

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA – CEPSRM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO**

ESTUDO DO FLUXO DE CARBONO UTILIZANDO GEOTECNOLOGIAS

Celso Pinheiro Rodrigues

Dissertação apresentada como um dos requisitos
à obtenção do Grau de Mestre em Sensoriamento Remoto
Área de Concentração Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento

Porto Alegre, RS, Brasil

Julho de 2010

CELSON PINHEIRO RODRIGUES

ESTUDO DO FLUXO DE CARBONO UTILIZANDO GEOTECNOLOGIAS

Dissertação apresentada como um dos requisitos
à obtenção do Grau de Mestre em Sensoriamento
Remoto Área de Concentração Sensoriamento
Remoto e Geoprocessamento

Orientadora: Dra. Denise Cybis Fontana

Porto Alegre, RS, Brasil

Julho de 2010

A minha amada mulher e família.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto pela oportunidade para realização do curso.

A minha família, a qual todos em todos os dias me ensinam, em especial a minha amada esposa Alessandra Yoshida, exemplo de mulher - que me resgatou aos estudos e fomenta amor, carinho, respeito, cumplicidade... te admiro muito, ao meu pai Osmar Otto Rodrigues, valente homem que enfrenta a doença de Parkinson com muita bravura e a minha mãe Maria Teófila Pinheiro Rodrigues, mulher guerreira que supera os seus limites.

A minha corajosa orientadora, professora Denise Cybis Fontana pela confiança na minha capacidade e criatividade na execução deste trabalho, pelo aprendizado transmitido e excelente orientação... A quem tive o privilégio de ser orientado.

Ao Professor Osvaldo Moraes Leal pela colaboração, apoio na análise dos dados, orientação e doação dos dados de CO₂.

A Pesquisadora Janaina Viário Carneiro pela atenção e cooperação.

Ao grupo de pesquisa da UFSM.

À FUNDACEP por ceder a área de estudo e ao Jackson Fiorin e Tiago Wyzykowski . pelo fornecimento de informações referente ao experimento.

Aos professores e colegas do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia pelos ensinamentos e convivência que fez possível a culminação deste trabalho.

Aos colegas Amaro, Aline, Silvia, Giovanni, Jaime, Fernanda, Claudiomiro, Ana, Angela e diretoria da Bourscheid que se solidarizaram e incentivaram o meu estudo.

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa

ESTUDO DO FLUXO DE CARBONO UTILIZANDO GEOTECNOLOGIA¹

Autor: Celso Pinheiro Rodrigues
Orientadora: Dr^a. Denise Cybis Fontana

RESUMO

O aumento das emissões dos gases de efeito estufa (GEE) configura atualmente como um dos principais problemas ambientais, o que pode afetar significativamente as atividades humanas e os ecossistemas terrestres. Um dos principais GEE é o CO₂, o qual tem sido emitido indiscriminadamente em função do estilo de vida atual, contribuindo nas mudanças climáticas de origem antropogênicas, associado principalmente ao aumento da poluição, queimadas, desmatamento, ilhas de calor e agricultura. Neste contexto, o objetivo da pesquisa foi estudar a relação entre o comportamento espectral da cultura de soja ao longo de seu ciclo de desenvolvimento, utilizando imagens NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), e os fluxos de CO₂, calculados pelo método de covariância de vórtices (*eddy covariance*), gerando informações e metodologia para investigar as trocas de carbono em uma área de cultivo de soja no Estado do Rio Grande do Sul. O estudo foi elaborado em experimento situado na fundação privada de pesquisa agropecuária (FUNDACEP), durante a safra de 2008/2009. Para isso, utilizou-se cinco imagens do satélite Landsat 5 (TM), órbita/ponto 223/080, e dados coletados em estação micrometeorológica (técnica de covariância de vórtices turbulentos) ao longo do ciclo de desenvolvimento da soja. Os resultados mostraram que o comportamento do fluxo de CO₂ ao longo do dia é cíclico, onde no período diurno apresenta valores negativos (captura) e no período noturno, positivos (liberação). Considerando todo o ciclo de crescimento da cultura, a lavoura de soja funciona como sequestradora de CO₂ atmosférico. A radiação fotossinteticamente ativa determina a magnitude do aprisionamento de CO₂ pela cultura da soja, mas o fluxo é modulado pelo estágio fenológico da cultura. A atividade fotossintética das plantas de soja é maior durante o estágio vegetativo, quando coincide a maior incidência de radiação solar e o maior aparato fotossintético. O NDVI, obtido de imagens Landsat, é um indicador da evolução da biomassa da soja ao longo do ciclo; apresenta baixos valores no início do ciclo, cresce gradualmente até um máximo de biomassa e decresce com o término do ciclo da cultura. Existe correlação entre o NDVI e os fluxos negativos de CO₂ (captura), ocorridos no período diurno. Portanto, técnicas de sensoriamento remoto demonstram potencialidade na geração de informações úteis sobre as trocas de CO₂ entre a superfície e a atmosfera. Recomenda-se o seguimento das pesquisas nesta área, buscando através do uso de imagens de satélite mapear as trocas de CO₂ entre a superfície e o ar. Para tanto, é necessário acumular um banco de dados maior de imagens coincidentes com medições em superfície sobre diferentes tipos de culturas e em diversas épocas do ano.

¹ Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil (93 p.). Julho, 2010.

STUDY OF THE CARBON FLOW USING GEOTECHNOLOGY²

Author: Celso Pinheiro Rodrigues

Advisor: Dr^a. Denise Cybis Fontana

ABSTRACT

The increase in emissions of the greenhouse gases (GHG) is today one of the main environmental problems, which can significantly affect human activities and land ecosystems. One of the main GHG is CO₂, which has been emitted indiscriminately due to the current lifestyle. This gas contributes in the climate changes that have anthropogenic origin. They are mainly associated with the increase of pollution, fires, deforestation, agriculture and heat islands. In this context, the object of this investigation was to study the relationship between the spectral reaction of soybean cultivation along its development cycle, using images NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), and the fluxes of CO₂ calculated by the eddy covariance method, generating information and methodology to investigate the carbon exchange in an area of soybean cultivation in the State of Rio Grande do Sul. The study was developed from an experiment located on private agricultural research foundation (FUNDACEP) during the harvest 2008/2009. For this were used five satellite images of Landsat 5 (TM), orbit/point 223/080, and data collected from micrometeorological station (technique of eddy covariance) throughout the development cycle of soybean. The results showed that the flow of response of CO₂ during the day was cyclical, which in the daytime shows negative values (capture) and at the night, positive (liberation). Considering the whole cycle of soybean growth, it works as scavenging of atmospheric CO₂. The photosynthetically active radiation determines the magnitude of the trapping of CO₂ by soybean, but the flow is modulated by the fenológico stage of the culture. The photosynthetic activity of soybean plants is higher during the vegetative stage, when coincide the higher incidence of solar radiation and the greater photosynthetic apparatus. The NDVI, obtained from Landsat images, is an indicator of the evolution of the biomass of soybean during the cycle; shows lower values at the beginning of the cycle, gradually grows to a maximum of biomass and decreases with the end of the soybean cycle. There is a correlation between NDVI and negative flows of CO₂ (capture), which occurred during the day. Therefore, remote sensing techniques show potentiality in the generation of useful information on CO₂ exchange between the surface and atmosphere. It is recommended to follow up researches in this area, searching through the use of satellite images to map the exchanges of CO₂ between the surface and the air. Thus, it is necessary to accumulate a large database of images coincident with surface measurements on different types of cultures at different time of the year.

² Master of Science Dissertation in Remote Sensing. Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Post-Graduation in Remote Sensing. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil (93 p.). July, 2010.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Representação esquemática do efeito estufa na atmosfera da Terra (Fonte: INPE/CPTEC).	13
Figura 2. Zoneamento agroclimático para cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul (Fonte Rio Grande do Sul, 1994).	22
Figura 3. Representação gráfica do conceito de radiância (fonte: JENSEN, 2009).	28
Figura 4. Representação esquemática do processo de Interpolação do vizinho mais próximo (fonte: PEDRINI, 2008).	35
Figura 5. Base fisiológica e características típicas de reflectância espectral (Fonte: JENSEN, 2009).	36
Figura 6. Situação do Município de Cruz Alta no Estado do Rio Grande do Sul.	41
Figura 7. Localização da área da CCGL (TEC) – FUNDACEP no Município de Cruz Alta na imagem Landsat TM5 de 21/01/09 em composição RGB -321.	42
Figura 8. Localização dos talhões e da estação micrometeorológica na área experimental sobre a imagem do CBERS 2B instrumento HRC de 25/11/08 na banda pancromática. .43	
Figura 9. Torre micrometeorológica utilizada nas medidas na cultura de soja na CCGL. 45	
Figura 10. Sistema de covariância de vórtices (<i>eddy covariance</i>): anemômetro sônico e analisador de gás de caminho aberto.	45
Figura 11. Fluxograma mostrando a etapas do processamento das imagens Landsat 5/TM.....	48
Figura 12. Vetores mapeados sobre a imagem do CBERS 2B instrumento HRC de 25/11/08 na banda pancromática.	52
Figura 13. Variação diária da Radiação Solar Global ao longo do período experimental de 2008/09, nos dias julianos 355, 5, 21, 85 e 101.....	56
Figura 14. Variação diária da Radiação Fotossinteticamente Ativa ao longo do período experimental de 2008/09, nos dias julianos 355, 5, 21, 85 e 101.....	57
Figura 15. Variação diária da Temperatura do ar ao longo do período experimental de 2008/09, nos dias julianos 355, 5, 21, 85 e 101.....	57
Figura 16. Variação diária da Temperatura do Solo ao longo do período experimental de 2008/09, nos dias julianos 355, 5, 21, 85 e 101.....	58
Figura 17. Variação diária da Pressão Atmosférica ao longo do período experimental de 2008/09, nos dias julianos 355, 5, 21, 85 e 101.....	58

Figura 18. Variação diária da Velocidade do Vento ao longo do período experimental de 2008/09, nos dias julianos 355, 5, 21, 85 e 101.....	59
Figura 19. Variação diária da Velocidade e Direção do Vento ao longo do período experimental de 2008/09. As linhas vermelhas representam o período diurno e as brancas o noturno.	60
Figura 20. Variação diária da Umidade do Ar ao longo do período experimental de 2008/09, nos dias julianos 355, 5, 21, 85 e 101.....	61
Figura 21. Dados fenológicos da cultura da soja na área experimental de 2008/2009.....	61
Figura 22. Relação do Índice de Vegetação por diferença normalizada (NDVI) e o ciclo fenológico da cultura da soja ao longo do período experimental de 2008/2009.	64
Figura 23. Variação do fluxo de CO ₂ ao longo das 24 horas para os dias julianos 355, 05, 21, 85 e 101.	65
Figura 24 Variação da Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) e fluxo de CO ₂ nos dias julianos 355, 05, 21, 85 e 101.	66
Figura 25 Fluxo negativo de CO ₂ dos dias julianos 355, 05, 21, 85 e 101 coincidentes com a passagem do satélite Landsat.	67
Figura 26. Perfil temporal do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) dos talhões de soja cultivados em plantio direto, nos dias 355, 05, 21, 85 e 101.....	68
Figura 27. Perfil temporal do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) dos talhões de soja cultivados em plantio convencional, nos dias 355, 05, 21, 85 e 101..	68
Figura 28. Perfil temporal do povoamento de eucalipto	69
Figura 29. Evolução temporal do NDVI e dos parâmetros obtidos da curva do fluxo de CO ₂ : média das 24 horas, instante da passagem do satélite, media de 2 horas, médias do fluxo negativo e pico de CO ₂ , nos dias julianos 355, 5, 21, 85 e 101.....	71
Figura 30. Evolução temporal do NDVI e dos parâmetros obtidos da curva do fluxo de CO ₂ : área e perímetro, nos dias julianos 355, 5, 21, 85 e 101.....	71
Figura 31. Superfície de fluxo de carbono para a cultura da soja no período experimental de 2008/09.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estádios vegetativos e reprodutivos da cultura de soja (Adaptado ALVARES FILHO, 1988).	24
Tabela 2 - Características da radiação eletromagnética correspondente às bandas do sensor TM do Landsat 5 (MOREIRA, 2005)	30
Tabela 3 - Número mínimo de GCPs necessários no método polinomial simples Fonte: PCI Geomatics (2001).	34
Tabela 4 - Parâmetros de calibração das imagens Landsat	49
Tabela 5 – Valores observados do Índice de Vegetação por diferença normalizada (NDVI) e dos parâmetros obtidos da curva de fluxo diário de CO ₂ atmosférico para os dias julianos 355, 5, 21, 85 e 101 e os coeficientes de correlação entre NDVI e fluxo de CO ₂	70

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
	2.1 EFEITO ESTUFA.....	13
	2.2 TROCAS GASOSAS ENTRE SUPERFÍCIE E ATMOSFERA	15
	2.2.1 Camada Limite.....	16
	2.2.2 Fotossíntese e respiração	16
	2.2.3 Influência de elementos meteorológicos na fotossíntese e respiração	19
	2.3 CULTURA DA SOJA	19
	2.3.1 Estatísticas da Produção	20
	2.3.2 Características Agronômicas	21
	2.3.3 Crescimento e Desenvolvimento	23
	2.4 SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL POR SENSORES ÓPTICOS .	27
	2.4.1 Imagens Landsat	30
	2.4.2 Calibração Radiométrica	32
	2.4.3 Correção Atmosférica.....	33
	2.4.4 Correção Geométrica	33
	2.4.5 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI)	36
	2.5 MONITORAMENTO DE CO₂.....	38
3	MATERIAL E MÉTODOS	41
	3.1 ÁREA E PERÍODO DE ESTUDO	41
	3.2 DADOS DE SUPERFÍCIE.....	43
	3.2.1 Dados Meteorológicos.....	43
	3.2.2 Dados Micrometeorológicos.....	44
	3.3 DADOS DE CULTURA	47
	3.4 DADOS ORBITAIS	47
	3.4.1 Imagens Disponíveis	47
	3.4.2 Processamento das Imagens.....	48
	3.4.3 Calibração Radiométrica	49

3.4.4 Correção Atmosférica.....	49
3.4.5 Correção Geométrica	50
3.4.6 Índices de Vegetação.....	51
3.4.7 Localização da Área Experimental	51
3.5 ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE FLUXO DE CO ₂ E NDVI	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PERÍODO EXPERIMENTAL.....	54
4.1.1 Condição Meteorológica.....	54
4.1.2 Condição Micrometeorológica.....	55
4.1.3 Fenologia da Cultura e Imagens NDVI.....	61
4.1.4 Fluxo de Carbono.....	65
4.1.5 Perfil Temporal do NDVI	67
4.2 ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE NDVI E FLUXO DE CO ₂	69
5 CONCLUSÕES	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
ANEXO 1.....	84
ANEXO 2.....	88
ANEXO 3.....	90

1 INTRODUÇÃO

O crescimento econômico do Brasil tem estabelecido suas bases no uso de fontes de energias renováveis, o que mostra um grau de comprometimento com o desenvolvimento sustentável, mas, ao mesmo tempo, apresenta algumas contradições, destacando-se as taxas de emissão de CO₂ em função do estilo de vida atual.

As mudanças climáticas antropogênicas estão associadas ao aumento da poluição, queimadas, desmatamento e a formação de ilhas de calor nas grandes cidades. Com o passar das décadas a produção industrial tem aumentado significativamente, acarretando aumento de poluentes na atmosfera que intensificaram o efeito estufa. Com o aumento do efeito estufa há uma tendência de aumento da temperatura média da Terra, conhecido como “Aquecimento Global, tendo como principal agente o gás carbônico (dióxido de carbono ou CO₂)”.

A análise dos diversos cenários de emissão de gases de efeito estufa (GEE) para o século XXI estão disponibilizadas no quarto relatório de mudanças climáticas do IPCC (Climate Change, 2007). Estima-se que, das emissões totais, a agricultura contribua com aproximadamente 20% da emissão antrópica de gases de efeito estufa, através dos processos básicos que ocorrem na planta, podendo atuar como fonte emissora ou receptora deste gás (JOHNSON *et al.*, 2005).

Tendo a produção agropecuária um peso determinante e estratégico na economia do País e do Estado do Rio Grande do Sul, torna-se importante gerar informações sobre os níveis de carbono que podem ser de muita utilidade na elaboração dos Estudos de Impacto Ambiental (EIA), que os órgãos de proteção ambiental exigem para os mais diversos empreendimentos.

Imagens de satélites têm sido utilizadas para diferentes finalidades, nos mais diversos ramos de atividades. Em geral, a grande contribuição das imagens é na generalização de informações obtidas em locais específicos para uma grande área, ou seja, na espacialização das mesmas. Para que isto seja possível, entretanto, pesquisas básicas são necessárias para verificar a existência de relações consistentes entre os parâmetros de interesse e os dados orbitais.

Neste contexto, para enfrentarmos os desafios futuros relacionados a mudanças climáticas, é de fundamental importância, desenvolver métodos que permitam quantificar as trocas de carbono entre a superfície e a atmosfera. A hipótese deste trabalho foi de que é possível estabelecer correlação entre o NDVI, obtido de imagens de satélite, com parâmetros relacionados ao fluxo de carbono entre a superfície e a atmosfera, obtidos a campo.

Com base na hipótese formulada, o objetivo central deste trabalho foi gerar informações que possam subsidiar o desenvolvimento de metodologias, com base em técnicas de sensoriamento remoto orbital e dados de superfície, para investigar as trocas de CO₂ em uma área de cultivo de soja no Estado do Rio Grande do Sul.

Os objetivos específicos foram:

Caracterizar o padrão diário do fluxo de CO₂ em diferentes estádios do ciclo de desenvolvimento da soja;

Caracterizar o padrão de evolução temporal do NDVI;

Relacionar NDVI e os estádios fenológicos da soja;

Analisar a relação entre fluxo de CO₂, condições meteorológicas e NDVI;

Correlacionar NDVI e parâmetros obtidos da curva diária de fluxo de CO₂.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 EFEITO ESTUFA

A base para o efeito estufa foi proposta em 1896 por Svante Arrhenius, que levantou a hipótese que o aumento de CO_2 na atmosfera poderia potencializar o aquecimento global. Foi ele o primeiro a quantificar a influência de mudanças na concentração de CO_2 na atmosfera sobre a temperatura da superfície da Terra (RODHE *et al.*, 1997).

O efeito estufa é um fenômeno natural que faz com que a temperatura da Terra seja maior do que seria na ausência de atmosfera, permitindo assim que ocorra vida da forma como a conhecemos. Caso não houvesse o efeito estufa, a temperatura média da Terra seria de -18°C ao invés dos 15°C que temos atualmente (CPTEC/INPE, 2010).

Os principais gases responsáveis pelo efeito estufa adicional são: o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), clorofluorcarbonos (CFCs) e ozônio (O_3), além do vapor d'água. O metano e o óxido nitroso são os principais relacionados diretamente a atividades agropecuária (EMBRAPA, 2010).

Segundo Goldemberg (1998), os gases estufa, em proporções ideais, evitam que ocorram grandes oscilações de temperatura e também fazem com que parte da radiação solar fique retida na superfície do planeta.



Figura 1 Representação esquemática do efeito estufa na atmosfera da Terra (Fonte: INPE/CPTEC).

Os raios que chegam do sol na forma de radiação eletromagnética de ondas curtas passam pela atmosfera e ao atingir a superfície se transformam em calor na forma de radiação infravermelha. Parte desta radiação permanece na atmosfera, pois é capturada pelos gases estufa que se aquecem, aumentando assim a temperatura do ar.

Conforme Dessler (2008), o vapor de água é reconhecidamente o mais potente gás com efeito de estufa, mas a amplitude da sua contribuição para o aquecimento global do planeta tem sido debatido. Dados mais recentes, obtidos pela NASA via satélite, permitiu aos investigadores concluir que o efeito amplificador que a umidade tem sobre o calor é suficientemente potente para fazer duplicar o aquecimento global causado pelo aumento dos níveis de dióxido de carbono na atmosfera.

"Todos concordam que se adicionar dióxido de carbono para a atmosfera irá resultar aquecimento. Portanto, a verdadeira questão é quanto vai aquecer?", afirmou Andrew Dessler, citado pelo portal de ciência Science Daily. "Os novos dados mostram-nos que, se a temperatura sobe, a umidade aumenta também. Despejar gases com efeito de estufa na atmosfera torna o clima mais úmido. E uma vez que o próprio vapor de água é um gás com efeito de estufa, o aumento da umidade amplia o aquecimento a partir do dióxido de carbono", explicou Dessler (2008).

Mudanças do clima já podem ser evidenciadas, pois observações mostram que o planeta Terra está ficando mais quente, ou seja, já ocorreram variações de temperatura nas últimas décadas. Além disso, observam-se alterações nos regimes de chuvas, perturbações nas correntes marinhas, retração das geleiras e a elevação do nível dos oceanos (Cadernos NAE, 2005).

O nível dos gases de efeito estufa tem aumentando como resultado direto da atividade humana, devido à queima de combustíveis fósseis, fruto da industrialização em grande escala, expansão de áreas urbanas, desmatamentos e queimadas de grandes volumes de biomassa (Cadernos NAE, 2005).

A concentração de CO₂ na atmosfera era de 280 ppm (partes por milhão) na era pré-industrial, hoje já atinge 380 ppm. Alguns pesquisadores prevêm que daqui a 50 anos alcançará o índice de 540 ppm de CO₂ na atmosfera (Mudança do Clima, 2005). Atualmente o CO₂ é responsável por mais de 60% da intensificação do efeito estufa. Além de estar presente naturalmente na atmosfera, outros fatores contribuem para seu aumento progressivo, como a queima de carvão, petróleo e o desflorestamento (Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas, 2002).

2.2 TROCAS GASOSAS ENTRE SUPERFÍCIE E ATMOSFERA

As transferências de energia, carbono e água são as mais importantes interações entre a biosfera e a atmosfera. A existência das muitas formas de vida e, particularmente, da vida vegetal, é amplamente dependente de uma troca vigorosa de massa e energia entre a biosfera e a atmosfera.

O ciclo de consumo e renovação dos gases atmosféricos revela um equilíbrio entre o solo, o ar, os animais e as plantas. Todos os seres vivos são em grande parte constituídos dos mesmos elementos do ar: oxigênio, água, carbono e nitrogênio. Enquanto o oxigênio é produzido pelas plantas, o dióxido de carbono é lançado na atmosfera pela respiração dos animais e vegetais, bem como por uma grande variedade de outros processos antrópicos.

A energia solar é extremamente importante, principalmente no que se refere aos processos de aquecimento do ar e do solo, evapotranspiração e fotossíntese, exercendo uma forte influência nas variações climáticas que ocorrem em todo o globo. A vegetação é um importante receptor e armazenador orgânico da energia solar, pois interfere, em função do seu albedo, na quantidade de energia solar que será absorvida pela superfície da terra, exercendo ainda um importante papel no armazenamento da energia solar na biomassa, por meio da sua alta capacidade térmica e da assimilação da energia na forma de carboidratos (JARVIS *et al.*, 1997).

No contexto da vegetação, o CO₂ apresenta um fluxo cíclico levando em consideração as 24 horas do dia, ou seja, durante o período diurno, o fluxo é predominantemente negativo, significando assimilação do CO₂ atmosférico pelo ecossistema, e durante a noite o fluxo inverte-se e torna-se positivo, significando a emissão de CO₂ para atmosfera. Ambos os fluxos variam conforme as condições meteorológicas (GRACE *et al.*, 1995).

