagnética refletida é registrada de uma única vez, sendo denominado quadro (EMBRAPA, 2014).

Nos sistemas de varredura, a imagem da cena é formada pela aquisição sequencial de elementos de resolução espacial (pixel). Neste sistema enquadram-se as câmeras de TV, scanners sólidos (CCD), emageadores-eletro-opticomecânicos (TM – *Thematic Mapper*), radiômetros de micro-ondas etc (MOREIRA, 2011).

O sensor *Operational Land Imager* (OLI) possui bandas espectrais para coleta de dados na faixa do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas, além de uma banda pancromática. Avanços tecnológicos demonstrados por outros sensores experimentais da NASA (sigla em inglês de National Aeronautics and Space Administration – Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço) foram introduzidos no sensor OLI, que passou a ter quantização de 12 bits. A entrada em operação do sensor a bordo do Landsat 8, permite a continuidade dos trabalhos em sensoriamento remoto iniciados na década de 1970, com a missão Landsat (EMBRAPA, 2013).

4.3.2 Índices de Vegetação

Nas aplicações de sensoriamento remoto, os cientistas desenvolveram os índices de vegetação para monitorar e quantificar as condições e distribuições espaciais das vegetações, usando os dados digitais de reflectância espectrais da radiação eletromagnética. Os índices de vegetação são obtidos das várias combinações matemáticas das reflectâncias em várias faixas espectrais da radiação eletromagnética (LIU, 2006).

A combinação da reflectância de objetos da superfície em dois ou mais comprimentos de onda, especialmente na região do visível e infravermelho, é chamada de índice de vegetação, cuja finalidade é destacar uma propriedade particular da vegetação (JENSEN, 2009).

Os índices da Vegetação são modelos resultantes da combinação dos níveis de reflectância em imagens de satélites nas bandas do vermelho e no

infravermelho próximo. De acordo com Moreira (2003), a região do visível, o qual se insere a banda 3, compreende toda radiação eletromagnética da faixa espectral de 400 a 700 nm. A maior parte desta radiação que incide sobre o dossel vegetativo e absorvida pelos pigmentos fotossintetizantes no mesófilo das folhas. Nesta faixa espectral, tanto a refletância quanto a transmissão das folhas são menores do que 15% porém a refletância apresenta um pico máximo em 555 nm.

Cada alvo (asfalto, vegetação, água, entre outros) tem comportamento espectral diferente na mesma condição ambiental. A água apresenta a mais baixa refletância e absorve toda a radiação acima de 750 nm. O asfalto não ultrapassa 10% no valor da refletância. Segundo Tucker em 1979, citado por Moreira (2005), a vegetação é caracterizada por uma intensa absorção devido à clorofila na região do vermelho (0,58 a 0,68 μm) e por uma intensa reflexão na faixa do infravermelho próximo (0,76 a 1,35 μm) causada pela estrutura celular das folhas. A diferença entre as bandas do vermelho e infravermelho é proporcional à refletância da imagem, sendo a medida do grau de vegetação na imagem.

Para minimizar a variabilidade causada pelos fatores externos, a refletância espectral da cobertura vegetal tem sido transformada e combinada em vários índices de vegetação, os mais comumente empregados utilizam a informação contida nas refletâncias de dosséis referentes às regiões do vermelho e do infravermelho próximo, as quais são combinadas sob a forma de razões (PONZONI, 2001).

As faixas do vermelho e do infravermelho próximo são mais utilizadas, por conter mais de 90% da variação da resposta espectral da vegetação; portanto, estes índices realçam o comportamento espectral da vegetação, correlacionando-os com os parâmetros biofísicos da mesma (ROSA, 2003).

As plantas usam a clorofila para transformar a energia do Sol em energia química. Devido à clorofila, elas absorvem os componentes da radiação solar cuja cor se aproxima do vermelho (V) e refletem os componentes cuja cor se aproxima do infravermelho (IV).

Quando um satélite captura imagens da Terra, estas são analisadas e é possível dizer se há pouca ou muita vegetação em determinada região: se a imagem contiver pouco vermelho (banda do espectro que a planta absorve) e muito infravermelho (que a planta reflete), significa que a região está coberta de vegetação saudável.

As técnicas de realce de imagem por meio de índices de vegetação aumentam o brilho das áreas vegetadas, melhorando a aparência da distribuição espacial de informações das imagens, tornando-as de fácil interpretação visual e computacional.

Um índice de vegetação ideal deve ser sensível à vegetação, insensível ao fundo do solo e não ter interferências atmosféricas. Todos os índices gerados com as várias combinações dos dados adquiridos pelos sensores de satélites são chamados de índice de vegetação (LIU, 2006) e os principais índices de vegetação utilizados para correlacionar parâmetros da planta e solo são:

a) O **Índice de Vegetação por Diferença Normalizada** - NDVI (Normalized Difference Vegetation) tem sido um dos mais utilizados índices de vegetação. Ele baseia-se na alta absorção da clorofila que é constatada na região espectral do vermelho e na alta reflectância esclarecida pela estrutura interna das folhas na região do infravermelho próximo. O valor de NDVI varia entre -1 e 1. Geralmente em vegetações saudáveis, o índice apresenta valores em torno de 0,2 e 0,8 (ROUSE et al., 1973). O NDVI é expresso pela Equação 4.

$$NDVI = \left(\frac{IV - V}{IV + V} \right) \times 100 \quad (4)$$

onde: IV é o fluxo radiante refletido no infravermelho próximo e V o fluxo radiante refletido no vermelho da região do visível.

Os maiores valores de NDVI correspondem aos ND (Número Digital) mais elevados, relacionam-se às áreas de vegetação com maior vigor. Enquanto os menores valores equivalem aos ND baixos, representam as áreas de vegetação estressada ou áreas desnudas.

Por ser resultado da combinação de duas bandas, o NDVI encobre parcialmente os efeitos de presença dos constituintes atmosféricos e das perturbações radiométricas e geométricas (HOLBEN, 1986).

Para o NDVI, as bandas espectrais da região do vermelho e infravermelho próximo ao espectro magnético são selecionadas em razão de serem mais afetadas pela absorção da clorofila pela folhagem da vegetação verde e conseqüentemente pela densidade dessa vegetação na superfície (COSTA FILHO et al., 2007).

Como os valores de NDVI variam de -1 a +1, os valores negativos representam as nuvens e ao redor de zero representa solo nu ou sem vegetação. O valor de NDVI maior que zero representa a vegetação. O valor de NDVI mais alto indica o grau de

verde da superfície mais alto que pode ser usado para inferir na vegetação mais densa ou vegetação em pleno vigor de crescimento. Em uma superfície de vegetação em pelo vigor de crescimento vegetativo, o grau de verde alcança o valor máximo. A reflectância do NIR (*Near Infrared Reflectance*) alcança o valor máximo de 0,55 e o VIS (Visible), faixa do visível, mínimo de 0,5 (LIU, 2006).

Jensen (2009) apresentou alguns pontos positivos e negativos na utilização do NDVI. O autor destacou a importância do índice que se concentra em dois aspectos: primeiro no monitoramento de mudanças sazonais e interanuais da atividade e do desenvolvimento da vegetação e segundo na redução de ruídos, como sombras de nuvens, variações topográficas e diferença de iluminação solar, através da razão.

O NDVI tem-se mostrado bastante útil na estimativa de parâmetros biofísicos da vegetação e o seu ponto forte é o conceito de razão que reduz várias formas de ruídos multiplicativos como diferenças de iluminação, sombra de nuvens, atenuação atmosférica e certas variações topográficas (SILVA, 2004); ainda, de acordo com o referido autor, uma peculiaridade atribuída ao NDVI é a rápida saturação que o torna insensível ao aumento da densidade do dossel. Os valores NDVI estabilizam-se em um patamar independente do aumento da densidade do dossel.

b) O **Índice de Reflectância Fotoquímico - PRI** (Photosynthetic Reflectance Index) foi desenvolvido para avaliar a eficiência fotossintética usando as bandas de reflectância nos comprimentos de onda do azul e do verde (GAMON et al., 1992).

O PRI (Equação 5) é sensível às alterações nos pigmentos de carotenoides (principalmente a xantofila) na folhagem. Tais pigmentos são indicativos da eficiência do uso da luz fotossintética ou da taxa de dióxido de carbono armazenada pela folhagem por unidade de energia absorvida. Esse índice é usado em estudos de estresse e de produtividade da vegetação. Os valores variam entre -1 e 1 e valores comuns para vegetação sadia ficam entre -0,2 e 0,2 (GAMON et al., 1992).

$$PRI = \frac{(R_1 - R_2)}{(R_1 + R_2)} \quad (5)$$

Onde: R_1 = Reflectância relativa à banda 2 do Landsat 8; R_2 = Reflectância relativa à banda 3 do Landsat 8

O PRI expressa a relação entre as bandas do verde e azul e, segundo Rahman et al. (2000), pode ser relacionado com a eficiência do uso da luz no processo fotossintético.

Salienta-se, porém, que os dados de PRI devem ser reescalados para valores positivos, gerando um novo índice, o sPRI (Equação 6). Assim, o sequestro florestal de carbono depende da integração desses dois índices (NDVI e sPRI), que geram um novo índice: o CO₂flux (BAPTISTA, 2003; BAPTISTA, 2004).

$$sPRI = \frac{(PRI+1)}{2} \quad (6)$$

Após a realização do cálculo do índice PRI, deve ser calculado o índice sPRI, seguindo a metodologia proposta por Rahman et al. (2000). O índice sPRI possui o mesmo significado do PRI, mas passa a ser representado em uma escala que varia entre 0 e 1 para, assim, ficar com a mesma escala do NDVI. Os índices NDVI e PRI foram combinados, segundo a metodologia de Rahman et al. (2000), para gerar o índice CO₂ Flux.

c) **CO₂ Flux** é a integração do índice de reflectância fotoquímica, ou PRI, que representa a eficiência do uso da luz na fotossíntese, com o NDVI (RAHMAN et al., 2000), que representa o vigor da vegetação fotossinteticamente ativa, o que tornaria possível integrar as feições de absorção decorrentes do sequestro de carbono. A esse índice integrado, Baptista (2003) chamou de CO₂ Flux.

Para determinação do fluxo de CO₂, Equação 7, estudos recentes salientam a possibilidade da utilização da integração do índice espectral NDVI e do PRI. O índice espectral PRI pode ser correlacionado com as taxas de fotossíntese e o NDVI com o sequestro de carbono. Essa integração mede a eficiência do processo de sequestro de carbono.

$$CO_{2flux} = (NDVI \times sPRI) \quad (7)$$

Há diferenças no estoque de carbono presente nos diferentes biomas e nos diferentes locais dentro dos biomas. De acordo com Ribeiro (2007), uma floresta jovem estoca menos carbono se comparada com uma floresta madura, porém, quando se considera o sequestro de carbono da atmosfera ao longo do tempo, a floresta jovem se sobressai. Como evidência dessa informação, Coutinho (2009) quantificou o estoque líquido de carbono na biomassa aérea após a substituição de uma área de pastagem

por plantio de eucalipto e regeneração natural de espécies nativas em região de Mata Atlântica, no município de Cruzeiro, SP. Quando avaliado o plantio de eucalipto tinha 4 anos de idade, a área de regeneração 35 anos e o pasto tinha aproximadamente 90 anos. O autor encontrou estoque de carbono de 45 Mg ha⁻¹ para a mata secundária, 31,1 Mg ha⁻¹ para o plantio de eucalipto e 2,2 Mg ha⁻¹ para o pasto. Observou-se que o estoque de carbono na mata secundária foi superior ao plantio de eucalipto. O autor justificou esse resultado porque a idade da área de regeneração era superior ao reflorestamento com eucalipto. Em contrapartida, considerando o Incremento Médio anual de Carbono (IMC), a área da mata secundária apresentou um IMC de 1,3 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, enquanto a área de eucalipto apresentou IMC de 8,5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹.

Balbinot et al. (2008), analisando a dinâmica do estoque de carbono em plantações de *Pinus spp*, em diferentes classes de idade entre os anos de 1993 e 2000, no município de General Carneiro, por meio de imagens de satélite, observaram que o valor encontrado de carbono presente na biomassa do fuste foi de 71Mg ha⁻¹, representando cerca de 70% de todo carbono fixado.

O sequestro de carbono pela vegetação depende da integração do NDVI e do PRI (RAHMAN et al 2000). Esta integração pode ser medida pelo índice CO₂ Flux, que resulta da razão entre aqueles dois índices. O índice NDVI expressa a diferença de reflectância entre a feição de absorção do vermelho (660 nm) e o aumento de albedo que ocorre nos espectros de vegetação após o início do infravermelho próximo (800 nm) e o PRI expressa a diferença entre a feição de absorção no azul (531nm) e o pico de reflectância do verde (570 nm).

O PRI e o NDVI podem ser correlacionado com as taxas de fotossíntese e o CO₂ Flux com o sequestro de carbono. Isso é explicado pelo fato de que, quanto maior for a atividade fotossintética, maiores serão as feições de absorção nas faixas do azul e do vermelho e mais expressivos serão os valores (BAPTISTA, 2004). Logo, quanto maior for a diferença de contraste entre a região do visível e o infravermelho próximo, maior será a biomassa da vegetação na área imageada, (MOREIRA, 2001) e maior o potencial de fixação de carbono.

d) O **Índice de Área Foliar (IAF)** é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação. O IAF é um indicador da biomassa de cada pixel da imagem (ALLEN et al., 2002).

O índice de área foliar (IAF), expresso na Equação 8, é um parâmetro biofísico que pode ser utilizado como medida de crescimento das plantas nos modelos agronômicos (DORAISWAMY et al., 2004; GOEL, 1988; GONZÁLEZ-SANPEDRO et al., 2008; TERUEL et al., 1997). O conhecimento da variação IAF, ao longo do ciclo de uma cultura agrícola, permite avaliar a capacidade ou a velocidade com que a parte aérea do vegetal (área foliar) ocupa a área do solo disponível àquele vegetal (LUCCHESI, 1987). O mesmo autor comenta que o aumento da área foliar propicia um aumento na capacidade da planta de aproveitar a energia solar para a realização da fotossíntese e, desta forma, pode ser utilizado para avaliar a produtividade. Além disso, o IAF pode ser empregado na estimativa da evapotranspiração e das emissões biogênicas (GONZÁLEZ - SANPEDRO et al., 2008).

$$IAF = \frac{\ln\left(\frac{0,69-SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (8)$$

O IAF expressa a disponibilidade de superfície assimiladora de CO₂ e da radiação fotossinteticamente ativa e de perdas de água (transpiração) da população de plantas. Isso tem relação com a capacidade fotossintética da população vegetal por estar relacionada a área de assimilação de CO₂ e de interceptação de radiação, ou pela redução da própria taxa fotossintética quando altos índices de área foliar indicam perda de água e, conseqüente, deficiência hídrica (MÜLLER et al., 2005).

e) O **Índice de Vegetação Ajustado ao Solo - SAVI** (Soil Adjusted Vegetation Index) foi proposto por Huete (1988) e foi uma adaptação do NDVI possuindo a propriedade de minimizar os efeitos do solo de fundo no sinal da vegetação ao incorporar uma constante de ajuste de solo, o fator L na Equação 9 do NDVI.