Esses processos operam em diversas escalas de tempo, de diurna a sazonal, entre outras, e são todas influenciadas por variáveis climáticas e ambientais, como temperatura, umidade disponível e frequência de distúrbios (MALHI *et al.*, 1998).

A assimilação de carbono pela vegetação ocorre através do processo de fotossíntese, já a emissão se dá pela respiração, mortalidade das árvores, decomposição microbiana e oxidação de carbono no solo. O ciclo hidrológico é completamente acoplado aos fluxos de energia (através do fluxo de calor latente) e de carbono (através dos mecanismos que controlam a condutância estomática) entre a superfície e a atmosfera (CAMPBELL e NORMAN, 1998).

2.2.1 Camada Limite

Na atmosfera encontram-se determinadas camadas que se subdividem de acordo com o efeito que a superfície terrestre provoca no movimento do ar. A primeira região da atmosfera, denominada de Camada Limite Atmosférica (CLA), próxima à superfície terrestre, é diretamente influenciada pela mesma. A segunda região, a atmosfera livre, mais acima, não sofre a influência direta da superfície terrestre (VAREJÃO, 2001).

A CLA é determinada principalmente pelas trocas de massa e energia com a superfície, sendo caracterizada pelos processos de emissão ou absorção que acontecem na superfície (MORAES *et al.*, 2007). Segundo Stull (1988), a CLA é a região da atmosfera que é diretamente influenciada pela superfície terrestre e responde a ação combinada de forçantes mecânicos e térmicos.

De acordo com Carneiro (2007) uma das principais características da CLA é a sua natureza turbulenta. A turbulência nesta camada é gerada pela convecção térmica (Sol) e mecânica (vento), durante o dia, com o aquecimento da superfície e com os movimentos convectivos, a profundidade da CLA aumenta entre 1 a 2 Km. À noite, devido o resfriamento radiativo da superfície, o que resulta na redução da turbulência ou até mesmo quase cessando, a altura nesta camada se torna bem mais rasa.

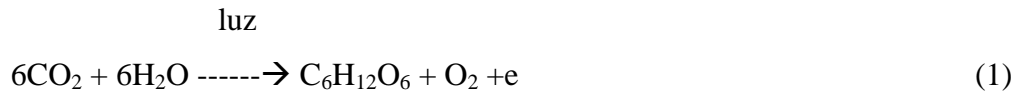
Segundo Fisch (1995), a evolução da Camada Limite Atmosférica, Camada Limite Superficial e a Camada Limite Noturna estão diretamente ligadas à quantidade de energia disponível na superfície.

2.2.2 Fotossíntese e respiração

Segundo Jensen (2009) a fotossíntese é um processo de armazenamento de energia que ocorre em folhas e em outras partes verdes das plantas na presença de luz. Neste processo, de acordo com Santos (1999), as plantas verdes necessitam continuamente de dióxido de carbono para sintetizarem a glicose (açúcares), em presença de luz solar e participação de água.

Como subproduto da fotossíntese há liberação de O₂, proveniente da água, em quantidades equivalentes ao CO₂ utilizado, ou seja, para cada molécula de CO₂ fixada, há liberação de uma molécula de O₂ (SANTOS, 1999).

A fotossíntese pode ser expressa pela equação:



O processo fotossintético pode ser dividido em etapas que são: reações da luz - passos envolvidos na captura da energia luminosa e reações escuras - que consistem na produção de açúcares e redução de CO₂ (MOREIRA, 2005).

O crescimento da planta está intimamente relacionado à quantidade total de radiação solar e dióxido de carbono através de processos de fotossíntese e respiração (SANTOS, 1999).

Moreira (2005) ressalta que, pela respiração, a planta absorve o oxigênio do ar e elimina o gás carbônico liberado de reações químicas de fotossíntese. A passagem desses gases é feita através dos ostíolos dos estômatos. A respiração ocorre tanto durante o dia como à noite. Os três principais componentes celulares que servem como substrato para respiração são carboidratos, lipídios e proteínas, cujas moléculas se quebram para produzir a energia necessária à respiração.

O carbono é o elemento da tabela periódica muito importante para estrutura dos seres vivos. O ciclo do carbono na natureza envolve as diversas transformações que o carbono sofre ao longo do tempo. É o motor químico que fornece energia e massa para maior parte dos seres vivos, além de estar intimamente relacionado com a regulação da atmosfera global e consequentemente com o clima (CPTEC/INPE).

Existe consenso que as ações humanas intensificaram a emissão de CO₂ desde o século passado. No entanto, evidências sugerem que as concentrações de CO₂ começaram a aumentar cerca de 8000 anos atrás, em função das atividades ligadas a agricultura, desmatamento e irrigação, adicionando GEE na atmosfera. Estas ações, somadas a industrialização e o estilo de vida atual, modificaram a tendência padrão de milhares de anos, que foram controladas por dezenas de sequências climáticas glaciais e interglaciais (RUDDIMAN, 2005).

O ciclo de carbono pode ser dividido em duas partes que são: o terrestre e o marinho, no entanto, o presente estudo abordou somente o terrestre. Neste ciclo, as plantas removem o CO₂ da atmosfera através da fotossíntese; parte desse carbono é utilizado pela planta para sua

manutenção e que posteriormente resulta na liberação de CO₂ para atmosfera. O carbono restante irá fazer parte dos tecidos vegetais (folhas, galhos, troncos e raízes). As plantas que são ingeridas por animais herbívoros servem como fonte de energia, para construção e manutenção de seus corpos, que por sua vez, também liberam CO₂ para a atmosfera através da respiração. Parte do carbono que flui através dos ecossistemas terrestres vai para a superfície na forma de liteira, animais e queimadas, todos permanecem no solo até serem fragmentados e decompostos pelos processos físico-químicos e bióticos que ocorrem nessa fração do ecossistema (RAICH, 1992). Os solos são um importante reservatório natural de carbono e as práticas de uso e manejo, podem reduzir ou aumentar o seu estoque, dentro dos limites impostos pelas condições climáticas e edáficas (FRANK *et al.*, 2006; ESCOBAR, 2008).

2.2.3 Influência de elementos meteorológicos na fotossíntese e respiração

Segundo Raich (1992), em uma escala global, as diferenças observadas entre os biomas podem ser explicadas em grande parte pelo clima. A variação do clima no espaço geográfico e no tempo é determinada em especialmente pela variação da disponibilidade da radiação solar. As taxas de respiração do solo possuem correlação significativa com a temperatura média anual do ar e da precipitação pluvial.

A radiação solar afeta o balanço de radiação das superfícies, que por sua vez influencia as condições de temperatura, movimentação do ar e disponibilidade hídrica para as plantas. Além de ser determinante do clima, a radiação do sol, usada diretamente pelas plantas verdes na síntese de compostos orgânicos, é praticamente a única fonte de toda a energia que circula através dos organismos em ecossistemas. Também, a radiação solar estimula processos de diferenciação de tecidos e órgãos.

Praticamente, toda matéria orgânica acumulada numa planta durante seu crescimento tem origem no processo fotossintético de fixação de carbono atmosférico, o que representa ao redor de 95% de toda sua fitomassa seca. Assim, qualquer fator ambiental que afetar a fotossíntese afetará o crescimento e o acúmulo de fitomassa (SYVERTEN & LLOYD, 1994).

Além da radiação solar, outros elementos influenciam o processo fotossintético, como: a disponibilidade hídrica, a temperatura, a umidade do ar e a velocidade do vento. Com teores adequados de água os estômatos das plantas estão mais abertos, há maior troca gasosa, maior produção de biomassa verde e conseqüentemente maior produtividade primária do ecossistema (TANNUS, 2004).

2.3 CULTURA DA SOJA

A soja atualmente cultivada é muito diferente dos seus ancestrais, que eram plantas rasteiras que se desenvolviam há mais de cinco mil anos na costa leste da Ásia, principalmente ao longo do rio Yang-tsé na China (EMBRAPA SOJA, 2004).

No Brasil, a planta chegou vinda dos Estados Unidos no ano de 1882. Já o primeiro registro de plantio de soja no país foi em 1914 no município de Santa Rosa - RS, mas foi só a partir dos anos 40 que ela adquiriu alguma importância econômica, merecendo o primeiro dado estatístico nacional em 1941, no anuário agrícola do Rio Grande do Sul - área cultivada 640 ha, produção de 450 toneladas e rendimento de 700 kg/ha (EMBRAPA SOJA, 2004).

Uma síntese dos fatores que contribuíram para que a soja se estabelecesse como uma importante cultura na região sul do Brasil são descritas a seguir, conforme EMBRAPA SOJA (2004): semelhança do ecossistema com aquele predominante no sul dos EUA, incentivos fiscais, mercado internacional em alta, substituição das gorduras animais por óleos vegetais, facilidades de mecanização, estabelecimento de uma rede de pesquisa envolvendo os poderes públicos e a iniciativa privada entre elas a Samrig, melhorias na infra-estrutura, entre outras.

O sistema de produção da soja no Brasil tem sido alterado nos últimos anos especialmente pela introdução de diversas cultivares entre elas a *Roundup Ready™* RR, que consiste em um material geneticamente modificado com características de tolerância ao herbicida não seletivo glifosato (N-fosfometilglicina). (ZABOT, 2009).

2.3.1 Estatísticas da Produção

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, sendo que na safra 2008/09, a cultura ocupou uma área de 21,7 milhões de hectares, o que totalizou uma produção de 57,1 milhões de toneladas. Os Estados Unidos, maior produtor mundial do grão, responderam pela produção de 80,5 milhões de toneladas de soja. A produtividade média da soja brasileira é de 2.629 kg por hectares, chegando a alcançar cerca de 3.082 kg/ha no estado de Mato Grosso, o maior produtor brasileiro de soja (EMBRAPA, 2009).

Dados do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior mostram que a soja tem uma importante participação nas exportações brasileiras. Em 2006 foram US\$ 9,3 bilhões, o que representou 6,77% do total exportado (EMBRAPA, 2009). A produção estimada (2009/10) em 67,86 milhões de toneladas é 18,7%, ou 10,7 milhões de toneladas, superior à produção de 57,17 milhões de toneladas atingidas em 2008/09 (CONAB, 2010).

A área cultivada entre 2009 e 2010 com a oleaginosa apresentou crescimento de 6,9%, correspondendo a um ganho de 1,5 milhão de hectares sobre a da safra anterior, passando para

23,24 milhões de hectares. O maior crescimento é observado na Região Sul, 643,4 mil hectares, sobressaindo-se o Estado do Paraná, com 435,4 mil hectares a mais que a cultivada em 2008/09, seguido do Rio Grande do Sul, com aumento de 153,7 mil hectares (CONAB, 2010).

2.3.2 Características Agronômicas

A soja, pertencente à família das Leguminosas, é uma dicotiledônea tipicamente herbácea, que apresenta grande diversificação genética e morfológica devido ao elevado número de variedades e cultivares, sendo predominantemente utilizada para o processamento do grão em óleo e proteína. O ciclo da soja em geral varia de 75 a 210 dias desde sua germinação até a maturação. Este ciclo pode variar, dependendo principalmente da cultivar, da latitude, da altitude, da pluviosidade, da temperatura e da época de semeadura (MENOSSO, 2000). As cultivares de soja são classificadas como precoce, quando seu ciclo for de 75 a 115 dias, semi-precoce de 116 a 125 dias, ciclo médio de 126 a 137 dias, semi-tardio de 138 a 150 dias e tardio quando for de mais de 150 dias (FARIAS *et al.*, 2000).

A produtividade da soja é dependente do potencial genético da cultivar e das condições ambientais edáficas e climáticas (MELLO, 2003). Entre as variáveis climáticas mais atuantes na cultura são: a disponibilidade hídrica e a temperatura.

Para diminuir o risco de insucesso, desde a década de 70, são realizados trabalhos como o zoneamento agroclimático, que facilitam o planejamento agrícola, através de informações sobre a ocorrência de chuvas, temperaturas e nas exigências climáticas das culturas agrícolas para áreas específicas.

Segundo Mello (2003), o zoneamento agroclimático em função da aptidão das regiões em classes distintas, estabelece uma relação entre as exigências bioclimáticas de cada cultura com o clima regional. Dessa forma o autor utilizou o zoneamento agroclimático da soja para o Estado do Rio Grande do Sul (Figura 2), baseado nas premissas de ocorrência de deficiência hídrica e na soma térmica durante o desenvolvimento da cultura.

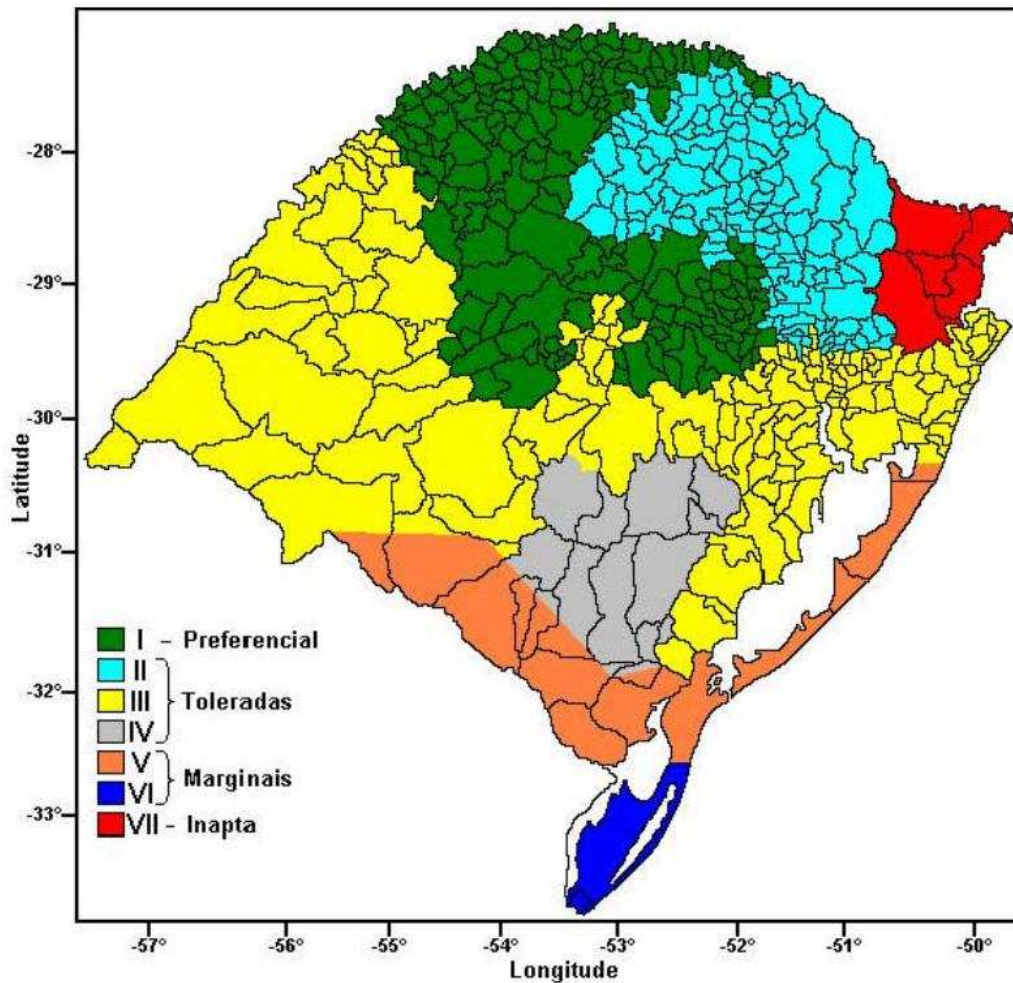


Figura 2. Zoneamento agroclimático para cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul (Fonte Rio Grande do Sul, 1994).

A época de semeadura é um dos fatores que influenciam o rendimento das culturas. Como a soja é uma espécie termo e fotossensível, está sujeita a alterações fisiológicas e morfológicas quando as suas exigências não são satisfeitas. Dessa maneira, semear em épocas não adequadas afeta o porte, o ciclo e o rendimento das plantas e contribui para o aumento das perdas na colheita. Dentre os componentes limitantes, o déficit hídrico é aquele que afeta com maior frequência e intensidade a produção agrícola (FONTANA *et al.*, 2001)

A disponibilidade de água é importante, principalmente, em dois períodos de desenvolvimento da soja: germinação-emergência e floração-enchimento de grãos. Durante o primeiro período, tanto o excesso quanto o déficit de água são prejudiciais à obtenção de uma boa uniformidade na população de plantas (EMBRAPA SOJA, 2004). No segundo período é quando são determinados outros componentes do rendimento: número de inflorescências, de legumes, de grãos e o peso dos grãos.

Cunha *et al.* (2001) relatou que a deficiência hídrica influi principalmente sobre a fotossíntese, respiração, crescimento, absorção e transporte de nutrientes, além de provocar modificações enzimáticas e alterações hormonais que afetam outros processos na planta.

Almeida (2008) verificou que também as respostas espectrais da soja, cultivada em diferentes condições de preparo do solo, sofrem diferenciação em função do déficit hídrico, dada a influência do mesmo sobre o crescimento das plantas de soja.

2.3.3 Crescimento e Desenvolvimento

O crescimento e o desenvolvimento da soja podem ser medidos pela quantidade de massa seca (matéria seca) acumulada na planta. Com exceção da água, a massa seca consiste em tudo que se encontra na planta, incluindo carboidratos, proteínas, lipídeos e nutrientes minerais. A biomassa é avaliada pela taxa de incremento de matéria seca nas partes vegetativas (folhas, pecíolos e ramos), que é pequena no início do ciclo de vida, aumentando com o desenvolvimento dos estádios vegetativos da cultura. É o acúmulo de matéria seca nos grãos que determina o rendimento da cultura, de modo que a biomassa, em determinados estádios de desenvolvimento, pode se constituir em um bom indicador do rendimento da cultura (FEHR e CAVINESS, 1977).





O uso de uma linguagem unificada na descrição dos estádios de desenvolvimento da cultura possibilita a comunicação entre os diversos públicos. Para a cultura da soja, o desenvolvimento da cultura é descrito usando mais frequentemente a escala fenológica proposta por Fehr e Caviness (1977).


Nesta escala, o desenvolvimento da cultura da soja é dividido em duas fases de desenvolvimento: vegetativo (V) e reprodutivo (R). Subdivisões do estágio vegetativo são designadas numericamente como V1, V2, V3 até Vn, menos os dois primeiros estádios que são designados como VE - emergência e VC - estágio de cotilédone. O último estágio vegetativo é designado como Vn, onde “n” representa o número do último nó vegetativo formado por um cultivar específico. O estágio reprodutivo apresenta oito subdivisões. A descrição dos diferentes estádios e as fotografias ilustrando os mesmos podem ser visualizados na Tabela 1.





Um melhor detalhamento para a fase reprodutiva no estágio R5 foi proposto por Yorinori (1996), que propôs a subdivisão em cinco sub-estádios:





- ☺ R5,1 - grãos perceptíveis ao tato (o equivalente a 10% da granação);
- ☺ R5,2 – granação de 11% a 25%;
- ☺ R5,3 – granação de 26% a 50%;
- ☺ R5,4 – granação de 51% a 75%;
- ☺ R5,5 – granação de 76% a 100

Tabela 1 - Estádios vegetativos e reprodutivos da cultura de soja (Adaptado ALVARES FILHO, 1988).

Estádio Vegetativo			
Estádios	Denominação	Descrição	Fotografias
E	Emergência	Os cotilédones estão acima da superfície do solo	
C	Cotilédone desenvolvido	As margens das folhas unifoliadas e opostas não se tocam.	
1	Primeiro nó	Folhas unifoliadas desenvolvidas.	
2	Segundo nó	Folhas trifoliadas completamente desenvolvidas no nó acima das folhas unifoliadas.	
3	Terceiro nó	Três nós sobre a haste principal com folhas completamente desenvolvidas, iniciando-se com nós das folhas unifoliadas.	

n	Enésimo nó	“n” números de nós sobre a haste principal com folhas completamente desenvolvidas, iniciando-se com nós das folhas unifoliadas.	
---	------------	---	---

Estádio Reprodutivo			
Estádios	Denominação	Descrição	Fotografias
R1	Início do florescimento	Uma flor aberta em qualquer nó da haste principal	
R2	Pleno florescimento	Uma flor aberta no último nó da haste principal, com folha completamente desenvolvida.	
R3	Início da formação das vagens	Vagem com 0,5 cm de comprimento desenvolve-se em um dos quatro últimos nós da haste principal, com folha completamente desenvolvida.	
R4	Plena formação das vagens	Vagem com 2,0 cm de comprimento desenvolve-se em um dos quatro últimos nós do caule com folha completamente desenvolvida.	

R5	Início do enchimento das sementes	Semente com 3 mm de comprimento em uma vagem, localizada em um dos quatro últimos nós da haste principal, com a folha completamente desenvolvida.			
R6	Pleno enchimento das vagens	Vagem contendo semente verde que preencha a sua cavidade, localizada em um dos quatro últimos nós da haste principal, com a folha completamente desenvolvida.			
R7	Maturação fisiológica	Uma vagem normal sobre a haste principal que tenha atingido a cor da vagem madura.			
R8	Maturação plena (colheita)	95% das vagens atingindo a cor de vagem madura.			

2.4 SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL POR SENSORES ÓPTICOS

Sensoriamento remoto é a ciência e a arte de observar um alvo sem ter contato físico com o mesmo, podendo obter informações de área ou do fenômeno estudado, baseando-se na interação deste alvo com a radiação eletromagnética (CREPANI, 1993; LILLESAND e KIEFER, 1995). O sensoriamento remoto é usado para diversas aplicações, tais como: análise de imagens médicas, avaliação não destrutiva de produtos numa linha de montagem e análise de recursos da Terra.

Tratando-se do nível orbital, o sensoriamento remoto é utilizado freqüentemente para extrair informações dos recursos da Terra, utilizando as propriedades das ondas eletromagnéticas emitidas, refletidas ou difracionadas pelos objetos sensoriados (ONU, 1986 *apud* BARBOSA, 2006).

Segundo Barbosa (2006) o registro dessas interações é feito pelo rastreamento regular da interação eletromagnética em diferentes faixas espectrais, formando distintas imagens. A interação da radiação em cada faixa de comprimento de ondas com cada alvo é função da estrutura física e química do alvo. A radiância tem uma relação direta com a reflectância e é, por sua vez, característica de cada alvo.

Conceitualmente, radiância é a medida radiométrica mais precisa em sensoriamento remoto (JENSEN, 2009), denominada por $(L\lambda)$ e com unidades expressas em watts por metro quadrado por esterradiano ($Wm^{-2}sr^{-1}$). A radiância, portanto, corresponde à intensidade radiante por unidade de área fonte projetada numa direção específica, ou seja, quantidade de radiância emergindo do alvo no terreno dentro do campo de visada instantâneo (IFOV do inglês *Instantaneous field of view*) num ângulo sólido específico. Este conceito é melhor entendido pela análise da Figura 3 e Equação 2.

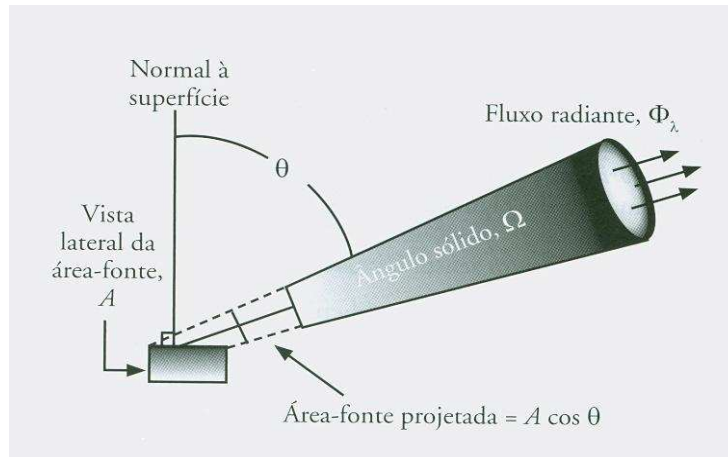


Figura 3. Representação gráfica do conceito de radiância (fonte: JENSEN, 2009).

Já em termos matemáticos tem-se que:

$$L_{\lambda} = \frac{\Phi_{\lambda}}{A \cos \theta \Omega} \quad (2)$$

Onde:

L_{λ} = radiância em determinados comprimentos de onda ;

Φ_{λ} = fluxo radiante em determinados comprimentos de onda;

Ω = ângulo sólido

A = área fonte

$\cos \theta$ = direção

Outro conceito importante é a reflectância, que representa a propriedade de um determinado alvo em refletir a radiação eletromagnética sobre ele incidente e é expressada através dos chamados fatores de reflectância (ρ). Estes, por sua vez, podem ser expressos em termos espectrais, recebendo a designação ρ_{λ} (PONZONI, 2007).

Cada alvo na Terra apresenta um comportamento espectral diferenciado em relação à radiação eletromagnética de cada faixa espectral. Centeno (2003) ressaltou que alvos de natureza similar, como duas árvores da mesma espécie, podem refletir a energia de maneira diferente, em função de seu estado ou posição. O autor ainda destacou que, embora estas diferenças espectrais existam, é possível distinguir espectralmente a vegetação, de maneira geral, de outros alvos diferentes, como por exemplo, os solos e a água.

Para a vegetação, a porção da radiação solar que é absorvida é fundamental para o crescimento e desenvolvimento das plantas, via o processo fotossintético. Entretanto, para a

interpretação de imagens orbitais, é a reflectância da radiação a componente observada pelos sensores remotos, a qual mostra alta correlação com a absorvância (ALMEIDA, 2008).

Informações provenientes de sensores remotos podem ser úteis para a modelagem do ciclo global do carbono, da biologia e bioquímica dos ecossistemas, de aspectos dos ciclos globais da água e da energia, da variabilidade e previsão do tempo, da química atmosférica, das características da Terra sólida, das estimativas populacionais, e do monitoramento da mudança de uso da terra e desastres naturais (JOHANNSEN *et al.*, 2003).

Existe uma gama diversificada de satélites e sensores que operam em várias faixas espectrais. Em aplicações na área agrícola destacam-se:

- ❶ Série de Satélites CBERS: desenvolvido por um programa de cooperação Brasil-China com 4 tipos de sensores: o CCD *High Resolution CCD Camera* (4 bandas + 1 pancromática), o IRMSS *Infrared Multispectral Scanner* (3 bandas + 1 pancromática) e WFI *Wide Field Imager* (2 bandas), o HRC *High Resolution Camera* (1 pancromática);
- ❷ Satélite LANDSAT 5: *Land Remote Sensing Satellite*, atualmente opera somente com o sensor TM *Thematic Mapper* (7 bandas);
- ❸ Série de Satélites SPOT: *Système Pour l' Observation de la Terre*, com 6 sensores: o HRV *High Resolution Visible* (3 bandas + 1 pancromática), o HRVIR *High Resolution Visible – Infrared* (4 bandas + 1 M), os VEGETATION E VEGETATION-2 (4 bandas), o HRG *High Resolution Geometric* (4 bandas + 1 pancromática), o HRS *High Resolution Stereoscopic* (1 pancromática)
- ❹ Satélite EOS-AM1: *Earth Observing System*: com 5 sensores: o ASTER *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (14 bandas,), o MODIS *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (36 bandas), o MISR *Multi Angle Imaging Spectroradiometer* (4 bandas), o MOPITT *Measurements of Pollution in the Troposphere* (3 bandas), o CERES *Clouds and the Earth's Radiant Energy System* (3 bandas);
- ❺ Satélite IRS-1D: *Indian Remote Sensing*, com 3 sensores: o LISS-III *Linear Imaging Self-Scanner* (4 bandas), o WIFS *Wide Field Sensor* (2 bandas), o PAN *Pancromatic Camera* (1 banda).

2.4.1 Imagens Landsat

Os sistemas sensores *Landsat Thematic Mapper* (TM) foram lançados em 16 de julho de 1982 (Landsat 4) e em 1 de março de 1984 (Landsat 5), sendo que atualmente encontra-se em operação somente o Landsat 5. O TM é um sensor óptico-mecânico do tipo *whiskbroom* que registra a energia nas regiões do visível, infravermelho refletido, infravermelho de ondas curtas (SWIR) e infravermelho termal do espectro eletro-magnético. O TM coleta imagens multiespectrais com resoluções espacial, espectral, temporal e radiométrica superiores ao antecessor MMS.

Os dados do Landsat TM tem um IFOV projetado no terreno de 30x30 metros para as bandas 1 a 5 e 7. A banda 6, do infravermelho termal, tem uma resolução espacial de 120x120 m.

A seleção de bandas espectrais dependem do contexto do estudo. Na Tabela 2 são apresentadas algumas aplicações em função da faixa espectral que opera o sensor TM.

Tabela 2 - Características da radiação eletromagnética correspondente às bandas do sensor TM do Landsat 5 (MOREIRA, 2005)

Banda	Faixa espectral (μm)	Características
1	0,45 – 0,52 (azul)	Essa banda tem maior penetração em corpos d'água, assim como fornece suporte para análise de uso da terra, solo e características da vegetação. O limite inferior do comprimento de onda é abaixo do pico de transmitância da água clara. O limite superior é o de absorção por clorofila no azul para vegetação verde saudável. Comprimento de ondas $< 0,45 \mu\text{m}$ são substancialmente influenciados por espalhamento e absorção atmosférica.
2	0,52 – 0,60 (verde)	Essa banda cobre a região entre as bandas de absorção pela clorofila no azul e no vermelho e responde reflectância da vegetação sadia no verde.
3	0,63 – 0,69 (vermelho)	Essa é banda vermelha de absorção por clorofila da vegetação verde sadia e é útil para discriminação da

Banda	Faixa espectral (μm)	Características
		vegetação. É também útil para delinear os limites de classes de solos e tipos de rochas. Essa banda pode exibir mais contraste do que as bandas 1 e 2 devido ao efeito reduzido da atenuação atmosférica. O limite superior de 0,69 μm é importante porque compreende o início de uma região espectral de 0,68 a 0,75 μm em que a reflectância muda abruptamente (borda vermelha ou <i>red edge</i>) o que pode reduzir a precisão das investigações da vegetação.
4	0,76 – 0,90 (infravermelho próximo)	Pelas razões discutidas anteriormente, o limite inferior dessa banda foi posicionado acima da 0,75 μm (término da borda vermelha). Esta banda é muito sensível à quantidade de biomassa da vegetação e/ou área foliar presente. É útil para identificação de culturas e para realçar contrastes entre solo/cultura e terra/água.
5	1,55 – 1,75 (infravermelho médio (SWIR))	Essa banda é sensível a turgidez ou quantidade de água nas plantas. Esta informação é útil em estudo de estresse de cultura e em investigações de vigor das plantas. Essa é uma das poucas bandas que podem ser usadas para discriminar entre nuvens, neve e gelo.
6	10,4 – 12,5 (infravermelho termal)	Essa banda mede a quantidade de energia radiante infravermelha emitida das superfícies. A temperatura aparente é uma função da emissividade e da temperatura verdadeira (cinética) da superfície. É útil para localizar atividade geotermal, mapeamento da inércia termal para investigações geológicas, classificação e análise de estresse de vegetação, e para estudos de umidade do solo. Esta banda frequentemente capta informação única sobre diferenças em aspecto topográfico em áreas montanhosas.

Banda	Faixa espectral (μm)	Características
7	2,08 – 2,35 (infravermelho médio ou infravermelho de ondas curtas)	Essa é uma importante banda para discriminação de formações geológicas de rochas. Ela tem sido efetiva para identificar zonas de alteração hidrotermal em rochas.

As bandas do Landsat TM foram selecionadas para maximizar o uso dos fatores dominantes que controlam a reflectância das folhas, tais como pigmentação da folha, estrutura da folha e do dossel, e conteúdo de umidade.

2.4.2 Calibração Radiométrica

Diferentemente das análises de caráter qualitativo (mapeamento de áreas), quando se analisam valores espectrais como medidas físicas de radiância ou reflectância em relação a propriedades biofísicas de sistemas vegetados, torna-se necessário maior rigor e controle dos fatores que influenciam a resposta espectral (causadores de variação) de alvos agrícolas. Em função disso, são necessários procedimentos de correção para minimizar esses fatores.

A transformação ou calibração radiométrica tem como principal objetivo reduzir as distorções oriundas da defasagem dos sensores e outros fatores como: mudança de iluminação da cena e geometria da visada. É utilizada quando há necessidade de converter o sinal que é captado pelo sensor, em radiância ou reflectância dos alvos, para que os dados da imagem possam ser relacionados com medições de superfície.

Muitas aplicações de sensoriamento remoto são concebidas com base em propriedades físicas dos alvos na superfície. A conversão de valores digitais das imagens para propriedades físicas é chamada de calibração dos dados (LILLESAND E KIEFER, 1995).

2.4.3 Correção Atmosférica

Em um cenário sem a atmosfera, a lei da conservação de energia define que de toda radiação solar que atingiria diretamente a superfície terrestre, uma parte seria absorvida pela superfície, outra seria transmitida e o restante seria refletido de volta para o espaço. No entanto, a presença da atmosfera é uma realidade, a qual influencia a transmissão da radiação solar e, conseqüentemente, os números digitais dos *pixels* da imagem.

A correção atmosférica é utilizada para atenuar o efeito combinado da absorção, espalhamento e reflectância atmosféricos, ocasionados pela presença de vários gases, vapor d'água e partículas que interagem com a radiação eletromagnética. Para aplicações baseadas no uso de imagens multitemporais, isto é, obtidas em diversas datas com variações das condições atmosféricas, torna-se imprescindível a correção atmosférica.

Entre os principais efeitos observados nas imagens de satélite, devido à notória presença da atmosfera entre o satélite e a superfície terrestre, podemos citar a diminuição da faixa de valores digitais possíveis registrados pelo sensor, o que resulta na diminuição do contraste entre superfícies adjacentes e alteração do brilho de cada ponto da imagem (MACHADO, 2003). Os gases (principalmente vapor d'água, oxigênio e dióxido de carbono) e os aerossóis (pequenas partículas em suspensão) refletem, refratam, absorvem e espalham a radiação desde quando ela atinge a atmosfera até quando a deixa, depois de refletida pelo solo (ZULLO JR., 1994).

Jensen (2009) relata que programas de modelos de transferência radiativa como o MODTRAN, o *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum* (6S), e outros, podem ser usados para prever a radiância de trajetória num dia particular para uma particular área de estudo (p.ex., MATTHEW *et al.*, 2000; InSpec, 2002; VERMONT *et al.*, 2002)

2.4.4 Correção Geométrica

As imagens produzidas por sensores remotos apresentam uma série de distorções espaciais, resultantes dos seguintes fatores (CENTENO, 2003):

- 📍 Rotação da Terra;
- 📍 Curvatura da Terra;

- ❗ Movimento do espelho de imageamento;
- ❗ Variações de altitude, posição e velocidade da plataforma;
- ❗ Distorção de panorama;
- ❗ Distorção topográfica.

Face ao exposto, imagens de satélite não possuem a precisão necessária em relação ao posicionamento dos objetos, superfícies ou fenômenos nelas representados, sendo necessários procedimentos de ajustes. Para modelar cada tipo de distorção e gerar uma imagem livre de erros, todos os fatores devem ser contemplados (CENTENO, 2003). No entanto, opta-se por uma correção simultânea de vários erros geométricos, usando pontos de controle.

Segundo Pedrini (2008), o registro de imagens é o processo de correspondência ou alinhamento entre duas ou mais imagens capturadas da mesma cena, obtidas por iguais ou diferentes sensores, em diferentes instantes de tempo ou sob diferentes pontos de observação. A operação de registro é fundamental em processamento e análise de imagens, auxiliando as etapas de identificação e reconhecimento de objetos nas imagens.

Uma transformação geométrica consiste em duas operações básicas, uma transformação espacial que define a reorganização dos *pixels* sobre o plano da imagem e uma interpolação de intensidade que trata da atribuição dos níveis de cinza ou cores aos *pixels* da imagem transformada espacialmente (PEDRINI, 2008).

Transformações geométricas são operações cujo principal objetivo é permitir o mapeamento entre posições espaciais dos *pixels* da imagem de referência e a imagem modificada, isto é, reorganização dos *pixels* da imagem em relação a um determinado sistema de projeção cartográfica. Ela objetiva minimizar as distorções geométricas, provenientes das características do sensor utilizado e das variações decorrentes do movimento do mesmo durante a passagem sobre o alvo (LUIZ, OLIVEIRA, OKIDA, 2003).

O método polinomial simples não leva em consideração o valor da elevação. Neste caso, pode-se selecionar a ordem do modelo matemático a ser aplicado durante a correção, porém um número mínimo de GCPs (*Ground Control Points*) é necessário (Tabela 3).

Tabela 3 - Número mínimo de GCPs necessários no método polinomial simples Fonte: PCI Geomatics (2001).

Ordem	Número Mínimo de GCPs
1a	4
2a	7

3a	11
4a	16
5a	22

De acordo com o autor Richards (1986) para obter bons resultados, é recomendável ter ao menos duas ou três vezes o número mínimo de GCPs. Entretanto, muitos GCPs não garantem, necessariamente, bons resultados. Os resultados somente serão bons se os pontos coletados forem precisos. Além disso, o uso de um polinômio de ordem maior pode não resultar numa boa correção, pois este pode introduzir erros em regiões da imagem que estão distantes dos pontos de controle.

A outra operação é a interpolação de intensidade, onde os valores de intensidade de níveis de cinza ou cor para cada *pixel* da nova grade da imagem transformada podem ser obtidos por um processo de interpolação. Os quatro métodos mais comumente utilizados para a interpolação de valores de intensidade nos *pixels* da imagem são o vizinho mais próximo, bilinear, bicúbica e polinômios de Lagrange. (PEDRINI, 2008).

A interpolação do vizinho mais próximo, considera o valor da intensidade a ser atribuída ao *pixel* (x',y') , na imagem reamostrada, terá o valor do *pixel* que estiver mais próximo da posição ocupada pelo *pixel* (x,y) na imagem original, conforme mostrado na Figura 4 (PEDRINI,2008).

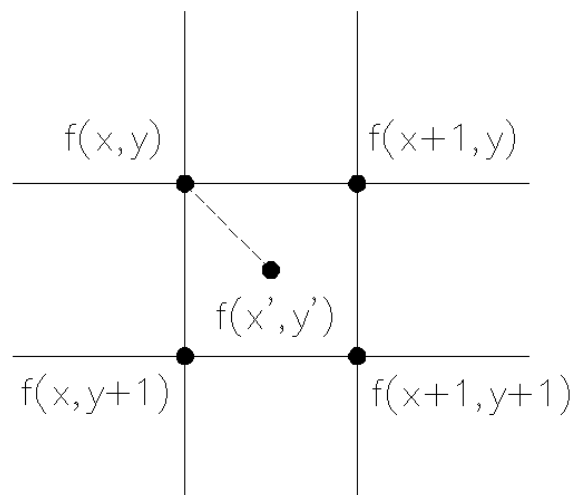


Figura 4. Representação esquemática do processo de Interpolação do vizinho mais próximo (fonte: PEDRINI, 2008).

A reamostragem com o vizinho mais próximo deve ser usada quando os valores do dado não podem ser alterados, por exemplo, com dados de classes ou dados qualitativos como tipo de solos (EASTMAN, 2003).

2.4.5 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI)

Segundo Epiphanyo *et al.* (1996) as variáveis de sensoriamento remoto podem ser representadas de diversas formas, através de uma simples banda (exemplo vermelho ou infravermelho próximo), ou através do agrupamento das informações espectrais de cada banda individual de uma maneira específica, no que se denomina de índice de vegetação (WIEGAND *et al.*, 1991).

Desde a década de 1960, que pesquisadores extraem e modelam vários parâmetros biofísicos da vegetação utilizando informações de imagens de satélite. Muito deste esforço é em função dos índices de vegetação, que tem sido utilizado como sensíveis indicadores da presença e da condição de vegetação (ALMEIDA, 2008), visto que os índices de vegetação possuem uma relação de dependência com as características estruturais e fisiológicas da vegetação.

Os índices de vegetação procuram maximizar a sensibilidade a parâmetros biofísicos das plantas, para que esta sensibilidade seja condizente com a dinâmica da vegetação (Figura 5).

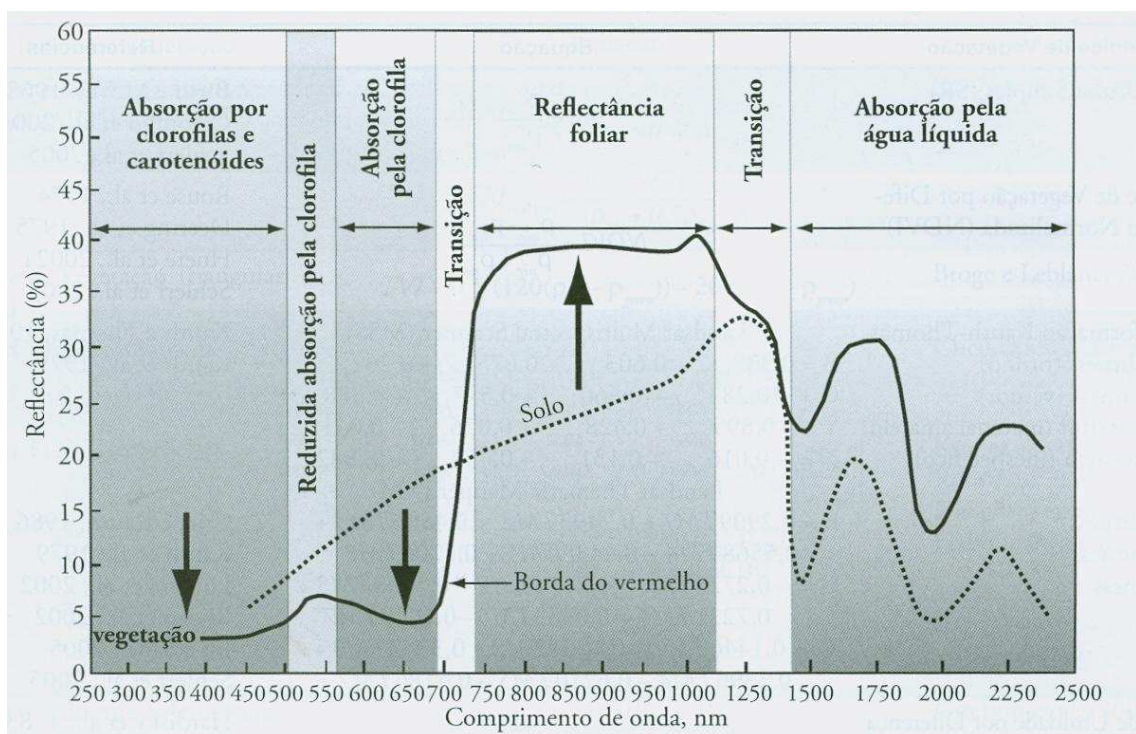


Figura 5. Base fisiológica e características típicas de reflectância espectral (Fonte: JENSEN, 2009).

A vegetação apresenta grande absorção na faixa do visível (400 a 700 nm) devido aos pigmentos fotossintetizantes presentes no mesófilo das folhas, com um pico máximo de refletância em 555 nm. Já na região do infravermelho próximo (700 a 1300 nm) a vegetação reflete intensamente, formando um platô, devido a sua estrutura celular (Moreira, 2005). Estas características acentuadas são de extrema relevância para operações matemáticas de bandas e criação de índices. Os índices de vegetação são modelos matemáticos desenvolvidos para avaliar a cobertura vegetal e relacionam porções da curva de reflectância da vegetação com os parâmetros mensuráveis no campo, tanto quantitativamente como qualitativamente. Os índices de vegetação são apontados como indicadores de crescimento e vigor da vegetação e podem ser utilizados para diagnosticar vários parâmetros biofísicos com os quais apresentam altas correlações, incluindo o índice de área foliar, biomassa, porcentagem de cobertura do solo, atividade fotossintética e produtividade (PONZONI, 2001).

Existem vários índices propostos para estimar a quantidade de biomassa fotossinteticamente ativa e também espacializar a sua distribuição na superfície da terra. Esses índices dividem-se basicamente em dois grupos: o primeiro é baseado no contraste entre a resposta da vegetação na banda do vermelho e do infravermelho próximo, também chamados de índices de razão. O segundo grupo faz uso do conceito de linha do solo, com o objetivo de calcular a distância entre a linha do solo e a vegetação. Os índices do segundo grupo podem ser chamados de índices ortogonais, perpendiculares ou baseados em distância.

Rouse *et al.* (1973) normalizaram a razão simples para o intervalo de -1 a +1, propondo o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI). Por se tratar de um índice de razão alguns ruídos multiplicativos (diferenças de iluminação solar, sombras de nuvens, algumas atenuações atmosféricas, algumas variações topográficas) presentes em múltiplas bandas de imagens temporais são minimizados (JENSEN, 2009).

O NDVI é utilizado como ferramenta para o monitoramento da vegetação, para construir perfis sazonal e temporal das atividades da vegetação, permitindo comparações desses perfis. O perfil temporal do NDVI tem sido utilizado para detectar atividades sazonal e fenológica, duração do período de crescimento, pico de verde, mudanças fisiológicas das folhas e períodos de senescência (PONZONI, 2007).

Esse índice, portanto, tem sido utilizado com sucesso para o monitoramento de mudanças na vegetação em escala regional, continental e global (BANNARI *et al.*, 1995). Alguns trabalhos realizados com a cultura da soja no Rio Grande do Sul e mostram a utilidade dos mesmos. Fontana (1995) menciona que os perfis são baseados no desenvolvimento

fenológico da vegetação caracterizando as mudanças estruturais ao longo do ciclo de desenvolvimento. Esta caracterização permite a diferenciação entre os diversos estágios de uma determinada cultura. Almeida (2008), em seu estudo fez uso do perfil temporal para acompanhar a evolução da cultura de soja em diferentes tipos de sistemas de plantio, concluiu que os índices testados foram eficientes no monitoramento da cultura.

2.5 MONITORAMENTO DE CO₂

O estudo do fluxo de carbono entre a atmosfera e um ecossistema, em uma variedade de condições ambientais, permite que se examine o impacto de eventuais mudanças ambientais nesse ecossistema, incluindo mudanças no uso do solo, na variabilidade climática e no aumento da concentração de CO₂ na atmosfera. Tais mudanças podem afetar a estrutura e o funcionamento total de um ecossistema natural, principalmente os seus fluxos de carbono, água e energia.

De acordo com Santos (2001), a assimilação do carbono pela biosfera tem sido um tema bastante discutido (MELILLO *et al.*, 1993; CIAIS *et al.*, 1995; SCHIMEL, 1995; HOUGHTON *et al.*, 1999). Basicamente, argumenta-se que a biomassa da biosfera terrestre tem crescido ao longo das últimas décadas em função do aumento da eficiência fisiológica dos vegetais, devido ao aumento da concentração atmosférica de CO₂, e também em função do crescimento da vegetação natural de certas regiões devido ao abandono de terras utilizadas na agricultura.