A equação do SAVI é composta por:

$$SAVI = \frac{(1+L_s)(\rho_{ivp}-\rho_v)}{(L_s+\rho_{ivp}+\rho_v)} \quad (9)$$

Sendo: L_s uma constante denominada de fator de ajuste do índice SAVI.

O SAVI limita-se em função dos diferentes biomas e situações agrícolas, uma vez que os valores da constante são generalizados, não considerando as especificidades dos ambientes analisados, mas apenas a densidade vegetada (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

A constante L pode apresentar valores de 0 a 1, variando segundo a própria biomassa. Segundo Huete, em 1988, descrito por Ponzoni e Shimabukuro (2010), os valores ótimos de L são:

L = 1 (para baixas densidades de vegetação)

L = 0,5 (para médias densidades de vegetação)

L = 0,25 (para altas densidades de vegetação)

4.4 Índices de Vegetação em Cana-de-Açúcar

Estudos que utilizam dados meteorológicos e dados de sensoriamento remoto para a estimativa da produtividade de culturas agrícolas podem ser vistos em Rudorff (1985), Rudorff et al. (1995), Rudorff e Batista (1990; 1991) e, mais recentemente, em Berka et al. (2003), Fontana et al. (2001) e Rizzi e Rudorff (2007). Estes estudos tiveram por base o emprego de uma variável: índice de vegetação, extraída de imagens de sensoriamento remoto, cuja informação está relacionada com o vigor vegetativo das culturas e, por conseguinte, à produtividade agrícola.

Entretanto, novos avanços são esperados no que se refere ao potencial do uso de imagens obtidas por satélites orbitais em modelos agrônômicos, para estimativa de produtividade de culturas agrícolas (PICOLI et al., 2009).

Na Figura 4 está disposta a variação espectral da cana-de-açúcar em diferentes idades e em três regiões distintas do Espectro Eletromagnético (EEM) cobertas por seis bandas espectrais do sensor MODIS (www.modis.gsfc.nasa.gov/) realizado por Rudorff e Batista (1985). Na faixa visível (bandas 3- azul, 4 -verde e 1-vermelho) a reflectância é baixa em decorrência da absorção da radiação incidente pelos pigmentos das folhas da cana, em especial nas bandas do azul e do vermelho. Já na faixa do infravermelho a reflectância é alta e aumenta gradativamente com o aumento da quantidade de folhas em função das múltiplas reflexões da radiação incidente nos espaços intracelulares do mesófilo foliar (RUDORFF; BATISTA, 1985).

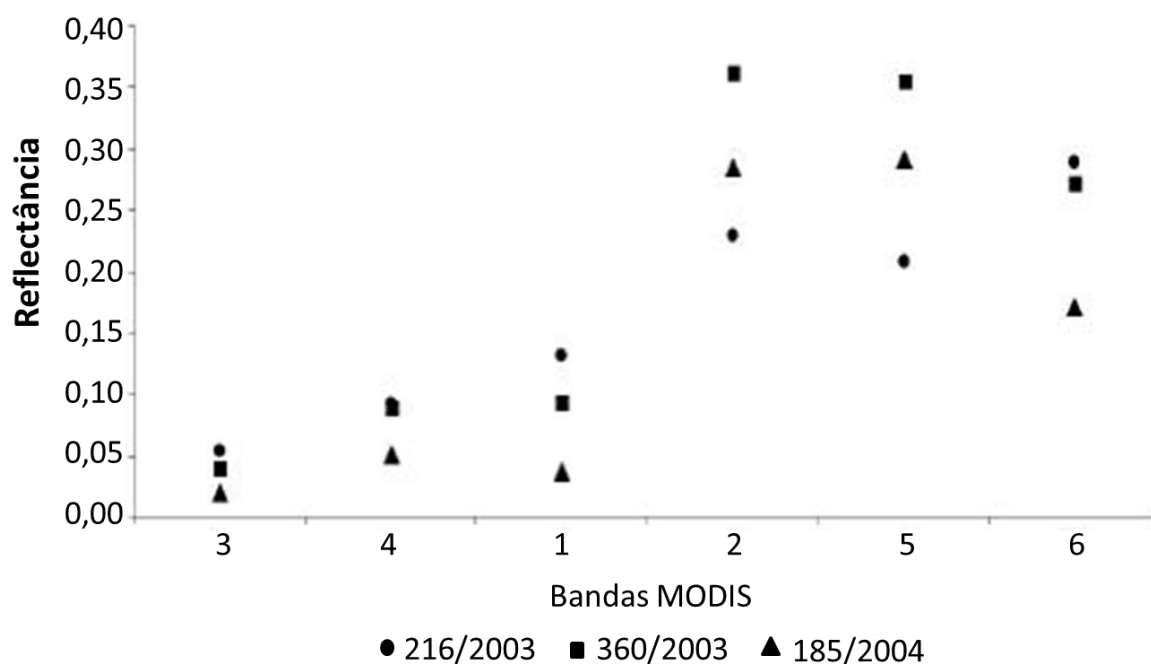


Figura 4. Variação espectral da cana-de-açúcar em imagem MODIS (bandas: 3 – 459-479 nm; 4 – 545-565 nm; 1 – 620-670 nm; 2 – 841-876 nm; 5 – 1230-1250 nm; 6 – 1628-1652 nm) em três idades (31 dias após o plantio - 216/03; 175 dias após o plantio - 360/03 e 364 dias após o plantio / 12 dias antes da colheita - 185/04) (RUDORFF E BATISTA 1985).

O ganho de biomassa e o conseqüente aumento do Índice de Área Foliar (IAF) são fatores preponderantes na reflectância da planta na faixa do infravermelho próximo. Na cultura da cana-de-açúcar o acúmulo de matéria seca (MS) tem comportamento sigmodal e é dividido em três fases, sejam elas, inicial, com crescimento lento; intermediária, com crescimento rápido (adquire de 70% a 80% da MS total) e final, quando o crescimento volta a ser lento para que ocorra o acúmulo de sacarose nos colmos (EDGERTON, 1958; PARANHOS, 1987). A reflectância na faixa do infravermelho médio está relacionada com o conteúdo de água da vegetação em função de bandas de absorção de água nesta faixa da Radiação Eletromagnética - REM (MENESES; NETTO, 2001; SIMÕES et al., 2003).

As diferenças na curva de reflectância da vegetação possibilitam a identificação, por meio de sensores remotos e técnicas de processamento de imagens, dos estádios de desenvolvimento da planta em diferentes épocas e lugares (PRICE, 2003). Outra possibilidade decorrente desta diferença é a criação de Índices de Vegetação (IV)

que auxiliam na interpretação de imagens de sensores remotos (MENESES; NETTO, 2001).

A álgebra de imagens é uma técnica de processamento digital de imagens bastante difundida e consiste em uma operação pixel a pixel de aplicação em análises de imagens multiespectrais e/ou multitemporais (CRÓSTA, 1992). Pode ser uma adição ou subtração de imagens e uma razão entre as bandas (p.ex. índices de vegetação), ou ainda, uma subtração de índices de vegetação da mesma área e de diferentes datas.

O intuito da adição de imagens é reduzir os ruídos, redefinir uma nova banda espectral e combinar resultados de outro tipo de processamento. A subtração de imagens visa identificar diferentes tipos de cobertura e detectar padrões de mudança na cobertura do solo (CRÓSTA, 1992; MAS, 1999; MATHER, 1999).

A obtenção de índices de vegetação multitemporais de uma mesma área evidencia padrões de mudanças no comportamento da vegetação presente. A cana planta tem elevados valores de índices de vegetação e com a colheita os valores deste índice diminui (LILLESAND; KIEFER, 1999). O NDVI de uma imagem em uma data qualquer comparado com o NDVI de uma data anterior (datas num curto intervalo de tempo, i.e, 8 a 15 dias), é possível obter o incremento de área de cana colhida neste período; pois as áreas onde houve uma queda nos valores de índices de vegetação são destacadas (AGUIAR, 2007).

Cerqueira e Franca-Rocha (2007) analisando a correlação entre o sequestro de carbono com CO₂ flux, no Bioma Caatinga, apontaram a fragilidade no método convencional de quantificação do carbono na vegetação, uma vez que cada vegetação possui características fitossociológicas específicas. Também verificaram que existiam diferenças significativas entre os tipos de vegetação estudados no que tange ao fluxo de CO₂.

Baptista e Munhoz (2009) analisaram por meio de sensoriamento remoto hiperespectral, o comportamento da vegetação pelos índices de CO₂ flux, ICO₂ e conteúdo de umidade da vegetação, em ambientes localizados o Pantanal de Nhecolândia (MS). Os resultados apontam que os índices utilizados foram satisfatórios para a vegetação terrestre.

Martins e Baptista (2013) analisaram os aspectos multitemporal do desmatamento no Projeto de Assentamento Carão (AC), por meio da análise do sequestro

florestal de carbono obtido a partir do índice espectral CO₂ Flux. Os resultados mostraram que o mapeamento do sequestro de carbono pela vegetação durante a fase clara da fotossíntese, mostrou-se ser mais eficiente para a avaliação do ritmo temporal de ocupação e de supressão da floresta nativa.

Silva e Baptista (2015) testaram a eficiência do CO₂ Flux para detecção do sequestro florestal de carbono, por meio das imagens do sensor Hyperion, comparando com os dados coletados em cinco torres micrometeorológicas, esse estudo apresentou os resultados da modelagem do conteúdo de CO₂ onde por meio da matriz de correlação de Pearson pode-se inferir que o CO₂ Flux apresentou uma forte correlação ($r=0,641$) com a concentração de CO₂ (ppm) medidos no topo da torre e ($r= 0,663$) com as medidas de fluxo de CO₂ ($\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). Com isso concluíram que modelagem do sequestro florestal de carbono a partir da aplicação do CO₂ Flux, com imagens Hyperion mostrou-se eficiente para as áreas naturais e antrópicas da Amazônia Brasileira.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Área de estudo

5.1.1 Município de São Manuel

A área de estudo (Figura 5) está localizada na região centro-oeste do estado de São Paulo, entre as coordenadas geográficas 22° 45', 22° 36' de latitude sul e 48° 43', 48° 22' de longitude a oeste de Greenwich, no município de São Manuel – SP, com altitude média de 520 m. São Manuel possui uma área de 65.127,45 ha e 36.364,39 ha de área está ocupada com a cultura cana-de-açúcar.

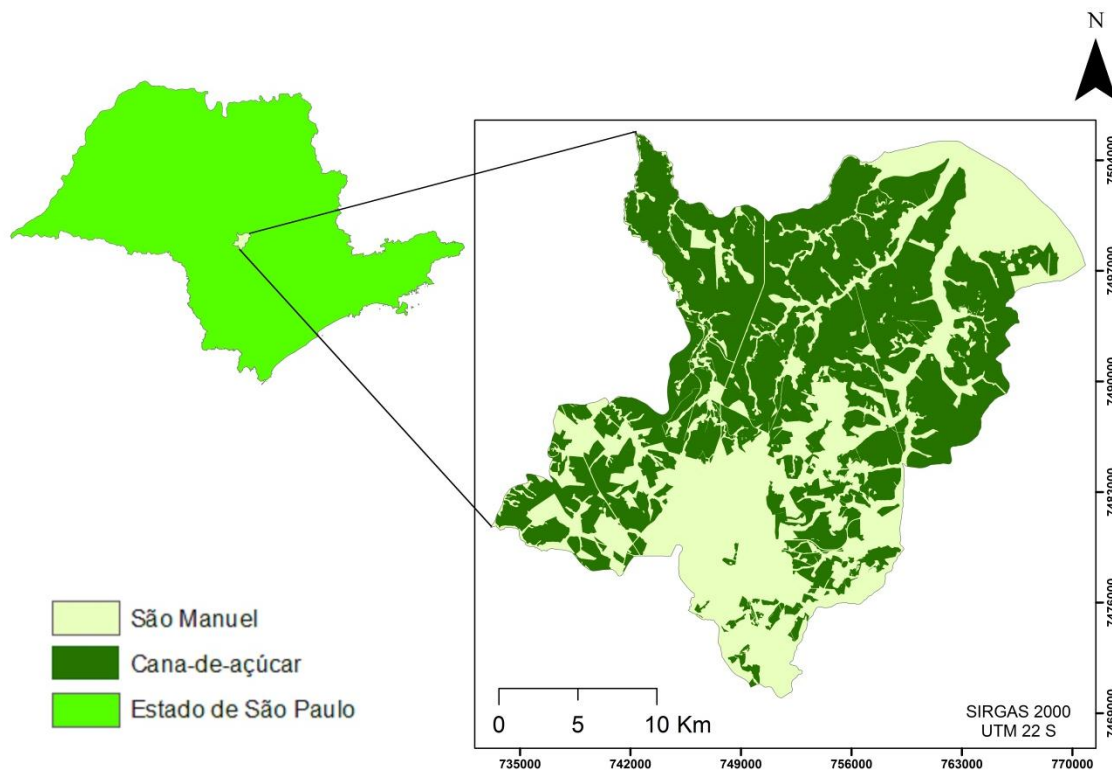


Figura 5. Localização da área cultivada com cana-de-açúcar no município de São Manuel – SP.

5.1.2 Áreas para a correlação e validação dos resultados localizadas no Município de Botucatu

Duas áreas de talhões cana-de-açúcar foram utilizadas em Sartori (2014), localizadas no município de Botucatu – SP próximas às áreas cultivadas no município de São Manuel (Figura 6), cultivadas com plantio convencional: a Área 1 com cana soca e a Área 2 com cana planta.

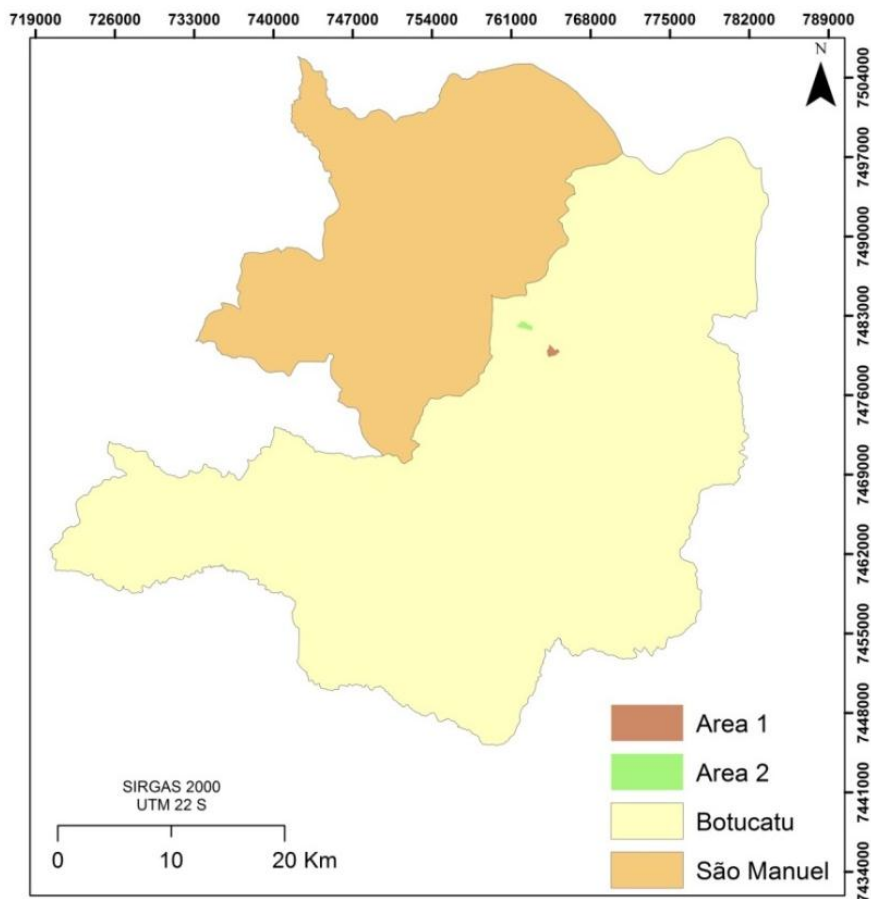


Figura 6. Localização das áreas para correlação e validação dos resultados.

5.1.3 Clima

Conforme os critérios adotados por Köppen, o clima da região de São Manuel –SP é Cfa (Clima Temperado Mesotérmico), com temperaturas médias mínimas e máximas, no verão, de 19 e 29 °C e, no inverno de 12 e 25 °C, respectivamente. A temperatura média do mês mais quente é superior a 22,0°C e o total médio de precipitação pluvial anual de 1377 mm (CUNHA; MARTINS, 2009).

De acordo com Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas - Ciiagro (2013), os maiores índices hídricos foram registrados nas estações primavera - verão, com precipitação máxima mensal de 261,4 mm (janeiro) e as deficiências hídricas nas estações outono-inverno, com precipitação mínima de 0,4 mm no mês de agosto de 2013.

O clima em Botucatu - SP pode ser enquadrado como sendo um clima mesotérmico, com estação mais seca no inverno e identificado como Cwa, segundo a

classificação de Köppen, com temperaturas médias anuais em torno de 20°C e o índice pluviométrico entre 1.100 e 1.700 mm anuais (CARVALHO; JIM, 1983).

5.1.4 Geologia

O local de estudo está situado sobre dois grupos geológicos: Grupo São Bento e Bauru, referentes aos períodos geológicos Jurássico-Cretáceo e Cretáceo, respectivamente (IPT, 1981).

O grupo São Bento é composto por três Formações: Pirambóia, Botucatu e Serra Geral (IPT, 1981).

As formações Pirambóia e Botucatu são compostas por deposição hídrica para a primeira e de arenitos eólicos para a segunda, resultando na feição geomorfológica Depressão Periférica da Cuesta. As cotas altimétricas na Depressão Periférica na sub-bacia do Araquá estendem-se dos 530 a 450 metros em relação ao nível do mar (ZIMBACK, 2008). A Formação Serra Geral é composta por derrames de basaltos, que intercalam na forma de lentes, os arenitos da Formação Botucatu e formam a feição geomorfológica denominada de Front da Cuesta. Esta feição é caracterizada por solos rasos e terreno com declividades acima de 30% (IPT, 1981).

O grupo Bauru é composto por quatro Formações de arenitos, sendo que na área ocorre a Formação Adamantina compondo a parte inicial do Reverso da Cuesta (cotas altimétricas que variam entre 920 metros a 700 metros em relação ao nível do mar) (IPT, 1981).

5.1.5 Solos

Os solos presentes no município, segundo Oliveira et al. (1999), são: LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico e Distroférico, NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico, ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, CAMBISSOLO HÁPLICO e NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico.

LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELO abrange solos minerais não hidromórficos com horizontes B latossólicos, teor de Fe₂O₃ na Terra Fresca Seca ao Ar

– TFSA proveniente do ataque sulfúrico igual ou inferior a 11% e normalmente maior que 7% quando de textura argilosa ou muito argilosa. Esses LATOSSOLOS são profundos ou muito profundos de sequência de horizontes A – Bw – C, com aparência relativamente bem individualizada, devido à distinção de cor, especialmente entre os horizontes A e B (OLIVEIRA, 1992).

De acordo com mesmo autor, sua ocorrência mais extensa encontra-se na Depressão Periférica e no Planalto Atlântico. Na Depressão Periférica são solos formados a partir de rochas sedimentares de granulometria fina (folhelhos, siltitos) e no Planalto Atlântico são desenvolvidos de rochas sedimentares e de rochas de origem ígnea e metamórfica (IAC, 2015).

Solos LATOSSOLOS VERMELHOS são formados por solos minerais não hidromórficos, vermelho-escuros de tonalidade arrocheadas, derivados de rochas básicas e tufitos. LATOSSOLOS VERMELHOS Distróficos são solos com saturação por bases baixa ($V\% < 50\%$) na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA). LATOSSOLOS VERMELHOS Distroférico são solos por saturação por bases baixa ($V < 50\%$) e teores de Fe_2O_3 pelo (H_2SO_4) de 180 g kg^{-1} a $< 360\text{ g kg}^{-1}$, ambos na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA). Nos LATOSSOLOS VERMELHOS Eutroféricos a saturação por bases é alta ($V > 50\%$) (OLIVEIRA, 1992).

NITOSSOLO VERMELHO compreende solos minerais, não hidromórficos, cor vermelha escura de tonalidade púrpurea – efeito arroxeados-argilosos, derivados de rochas básicas ou ultra-básicas, com teores relativamente elevados de Fe_2O_3 , TiO_2 , baixo gradiente textural, horizonte B textural com argila de atividade baixa, estrutura em blocos e cerosidade moderadamente a bem desenvolvida. NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico possuem saturação por bases alta na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA) (OLIVEIRA et al., 1992).

ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO constituem solos com grande variação em características morfológicas e analíticas, porém com presença distintiva de horizonte B textura que diverge do A ou E, seja pela cor, seja pela diferença de textura e complementação marcante de estrutura em blocos, sendo a textura argilosa ou muito argilosa.

CAMBISSOLO HÁPLICO são solos de fertilidade natural variável. Apresentam como principais limitações para uso, o relevo com declives

acentuados, a pequena profundidade e a ocorrência de pedras na massa do solo (OLIVEIRA, 1992).

NEOSSOLO LITÓLICO são solos não hidromórficos, rudimentares, pouco evoluídos, rasos (50 cm até o substrato rochoso). Apresentam grande diversificação morfológica, sendo também bastante heterogêneos no que concerne aos atributos químicos, físicos e mineralógicos (OLIVEIRA, 1992).

5.2 Materiais

5.2.1 Programas

Para o processamento e avaliação dos dados obtidos, foi utilizado o programa ArcGIS 10.2.2.

5.2.2 Imagens

As imagens dos sensores do LANDSAT 8 utilizadas no trabalho são captadas por antena de recepção do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) localizada em Cuiabá, capta desde os anos 70 imagens de todo território nacional, o que representa um enorme e único acervo de dados (EMBRAPA, 2013).

O satélite foi lançado em 11/02/2013, do programa LDCM (*Landsat Data Continuity Mission*) ou também denominado Landsat 8 que opera com os instrumentos OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*). O sensor OLI dará continuidade aos produtos gerados a partir dos sensores TM e ETM+, a bordo das plataformas anteriores, além de incluir duas novas bandas espectrais, uma projetada para estudos de áreas costeiras e outra para detecção de nuvens do tipo cirrus (EMBRAPA, 2013). Na Tabela 3 estão expostos os sensores do satélite.

Foi utilizada uma cena do satélite Landsat-8 na data de 30 janeiro de 2014, órbita/ponto 220/076, resolução radiométrica de 16 bits, resolução temporal 16 dias, projeção da imagem UTM, datum WGS 84, (projeção cilíndrica) sendo necessário projetá-las para o hemisfério Sul. O tamanho aproximado da cena Landsat-8 é de 170 km ao norte-sul por 183 km de leste a oeste. A cena foi adquirida de forma gratuita no portal

GLOVIS: *The USGS Global Visualization Viewer*. A cena foi escolhida em janeiro por ser período de maior vigor vegetativo da cultura de cana-de-açúcar.

Tabela 3. Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) e Thermal Infrared Sensor (TIRS)

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Área Imageada	Resolução Radiométrica
OLI (Operational Land Imager)	(B1) Costal	0,433 – 0,453 μm	30 m	16 dias	185 km	12 bits
	(B2) Azul	0,450 – 0,515 μm				
	(B3) Verde	0,525 – 0,600 μm				
	(B4) Vermelho	0,630 – 0,680 μm				
	(B5) Infravermelho próximo	0,845 – 0,885 μm				
	(B6) Infravermelho médio	1,560 – 1,660 μm				
	(B7) Infravermelho médio	2,100 – 2,300 μm	15 m			
	(B8) Pancromático	0,500 – 0,680 μm	30 m			
	(B9) Cirrus	1,360 – 1390 μm				
TIRS (Thermal Infrared Sensor)	(B10) LWIR – 1	10,30 – 11,30 μm	100 m			
	(B11) LWIR – 2	11,50 – 12,50 μm				

5.2.3 Áreas para comparação entre índices de vegetação

Foram utilizadas as análises químicas do solo de Sartori (2014) no mês de setembro de 2013, onde as amostras foram obtidas em grade regular. A Área 1 (Figura 7) possui 67 ha e foram coletados 70 amostras de solo e na Área 2 (Figura 7) foram coletadas 71 amostras de solo em uma área de 58 ha.

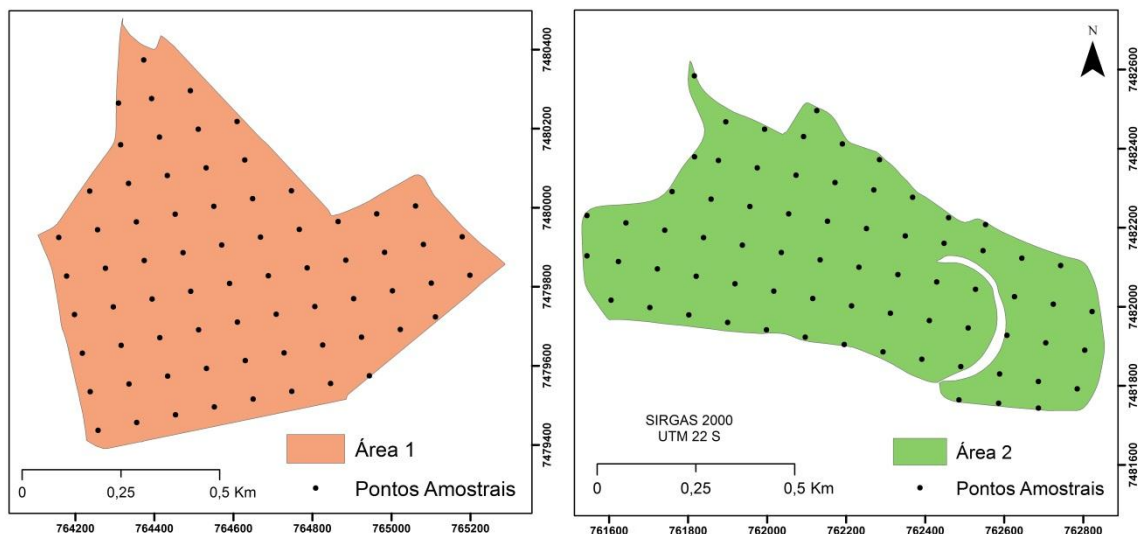


Figura 7. Áreas de correlação e validação de talhões de cana-de-açúcar em Botucatu – SP.

5.3 Metodologia

5.3.1 Elaboração do banco de dados com os talhões de cana-de-açúcar

Para a elaboração do banco de dados dos talhões de cana-de-açúcar foram utilizados a imagem Landsat 8 orbita 220 ponto 076 no programa ArcGIS 10.2.2 e classificados em tela a partir de interpretação visual.

5.3.2 Geração dos Índices de Vegetação nos talhões de cana-de-açúcar

A partir da imagem, foram gerados os índices de vegetação que representem as amostras por meio de equações entre as bandas do satélite Landsat 8.

O índice NDVI foi calculado de acordo com a Equação 4 citada por ROUSE et al., (1973).

O índice PRI possui a mesma ideia do NDVI, porém as bandas utilizadas são a do verde e azul conforme Equação 5 proposta por GAMON et al., (1992). Os valores de PRI foram escalonados para valores positivos para serem utilizados no índice CO₂ flux, gerando um novo índice, o sPRI conforme Equação 7 (BAPTISTA, 2003; BAPTISTA, 2004).

Para gerar o índice CO₂ flux fez-se necessário a utilização dos índices NDVI e sPRI para o cálculo, como expressa a Equação 7 (BAPTISTA, 2003; BAPTISTA, 2004).

O cálculo do índice IAF foi elaborado por meio da Equação 8 citada por Jensen (2009).

O índice SAVI foi obtido conforme Equação 9 (HUETE, 1988). A constante L pode apresentar valores de 0 a 1, variando segundo a própria biomassa. Segundo Huete (1988), os valores ótimos de L são:

L = 1 (para baixas densidades de vegetação);

L = 0,5 (para médias densidades de vegetação);

L = 0,25 (para altas densidades de vegetação).

Foi determinado 0,5 no valor de L para a área por ser homogênea quanto aos talhões de cana-de-açúcar, sendo que algumas áreas de cana-de-açúcar estavam com ausência de vegetação (solo exposto) ou recém colhido.

De acordo com os autores supracitados, em geral o fator L = 0,5 é mais comumente utilizado, uma vez que engloba uma maior variação de condições de vegetação. Ainda assim, o SAVI limita-se em função dos diferentes biomas e situações agrícolas, uma vez que os valores da constante são generalizados, não considerando as especificidades dos ambientes analisados, mas apenas a densidade vegetada (PONZONI, SHIMABUKURO, 2010).

Após a geração dos índices de vegetação foram gerados os mapas finais no mesmo programa.

5.3.3 Geração dos Índices de Vegetação nas áreas para validação

O processo de geração dos índices foi o mesmo para as Áreas 1 e 2, na mesma imagem, utilizados como parâmetros de validação, pois essas áreas possuem cultivo homogêneo de cana-de-açúcar.

5.3.4 Dados amostrais de solo

As análises a partir das amostras de solo de Sartori (2014) coletadas de 0-20 e 20-40 centímetros de profundidade. Foram utilizadas essas duas profundidades para o cálculo de Matéria Orgânica (MO) e realizada a média entre elas.

Os valores obtidos de MO foram multiplicados por 1,724, pois o carbono orgânico participa com 58% na composição da Matéria Orgânica do Solo (MOS) (EMBRAPA, 1999).