Atualmente pesquisadores que estudam fluxos em diferentes localidades e ecossistemas, procuram entender a magnitude de fluxos de CO₂ e suas variações.

As principais técnicas atuais para a estimativa das trocas de CO₂ entre um ecossistema e a atmosfera fazem uso de câmaras estáticas ou dinâmicas, perfis de concentração de CO₂ no solo ou na atmosfera. Medidas realizadas através de análises de solo ou de câmara são pontuais no tempo e espaço e pode não capturar a dinâmica dos fluxos de CO₂ em diferentes escalas de tempo. A colocação da câmara pode perturbar a integridade da superfície do solo causando uma superestimação ou subestimativa do fluxo. Também, salienta-se a instalação de torres de observação com abrangência de microescala, utilizando a técnica micrometeorológica da covariância de vórtices turbulentos para estimar as trocas de carbono, água e calor sensível

entre a atmosfera e os ecossistemas sem causar perturbação no ambiente. A técnica usa uma alta frequência de medições (tipicamente 10 registros por segundo) da velocidade vertical do vento e da concentração de gás atmosférico num determinado ponto acima da superfície. Baseia-se na premissa que o fluxo de CO₂ num ecossistema é igual à covariância média entre as flutuações na velocidade vertical do vento e as flutuações na concentração de CO₂ (ESCOBAR, 2008). Segundo a UNESCO (2009), as torres apresentam vantagens e desvantagens. Dentre os pontos positivos: obtenção de dados contínuos e com cobertura espacial superior as das medidas *in situ*. Dentre os negativos: custo elevado e manipulação dos dados complexa, requer cuidados no processamento de dados. Alguns trabalhos e projetos neste tópico são listados a seguir.

MALHI *et al.* (1998) utilizaram esta técnica no estudo da variação diurna, sazonal e anual do fluxo de CO₂ e sua relação com as condições meteorológicas, mostrando que o estresse hídrico afeta a fotossíntese.

O Projeto Ecobioma/LBA (Programa de grande escala da biosfera-atmosfera na Amazônia), realiza estudos integrados de diversos temas, entre eles: Armazenamento e trocas de Carbono que utiliza uma rede de torres instrumentadas para medir fluxos, instaladas na floresta, em áreas de cerrado, pastagens e plantios agrícolas, sensores móveis e imagens de satélite.

No trabalho intitulado Variação Sazonal do Fluxo de Concentração de CO₂ na Região Leste da Floresta Amazônica (LEAL, 2000), foram utilizados dados meteorológicos e de CO₂ do projeto ao longo do ano de 1999, com o objetivo de analisar as variações diárias e sazonais da concentração e dos fluxos de CO₂ acima e dentro do dossel da floresta.

Ainda com dados de superfície, registra-se o trabalho Variação dos Fluxos de CO₂ e da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) em ecossistema de manguezal amazônico na região de Bragança, PA (ANDRADE, *et al.*, 2009),

Já envolvendo técnicas de sensoriamento remoto com o objetivo de fornecer informações sobre o fluxo de CO₂, são poucos os resultados disponíveis, existindo, portanto, um grande espaço para esse tipo de investigação. Alguns exemplos são os trabalhos de PAULA *et al* (2009), que analisaram a possibilidade de estimar o carbono em florestas naturais; WATZLAWICK *et al* (2009), que realizaram teste de metodologia para estimar a biomassa e carbono orgânico na Floresta com Araucária; BARBOSA (2006), que propôs estimar a biomassa e carbono orgânico da parte não inundada da herbácea (*Echinochloa polystachya*).

Atualmente, outras ações a nível orbital tem sido almeçadas, com lançamento de satélites específicos para monitorar o CO₂. No entanto, a NASA, não obteve sucesso com o satélite Observatório Orbital de Carbono (OCO, sigla em inglês), que iria monitorar as medidas globais de CO₂, e fornecer imagens completas da distribuição regional e variações sazonais das fontes naturais e antrópicas das emissões de dióxido de carbono e seus sumidouros. A partir de 08 de março de 2010, iniciou o planejamento do OCO-2, sucessor do anterior, com a mesma missão. O Observatório vai voar em formação livre com uma série de outros satélites em órbita da Terra conhecido como *Earth Observing System Afternoon Constellation*, ou *A-train*. Esta formação de vôo coordenada permitirá que os investigadores correlacionem dados OCO com dados obtidos por outros instrumentos de observação da Terra. Em particular, os cientistas irão comparar os dados OCO com medições quase simultâneas adquiridas pelo instrumento *Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)*. O instrumento AIRS arquiva dados na plataforma *Earth Observing System Aqua*.

Para fornecer maior flexibilidade à missão, o Observatório vai adquirir dados em três diferentes sistemas de imageamento. No modo *Nadir*, o sensor imageia a superfície com visada diretamente abaixo da nave espacial. Em modo *Glint*, o sensor imageia o local próximo de onde a luz solar é refletida diretamente na superfície da Terra. O modo *Glint* aumenta a capacidade do instrumento para adquirir medições de alta precisão, particularmente sobre o oceano. Em modo *Target*, o sensor imageia continuamente uma superfície especificada quando o satélite orbita. O modo *Target* oferece a capacidade de coletar um grande número de medidas sobre os locais onde instrumentos alternativos localizados em terra e em aviões também medem CO₂ na atmosfera. A equipe científica do OCO irá comparar as medições do modo *Target* com aqueles adquiridos por instrumentos baseados em terra e em aviões para calibrar o instrumento do OCO e validar as informações da missão.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA E PERÍODO DE ESTUDO

A área objeto do estudo foi escolhida pelas seguintes particularidades: a disponibilidade de dados da estação micrometeorológica, de estação meteorológica próxima à área e de imagens de satélite. Situada no Estado do Rio Grande do Sul, no Município de Cruz Alta com área aproximadamente de 1.360,37 km² a uma distância de 350 km da Capital do Estado, está localizada a CCGL (TEC) – FUNDACEP, fundação privada de pesquisa agropecuária, onde se utilizou as parcelas de um experimento de manejo do solo de longa duração (23 anos). As Figuras 6 e 7 mostram a situação e localização da área em questão.

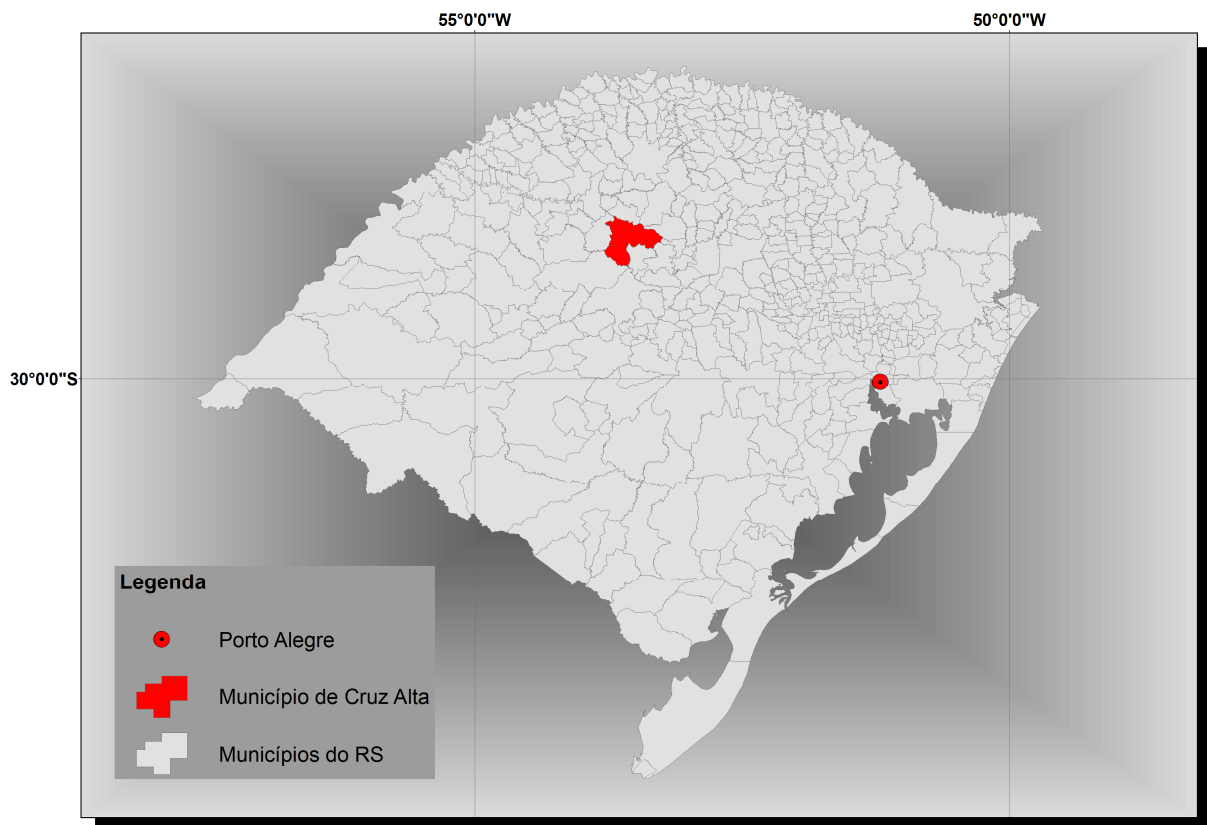


Figura 6. Situação do Município de Cruz Alta no Estado do Rio Grande do Sul.

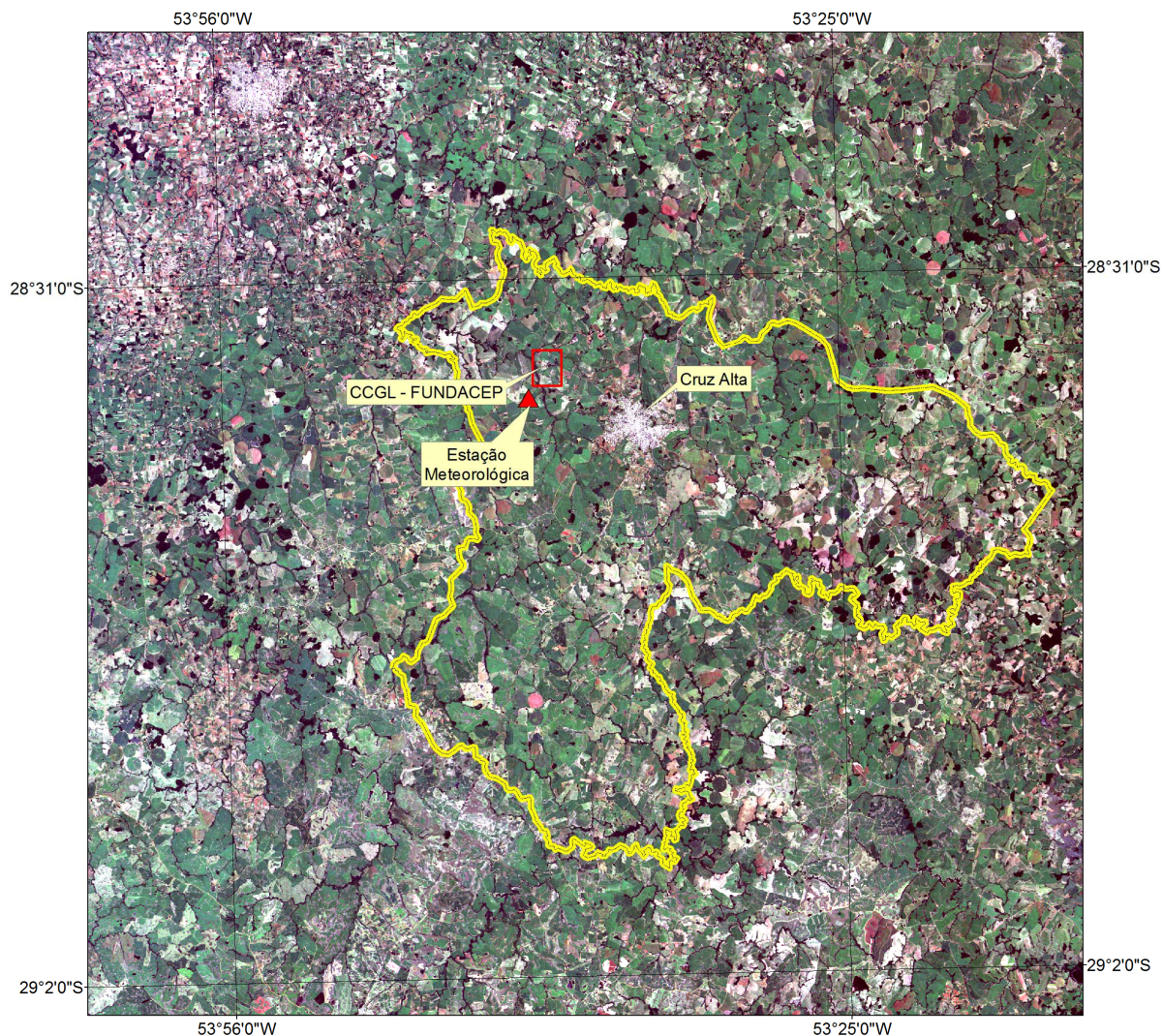


Figura 7. Localização da área da CCGL (TEC) – FUNDACEP no Município de Cruz Alta na imagem Landsat TM5 de 21/01/09 em composição RGB -321.

A área de interesse dessa dissertação é, portanto, uma fração do terreno da CCGL, a qual é composta por 10 talhões com medidas de 40 x 60 metros e 2 talhões com dimensões menores, em um total de 12 talhões. O manejo foi diferenciado quanto ao tipo de plantio, empregando o plantio direto (PD) na metade da lavoura e o plantio convencional (PC) na outra metade (Figura 8), combinados com diferentes sistemas de rotação de culturas.

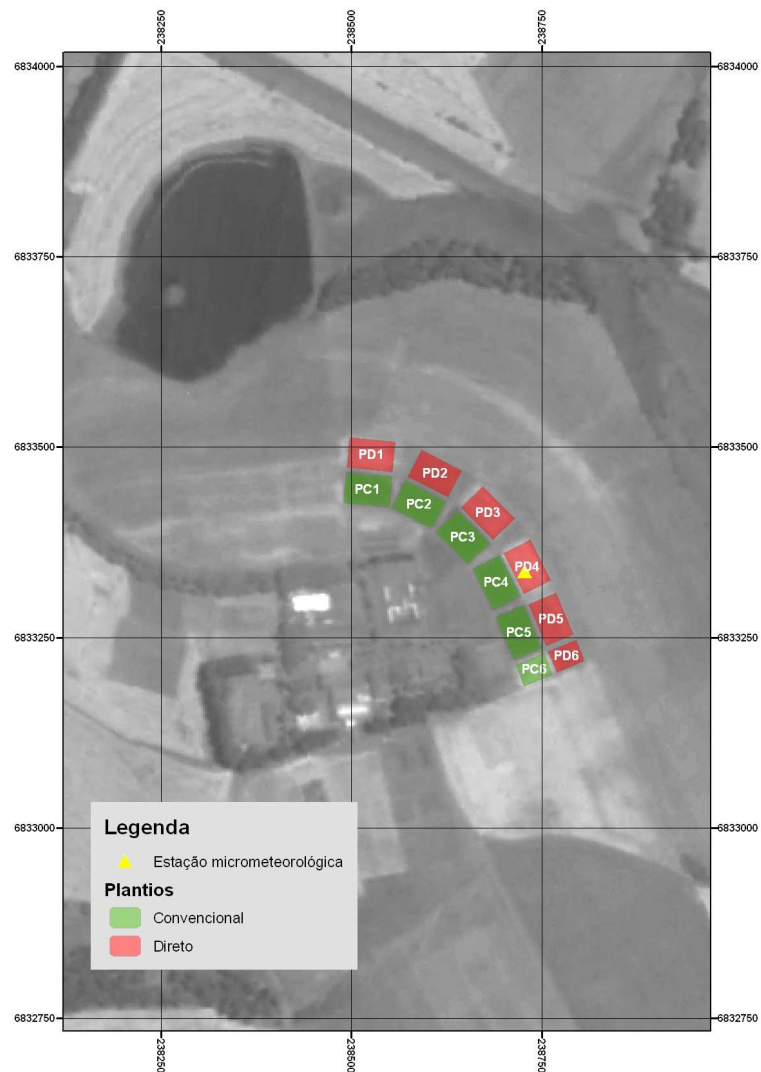


Figura 8. Localização dos talhões e da estação micrometeorológica na área experimental sobre a imagem do CBERS 2B instrumento HRC de 25/11/08 na banda pancromática.

3.2 DADOS DE SUPERFÍCIE

3.2.1 Dados Meteorológicos

Os dados de temperatura do ar, insolação, umidade relativa do ar e precipitação pluvial durante o período de avaliação, para a Estação Cruz Alta, foram obtidos do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), diretamente do site <http://www.inmet.gov.br> e encontram-se

apresentados no Anexo 1. Estes dados foram utilizados para caracterizar as condições meteorológicas durante o período experimental, que se estendeu de novembro de 2008 a abril de 2009.

3.2.2 Dados Micrometeorológicos

Uma torre micrometeorológica instrumentada foi instalada no centro do talhão PD4, cujas dimensões são 40 x 60 metros, no dia 19/11/2008 pela equipe do Laboratório de Micrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), através do projeto SULFLUX (<http://www.ufsm.br/sulflux>), a qual fez a definição dos sensores, a montagem do equipamento e todo o acompanhamento e coleta de dados (Figura 9). A localização da torre, no sistema de projeção UTM (*Universal Transversa de Mercator*), *datum* WGS84, foi nas coordenadas 238728, 6833336, obtida com um GPS Garmin modelo 76CSx e antena externa, com sinal de 12 satélites. Os fluxos de CO₂ foram estimados pelo método de covariância dos vórtices através das medidas na frequência de 10Hz, da componente vertical da velocidade do vento, obtidas por um anemômetro sônico (CSAT 3, Campbell Scientific Inc), e da concentração de CO₂, obtidas por um analisador de gás infravermelho LiCor, LI7500 (figura 10), ambos localizados a 2.5m. A torre micrometeorológica contava com sensores que realizam as seguintes medidas (altura do sensor na torre, fabricante, modelo) na frequência de 10Hz: (vento e temperatura do ar (2,5m, CSAT 3, Campbell Scientific Inc., Logan, UT); H₂O/CO₂ analisador de gás e pressão (2,5 m, LiCor, LI7500); radiação de ondas curtas incidente (5 m, Kipp & Zonen, CMB6); saldo de radiação (5 m, Kipp & Zonen, NR LITE); radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR) (1 m, Kipp & Zonen, PAR LITE); fluxo de calor no solo (-2 cm, Hukseflux, HFP01SC-L); temperatura do solo (-2 cm, Campbell Scientific, TCAV-L); umidade do solo (-5 cm, Campbell Scientific, CS616-L); e precipitação pluvial (1,5 m, Texas Instruments). Mais detalhes em ROBERTI *et al.* (2011).



Figura 9. Torre micrometeorológica utilizada nas medidas na cultura de soja na CCGL.



Figura 10. Sistema de covariância de vórtices (*eddy covariance*): anemômetro sônico e analisador de gás de caminho aberto.

O método da covariância dos vórtices (“*eddy covariance*”) foi utilizado para medir o fluxo de CO_2 resultante da interação entre atmosfera e o ecossistema local (soja e solo), assim como o fluxo de calor latente e sensível. Esta técnica permite determinar o fluxo vertical de CO_2 (fotossíntese-respiração), da temperatura do ar (fluxo de calor sensível) e da umidade do ar (fluxo de calor latente), usando o cálculo da covariância entre as flutuações da velocidade

vertical do vento e das concentrações de CO₂. Esse método está baseado nos redemoinhos (turbilhões) que acontecem na atmosfera. Os turbilhões mais aquecidos e mais úmidos gerados próximos à superfície são deslocados verticalmente, sendo substituídos por turbilhões menos aquecidos. Assim, estes movimentos são responsáveis pelo transporte vertical (fluxos) das propriedades da atmosfera.

O analisador de gás infravermelho faz as medições de CO₂ e H₂O, baseado na diferença de absorção da radiação infravermelho que atravessa duas células de amostragem de gás. A célula de referência é usada para o gás de concentração conhecida e a célula amostra é usada para um gás de concentração desconhecida. A radiação infravermelho é transmitida em ambos caminhos. Assim, a concentração de CO₂ (saída do analisador) foi obtida pela diferença de absorção entre as duas células (LI-COR, 1996).

A estação meteorológica permaneceu conectada a uma rede de abastecimento elétrica durante todo o período de coleta de dados, sendo que todos os sensores estão conectados a um módulo de aquisição de dados (*datalogger*), onde se registram e armazenam as medições efetuadas, por vez, ligado a um computador.

Os dados brutos foram armazenados em tempo real, posteriormente processados em arquivos de 30 minutos. Para isso, tiveram que ser unidos em arquivos de 24h. Então, foram feitas médias de 30 min em janela móvel com avanço de 3 min, permitindo assim, para um período de 24h, 480 registros. As variáveis turbulentas foram calculadas com auxílio de linguagem computacional Fortran-77, desenvolvido pela equipe do Laboratório de Micrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), utilizando o método da covariância de vórtices.

O programa, entre outras funções, realiza uma rotação de coordenadas para minimizar efeitos nas covariâncias devido à mínima inclinação topográfica que possa ter no sítio experimental. Para a média das componentes da velocidade do vento ou de covariâncias que incluam grandezas escalares são realizadas essas rotações (CARNEIRO, 2007).

Ao longo do período experimental, foram analisados aproximadamente 15 dias de coleta de dados, entre esses, o dia anterior e posterior do imageamento do satélite. Para cada um destes dias que houve a passagem do satélite foram gerados gráficos mostrando o comportamento ao longo do dia dos dados coletados na torre micrometeorológica.

3.3 DADOS DE CULTURA

A cultivar de soja utilizada foi a FUNDACEP 53 RR com espaçamento entre linhas de 0,40 m, semeada em 28/11/2008 e colhida em 28/04/2009. Dados sobre o ciclo de desenvolvimento da cultura foram fornecidos pelos técnicos da CCGL. Entre os dados coletados, foi utilizado neste trabalho a fenologia, segundo a escala proposta por Ferh e Cavines (1977).

3.4 DADOS ORBITAIS

3.4.1 Imagens Disponíveis

As imagens Landsat 5 (TM) e CBERS 2B (HRC) foram obtidas de forma gratuita diretamente do site (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A escolha das imagens considerou a melhor visibilidade, menor ocorrência de nuvens e disponibilidade dos dados da torre micrometeorológica.

Em função do exposto, ao longo do período experimental, entre as 7 datas de imageamento (Anexo 2), foi possível trabalhar com 5. A data de 18 de novembro de 2008 (a) não houve aquisição dos dados micrometeorológicos da torre e em 22 de fevereiro de 2009 (e) a imagem não era adequada em função da presença maciça de nuvens acima dos talhões de soja.

Assim, foram utilizadas as imagens do Landsat TM, órbita/ponto 223/080 com as respectivas datas: 20 de dezembro de 2008 (b), 05 de janeiro de 2009 (c), 21 de janeiro de 2009 (d), 26 de março de 2009 (f) e 11 de abril de 2009 (g), para gerar as imagens NDVI e os perfis temporais.