O estoque de C orgânico de cada camada corresponde ao produto do teor de C do solo (g kg^{-1}) pela densidade do solo (g cm^{-3}) e pela profundidade da camada (cm), empregando-se a Equação 10:

$$\text{ECS} = (\text{C} \times \text{DS} \times \text{p})/10 \quad (10)$$

Onde: ECS: Estoque de Carbono no Solo; C: teor de Carbono no solo (g kg^{-1}); DS: Densidade do Solo (g cm^{-3}) e p: profundidade da camada (cm).

5.3.5 Interpolação dos dados de amostra de solo

O método de análise de dados baseou-se na interpolação por krigagem ordinária (ISAAK; SRIVASTAVA, 1989). Foi necessária a transformação dos dados discretos das amostragens para valores contínuos para o cálculo da média dos pontos amostrados.

Para cada ponto amostral foi gerado um buffer de 50 metros, para que após a interpolação dos valores, fosse utilizada uma média dos mesmos presentes nessa área de 50 metros (Figuras 8 e 9).

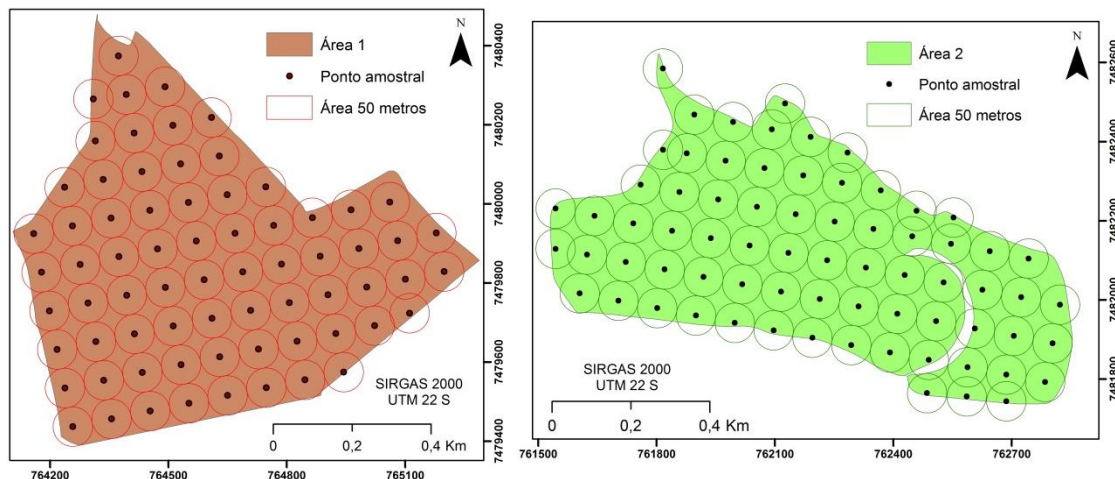


Figura 8. Áreas de 50 metros gerados em cada ponto amostral nas áreas de correlação e validação de talhões de cana-de-açúcar em Botucatu – SP.

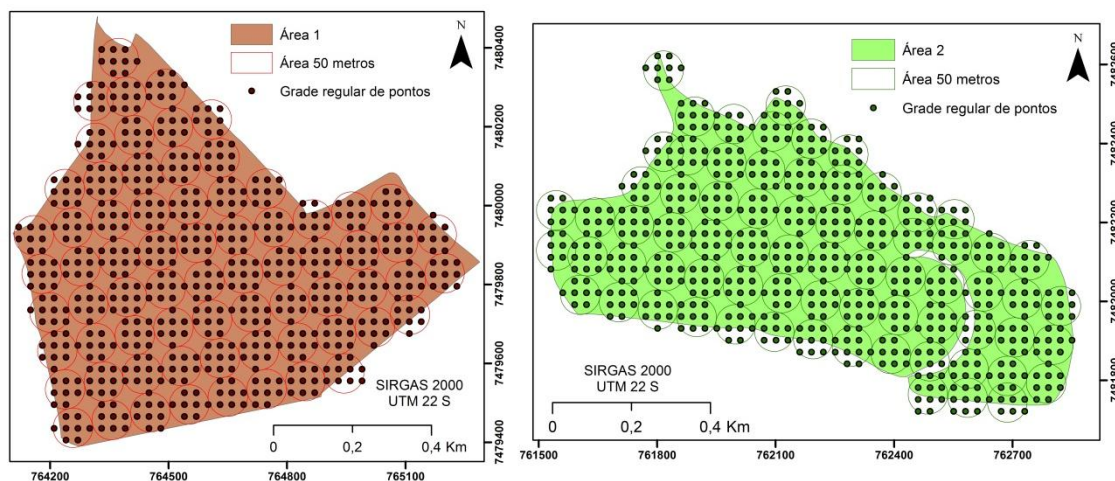


Figura 9. Grade de pontos gerados em cada polígono (área de 50 metros) nas áreas de correlação e validação de talhões de cana-de-açúcar em Botucatu – SP.

Os valores dos índices de vegetação CO_2 flux foram comparados com o cálculo de estoque de carbono, a partir das análises de solo, nas Áreas 1 e 2.

Foi verificada a correlação entre cada profundidade de solo (0-20 cm e 20-40 cm) e o estoque médio calculado para ambas as áreas, com os índices de vegetação por meio do coeficiente de correlação de Pearson pela Equação 14:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x_i - \bar{x})^2)(\sum(y_i - \bar{y})^2)}} \quad (11)$$

Onde: x_1, x_2, \dots, x_n e y_1, y_2, \dots, y_n são os valores medidos de ambas as variáveis.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Áreas cultivadas com cana-de-açúcar no município de São Manuel

A cana-de-açúcar é a principal cultura do município de São Manuel – SP ocupando aproximadamente 56% da área total como observado na Figura 10. A imagem utilizada é referente ao mês de janeiro de 2014, onde grande parte da área de estudo está representada com a vegetação em pleno vigor (coloração verde-escuro), porém são também observadas áreas onde os talhões estão com o solo exposto ou regiões de início de crescimento da cultura (coloração vermelho).

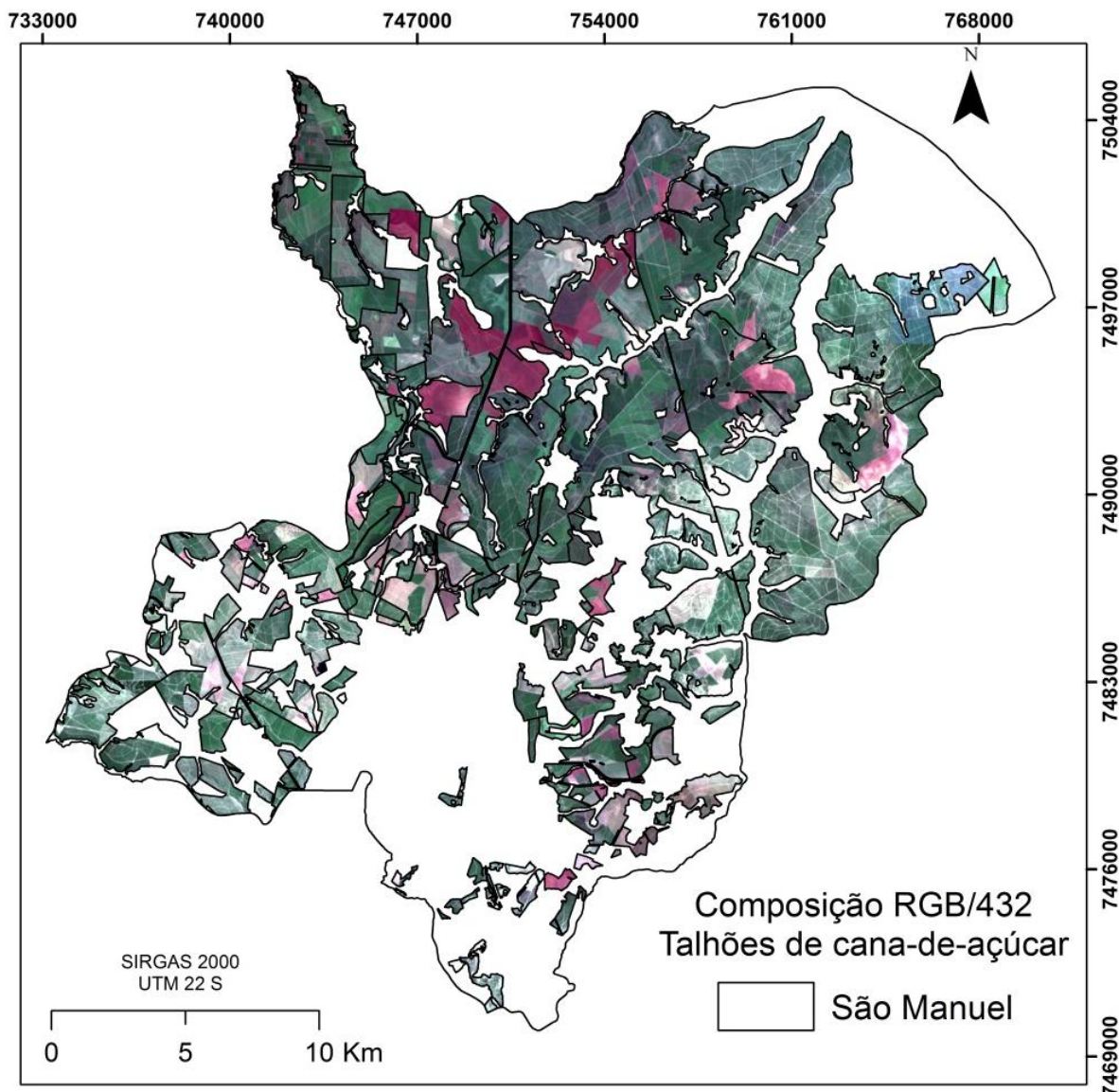


Figura 10. Cultura de cana-de-açúcar no município de São Manuel – SP. Alguns talhões apresentam-se como solo exposto ou com início de crescimento da cultura. Composição das bandas RGB/432 da imagem de 30 de janeiro de 2014 do satélite LANDSAT 8.

6.2 Índices de Vegetação nos talhões de cana-de-açúcar no município de São Manuel

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) gerado em cana-de-açúcar (Figura 11) representa grande parte da área com o crescimento vegetativo máximo da cultura, com valores próximos a 1 representados em cor verde e pode-se certificar que nessas áreas em verde possui maior quantidade de biomassa da cultura.

O NDVI, para Alvarenga e Moraes (2014), é um indicador da proporção e da condição da vegetação verde. Geralmente para superfícies com presença de alguma vegetação o valor do NDVI é positivo, para superfícies sem vegetação o valor é nulo, já para a água e nuvens o valor geralmente é negativo. Quanto mais próximo do extremo positivo, maior a densidade da cobertura vegetal, ou seja, condiz com seu estágio denso e desenvolvido. Esse valor diminui gradativamente para cobertura vegetal menos densa, que apresenta valores positivos, porém, não muito elevados.

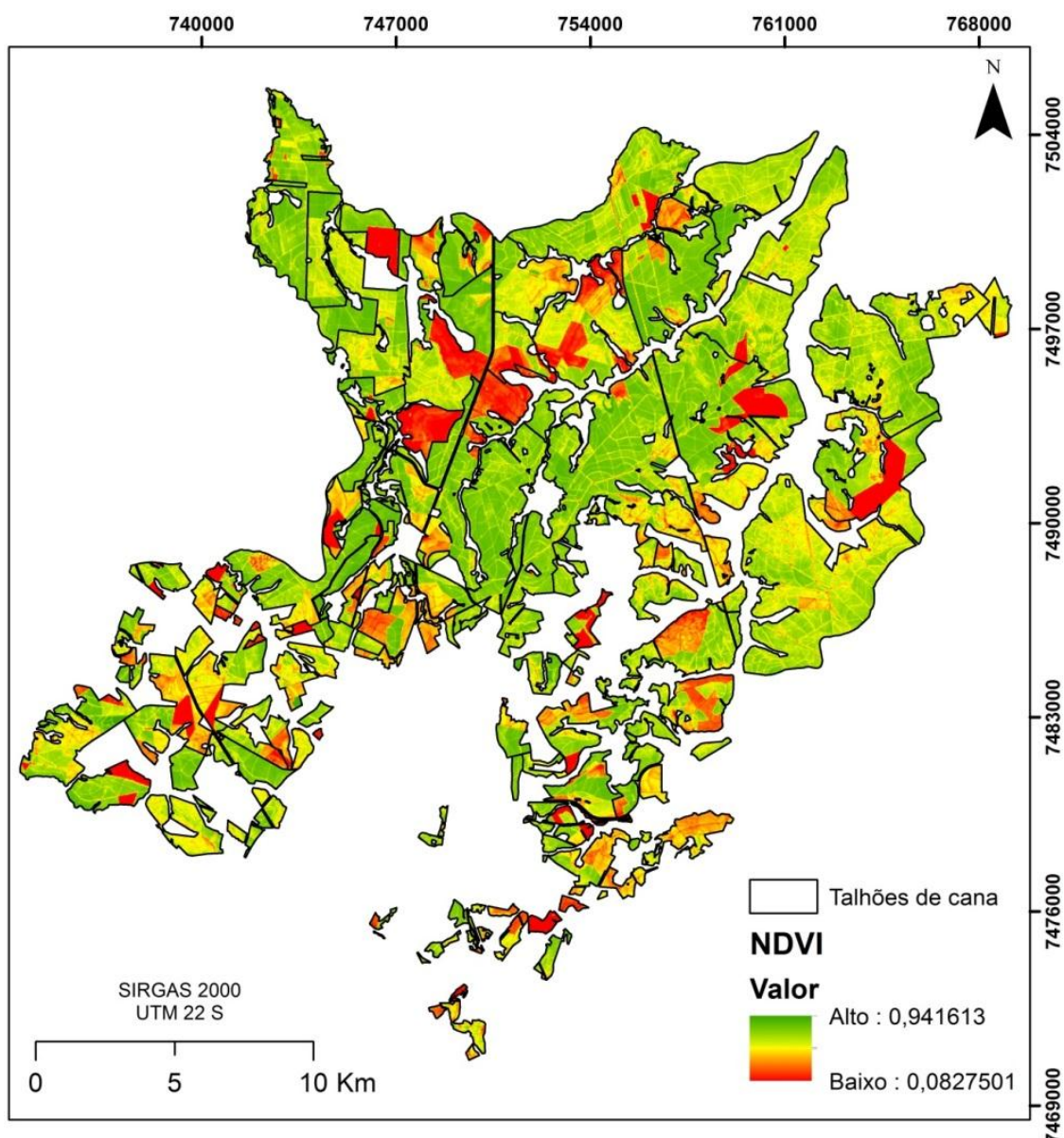


Figura 11. Índice de vegetação NDVI nos talhões de cana-de-açúcar no município de São Manuel-SP.

Para as áreas com valores próximos a zero, encontram-se os talhões de cana-de-açúcar com ausência da cultura, ou seja, solo exposto e também áreas onde o crescimento da cultura é inicial.

O índice de vegetação CO₂ flux é gerado a partir da integração do NDVI com o sPRI. O NDVI representa o vigor da vegetação fotossinteticamente ativa e o índice PRI ou sPRI representa a eficiência do uso da luz na fotossíntese. Logo, com essa integração o CO₂ flux mede a eficiência do processo de sequestro de carbono. Na Figura 12 é possível detectar onde o sequestro de carbono teve maior eficiência, representados pelos maiores valores.

Melo et al. (2015) definiram o NDVI um índice capaz de determinar a densidade de fitomassa foliar fotossinteticamente ativa por unidade de área (quanto maior este índice de vegetação, mais densa é a fitomassa verde). Segundo Rouse et al. (1973), as vegetações saudáveis estão representadas no intervalo de 0,2 e 0,8 no NDVI. Por meio desse índice pode-se dizer que nas áreas de vegetação densa (verde em NDVI) seria as áreas que mais sequestrariam carbono e é o que realmente acontece no índice CO₂ flux em cana-de-açúcar no município de São Manuel –SP (Figura 12).

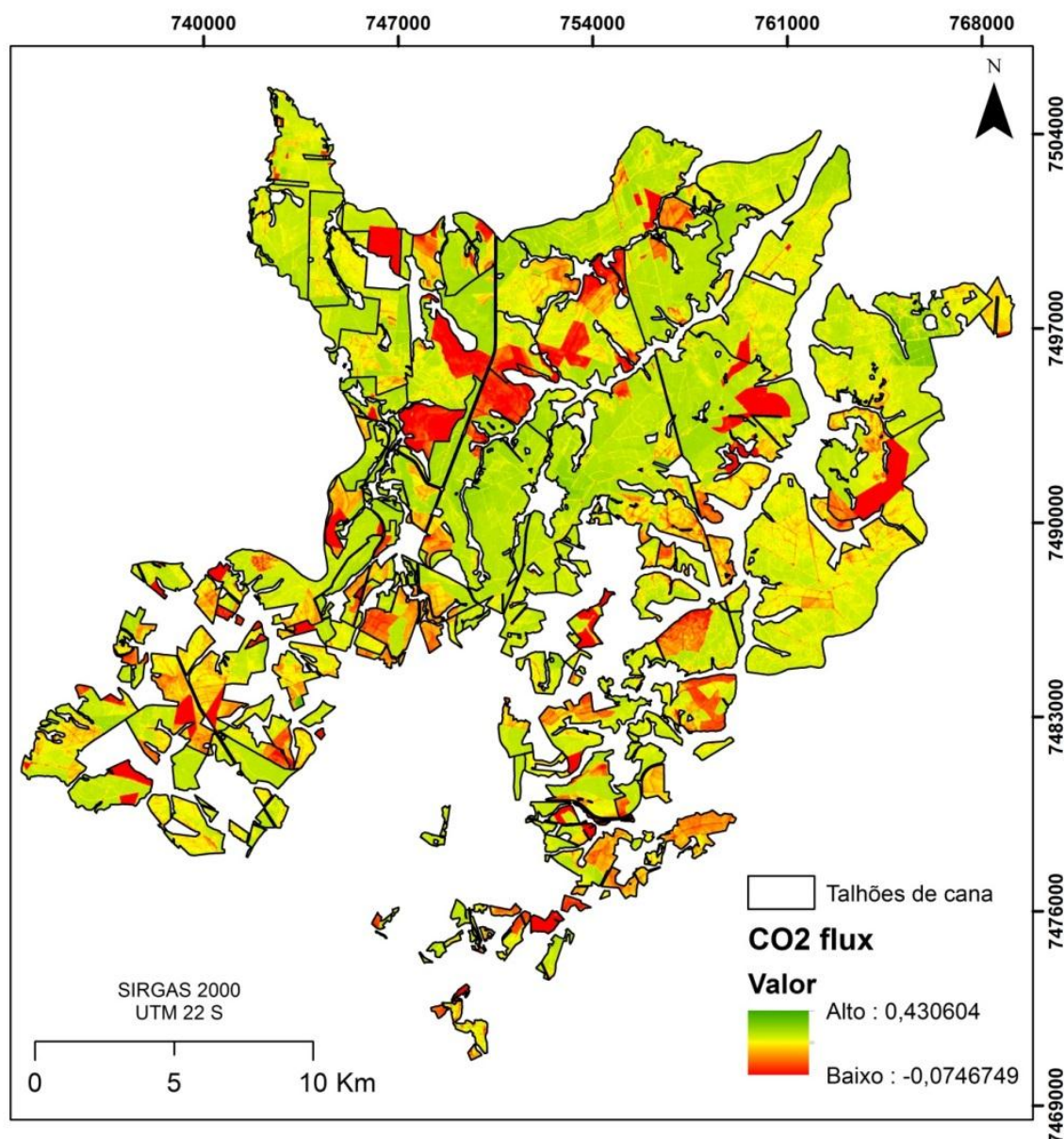


Figura 12. Índice de vegetação CO₂ flux nos talhões de cana-de-açúcar no município de São Manuel –SP.

Na Figura 13, o Índice de Área Foliar (IAF) estima a quantidade de biomassa nos talhões de cana-de-açúcar, desta forma, quanto maior os valores de IAF, menor os valores de radiância na região do visível e no infravermelho médio e maior na região do infravermelho próximo.

As áreas que apresentam maior teor de biomassa (Figura 13) são relativamente às mesmas que apresentam maior teor de CO₂ flux representado na Figura 12.

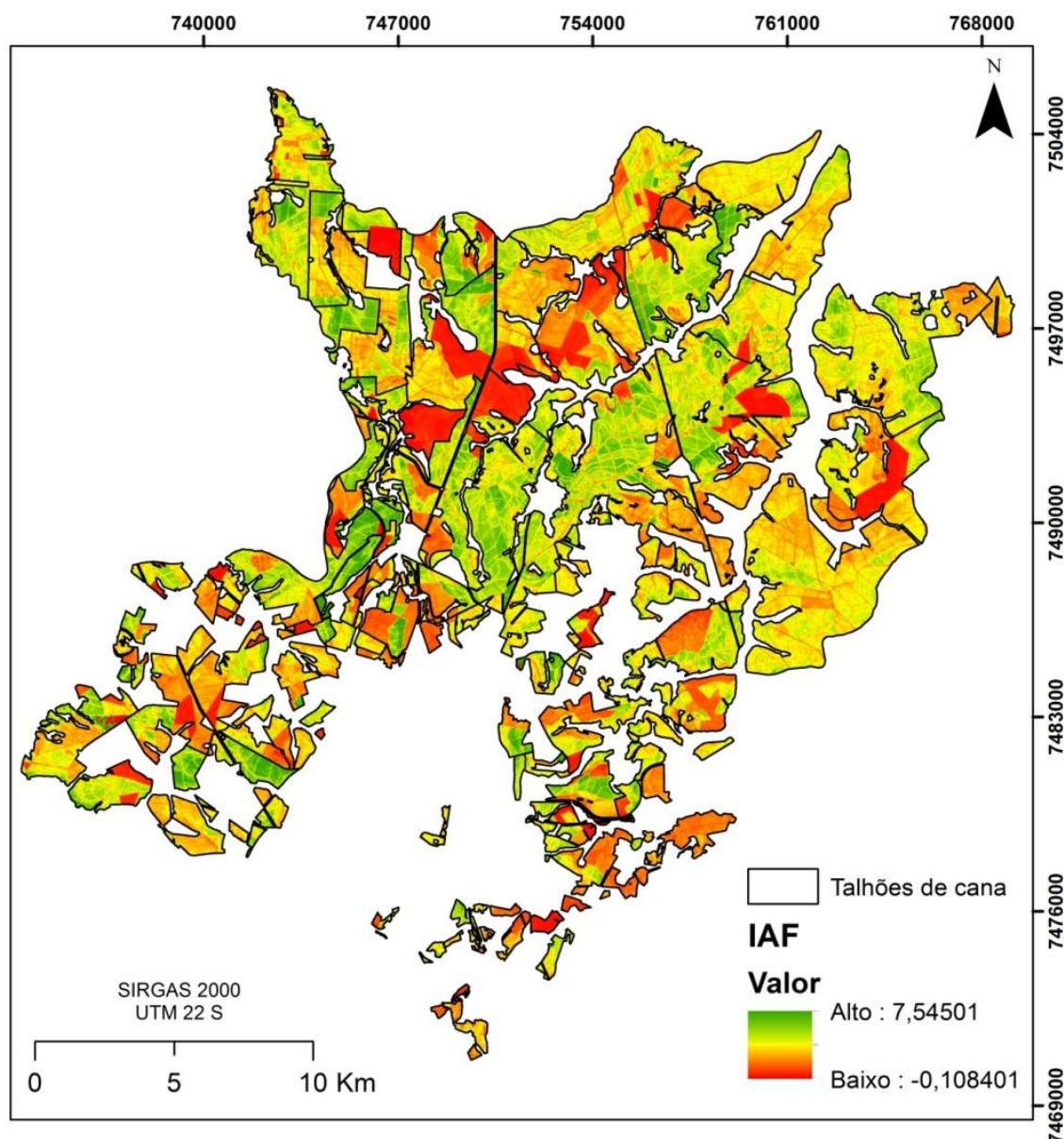


Figura 13. Índice de vegetação IAF nos talhões de cana-de-açúcar no município de São Manuel - SP.

Assim, como o NDVI, o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) é um indicador da proporção e da condição da vegetação verde, porém, faz parte de um grupo de índices considerados híbridos, pois utiliza um fator de ajuste para minimizar o efeito da presença de solo em meio à vegetação. Segundo Huete (1988), o SAVI mede ou aproxima a distância entre o pixel e a linha do solo retirando o efeito dos solos claros ou escuros amenizando os efeitos do background do solo.

Como a área de estudo é somente talhões de cana-de-açúcar o intervalo de SAVI foi de 0,03 à 0,78, Figura 14, sendo os valores baixos às áreas de solo

exposto, ou quando na fase inicial de crescimento da cultura. Os valores obtidos da classificação SAVI variam em escala negativo-positivo, onde áreas com presença de alguma vegetação o valor é positivo e áreas sem vegetação, corpos d'água e nuvens o valor geralmente é negativo. (ALVARENGA; MORAES, 2014).

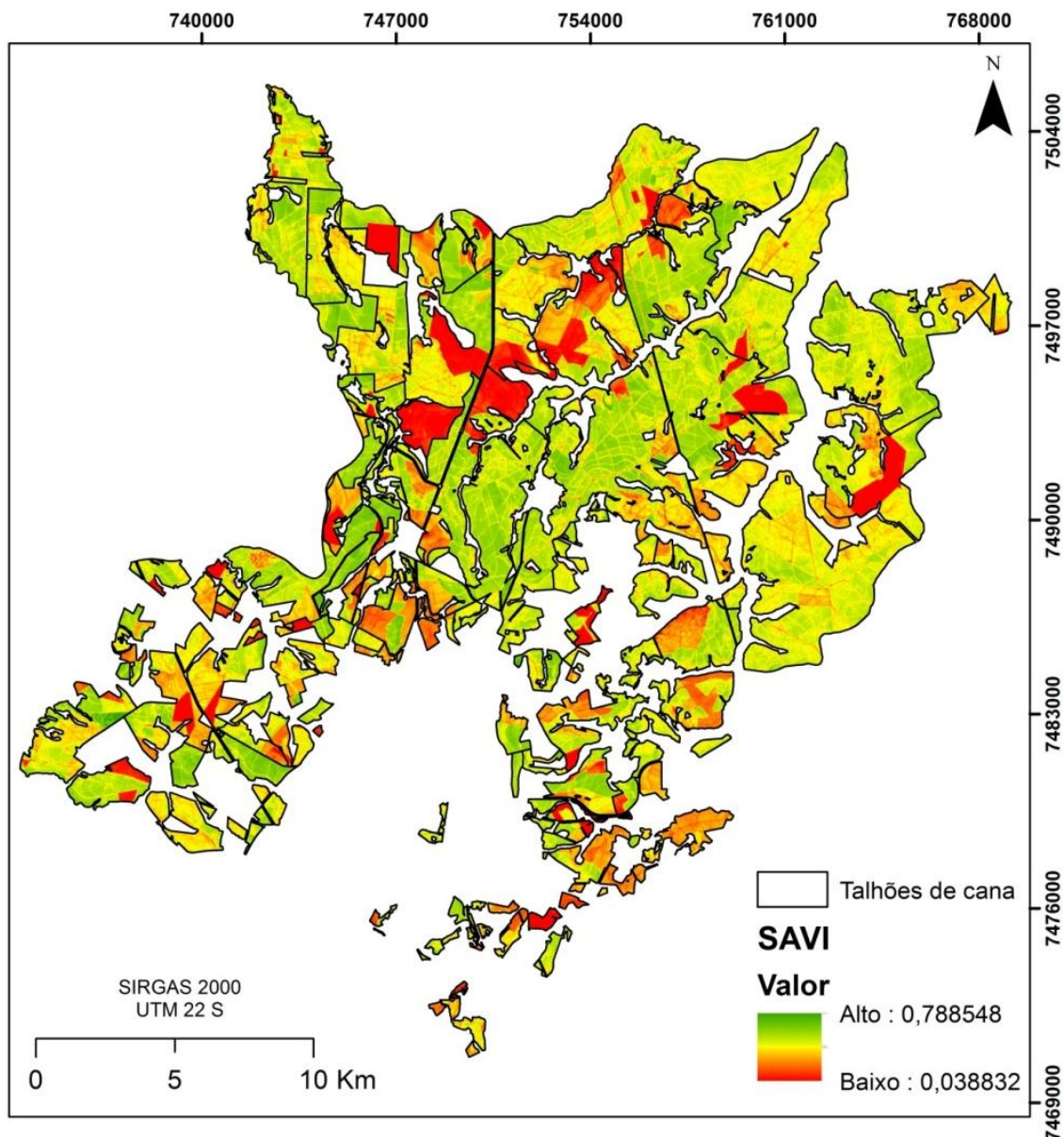


Figura 14. Índice de vegetação SAVI nos talhões de cana-de-açúcar no município de São Manuel – SP.

6.3 Índices de Vegetação nas áreas no município de Botucatu – SP

As áreas em Botucatu (Figura 15) usadas para validação, na época do estudo, em janeiro de 2014, vegetadas com cana-de-açúcar sendo a Área 1, cana soca, teve plantio realizado em Julho de 2010, portanto, ser seu terceiro ciclo em cana soca, e a Área 2 com 8 meses sendo a data do plantio em Maio de 2013. Nessa imagem pôde-se detectar que o vigor vegetativo da Área 2 foi maior devido ao fato que nessa área a cultura ser cana planta, onde a cana soca já não responde em quantidade de biomassa, em terceiro ciclo, como uma cana planta.