Foi também utilizado a imagem do CBERS 2B instrumento HRC, órbita/ponto 160_D/132_3 de 25 de novembro de 2008 (Figura 12), para delimitar os talhões, o açude e a mata.

3.4.2 Processamento das Imagens

Para a utilização das imagens do satélite Landsat 5/TM de forma multitemporal foram realizados alguns procedimentos de correção.

Na Figura 11 podem ser visualizadas as etapas utilizadas no processamento das imagens Landsat 5/TM, desde a transformação radiométrica, correção atmosférica e correção geométrica das imagens até a geração do índice de vegetação (NDVI) para cada uma das imagens.

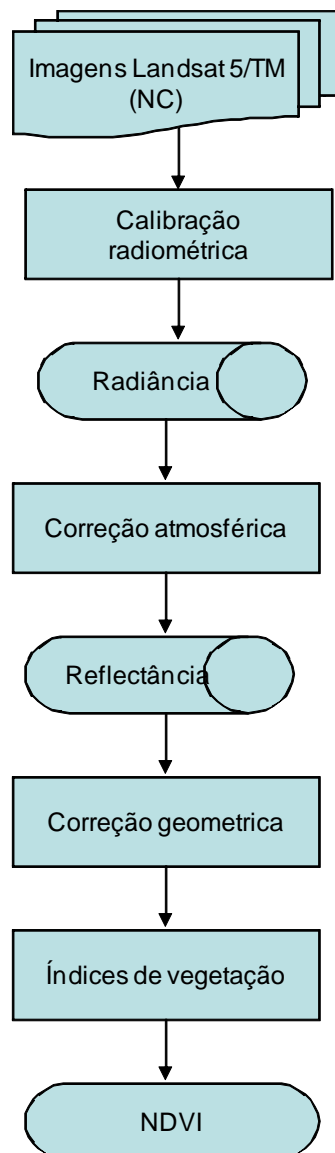


Figura 11. Fluxograma mostrando as etapas do processamento das imagens Landsat 5/TM

3.4.3 Calibração Radiométrica

Na calibração radiométrica foi feita a conversão do Número Digital (ND) para valores de radiância, que é uma propriedade física da superfície. Para isso utilizou-se o software Envi (*Environment for Visualizing Images*) versão 4.6.1, onde foram informados os parâmetros de calibração (Tabela 4).

Tabela 4 - Parâmetros de calibração das imagens Landsat Fonte: http://landsat.usgs.gov/science_L5_cpf.php

Data da Imagem	<i>Spectral Radiances (Lmin e Lmáx (W/(m².sr.µm))</i>	
	De Outubro de 2008 a Junho de 2009	
Bandas	Lmin	Lmáx
1	-15.200	1.930.000
2	-28.400	3.650.000
3	-11.700	2.640.000
4	-15.100	2.210.000
5	-0.3700	302.000
6	12.378	153.030
7	-0.1500	165.000

A verificação da qualidade da correção foi feita a partir da análise das curvas espectrais de alvos conhecidos, as quais são mostradas no Anexo 3

3.4.4 Correção Atmosférica

Com o objetivo de atenuar as incertezas dos dados das imagens foi utilizado o módulo FLAASH-ENVI (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*), a partir do qual estimou o sinal recebido pelo satélite sem a interferência de fatores atmosféricos como gases e aerossóis.

Para execução do módulo nas imagens dos sensores TM do satélite Landsat 5, foram necessários os seguintes dados de entrada: imagens com valores de radiância, parâmetros da cena, informações do sensor, modelo atmosférico, modelo de aerosol e visibilidade. Com estes dados, as imagens foram processadas e transformadas em imagens de reflectância.

Foram selecionadas superfícies testes de água, solo exposto e mata (anexo 3), e comparados com a literatura disponível.

3.4.5 Correção Geométrica

Alguns dos pontos levantados foram definidos a partir da imagem pancromática, de resolução espacial (2,5m) e outros a partir da composição falsa cor da imagem multiespectral, de resolução espacial de (30m). Também foram coletados vários pontos notáveis identificados durante a visita de campo (cruzamentos de vias, pontes, bordas de polígonos de uso da terra, etc.), além de utilizar-se as rotas armazenadas no GPS (Sistema de Posicionamento Global).

Desse conjunto de dados, usaram-se em torno de 30 pontos planimétricos para efetivar o georreferenciamento e as rotas para verificação da transformação aplicada as imagens.

A seleção destes pontos priorizou uma boa distribuição espacial, de forma a atender a abrangência da área de interesse (município de Cruz Alta) e a melhor definição pontual possível da área de estudo (talhões de soja). Estes cuidados são extremamente importantes para que o desempenho da correção geométrica seja considerado satisfatório.

O limite da área de estudo foi digitalizado em formato vetorial a partir da imagem pancromática corrigida geometricamente e as medições de campo com uso de trena. As imagens do Landsat TM5 foram georreferenciadas a fim de que suas informações fossem compatíveis entre si (talhões com a cultura da soja) e com as informações advindas da estação micrometeorológica. Desta maneira, as imagens de diversas datas foram registradas a um sistema de projeção geográfica único, utilizando uma das imagens como referência.

O modelo matemático utilizado foi a transformação polinomial de primeira ordem e o método de interpolação foi o vizinho mais próximo, por apresentarem as vantagens de menor chance de distorções geométricas e alterar muito pouco os valores dos níveis de cinza originais da imagem (EASTMAN, 2003).

Foram utilizados como referência a projeção UTM (*Universal Transverse Mercator*), o datum WGS/84 (*World Geodetic System -1984, Zone 22*).

3.4.6 Índices de Vegetação

No intuito de caracterizar a resposta espectral da cultura da soja, foram geradas imagens de índices de vegetação, após a calibração radiométrica, atmosférica e geométrica. O índice de vegetação utilizado no trabalho foi o baseado na razão de bandas, que é o índice NDVI (ROUSE *et al.*, 1973).

O NDVI foi gerado usando o módulo *Vegindex* do SIG Idrisi, através da equação:

$$NDVI = \frac{(\rho_{iv} - \rho_v)}{(\rho_{iv} + \rho_v)} \quad (3)$$

Onde:

NDVI = índice de vegetação por diferença normalizada;

ρ_{iv} = reflectância no infravermelho próximo;

ρ_v = reflectância no vermelho.

Os dados de entrada na geração do NDVI foram as bandas 3 e 4 do sensor TM do Landsat 5, correspondendo à região do vermelho (0,63 a 0,69 μm) e infravermelho próximo (0,76 a 0,90 μm), respectivamente.

Foram então extraídos os dados de NDVI dos *pixels* correspondentes a localização da estação micrometeorológica adotando-se 2 *pixels* para a realização de médias do NDVI.

3.4.7 Localização da Área Experimental

O procedimento para a localização da área de estudo, levou em consideração duas abordagens distintas: a preparação dos dados e o diagnóstico. Em primeiro lugar foi importante o reconhecimento visual e identificação das feições da paisagem, que auxiliaram para diminuir as incertezas do georreferenciamento. Esta etapa teve subsídios na visita de campo que permitiu a vetorização dos talhões, do polígono de água e mata, obtidos na imagem, os quais estão

presentes na área em torno de 195 e 280 metros de distância dos talhões do cultivo de soja (PD1 e PD3), respectivamente. Também, foi utilizada uma imagem pancromática do satélite CBERS2, sensor HRC com resolução espacial de 2,5 metros, como podem ser visualizados na Figura 12.



Figura 12. Vetores mapeados sobre a imagem do CBERS 2B instrumento HRC de 25/11/08 na banda pancromática.

Para maior segurança quanto a localização dos *pixels* nas imagens em função dos vetores mapeados e a coordenada da estação, optou-se utilizar as imagens NDVI para testar esta relação, pois as imagens caracterizam esses alvos de forma bem distinta.

O referido teste faz parte da etapa do diagnóstico, que utilizou os valores extraídos dos *pixels* presentes no interior dos vetores e construiu perfis temporais da cultura da soja, levando em conta os dois tipos de manejo do plantio, e do povoamento de eucalipto.

3.5 ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE FLUXO DE CO₂ E NDVI

A última etapa do trabalho foi a análise de correlação entre o fluxo de CO₂ obtidos da torre micrometeorológica e os dados de NDVI, obtidos das imagens. As análises abrangeram períodos distintos, com abrangência máxima de 24 horas. Para isso, utilizou-se um conjunto de parâmetros, obtidos da curva diária de fluxo de CO₂ (dado observado) e também aplicando a média móvel de amplitude 5. São eles:

- ❏ valor instantâneo (hora da passagem do satélite);
- ❏ valor médio de 2 horas centradas no horário da passagem do satélite;
- ❏ valor médio do período negativo (de absorção de CO₂);
- ❏ valor médio das 24 horas;
- ❏ valor máximo de absorção de CO₂.
- ❏ integração de área e perímetro;

A análise estatística gerou 14 índices de correlação.

Em contribuição para análise, outra metodologia adotada foi a criação de uma superfície de absorção de carbono através do modelo TIN (*Triangulated Irregular Network*), onde foram interpolados os valores de fluxo de carbono no dia que a área foi imageada pelo satélite.

A análise em questão utilizou o software Excel. No entanto, para compor os valores de área, perímetro e superfície foi utilizado o AutoCAD MAP, um software próprio para essas atividades, o qual possui muita precisão em seus cálculos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PERÍODO EXPERIMENTAL

4.1.1 Condição Meteorológica

É sabido que a assimilação de carbono pela vegetação ocorre através do processo de fotossíntese, já a emissão se dá pela respiração, mortalidade das árvores, decomposição microbiana e oxidação de carbono no solo. O ciclo hidrológico é completamente acoplado aos fluxos de energia (através do fluxo de calor latente) e de carbono (através dos mecanismos que controlam a condutância estomática) entre a superfície e a atmosfera (CAMPBELL e NORMAN, 1998). Portanto, as condições meteorológicas controlam grandemente os fluxos de CO₂ entre a superfície e a atmosfera e, por isso, nesta primeira análise é apresentada uma caracterização das condições do tempo durante o experimento.

De uma forma geral, as condições meteorológicas ocorridas durante o período experimental foram favoráveis à cultura da soja (Anexo 1), não tendo ocorrido qualquer evento adverso que pudesse ter comprometido o crescimento e desenvolvimento da cultura.

A temperatura média do ar oscilou ao longo do período entre 15 e 29°C. Dezembro foi o mês mais quente, quando a temperatura média teve valores máximos em torno de 29°C (em 08 de dezembro de 2008), com as temperaturas mínimas e máximas atingindo valores máximos de 23 e 37°C, respectivamente. Neste período a soja encontrava-se no estágio vegetativo, tendo, portanto, suas exigências térmicas atendidas, já que a temperatura ideal é em torno de 30°C (EMBRAPA SOJA, 2004). Nos meses de novembro, dezembro e janeiro a amplitude térmica foi maior do que em fevereiro, março e abril, quando as temperaturas foram mais estáveis ao longo do mês.

Observou-se uma adequada distribuição da precipitação pluvial durante o ciclo evolutivo da cultura. De novembro de 2008 a março de 2009 a precipitação pluvial foi sempre superior a 100mm mensais, com pelo menos 6 eventos em cada mês. Este padrão de distribuição da precipitação pluvial é favorável à cultura, visto que é amplamente sabido que a condição hídrica é determinante para obtenção de altos rendimentos no Estado (CUNHA, 2001;

FONTANA *et al.*, 2001). O mês de abril de 2009 foi o que apresentou os menores valores de precipitação pluvial (12mm), o que também é favorável à cultura, que nesta época encontra-se no final do período de maturação e início da colheita.

4.1.2 Condição Micrometeorológica

A variação diária dos elementos: radiação solar global (Rg), radiação fotossinteticamente ativa (RFA), temperatura do ar (Tar), temperatura do solo (Tsolo), pressão (P), velocidade do vento (v), direção e intensidade do vento e umidade do ar (UR), são apresentadas nas Figuras 13 a 20, respectivamente, para os cinco dias em que ocorreram imageamento com o satélite Landsat.

O padrão típico de variação diurna dos elementos meteorológicos avaliados foi verificado na maior parte dos dias. A radiação solar global (Figura 13) mostrou o mesmo padrão da radiação fotossinteticamente ativa (Figura 14), com valores nulos durante a noite e positivos durante o dia. O máximo valor diário ocorreu próximo das 12:00h, sendo superior nos dias julianos 355, 5 e 21, diminuindo após em função da declinação solar. Nos dias 355 e 85 as curvas mostraram diminuições abruptas no recebimento de energia no período da tarde, o que deve ser consequência da nebulosidade.

Associado a este padrão, verificou-se que as temperaturas do ar (Figura 15) e do solo (Figura 16) tiveram valores menores durante a noite, mínimo próximo às 7:00h, e maiores durante o dia. O horário de ocorrência dos máximos valores variou conforme o dia de observação, mas em geral, foi após às 13:00h. Este padrão de variação diária da temperatura é típico de dias em que o aquecimento e resfriamento do solo e do ar são definidos pelas trocas entre a superfície e o ar (VAREJÃO-SILVA, 2001).

Ao longo dos dias analisados, a pressão atmosférica mostrou uma associação aproximadamente inversa com a temperatura do ar, conforme esperado, com a tendência dos dias mais frios apresentarem pressão atmosférica maior. Já ao longo do dia, a pressão mostrou dois máximos e dois mínimos, o que em geral é observado e denominado como marés barométricas. Novamente os dias 355 e 85 se diferenciam dos demais por apresentarem pressões atmosféricas inferiores (Figura 17).

As variações da pressão atmosférica geram os movimentos (ventos), os quais apresentaram um padrão bastante variável ao longo do dia e entre os dias de observação (Figura 18). Nos dias 5, 21 e 101 os ventos de noroeste predominaram (Figura 19), atingindo as maiores velocidades as 8:44, 21:27 e 20:06, respectivamente. Já nos dias 355 e 85 os ventos apresentaram comportamento mais variável ao longo do dia, com ventos no quadrante norte, sul e sudoeste durante o dia e ventos no quadrante noroeste e sudoeste durante a noite, atingindo as maiores velocidades na madrugada e no entardecer.

Na análise dos dados observa-se, portanto, que os dias 355 e 85 apresentaram uma dinâmica distinta dos demais. A radiação solar global e a radiação fotossinteticamente ativa sofreram alterações no período da tarde, provavelmente pela presença de nuvens (Figuras 13 e 14). Também neste dia ocorreu grande oscilação nas temperaturas do ar e do solo, na umidade do ar e na direção dos ventos, o que indica a entrada de um sistema frontal, ocasionando chuvas nos dias posteriores (Anexo 1).

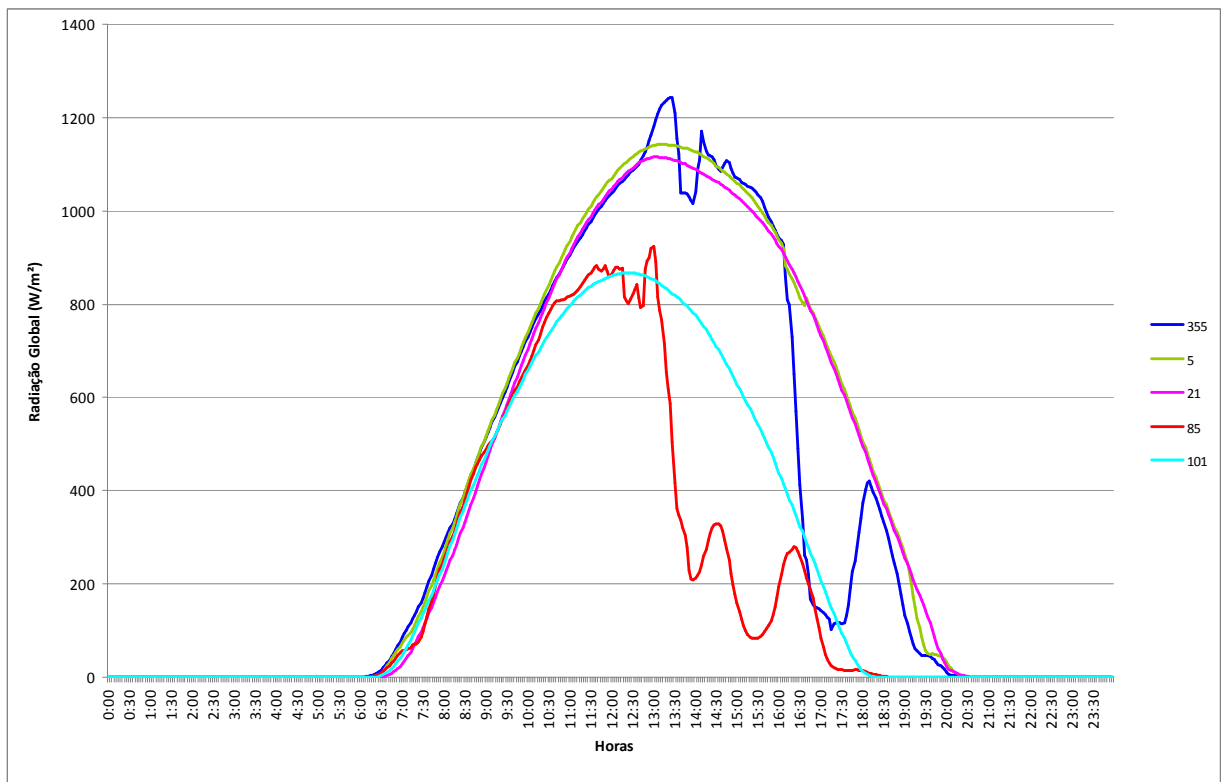


Figura 13. Variação diária da Radiação Solar Global ao longo do período experimental de 2008/09, nos dias julianos 355, 5, 21, 85 e 101.

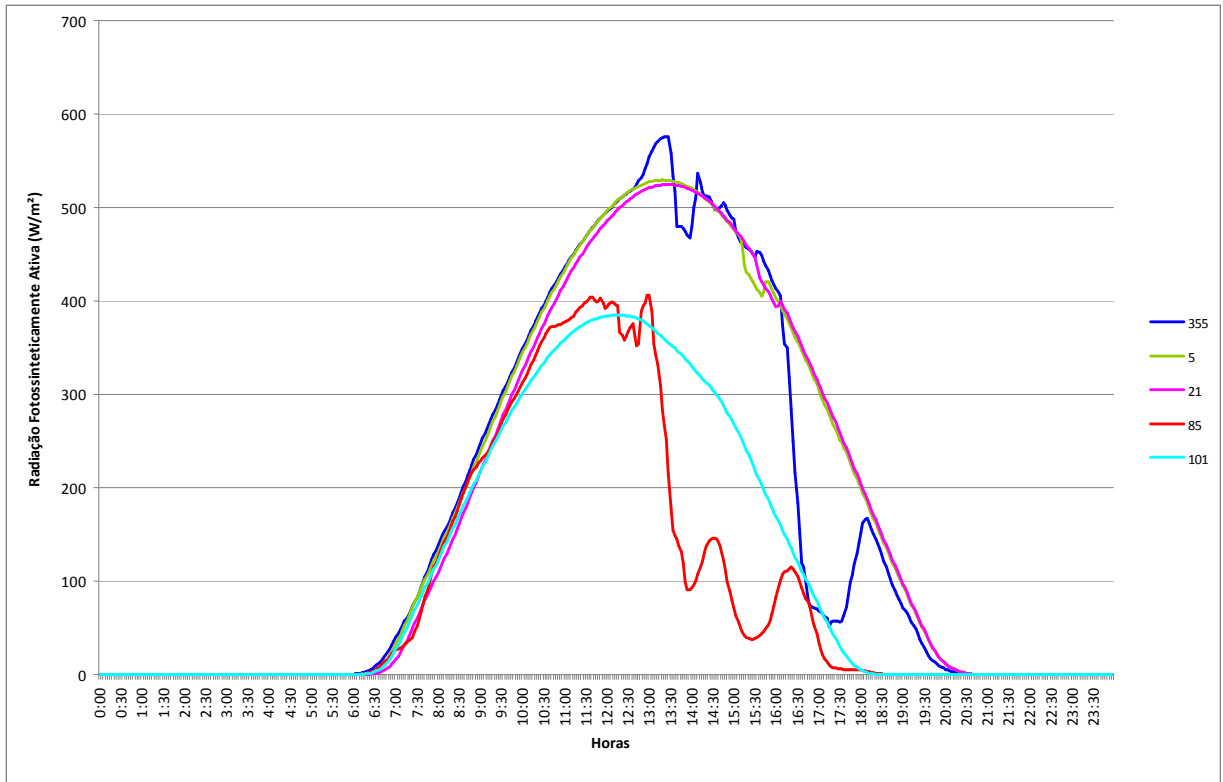


Figura 14. Variação diária da Radiação Fotossinteticamente Ativa ao longo do período experimental de 2008/09, nos dias julianos 355, 5, 21, 85 e 101.

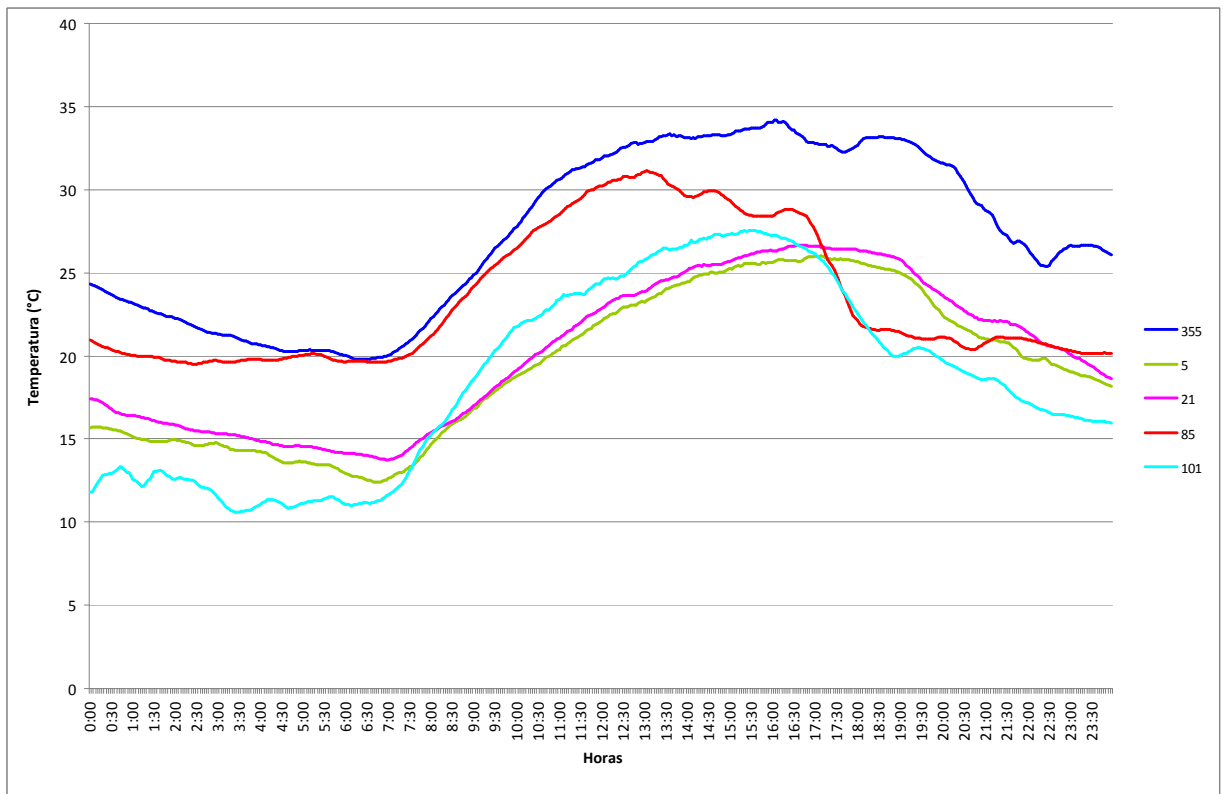


Figura 15. Variação diária da Temperatura do ar ao longo do período experimental de 2008/09, nos dias julianos 355, 5, 21, 85 e 101.

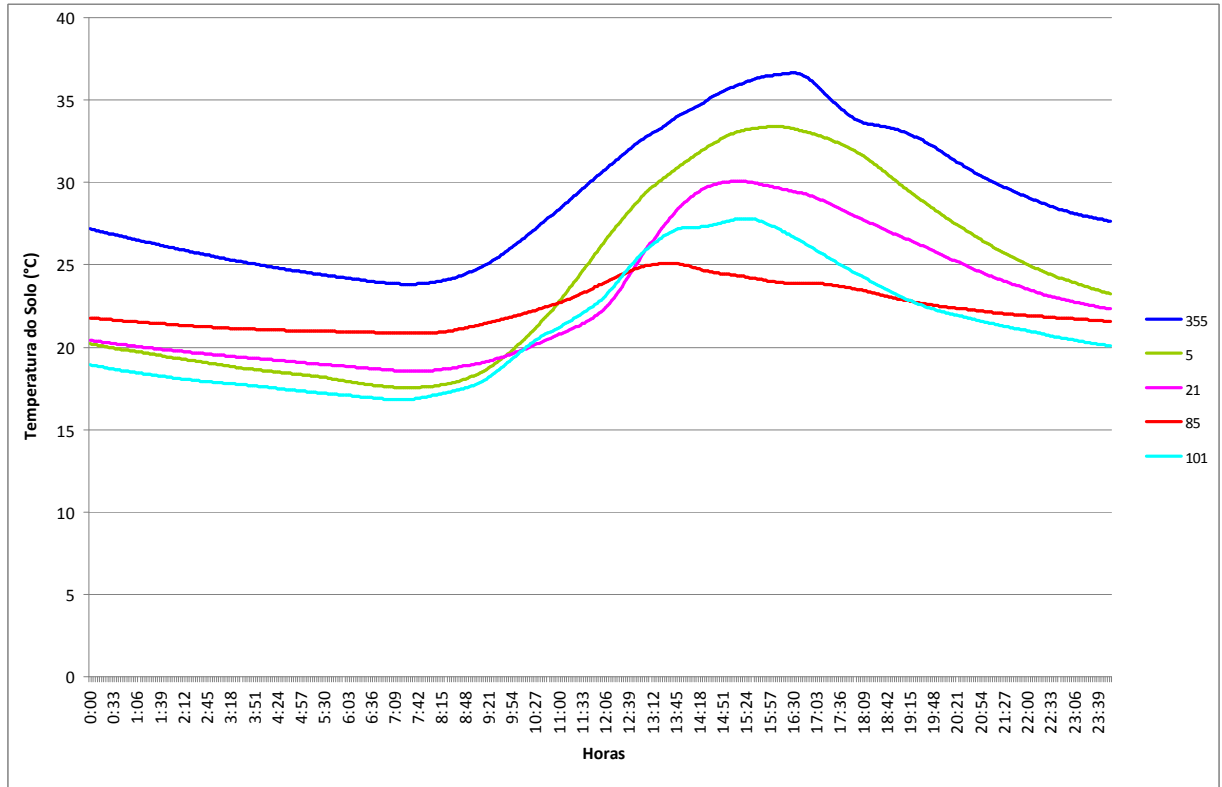


Figura 16. Variação diária da Temperatura do Solo ao longo do período experimental de 2008/09, nos dias julianos 355, 5, 21, 85 e 101.

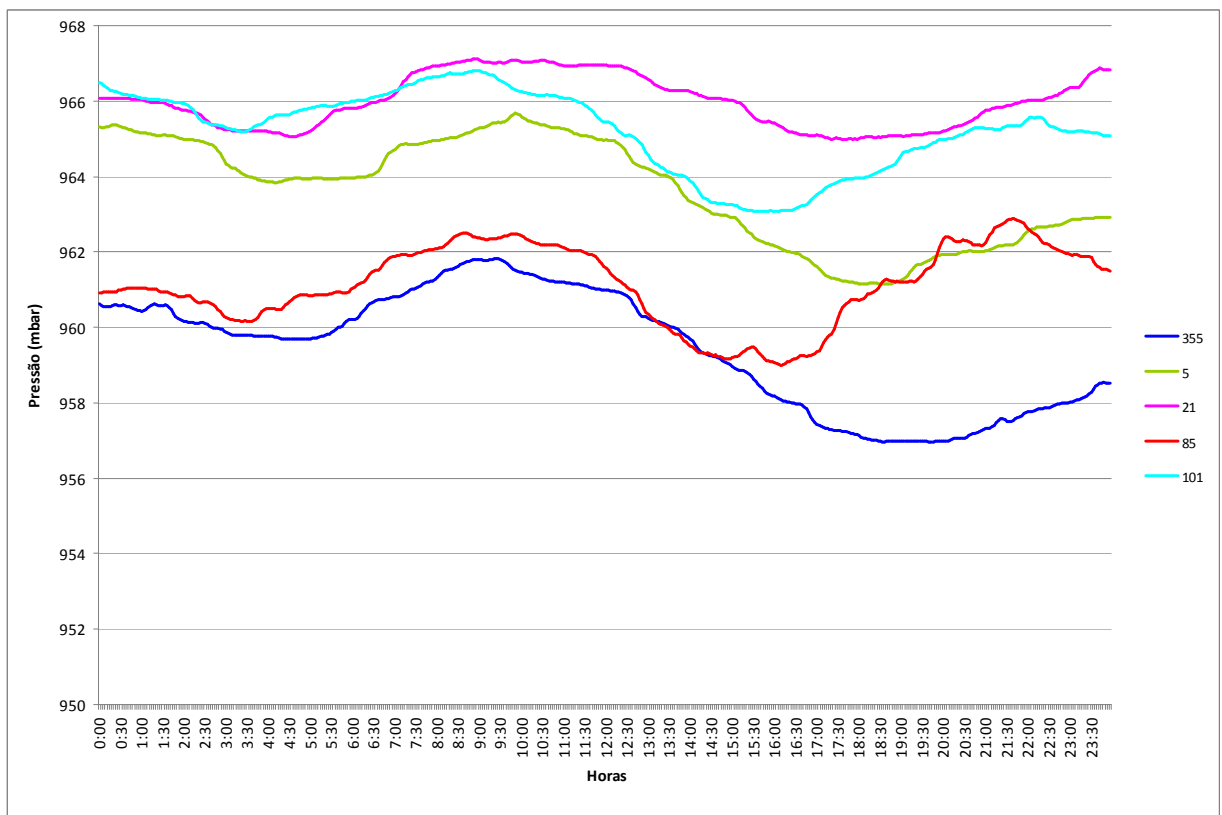


Figura 17. Variação diária da Pressão Atmosférica ao longo do período experimental de 2008/09, nos dias julianos 355, 5, 21, 85 e 101.

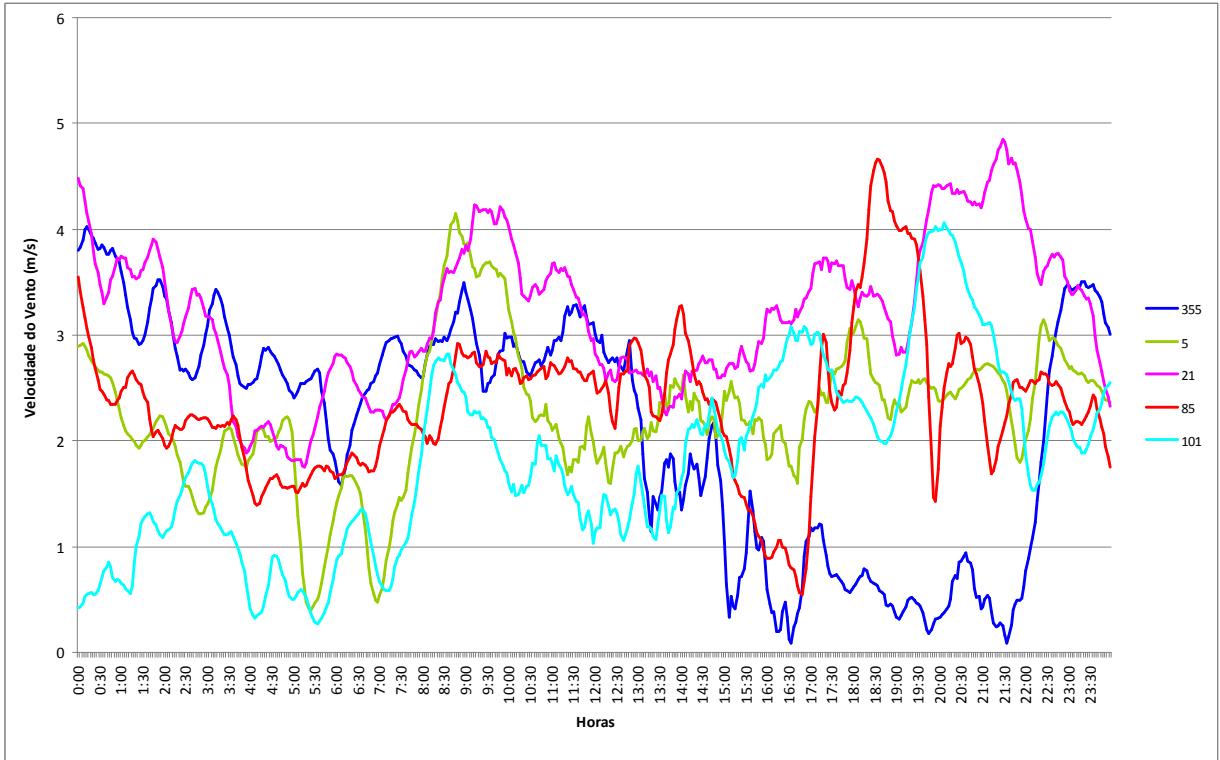
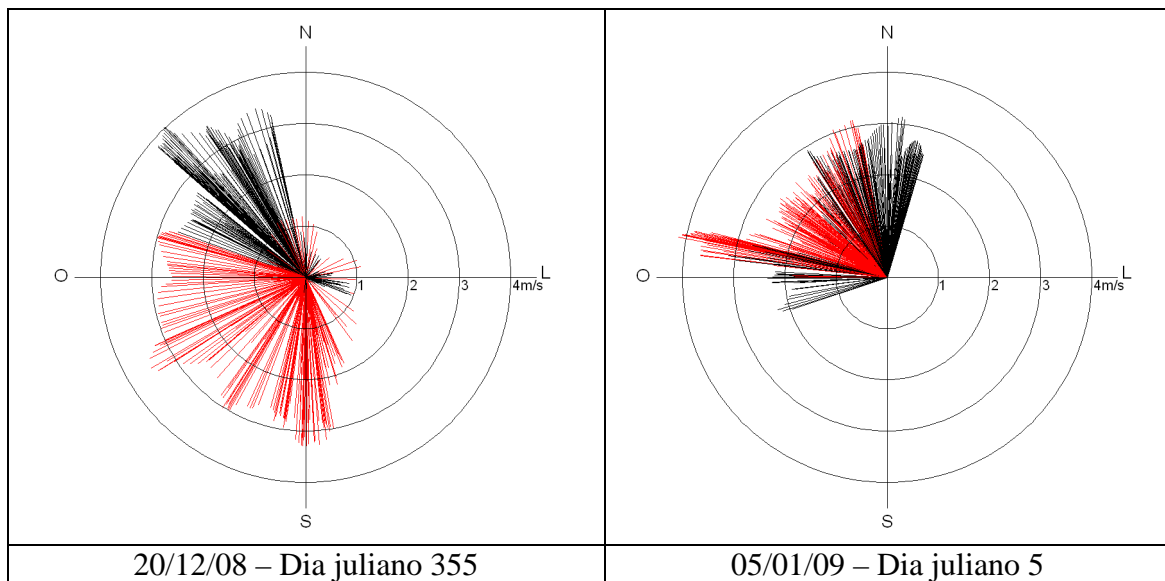


Figura 18. Variação diária da Velocidade do Vento ao longo do período experimental de 2008/09, nos dias julianos 355, 5, 21, 85 e 101.



20/12/08 – Dia juliano 355

05/01/09 – Dia juliano 5

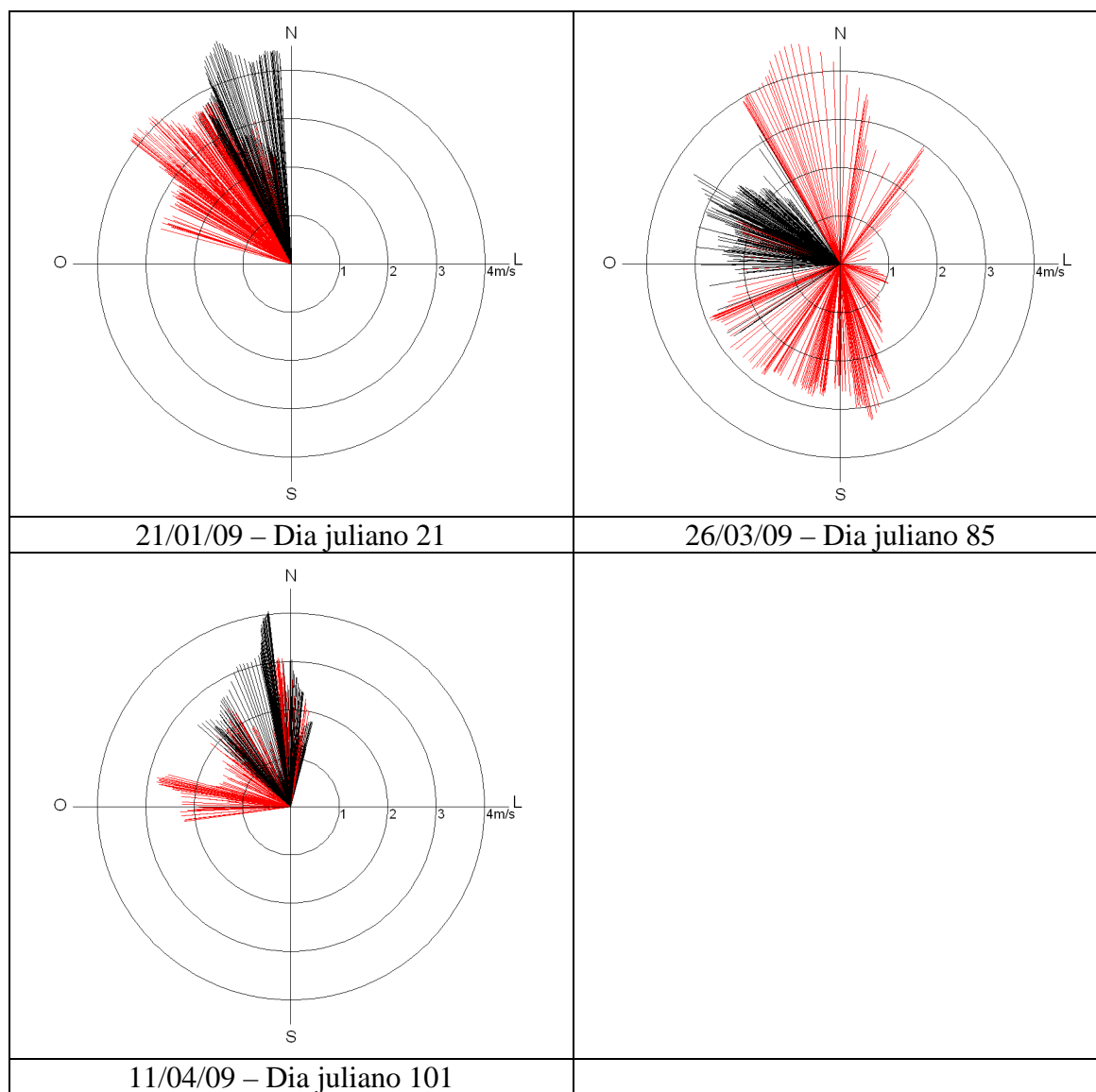


Figura 19. Variação diária da Velocidade e Direção do Vento ao longo do período experimental de 2008/09. As linhas vermelhas representam o período diurno e as pretas o noturno.

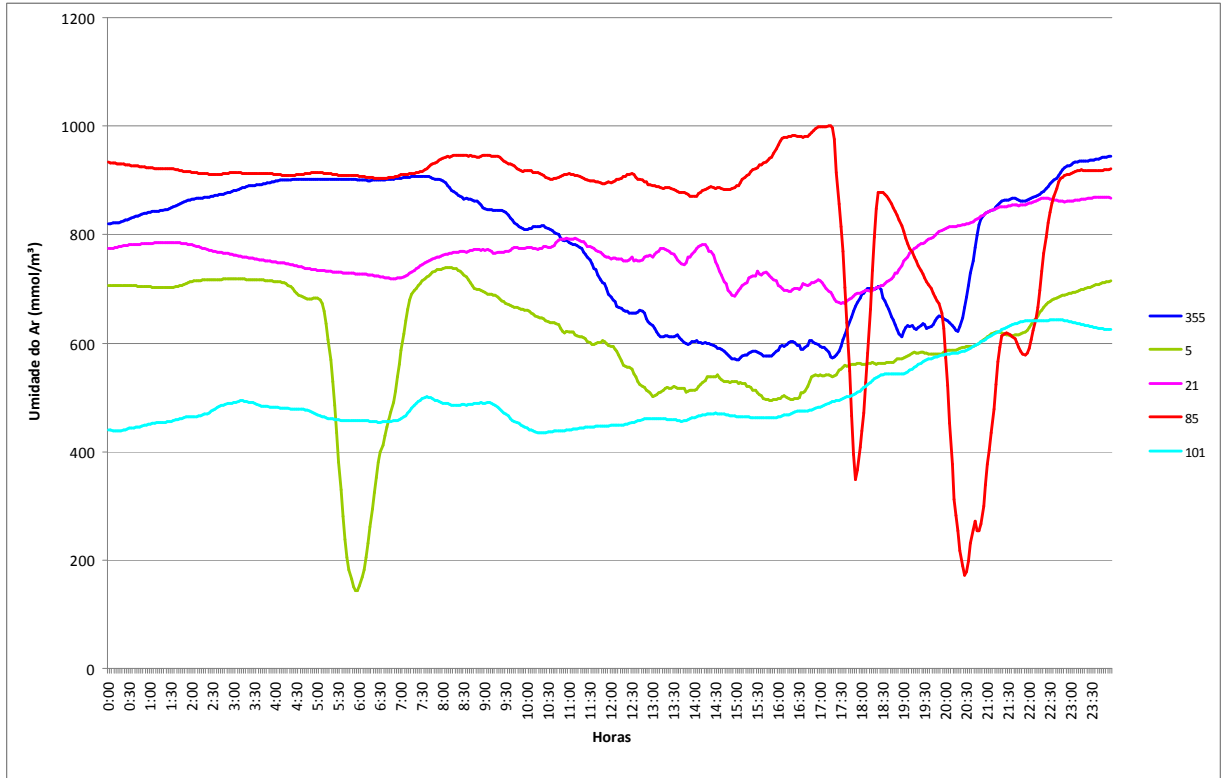


Figura 20. Variação diária da Umidade do Ar ao longo do período experimental de 2008/09, nos dias julianos 355, 5, 21, 85 e 101.

4.1.3 Fenologia da Cultura e Imagens NDVI

Com base nos dados de campo fornecidos pelos técnicos da CCGL foi possível montar o diagrama linear da fenologia da soja, o qual foi comparado com as imagens NDVI (Figuras 21 e 22). Verifica-se que a cultura apresentou um ciclo de 152 dias, característico da cultivar FUNDACEP 53 RR