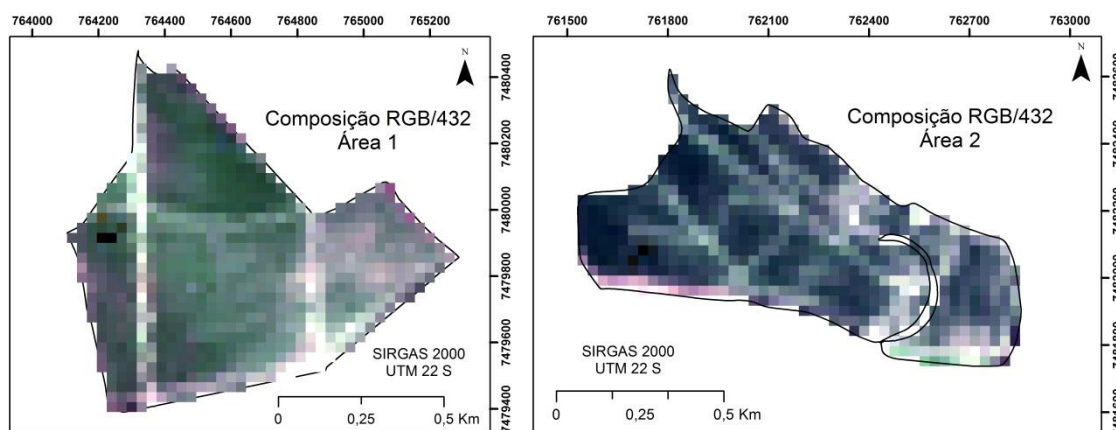


Figura 15. Áreas de validação (Área 1 e 2) cultivadas com cana-de-açúcar no município de Botucatu – SP. As áreas mais escuras correspondem ao maior vigor vegetativo da cultura de cana-de-açúcar. Composição das bandas RGB/432 da imagem de 30 de janeiro de 2014 do satélite Landsat 8.

O NDVI para a Área 1 (Figura 16) apresentou valores próximos a 1 nos talhões e valores próximo a zero nos carregadores, representando o esperado pela presença de cana-de-açúcar e, com isso, é possível afirmar que na área de São Manuel, os locais que possuem valores semelhantes ao apresentado neste mapa, possuem grande quantidade de biomassa, presença de vegetação densas.

O índice CO₂ flux apresentou, na região central da Área 1, valores semelhantes por toda a área embora o NDVI tenha apresentando regiões mais densa ao norte da área. O CO₂ flux apresentou valores reduzidos na região leste o que foi comprovado também pelo NDVI.

Em São Manuel pôde-se encontrar áreas com valores de NDVI mais elevados (Figura 12) assim como na Área 1 (Figura 16-a), indicando que em ambas as áreas a vegetação está mais densa. O mesmo ocorreu com o CO₂ flux nas mesmas áreas com valores elevados.

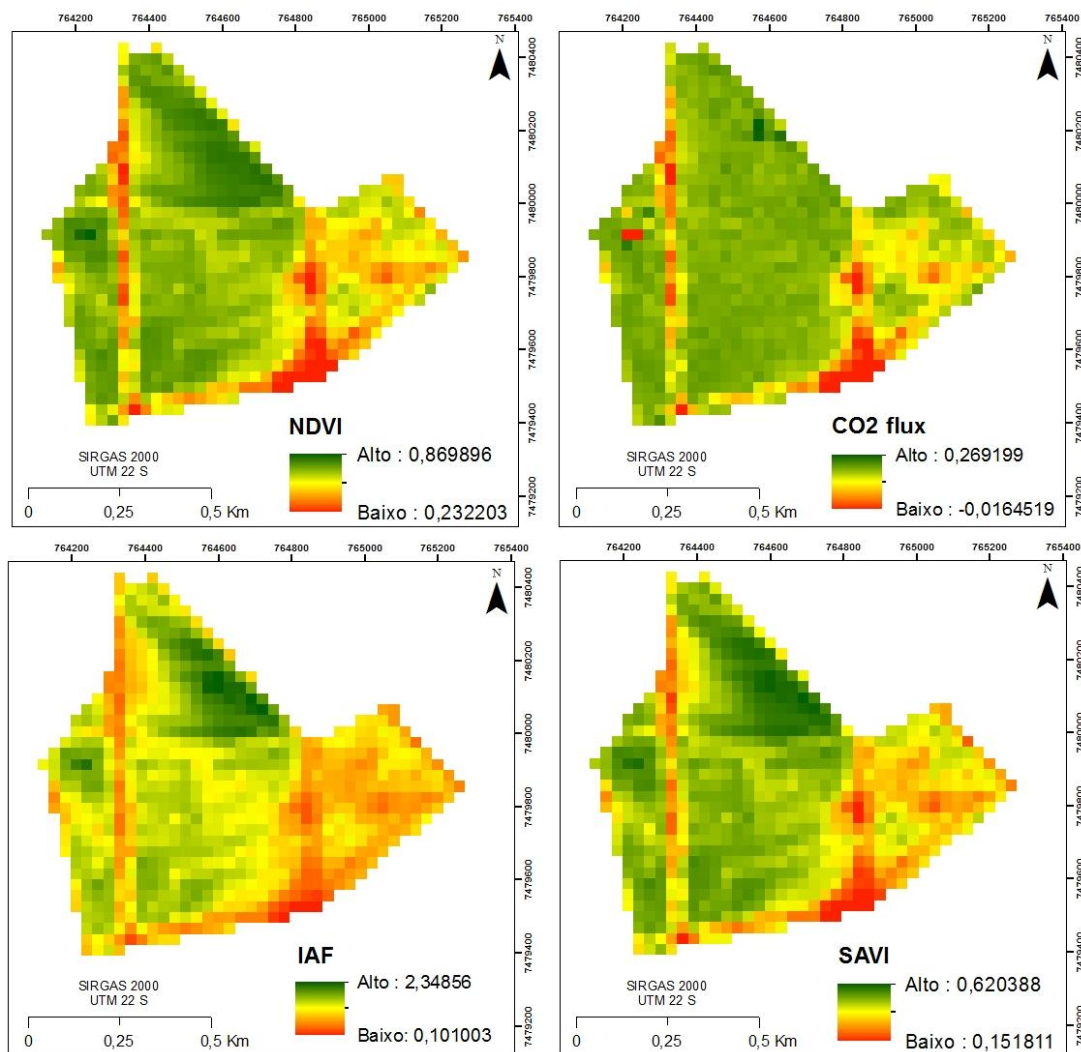


Figura 16. Índices de vegetação (NDVI, CO₂ flux, IAF e SAVI) na Área 1 em Botucatu – SP.

O IAF e SAVI apresentaram diferença relativa aos valores na região norte, assim como o NDVI, indicando biomassa densa. Na região central os valores de IAF foram menores e o SAVI apresentou valores próximos à região norte.

Na Área 2 (Figura 17), o NDVI apresentou valores altos em toda a área, conseqüentemente, o sequestro de carbono estimado pelo CO₂ flux apresentou também valores altos.

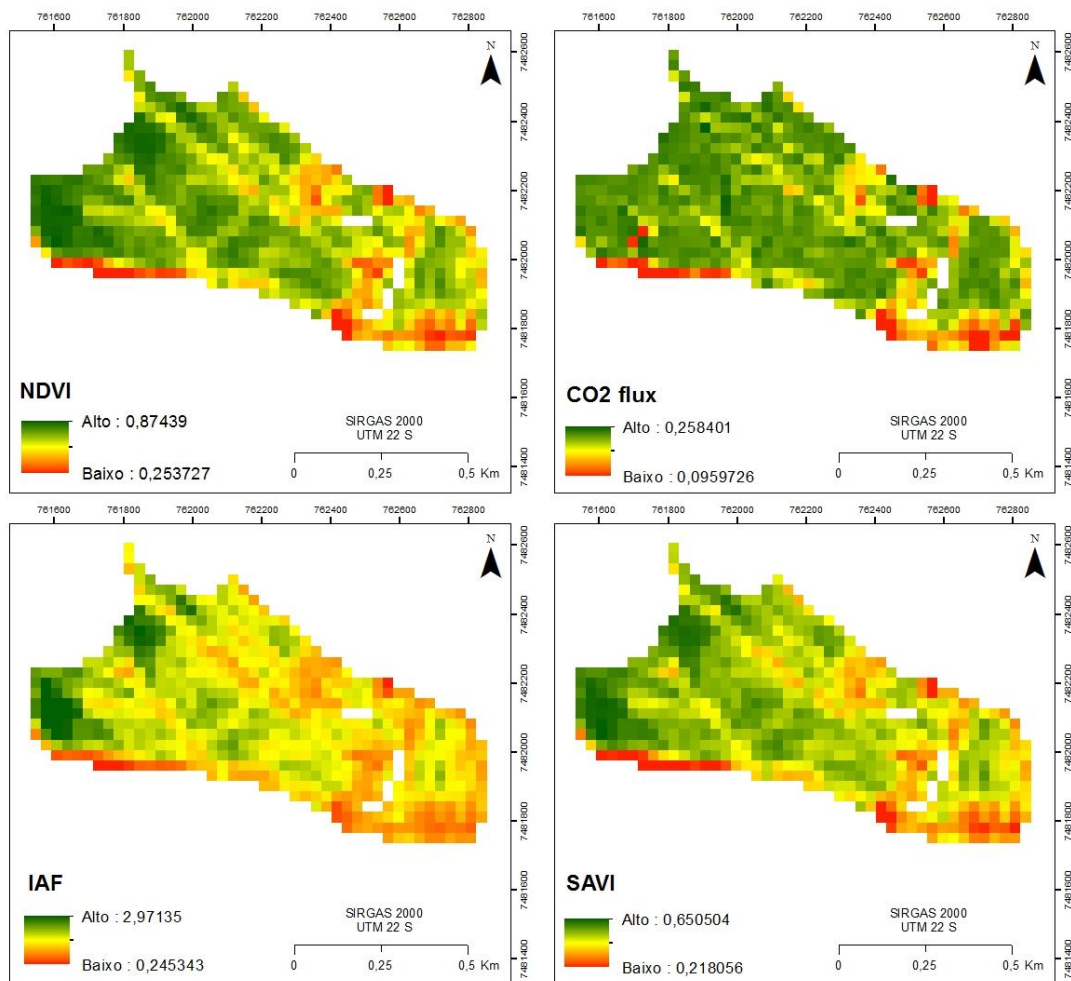


Figura 17. Índices de vegetação (NDVI, CO₂ flux, IAF e SAVI) na Área 2 em Botucatu – SP.

Os valores máximos nos índices nas duas áreas de validação foram próximos, porém, pôde-se notar um diferencial na distribuição desses valores. A Área 2 apresentou maior quantidade dos maiores valores quando comparados com a Área 1, representando maior biomassa e, conseqüentemente, o maior sequestro de carbono.

Um dos motivos para essa diferença nos valores entre as áreas deve-se ao estágio de desenvolvimento da cana, pois na Área 2 foi realizado o plantio da cana, chamada então de cana planta. A cana-de-açúcar é denominada “cana planta” até sua primeira colheita, havendo um período de crescimento em torno de 12 ou 18 meses, dependendo da época de plantio (BRANDÃO et al., 2009). Após a primeira colheita, a cana sofre uma rebrota que é chamada de soca.

A Área 1 por apresentar cana do tipo soca, possui um ciclo fisiológico menor, com duração de um ano após a primeira colheita. Ou seja, seu desenvolvimento é mais rápido, podendo diminuir sua qualidade quando comparado ao desenvolvimento da cana planta, representada na Área 2.

Com isso, pôde-se interpretar essa resposta dos índices de vegetação na Área 2, com maior intensidade dos valores, pois nessa área a cana-de-açúcar estava com o desenvolvimento da cultura um pouco mais avançada em relação à Área 1. Os índices na Área 2 apresentaram essa diferença em relação a presença de maior biomassa e sequestro de carbono.

Para aprimorar os resultados foi realizada a correlação de Pearson entre os índices de vegetação. O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas, variando entre os valores -1 e 1.

Na Tabela 4 está descrita a matriz de correlação entre os índices de vegetação para a Área 1, onde foi possível notar que todos os índices de vegetação tiveram correlação alta e positiva, pois valores próximos a 1 indicam maiores correlações e as que obtiveram os valores mais próximos a 1 foram do SAVI com NDVI e SAVI com IAF, porém, são dependentes entre si por serem derivados um dos outros.

Tabela 4. Matriz de correlação entre os índices de vegetação na Área 1 em Botucatu – SP

	NDVI	SAVI	CO ₂ flux	IAF
NDVI	1	0,989656	0,918604	0,946653
SAVI	0,989656	1	0,880961	0,978145
CO ₂ flux	0,918604	0,880961	1	0,786875
IAF	0,946653	0,978145	0,786875	1

O índice de CO₂ flux, ainda na Tabela 4, teve correlação alta com NDVI, pois o mesmo possui o dado de NDVI dentro de sua fórmula. O SAVI possuiu alta

correlação com CO₂ flux (0,880961), sendo este valor mais baixo que entre a correlação de CO₂ flux com NDVI (0,918604). Como o SAVI elimina o efeito de solo, essa diferença pode estar relacionada com essa variação de valores. O IAF teve correlação de 0,78 com CO₂ flux, onde foi considerada alta correlação.

A matriz de correlação entre os índices de vegetação na Área 2 está expressa na Tabela 5. A correlação dessa área foi maior quando comparada com a da Área 1. Todos os índices possuíram correlação acima de 0,93, o que indica alta correlação entre eles, somente a correlação entre CO₂ flux e IAF foi abaixo desse valor, porém apresentou correlação com valor de 0,80, acima da correlação encontrada na Área 1 (0,78).

Tabela 5. Matriz de correlação entre os índices de vegetação na Área 2 em Botucatu - SP

	NDVI	SAVI	CO ₂ flux	IAF
NDVI	1	0,987704	0,946927	0,935468
SAVI	0,987704	1	0,936519	0,949856
CO ₂ flux	0,946927	0,936519	1	0,807612
IAF	0,935468	0,949856	0,807612	1

Por meio da correlação entre os índices de vegetação foi notada a importância dessa análise, pois os resultados foram comparados entre si, tanto na área em São Manuel como nas áreas de Botucatu. Essas altas correlações foram importantes por permitir a comparação entre as áreas de São Manuel e as de validação.

Com as áreas de validação foi possível identificar os locais onde a cultura de cana-de-açúcar está presente e seus estágios de desenvolvimento no município de São Manuel – SP.

6.4 Estoque de carbono no solo

O estoque de carbono no solo das Áreas 1 e 2 em Botucatu - SP foram especializados por krigagem, de acordo com Isaaks e Srivastava (1989) e estão

representadas nas Figuras 18 e 19, respectivamente. Na profundidade de 0-20 e 20-40 cm (Figura 18) pôde-se observar uma grande variação entre os valores, sendo o valor máximo de estoque de carbono no solo na profundidade de 0-20 foi de aproximadamente 63 g cm^{-3} e na profundidade de 20-40 foi muito maior, com valor de 162 g cm^{-3} .

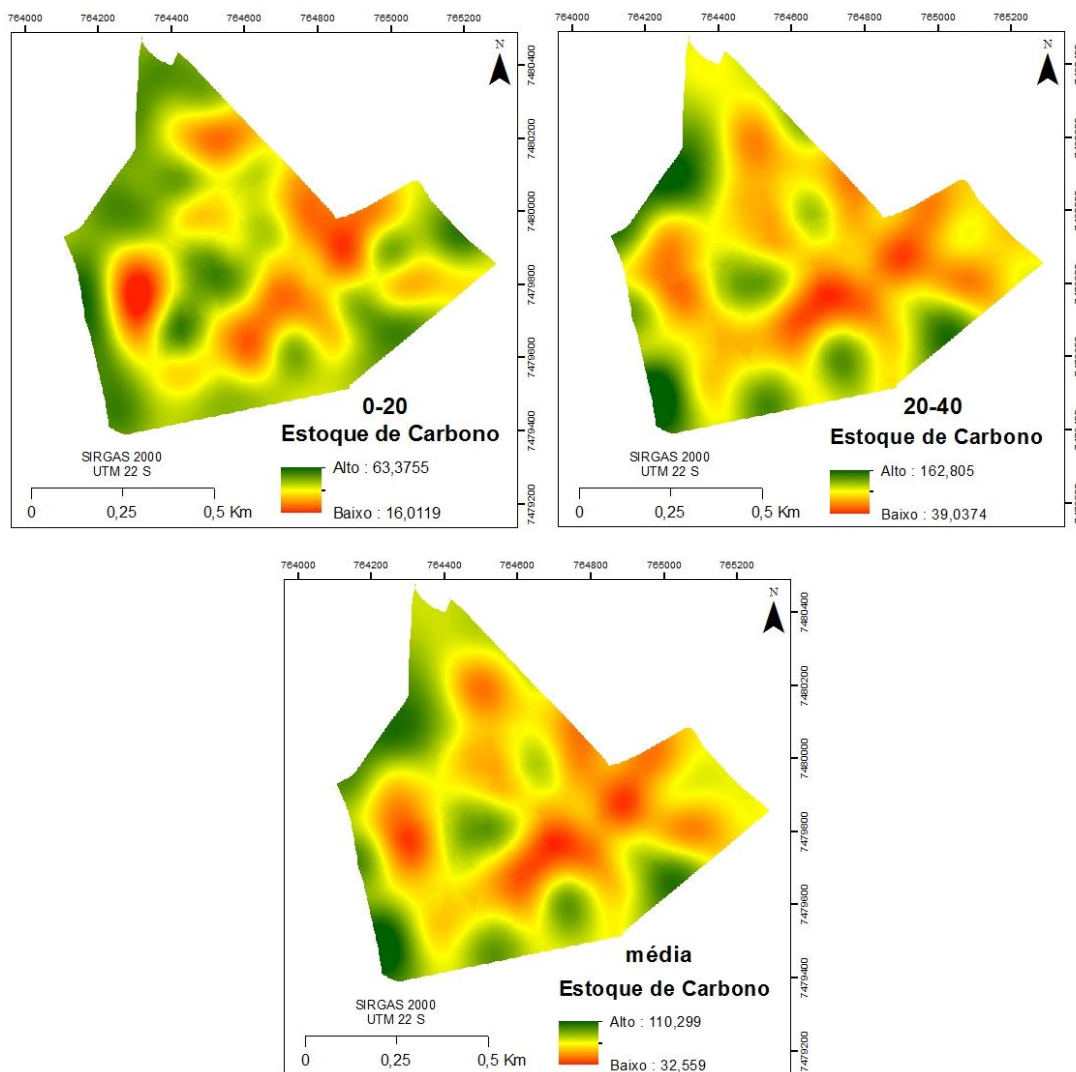


Figura 18. Espacialização de Estoque de Carbono no Solo em diferentes profundidades (0-20 e 20-40) e média na Área 1 em Botucatu – SP.

Na profundidade de 0-20 cm estão apresentados os maiores valores em relação à profundidade de 20-40 cm, sendo que na superfície os maiores valores possuem continuidade espacial, ocorrendo o contrário em subsuperfície. Na média das profundidades para estoque de carbono observa-se um comportamento próximo da profundidade 20-40 cm.

Na Área 2 houve variação dos valores máximos entre profundidade de 0-20 cm ($69,16 \text{ g cm}^{-3}$) em relação a 20-40 cm ($107,15 \text{ g cm}^{-3}$), porém não muito elevada como ocorreu na Área 1. A distribuição dos valores (Área 2) seguiu da mesma maneira para as duas profundidades, onde maiores valores aparecem em manchas descontínuas.

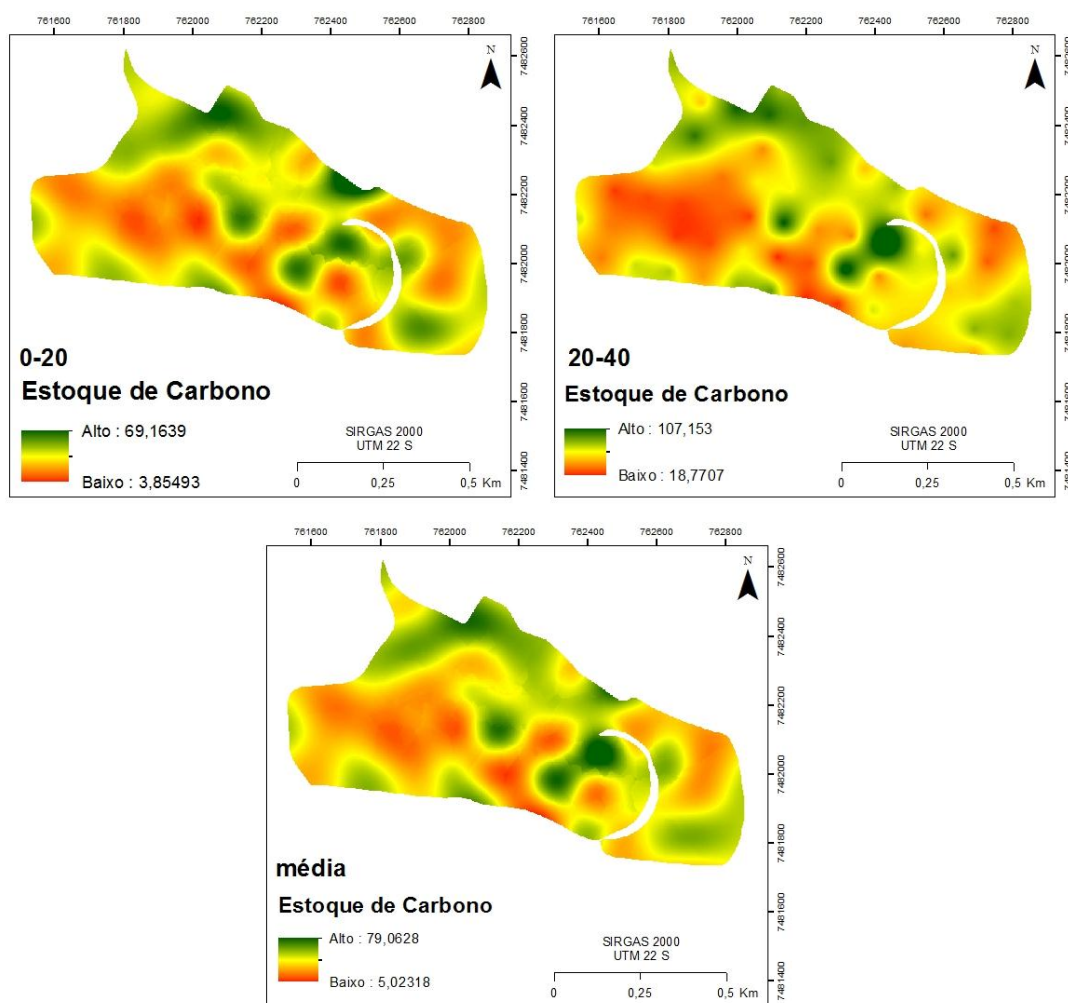


Figura 19. Espacialização de Estoque de Carbono no Solo em diferentes profundidades (0-20 e 20-40) e média na Área 1 em Botucatu – SP.

Também foi realizada a correlação de Pearson (Tabela 6 e 7) para os valores especializados de estoque de carbono no solo e os índices de vegetação, não foi encontrado nenhuma correlação entre os valores nas duas áreas, pois, o valor 0 (zero) significa que não houve correlação linear, o valor 1 ou -1 indica uma relação linear perfeita, o valor negativo indica uma relação linear perfeita mas inversa, ou seja quando uma das variáveis aumenta a outra diminui. Quanto mais próximo estiver de 1 ou -1, mais forte é a associação linear entre as duas variáveis.

Para a Área 1 (Tabela 6) e para a Área 2 (Tabela 7), nenhuma das profundidades no solo possuíram correlação, todos os valores encontraram-se próximo a zero, com isso tem-se como resultado que nessas áreas não existe correlação entre o estoque de carbono no solo e os índices gerados nas mesmas áreas, ou seja a biomassa apresentada pelos índices (NDVI, IAF e SAVI) e o sequestro de carbono estimado pelo CO₂ flux não correlacionaram com os valores de estoque de carbono no solo.

Tabela 6. Correlação de Pearson entre os valores de estoque de carbono no solo e os índices de vegetação na Área 1 em Botucatu - SP

	NDVI	SAVI	CO ₂ flux	IAF
0-20	-0,12082	-0,14412	-0,13036	-0,15881
20-40	-0,15392	-0,15458	-0,14125	-0,1531
média	-0,15475	-0,16252	-0,15011	-0,16466

Tabela 7. Correlação de Pearson entre os valores de estoque de carbono no solo e os índices de vegetação na Área 2 em Botucatu - SP

	NDVI	SAVI	CO ₂ flux	IAF
0-20	-0,18777	-0,16096	-0,12842	-0,15352
20-40	-0,11827	-0,1078	-0,0204	-0,1342
média	-0,1646	-0,14752	-0,08846	-0,15311

A explicação possível para a baixa correlação entre índices relacionados à biomassa e teor de carbono no solo é que as áreas são cultivadas com

cultura semiperene, que demanda revolvimento sistemático do solo. Outra justificativa para o fato é que o manejo foi convencional, outra vez com revolvimento do solo (sem deixar acumular material orgânico no solo).

As análises dos índices gerados apresentaram o esperado, pois, em São Manuel - SP, grandes áreas possuíam valores maiores ou iguais aos valores apresentados nas áreas de validação, onde havia presença da vegetação de cana-de-açúcar e, com isso, pode-se indicar o uso de índices na mensuração de biomassa, e estoque de carbono no monitoramento e análise temporal da cultura.

Uma vantagem no uso de índices de vegetação para o monitoramento é que independe do tamanho da área, grandes ou pequenas, a cada 16 dias é possível adquirir nova imagem de satélite para realizar outra análise.

7 CONCLUSÃO

Pelos resultados obtidos no estudo de índices de vegetação em cana-de-açúcar pôde-se concluir:

- É viável a confecção e manipulação das imagens para determinação dos índices de vegetação da cultura de cana-de-açúcar em São Manuel – SP sendo que a cana soca apresentou os maiores índices de vegetação em relação à cana planta;
- Foi possível a confecção de mapa de estoque de carbono a partir de dados de análise química do solo;
- Houve alta correlação entre os índices de vegetação NDVI, CO₂ flux, SAVI e IAF nas áreas de validação;
- Não houve correlação entre o sequestro de carbono obtido por sensoriamento remoto com o estoque de carbono no solo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, D. A. **Monitoramento da área colhida de cana-de-açúcar por meio de imagens do sensor MODIS**. 2007. 103 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2007

ALENCAR, K. **Análise do balanço entre demanda por etanol e oferta de cana-de-açúcar no Brasil**. 2012. 49 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land)** – Advanced Training and Users Manual –Idaho Implementation, version 1.0, 2002.

ALVARENGA, A. S; MORAES, M. F. **Processamento digital de imagens LANDSAT – 8 para obtenção dos índices de vegetação NDVI e SAVI visando a caracterização da cobertura vegetal no município de Nova Lima – MG**. 2014. Disponível em:
<http://mundogeo.com/blog/2014/06/10/processamento-digital-de-imagens-landsat-8-para-obtencao-dos-indices-de-vegetacao-ndvi-e-savi-visando-a-caracterizacao-da-cobertura-vegetal-no-municipio-de-nova-lima-mg/>

ANDRADE, H.J.; IBRAHIM, M. Como monitorar el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? **Agroforestería en las Américas**, v.10, p. 109 – 116, 2003.

ARATANGY, G.B., **Protocolo de Quioto: uma aplicação da teoria da ação coletiva**. 2007. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade Getúlio Vargas, FGV, São Paulo, 2007.

AREVALO, L. A.; ALEGRE, J. C.; VILCAHUAMAN, L. J. M. **Metodologia para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra**. Colombo: Embrapa Florestas, 2002. 41 p.

ARRUDA, P. Perspective of the sugarcane industry in Brazil. **Tropical Plant Biology**, New York, v. 4, p. 3 – 8, 2011.

BALBINOT, R. et al. Estoque de carbono em plantações de *Pinus* spp. em diferentes idades do sul do estado do Paraná. **Revista Floresta**, Curitiba, v.38, n. 2, p. 317-324, jun. 2008.

BAIRD, C. **Química ambiental**. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

BARBOSA, A. P. **Comparação de métodos de classificação de imagem, visando o gerenciamento de imagens citrícolas**. 2009. 80 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu. 2009.

BARBOSA, R. R. N. et al. Produção e sequestro de carbono a atmosfera. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 16, p. 1783-1798, 2013.

BAPTISTA, G. M. M. Mapeamento do Sequestro de Carbono e de Domos Urbanos de CO₂ em Ambientes Tropicais, por meio de Sensoriamento Remoto Hiperespectral. X ed. Rio Claro: **Geografia**, v. 29, n. 2, p. 189 – 202, 2004.

BAPTISTA, G. M. M. Validação da Modelagem de sequestro de carbono para ambientes tropicais de cerrado, por meio de dados Aviris e Hyperion. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2003. Artigos, p. 1037-1044. Disponível em: http://mar.te.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/09.07.21.45/doc/10_002.pdf. Acesso em: 25 out. 2014.

BAPTISTA, G. M. M., MUNHOZ, C. B. R. Comportamento do sequestro florestal de carbono, do conteúdo de CO₂ atmosférico e do conteúdo de umidade da vegetação no Pantanal de Nhecolândia, MS, por meio de sensoriamento remoto hiperespectral. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIV, Natal, 2009. **Anais...**, São José dos Campos: INPE, 2009. p. 1071-1078.

BERKA, L.M.S.; RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E. Soybean yield estimation by an agrometeorological model in a GIS. **Scientia Agricola**, v.60, p.433-440, 2003.

BOHM, G. M. **Impactos da poluição de veículos automotores na saúde humana e meio ambiente**. São Paulo: FIESP/CIESP, 1986.

BRANDÃO, D.; et al. Distinção das classes de cana-de-açúcar através do NDVI. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14., 2009. Natal, Brasil. **Anais...** São José dos Campos, INPE. 2009, p. 105-111.

BROLLO, M. J. **Metodologia automatizada para seleção de áreas para disposição de resíduos sólidos: Aplicação na região metropolitana de Campinas (SP)**. 2001. 233 f. Tese (Doutorado em Saúde Ambiental) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2001.