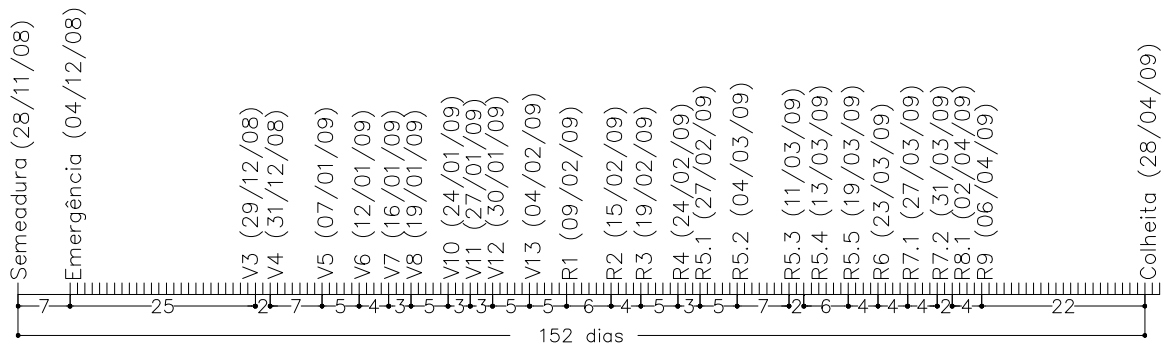
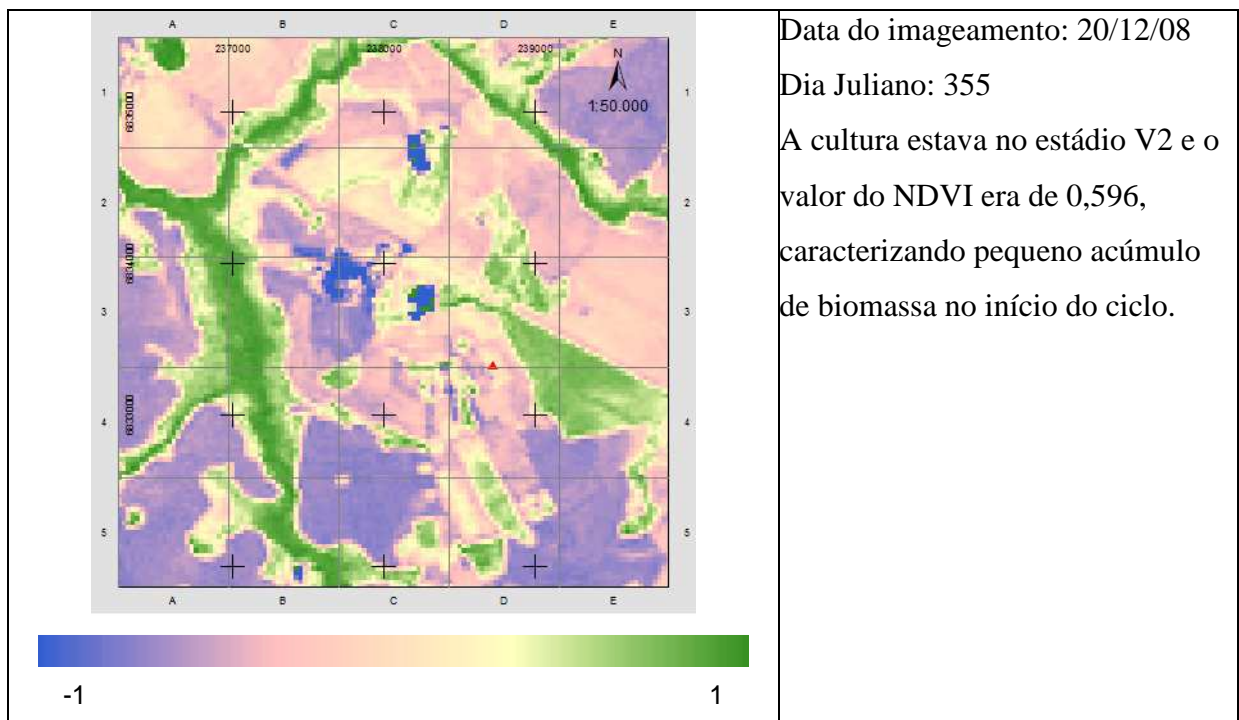
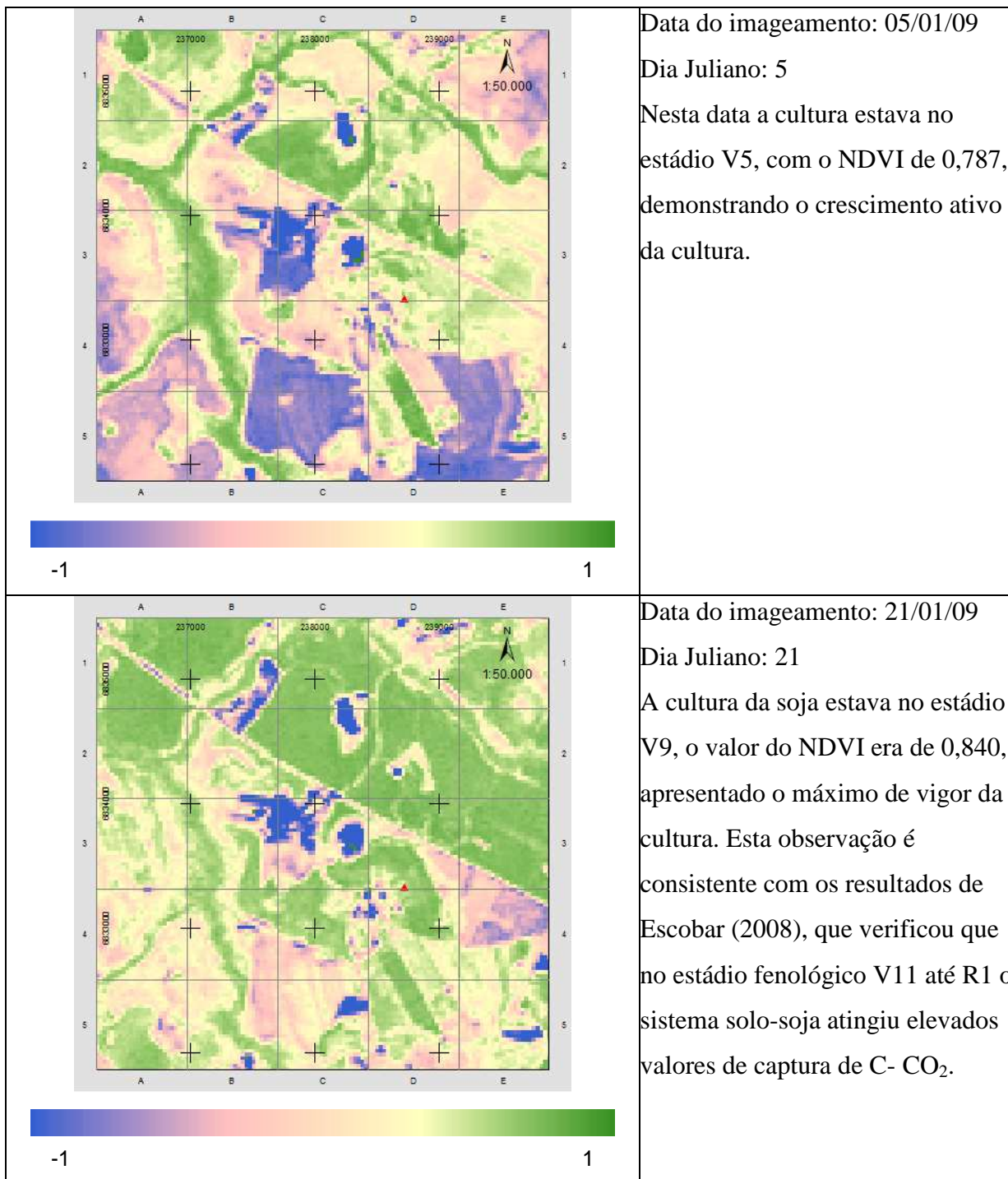


Figura 21. Dados fenológicos da cultura da soja na área experimental de 2008/2009.

Na Figura 22 são mostrados recortes das imagens de NDVI sobre a região de estudo para os cinco dias em análise. Para fins de localização, a estação micrometeorológica está representada por um triângulo vermelho nos limítrofes das quadriculas D3 e D4. Nestas figuras pode-se observar a fenologia da cultura como determinante dos valores de NDVI da lavoura experimental e arredores.

Pode-se observar que as áreas com matas, caracterizadas pela cor verde (altos valores), estão presentes em todas as imagens com um destaque mais acentuado nos dias 355 e 101, pois as lavouras nessas datas estão em fase inicial e final de ciclo, portanto com menor NDVI. Já no dia juliano 21 os altos valores estão disseminados em toda a imagem, caracterizando a presença predominante das lavouras. Nas datas de 05 e 85, as mesmas aparecem em tons suaves de verde, demonstrando as fases intermediárias. Os açudes estão representados pela cor azul (valores negativos de NDVI) e sua geometria peculiar, também estão contemplados em todas as imagens.





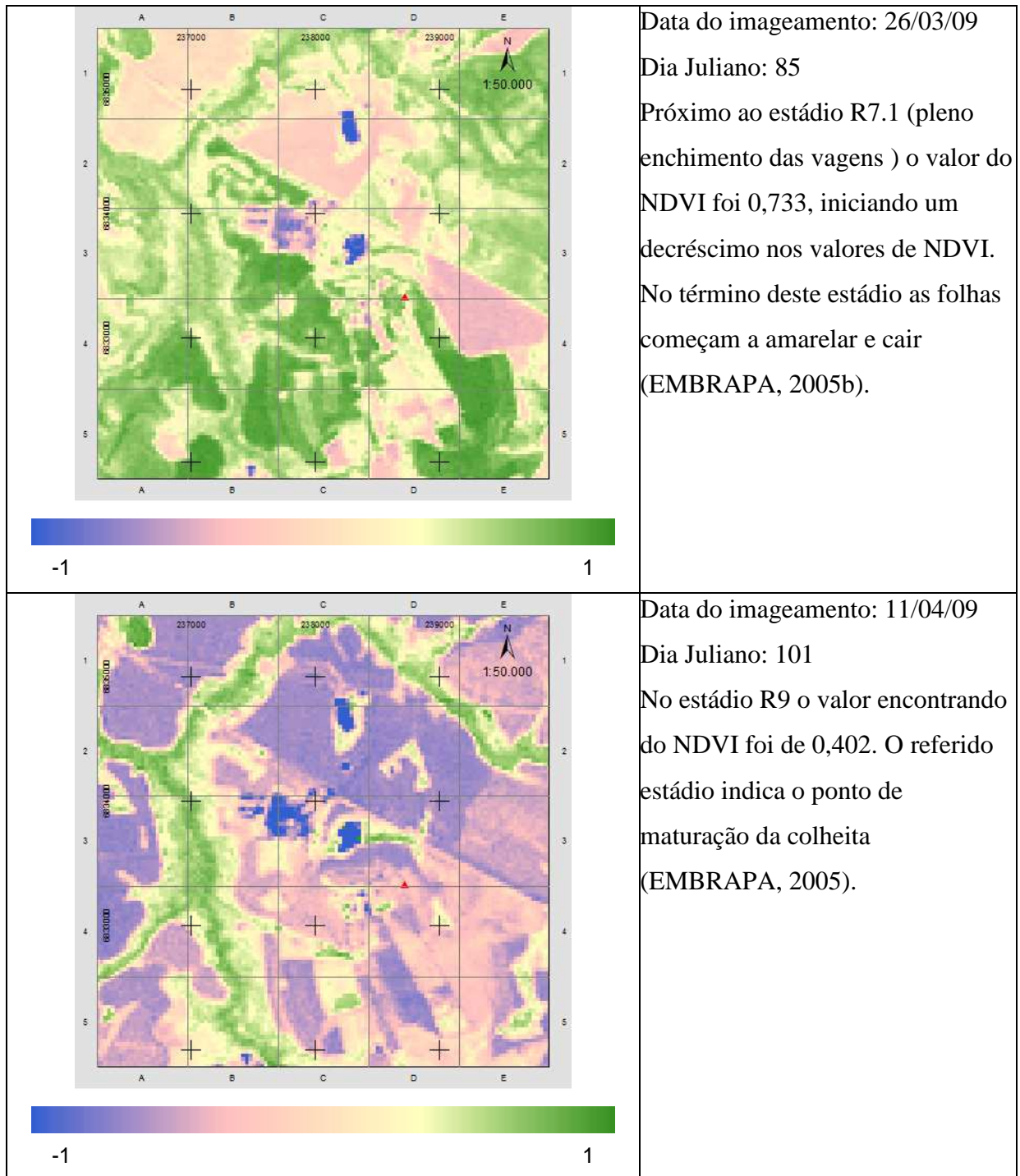


Figura 22. Relação do Índice de Vegetação por diferença normalizada (NDVI) e o ciclo fenológico da cultura da soja ao longo do período experimental de 2008/2009.

Baseado nas análises descritas na Figura 22 observa-se que ocorreu o esperado teoricamente. Com o desenvolvimento dos sucessivos estádios fenológicos da soja houve um aumento da biomassa até o estádio V9, quando alcançou o máximo valor do NDVI. Após o ápice - levando em conta as imagens disponíveis, inicia-se o declínio dos valores do NDVI, que acompanharam o ciclo evolutivo e o vigor da cultura.

4.1.4 Fluxo de Carbono

O padrão observado na lavoura de soja em estudo foi de um fluxo cíclico de CO_2 levando em consideração às 24 horas do dia (Figura 23). Durante o período diurno, o fluxo foi predominantemente negativo, significando assimilação do CO_2 atmosférico pela superfície e durante a noite o fluxo inverteu-se e tornou-se positivo, significando a emissão de CO_2 para atmosfera. Este é o padrão esperado e observado por outros autores (TANNUS, 2004, CARNEIRO, 2007 e ESCOBAR, 2008).

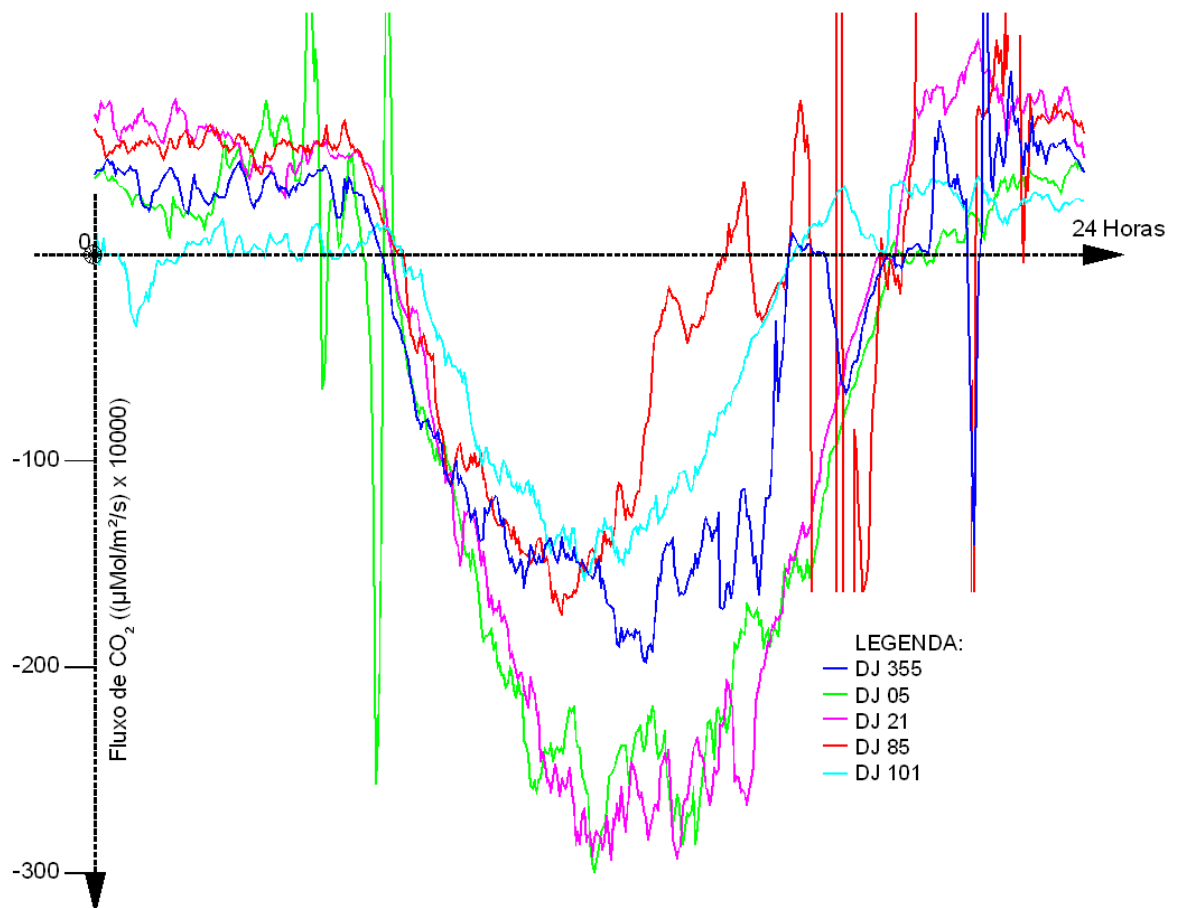


Figura 23. Variação do fluxo de CO_2 ao longo das 24 horas para os dias julianos 355, 05, 21, 85 e 101.

Portanto, no período diurno o fluxo negativo de CO_2 , durante todo o desenvolvimento da cultura, esteve associado ao aprisionando do CO_2 pelas plantas, através do processo fotossintético. No período noturno ocorre a liberação de CO_2 que é decorrente da respiração da planta e do solo, além disso, da decomposição heterotrófica (KUZUYAKOV, 2006). A Figura 24

ilustra a associação entre o aprisionamento de CO₂ atmosférico e a disponibilidade de radiação para o processo fotossintético, evidenciando a alta associação entre estas duas variáveis. A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) teve uma diminuição contínua ao longo dos dias de observação, o que é função da declinação solar. Já o fluxo de CO₂ foi determinado pela disponibilidade de radiação, mas modulado pelas condições da superfície, especialmente da densidade de biomassa. O valor mais elevado de fluxo negativo foi encontrado no dia 21/01/09, quando a cultura estava no estágio V9. Neste estágio, com todo o aparato fotossintético já desenvolvido e com alta disponibilidade de radiação solar, a planta de soja capturou a maior quantidade de CO₂ da atmosfera. O menor valor de fluxo de CO₂ observados no dia 355, apesar da alta radiação solar, foi decorrência de uma pequena quantidade de biomassa (estádio V2). Já nos dias 85 e 101 apesar da cultura se encontrar com alta biomassa, respectivamente, nos estádios R7.1 e R9, a disponibilidade de radiação era menor, determinando fluxos menores.

Em linhas gerais o fluxo de CO₂ apresentou um padrão diurno gradual, onde aumentou a partir do nascer do sol até o meio dia e decresceu no final da tarde. Nos dias 355 e 85, quando a radiação incidente sofreu alterações no final do dia, percebeu-se as mesmas oscilações também no fluxo de CO₂ (Figura 24), condizente com o estudo de Soegaard *et al.*, (2003), que estudou o fluxo de CO₂ em culturas de grãos na Dinamarca, verificando menores taxas em dias nublados.

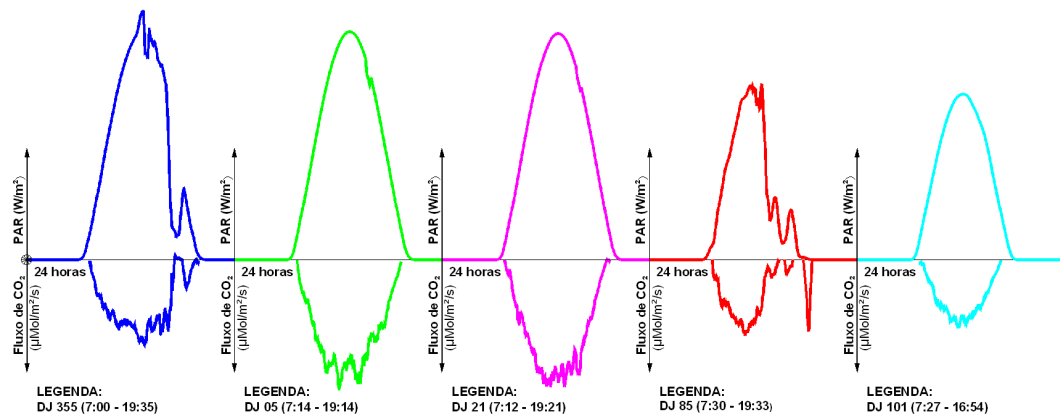


Figura 24 Variações da Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) e fluxo de CO₂ nos dias julianos 355, 05, 21, 85 e 101.

A diminuição do fluxo de CO₂ nos estádios fenológicos finais das culturas (figura 25) também foi observado por Carneiro (2007), que o autor associou à menor demanda de CO₂ devido ao início da senescência da cultura.

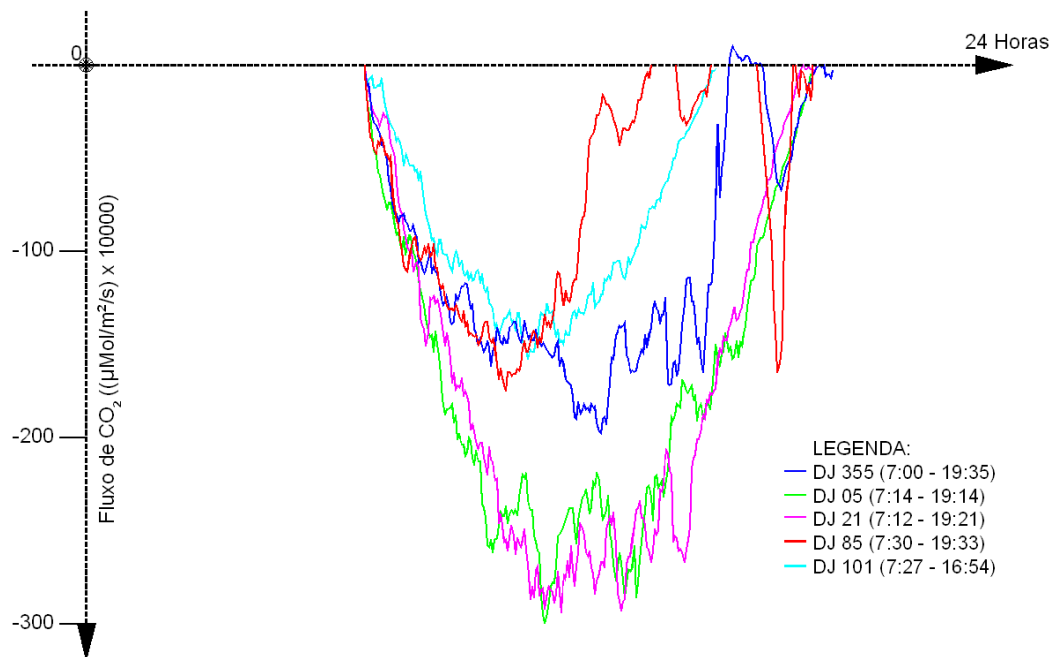


Figura 25 Fluxo negativo de CO₂ dos dias julianos 355, 05, 21, 85 e 101 coincidentes com a passagem do satélite Landsat.

4.1.5 Perfil Temporal do NDVI

Os perfis temporais do NDVI das áreas de soja conduzidas em plantio direto e convencional, assim como para uma mata de eucalipto próxima à área experimental podem ser observados nas Figuras 26, 27 e 28.

As áreas de soja são caracterizadas por baixos valores de NDVI no início da cultura, um gradativo aumento até chegar à etapa de máximo acúmulo da biomassa e novamente retornando a valores mais baixos na etapa de senescência, percorrendo todos os estádios de desenvolvimento. Evolução temporal do NDVI sobre áreas de soja similar a descrita pode ser encontrada em diversos trabalhos que utilizaram sensores com alta resolução temporal como o AVHRR/NOAA (JACÓBSEN *et al.*, 2003; MELO, 2003) ou MODIS/Terra (SANTOS, 2010). Neste trabalho, mesmo usando imagens Landsat, foi possível acompanhar a evolução da cultura, dada a disponibilidade de cinco imagens sem cobertura de nuvem, o que não é freqüente de ocorrer. O perfil temporal do NDVI (Figura 26) caracterizou o ciclo de desenvolvimento da soja e diferenciou os sistemas de manejos. Considerando as imagens

disponíveis, os maiores valores de NDVI ocorrem na data de 21/01/2009 (Dia Juliano 21) sob o plantio direto (PD) e no plantio convencional (PC) o maior valor de NDVI foi obtido em 26/03/2009 (Dia Juliano 85).

O perfil temporal do NDVI dos talhões cultivados com soja foi utilizado também como forma de avaliar a localização dos *pixels* da imagem Landsat na área experimental. Nesta etapa buscou-se, portanto, verificar a pureza do *pixel* de soja, ou seja, se o vetor dos talhões experimentais cultivados com a cultura da soja ao serem sobrepostos a imagem Landsat se localizavam somente sobre as áreas de soja, não havendo mistura com as áreas vizinhas, etapa designada como diagnóstico.

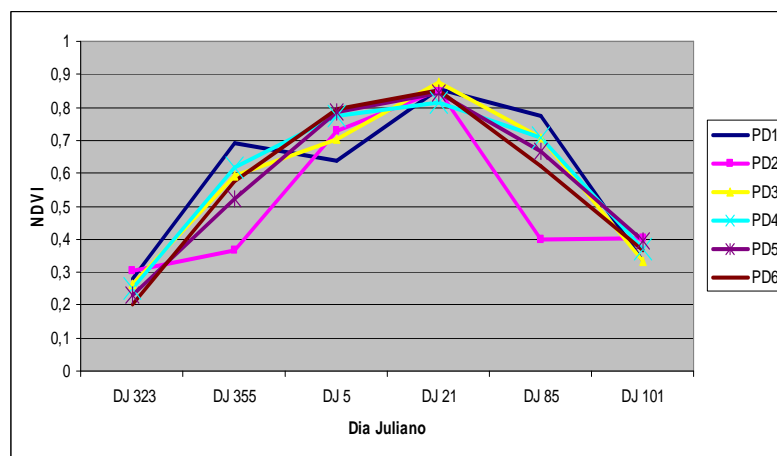


Figura 26. Perfil temporal do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) dos talhões de soja cultivados em plantio direto, nos dias 355, 05, 21, 85 e 101.

Nota-se que as curvas referentes aos talhões 1 e 2 fogem do padrão das demais, tanto em PD como em PC, o que pode ser decorrência do posicionamento dos *pixels* sobre estas parcelas, misturando no valor do NDVI da soja a influência de alvos vizinhos (campo).