BUCKERIDGE, M. S. **Comparação entre os sistemas fotossintéticos C3 e C4**. Universidade de São Paulo: Instituto de Biociências. 2011. Disponível em:
<http://felix.ib.usp.br/pessoal/marcos/minhawe3/PDFs/Pratica%20fotossintese.pdf>

CANA-DE-AÇÚCAR. Proálcool procura seu caminho para sobreviver. **A Granja**, Porto Alegre, v. 53, n. 581, p. 12-17, 1997.

CANASAT. **Monitoramento da cana-de-açúcar via imagens de satélite: via imagens de satélite**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/>>. Acesso em: 05 jan. 2015.

CARNEIRO, J. V. **Fluxos turbulentos de CO2 em uma área de arroz irrigado no RS**. 2007. 19p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

CASAGRANDE, A. A.; VASCONCELOS, A. C. M. **Fisiologia da parte aérea**. In: DINARDOMIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; ANDRADE LANDELL, M. G. DE. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2010. p. 57-78.

CERQUEIRA, D. B.; ROCHA, W. F.; Relação entre tipos de vegetação e fluxo de CO2 no Bioma Caatinga: Estudo de caso em Rio de Contas – BA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIII, Florianópolis, 2007. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 2413-2419.

CERRI, C. C. et al. **Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa**: Emissões e remoções de dióxido de carbono pelos solos por mudança de uso da terra e calagem. Brasília: Ministério da Ciências e Tecnologia, 2001. 41 p.

CENTRO INTEGRADO DE INFORMAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS - CIIAGRO. **Monitoramento climático**. São Paulo: IAC/APTA/SAB. Disponível em:
<<http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Listagens/MonClim/LMclimLocal.asp>>. Acesso em: 14 ago. 2014.

COELHO, C. H. M. et al. Identificação de genótipos de cana-de-açúcar quanto ao potencial de contribuição da fixação biológica de nitrogênio. **Agronomia**, Rio de Janeiro, v. 37, n. 2, p. 37-40, 2003.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, v. 1, Safra 2014/15, n. 3 - Terceiro Levantamento, Brasília, dez. 2014.

COSTA FILHO, J. F. et al. Estimativa do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) na microrregião de Sousa - PB utilizando imagens do CBERS2. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15, Aracaju - SE. **Anais...** 2007.

COUTINHO, R. P. **Estoques de carbono e emissão de N₂O no sistema solo-planta em região da Mata Atlântica**. 2009. 68 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2009.

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: IG/UNICAMP, 1992. 170 p.

CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Classificação Climática para os Municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **Irriga**, v.14, n.1, p.1-11, 2009.

DIAS FILHO, M. B. **A fotossíntese e o aquecimento global**. Belem: Embrapa Amazonia Oriental, 2006. 24p. (Embrapa Amazonia Oriental. Documentos, 234).

DORAISWAMY, P. C.; et al. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS. **Remote Sensing of Environment**, Oxford, v. 92, n. 1, p. 548-559, 2004.

EDGERTON, C. W. **Sugarcane and its diseases**. Baton Rouge, L.A.: Louisiana State University, 1958. 301p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Geotecnologias e geoinformação: o produtor pergunta, a embrapa responde**. Editores técnicos: TÔSTO, S. G.; RODRIGUES C. A. G.; BOLFE E. L.; BATISTELLA M. Brasília, DF. 2014. 248 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **LANDSAT - Land Remote Sensing Satellite**. EMBRAPA Monitoramento por Satélite. Campinas, 2013. Disponível em: <http://www.sat.cnpem.embrapa.br/conteudo/missao_landsat.php> Acesso em: 04 fev. 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Rio de Janeiro. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: 1999. 412 p.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**, Oficina de textos, São Paulo, 97 páginas, 2002.

FONTANA, D.C. et al. Modelo de estimativa de rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p.399-403, 2001.

GAMON, J. A.; PEÑUELAS, J.; FIELD, C. B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 41, p. 35–44, 1992.

GATTO, A. et al. Estoque de carbono a biomassa de plantações de eucalipto na região Centro-Leste do Estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 895-905, abr. 2011.

- GHELLER, A. C. A. Resultados da aplicação de maturadores vegetais em cana-de-açúcar, variedades RB72454 e RB835486 na região de Araras, SP. In: 4 Jornada Científica da UFSCar, 2001, São Carlos. **Resumos**. 2001.
- GOEL, N. S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing Reviews**, Oxford, v. 4, n. 1, p. 1-21, 1988.
- GONZALEZ-SANPEDRO, M. C. et al. Seasonal variations of leaf area index of agricultural fields retrieved from Landsat data. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p.810-824, 2008
- HOLBEN, B.N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing** , v. 7 n. 11 p.1417 - 1434, 1986.
- HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing Environ.** Vol. 25, 1988.
- INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Land use, land use change, and forestry special report**. Summary for Policymakers (Based on Watson, R. et al. as Core Writing Team). Montreal, 2000. 388 p.
- INSTITUTO AGRONÔMICO - IAC. **Solos do Estado de São Paulo**. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/solosp/>. Acesso em: 21 maio de 2015.
- INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA - IPAM. **Perguntas e Respostas sobre Mudanças Climáticas**. Belém: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, 2002.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. 1981. Mapa geológico do Estado de São Paulo; escala 1:500.000. v1 (texto) e v2 (mapa). Governo do estado de São Paulo. Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia.
- ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. An introduction to applied geostatistics. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. 2ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009, 604 p
- KETTERINGS, Q. M. et al. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 146, n. 1/3, p. 199-209, June 2001.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H., **Queimadas na Amazônia e efeito estufa**, Ed. Contexto, 1992, 118p.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 4. ed. Madison: University of Wisconsin, 1999, 750 p.
- LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. 1. ed. Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2006. 908 p.

LUCCHESI, A. A. **Fatores da produção vegetal**. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. *Ecofisiologia da produção agrícola*. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. p. 1-11

MACEDO, I. C. Greenhouse gas emissions and energy balances in Bio-Ethanol reduction and utilization in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 14, n. 1, p. 77-81. 1998.

MAGRO, F. J. et al. **Biometria em cana-de-açúcar**. 2011

MARTINELLI, L. A.; CAMARGO, P. B. O monitoramento do carbono em áreas florestadas. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 10, n. 29, p. 6, nov. 1996.

MARTINS, C. R. et al. **Ciclos globais de carbono, nitrogênio e enxofre: a importância na química da atmosfera**. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola, Nº 5 – Novembro, 2003. Disponível em :

http://webeduc.mec.gov.br/portaldoprofessor/quimica/sbq/cadernos/05/quimica_da_atmosfera.pdf

MARTINS, L.N.; BAPTISTA, G.M.M. Análise multitemporal do sequestro florestal de carbono no projeto de assentamento Carão, Acre. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 06, n. 06, p. 1648-1657, 2013.

MAS, J. F. Monitoring land-cover changes: a comparison de change detection techniques. **International Journal of Remote Sensing**, Londres, v.20, n.1, p. 139-152, 1999.

MATHER, P. M. Classification. In: MATHER, P. M. *Computer processing of remotely-sensed images*. West Sussex: John Wiley & Sons LTD. 1999. 292 p. cap. 8. p 167 – 209.

MELO, E. T. et al. Aplicação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para análise da degradação ambiental da Microbacia Hidrográfica do Riacho dos Cavalos, Crateús-CE. *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE41212011. P. 520-53 Curitiba, Departamento de Geografia – UFPR.

MENESES, P. R. Princípios de sensoriamento remoto. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília, 2012.

MENESES, P. R., NETTO, J. S. M.(org) **Sensoriamento remoto, reflectância dos alvos naturais**. Brasília – DF: Editora Universidade de Brasília- UNB, Embrapa Cerrados, p 157-199, 2001.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. **Cana-de-açúcar**. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>. Acesso em 28 jan 2015

MINISTÉRIO DE AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO – MAPA. **Efeito estufa e sequestro de carbono em sistemas de cultivo com espécies florestais e na cultura de cana-de-açúcar**. n. 133. ISSN 1517-8498. EMBRAPA. 2001

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DA TECNOLOGIA – MCT. **Efeito Estufa e a Convenção sobre Mudança do Clima**, Cartilha. Brasília: 1999. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimentoo/especial/clima.pdf> Acesso em: 20 nov 2014.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental. **Mudança do clima e sustentabilidade: ciência do clima**: efeito estufa. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/sitio/index.php?ido=conteudo.monta&idEstrutura=141&idConteudo=7463&idMenu=11222>>. Acesso em: 21 dez. 2013.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2001. 250p.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2.ed. Viosa - MG: UFV, 2003. 307 p.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3ª edição. 2005. Editora UFV. 320p.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 4ª Ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa (UFV), 2011. 423 p.

MÜLLER, A G. et al. estimativa do índice de área foliar do milho a partir da soma de graus-dia. Santa Maria: **Revista Brasileira Agrometeorologia**, v.13,n.1,p.65-71,2005.

OLIVEIRA, J.B.; JACOMINE, P.K.T. & CAMARGO, M.N. **Classes gerais de solos do Brasil: Guia auxiliar para seu reconhecimento**. 2.ed. Jaboticabal, FUNEP, 1992. 201p.

PARANHOS, S. B. **Cana-de-açúcar**: cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, 431 p.

PICOLI, M. C. A; et al. Índice de vegetação do sensor MODIS na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 68, p. 789-795, 2009.

PONZONI, F. J. Comportamento Espectral da Vegetação. In: Meneses, P. R., Netto, J. S. M. (org) **Sensoriamentoremoto,reflectânciadosalvosnaturais**.Brasília – DF: Editora Universidade de Brasília - UNB, Embrapa Cerrados, p 157-199, 2001.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2010.

PRICE, J. C. Comparing MODIS and ETM+ data for regional and global land classification. **Rev. Remote Sensing of Environment**, v. 86, p. 491-499, aug. 2003.

RAHMAN, A.F.; et al. **Modeling CO2 flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery**. AVIRIS Workshop, JPL/NASA, Pasadena, Califórnia. 2000.

RENNER, R. M. **Sequestro de Carbono e viabilização de novos reflorestamentos no Brasil**. Disponível em://www.ufrgs.br/necon/2evavea(3).pdf. Acesso em 04 de dezembro de 2014.

RIBEIRO, S. C. **Quantificação do estoque de biomassa e análise econômica da implementação de projetos visando à geração de créditos de carbono em pastagem, capoeira e floresta primária**. 2007. 139 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T. Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo para estimar a produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p.73-80, 2007.

ROCKSTRÖM, J.; et al. Linkages among water vapor flows, food production, and terrestrial ecosystem services. **Conservation Ecology**, v. 3, n. 2, p. 5. 1999. Disponível em: <http://www.consecol.org/vol3/iss2/art5/> Acesso em: setembro 2014.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP, 1995. 100p.

ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**, Uberlândia: EDUFU,2003.

ROSENDO, J. dos S. **Índices de Vegetação e Monitoramento do uso do solo e cobertura vegetal na Bacia do rio Araguari -MG - utilizando dados do sensor Modis**. 2005. 130 p. Dissertação (Mestrado em Geografia e Gestão do Território) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2005.

ROUSE, J.W. et al. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. In 3rd ERTS Symposium, NASA. 1973.

RUDORFF, B.F.T. **Dados Landsat na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar**. 1985. 114p. (INPE-3744-TDL/202) Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos. 1985. Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1912/2005/07.18.22.34.40/doc/publicacao.pdf>

RUDORFF, B.F.T.; BATISTA, G.T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological - Spectral models. **Remote Sensing of Environment**, v.33, p.183-192, 1990.

RUDORFF, B.F.T.; BATISTA, G.T. Wheat yield estimation at the farm level using Landsat-TM and agrometeorological data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 2, p.2477-2484, 1991.

RUDORFF, B.F.T. et al. The contribution of qualitative variables to a sugarcane yield model based on spectral vegetation index. In: SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA, 7., 1995, Puerto Vallarta. **Anais...** Puerto Vallarta: Sociedad de Especialistas Latinoamericanos en Percepción Remota, 1995. p.705-708.

SARTORI, A. A. C. **Geoestatística multivariada na delimitação de zonas de manejo na cultura de cana-de-açúcar**. 2014. 158 p Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem). Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP. 2014.

SILVA, C. A. **Carbono na parte aérea de plantios de *Eucalyptus ssp.* – em nível de árvore por amostragem destrutiva e para talhões inteiros após o ajuste de métricas LiDAR.** 2013. 153 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2013

SILVA, E. T. J. B. **Utilização dos índices de Vegetação do Sensor MODIS para Detecção de Desmatamentos no Cerrado: Investigação de Parâmetros e Estratégias.** 2004, 146 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

SILVA, S. C. P.; BAPTISTA, G. M. M. Sequestro florestal de carbono nas torres micrometeorológicas em diferentes ambientes na Amazônia Brasileira e sua relação com dados Hyperion. In: Simpósio Brasileira de Sensoriamento Remoto, 17., 2015. João Pessoa, Brasil. Anais... São José dos Campos, INPE. 2015, p. 5748-5755.

SIMÕES, M. S.; ROCHA, J. V.; LANPARELLI, R. A. C. Análise do comportamento espectral de uma área comercial de cana-de-açúcar em duas safras por meio de radiometria de campo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003. Belo Horizonte, Brasil. Anais... São José dos Campos, INPE. 2003, p. 2367-2374.

SUZANO, **O que é o aquecimento global?** 2012. Disponível em <http://www.pegadadecarbonosuzano.com.br/mudancas-climaticas>. Acessado em 08 de novembro de 2013

TERUEL, D. A.; BARBIERI, V.; FERRARO JR., L. A. Sugarcane leaf area index odeling under different soil water conditions. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 54, n. spe, p. 39-44, 1997.

TONELLO, V. M. M. **Principais aspectos do ciclo biogeoquímico do elemento carbono e seu contexto na atualidade.** 2007. 133 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia aplicada) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2007.

VALÉRIO FILHO, M. Técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicadas ao planejamento regional. In: **Anais do VI Simpósio Nacional de Controle de Erosão**; 1998. Presidente Prudente (SP). Presidente Prudente: ABGE; 1998. CD-ROM.

VETTORAZZI, C. A. **Sensoriamento remoto orbital.** Piracicaba: Departamento de Engenharia Rural, ESALQ, USP, 1992. 134 p. (Didática, 2).

WACLAWOVSKY, A.J. et al. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. **Plant Biotechnology Journal** v. 8, p. 1–14, 2010.

YATES, R. A.; TAYLOR, R. D. Water uses efficiencies in relation to sugarcane yields. **Sugarcane**, v. 1, p. 6-10, 1988.

YU, C. M. **Sequestro florestal do carbono no Brasil:** dimensões políticas socioeconômicas e ecológicas. São Paulo: Annablume, IEB, 2004. 280 p.

ZIMBACK, C. R. L. **A geologia do município de Botucatu**. In: SILVA, R. F. B.; CHINELATO, F. C. S.; ORSI, A. C. Lavapés, Água e Vida:nos caminhos da Educação Ambiental . Botucatu: SABEP, 2008, Cap. 4, p. 63-78.