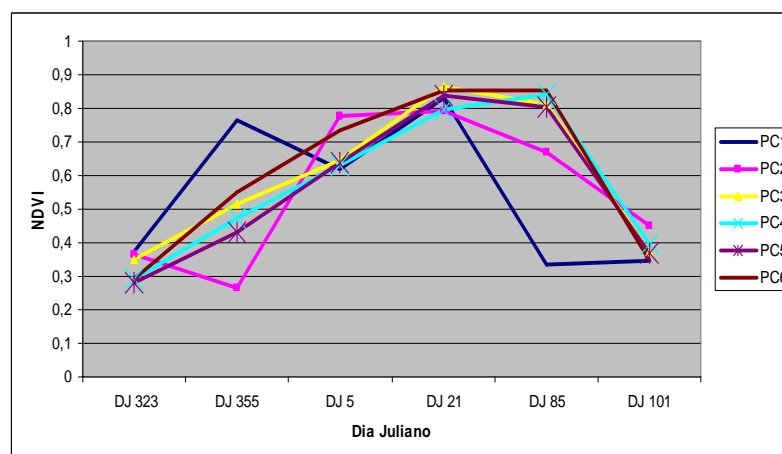


Figura 27. Perfil temporal do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) dos talhões de soja cultivados em plantio convencional, nos dias 355, 05, 21, 85 e 101.

O perfil do povoamento de eucalipto (Figura 28) apresentou um comportamento estável durante o período de análise, com valores em torno de 0,73. Como trata-se de uma espécie não decidual, comportamento homogêneo do NDVI reflete a estabilidade da biomassa.

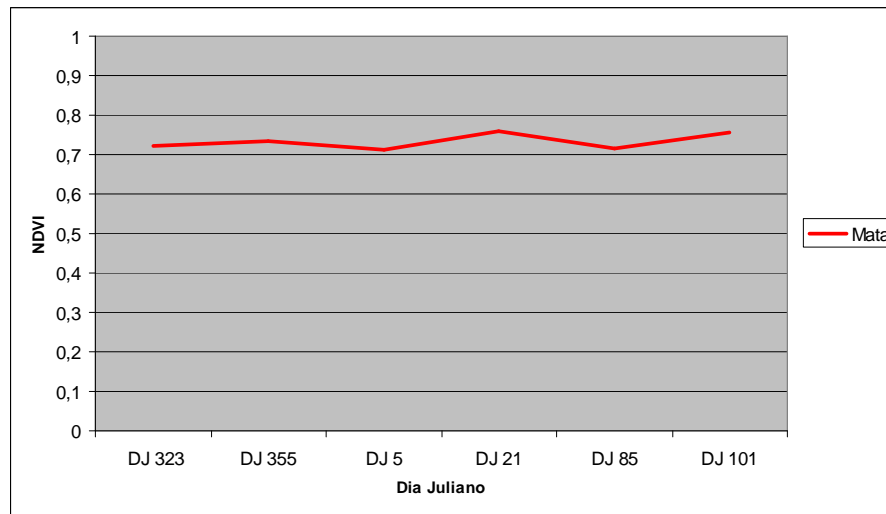


Figura 28. Perfil temporal do povoamento de eucalipto

4.2 ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE NDVI E FLUXO DE CO₂

Na Tabela 5 são apresentados os coeficientes de correlação obtidos entre o NDVI e os dados derivados da curva do fluxo de CO₂. Dado o pequeno número de pares de dados usados nesta análise (5), somente os coeficientes de correlação superiores a 0,7 são significativos a 90% de probabilidade.

Os coeficientes de correlações apresentaram valores negativos e positivos, oscilando entre um mínimo de -0,50633 e um máximo de 0,815136. Os valores negativos indicam uma relação inversa, o que é esperado já que quanto maior o valor do NDVI, maior a biomassa, maior a potencialidade de captura de CO₂ através do processo fotossintético, maior é a absorção de CO₂ (fluxo de CO₂ negativo) pela cultura de soja.

Correlações positivas ocorrem somente quando se utilizou a integração da curva (área), e o perímetro, as quais aliadas ao parâmetro “pico negativo”, foram as relações com coeficientes de correlação mais elevados e significativos estatisticamente.

Tabela 5 – Valores observados do Índice de Vegetação por diferença normalizada (NDVI) e dos parâmetros obtidos da curva de fluxo diário de CO₂ atmosférico para os dias julianos 355, 5, 21, 85 e 101 e os coeficientes de correlação entre NDVI e fluxo de CO₂.

Parâmetro	Fluxo de CO ₂ (μMolm ⁻² s ⁻¹)					Coeficiente de correlação
	DJ 355	DJ 5	DJ 21	DJ 85	DJ 101	
NDVI	0,5967	0,7877	0,8405	0,7337	0,4022	
Inst	-0,0192	-0,0234	-0,0261	-0,0089	-0,0133	-0,544
Inst MM	-0,01908	-0,02342	-0,0266	-0,00942	-0,01322	-0,573
Med 2h	-0,01717	-0,02488	-0,02693	-0,00811	-0,01288	-0,569
Med 2h MM	-0,01702	-0,02504	-0,02708	-0,00799	-0,01272	-0,575
Med negat	-0,01048	-0,01764	-0,01741	-0,0262	-0,00908	-0,654
Med negat MM	-0,01038	-0,01776	-0,01735	-0,02628	-0,00911	-0,650
Med 24 h	-0,00389	-0,00756	-0,00591	-0,01401	-0,00286	-0,506
Med 24 h MM	-0,00387	-0,00762	-0,00593	-0,01211	-0,00286	-0,576
Pico negat ²	-0,0198	-0,03	-0,0294	-0,0175	-0,0158	-0,785
Pico negat MM ²	-0,0192	-0,0294	-0,0288	-0,0167	-0,0153	-0,775
Área ^{1,2,3}	26572	42518	42484	18695	17254	0,757
Área MM ^{1,3}	5089	8491	8518	2993	3453	0,688
Perímetro ^{1,2,3}	1558	1701	1756	2199	890	0,815
Perímetro MM ^{1,2,3}	629	809	900	421	378	0,766

Inst – é o valor instantâneo do horário da passagem do Satélite (10:15h), Med 2h – é o valor da média de duas horas centrada no horário da passagem; Med negat – é a média de todo o período em que o fluxo é negativo; Med 24h – é a média das 24h; Área – é integração da curva do período em que o fluxo é negativo; Perímetro – é o perímetro da curva no período em que o fluxo é negativo; Pico negat – é o valor máximo de fluxo no período em que o fluxo é negativo.

MM em cada parâmetro representa o valor do mesmo obtido sobre a curva suavizada pela média móvel.

¹Valores multiplicados por 10000.

²Correlações significativas a 90% de probabilidade

³Obtidos da integração da curva do período em que o fluxo é negativo

Verifica-se nas Figuras 29 e 30, onde é mostrada a evolução temporal do NDVI e dos parâmetros retirados das curvas de fluxo de CO₂, que o ciclo fenológico contribuiu diretamente no comportamento das variáveis utilizados como bio-indicadores na relação com o fluxo de CO₂ e NDVI.

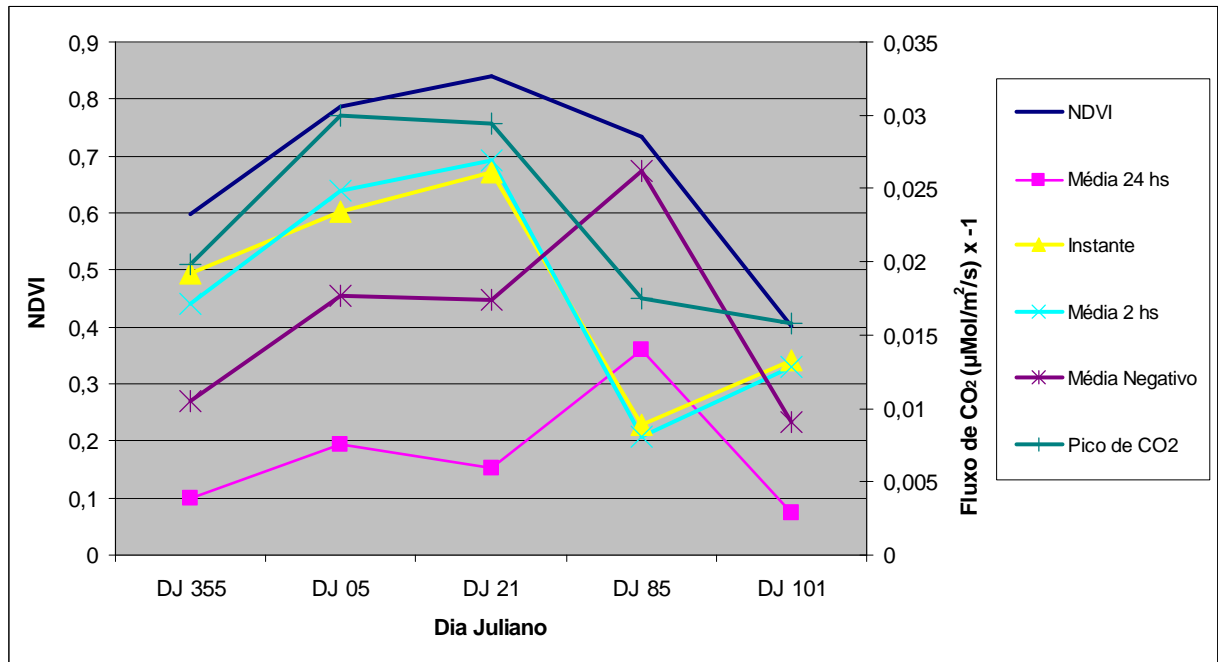


Figura 29. Evolução temporal do NDVI e dos parâmetros obtidos da curva do fluxo de CO₂: média das 24 horas, instante da passagem do satélite, media de 2 horas, médias do fluxo negativo e pico de CO₂, nos dias julianos 355, 5, 21, 85 e 101.

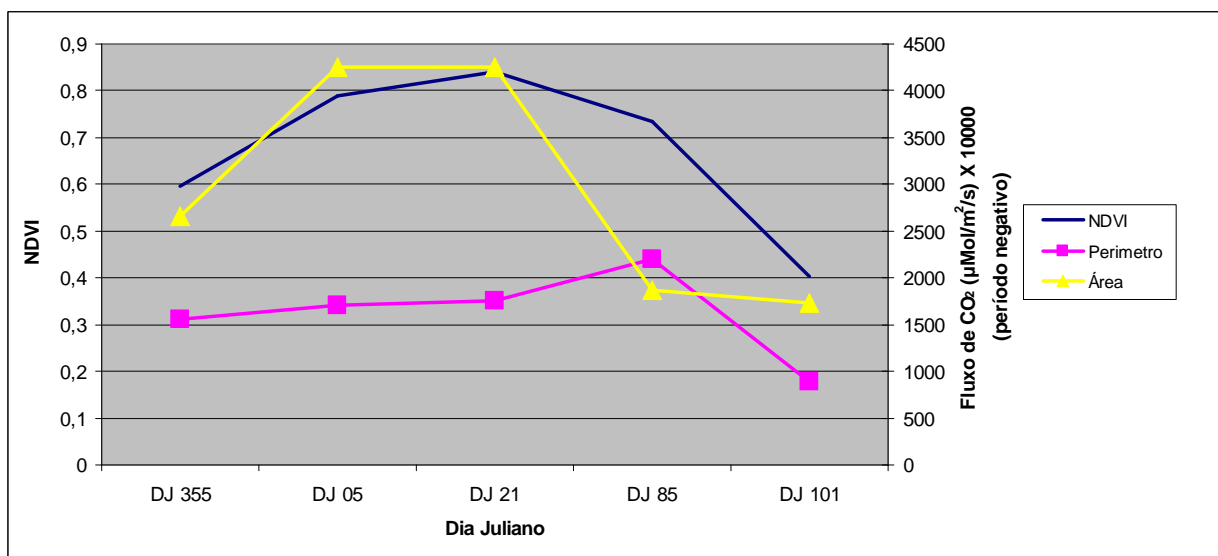


Figura 30. Evolução temporal do NDVI e dos parâmetros obtidos da curva do fluxo de CO₂: área e perímetro, nos dias julianos 355, 5, 21, 85 e 101.

Pode-se observar que as curvas temporais dos diferentes parâmetros obtidos da curva do CO₂ apresentaram suas particularidades. Os parâmetros designados por área e pico de CO₂, além de apresentarem coeficientes de correlação significativos, apresentaram, também, uma forma similar a da curva temporal do NDVI (Figura 30). Ambos parâmetros representam aparentemente de forma mais adequada à capacidade de absorção de CO₂ pela superfície, especialmente pela biomassa da cultura da soja, o que é adequadamente caracterizado pelo NDVI. Apesar do maior coeficiente de correlação ter sido obtido entre o NDVI e o perímetro da seção, o comportamento das curvas não foi coincidente e a explicação física da relação não é evidente.

Em todos os parâmetros avaliados observou-se que o dia 26/03/09 (DJ 85), foi caracterizado por um padrão distinto do esperado. Percebe-se que nesta data as condições micrometeorológicas apresentaram oscilações importantes, são elas:

- ❗ As 14:00h a radiação global cai menos da metade;
- ❗ As 16:30h ocorre variação na velocidade do vento de 1 para 5 m/s;
- ❗ Queda de temperatura do ar;
- ❗ Aumento de pressão atmosférica.

Dados esses que podem interferir na fisiologia das plantas ocasionando o fechamento dos estômatos. Também se deve considerar que em condições de experimentação de campo, os sensores da torre estão expostos a situações que podem em certas circunstâncias alterar as medições como, por exemplo, insetos, partículas d'água, etc...

É importante salientar que se no DJ85 tivesse sido observada uma evolução diária do fluxo de CO₂ semelhante a dos demais dias de observação os valores de correlação seriam bem maiores, podendo levar a equivocada conclusão de que o fluxo de CO₂ é determinado basicamente pela densidade de biomassa na superfície. Este dia, portanto, é extremamente didático, visto que ele explicita a influência de outros fatores do ambiente como a radiação fotossinteticamente ativa na determinação da magnitude do fluxo de CO₂, além da biomassa.

Na Figura 31 é representada a superfície de carbono, a qual integra todas as variáveis implicadas no estudo da absorção de carbono. Pode-se observar que o fluxo de CO₂ atingiu os maiores valores (cor verde na figura) quando ocorreu o máximo de disponibilidade de energia e o máximo de capacidade de absorção pela superfície.

No que tange a radiação solar, nota-se, como é esperado, que quanto mais próximo do meio dia, maiores são os valores de assimilação de carbono. No estágio vegetativo também ocorre o mesmo, pois é quando a cultura está construindo o aparelho fotossintético.

Nota-se que no estádio R7.1 com incidência solar mais fraca acarreta valores mais baixos de CO₂, somando-se a isso a possibilidade da presença de nuvens, menores valores foram encontrados.

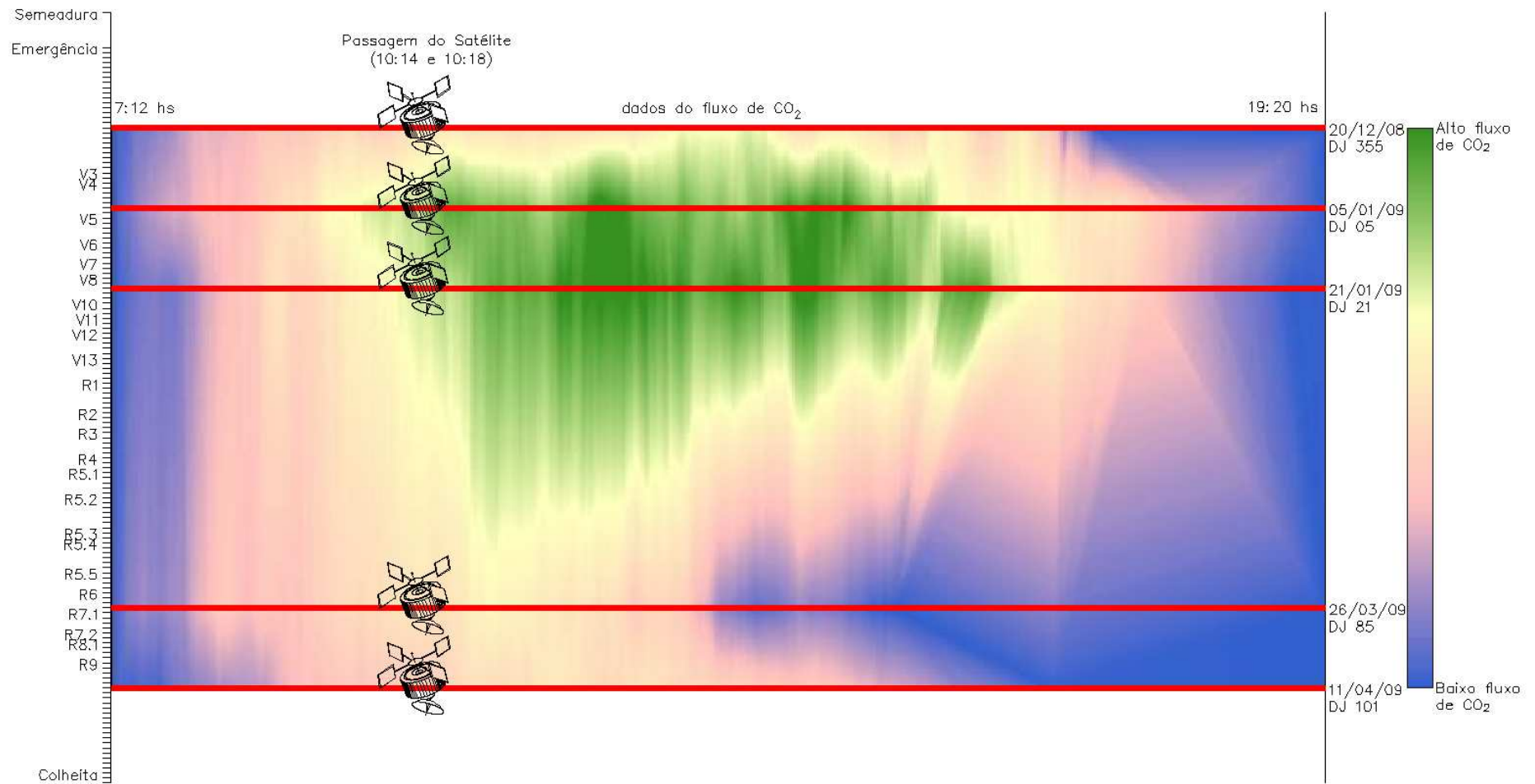


Figura 31. Superfície de fluxo de carbono para a cultura da soja no período experimental de 2008/09.

5 CONCLUSÕES

Através de experimentos com torres micrometeorológicas é possível estudar os fluxos de CO₂ entre a superfície e a atmosfera, quantificando o comportamento cíclico do fluxo de CO₂ ao longo do dia, com valores negativos (captura) no período diurno e no período noturno, positivos (liberação).

Considerando todo o ciclo de crescimento da cultura, a lavoura de soja funciona como seqüestradora de CO₂ atmosférico.

A radiação fotossinteticamente ativa determina a magnitude do aprisionamento de CO₂ pela cultura da soja, mas o fluxo é modulado pelo estágio fenológico da cultura.

A atividade fotossintética das plantas de soja é maior durante o estágio vegetativo, quando coincide a maior incidência de radiação solar e o maior aparato fotossintético.

O NDVI, obtido de imagens Landsat, é um indicador da evolução temporal da soja ao longo do ciclo; apresenta baixos valores no início do ciclo, cresce gradualmente até um máximo de biomassa e decresce com o término do ciclo da cultura.

Existe correlação entre o NDVI e os fluxos negativos de CO₂ (captura), ocorridos no período diurno. Portanto, técnicas de sensoriamento remoto demonstram potencialidade na geração de informações úteis sobre as trocas de CO₂ entre a superfície e a atmosfera.

Recomenda-se o seguimento das pesquisas nesta área, buscando através do uso de imagens de satélite mapear as trocas de CO₂ entre a superfície e o ar. Para tanto, é necessário acumular um banco de dados maior de imagens coincidentes com medições em superfície sobre diferentes tipos de culturas e em diversas épocas do ano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, T.S. **Respostas espectrais da soja sob diferentes condições hídricas e de preparo do solo**. 2008. 100f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

ALVARES Filho, A. Botânica e desenvolvimento. In: Santos, O.S. (Ed). **A Cultura da soja – 1**. Rio de Janeiro: Editora Globo, 1988. p. 25-35.

ANDRADE, V.M.S.; SILVA, M.A.V.; COSTA, J.M.N.; OLIVEIRA, E.C.; MALHI, Y. Variação dos Fluxos de CO₂ e da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) em ecossistema de manguezal amazônico na região de Bragança, PA. WORKSHOP BRASILEIRO DE MICROMETEOROLOGIA, 5., 2009, Santa Maria. [Anais...] [Santa Maria], 2009. Ciência e Natura Especial. p.121-124.

BANNARI, A. Morin, D.; BONN, F.; HUETE, A. R. A review of vegetation indices. **Remote Sensing Reviews**. Lausanne, v.13, p. 95-120, 1995.

BARBOSA, K.M.N. **Monitoramento espacial de biomassa carbono orgânico da vegetação herbácea de várzea na Amazônia Central**. 2006. 131f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

CAMPBELL, G.S.; NORMAN, J.M. **An introduction to environmental biophysics**. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1998. 286 p.

CARNEIRO, J.V. **Fluxos Turbulentos de CO₂ em uma Área de Arroz Irrigado no RS**. 2007. Tese (Mestrado em Física) – Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2007.

CENTENO, J.A.S. **Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens Digitais**. Curitiba: UFPR, 2003. 219 p.

CIAIS, P.; TANS, P. P.; TROLIER, M.; WHITE, J. W. C.; FRANCEY, R. J. A large northern hemisphere terrestrial CO₂ sink indicated by 13C/12C of atmospheric CO₂. **Science**, [Washington], v.269, 1995. p.1098-1102.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, sétimo levantamento, abril/2010.** Brasília, 2010. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: maio 2010.

CREPANI, E. **Princípios básicos de sensoriamento remoto.** São José dos Campos: CNPQ/INPE, 1993. 45p.

CUNHA, G.R.; BARNI, A.N.; HASS, J.C.; MALUF, J.R.T.; MATZENAUER, R.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M.B.M.; PIRES, J.L.F. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, p. 446-459, 2001.

DESSLER, A. E., Z. Zhang, and P. Yang (2008), Water-vapor climate feedback inferred from climate fluctuations, 2003–2008, **Geophys. Res. Lett.**, 35, L20704, doi:10.1029, 2008.

EASTMAN, J.R. **Idrisi Kilimanjaro – Guide to GIS and Image Processing.** Clark Laboratory. Clark Labs, Clark university, Worcester/MA. USA, 2003. 328p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Projetos.** Brasília, 2010. Disponível em: <<http://www.cnpma.embrapa.br/projetos/index.php3?sec=agrog:::81>>. Acessado em: março. 2010.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Soja.** Brasília, 2004. Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br/>> Acessado em: maio. 2010.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2009. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/index.php?op_page=22&il> Acessado em: fevereiro. 2010.

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Eficiência de soja cultivada em modelos de produção sob sistema plantio direto.** EMBRAPA Trigo. Passo Fundo, RS., 248p., 2005b.

EIPHANIO, J.C.N.; ALMEIDA JÚNIOR, A.C.; FORMAGGIO, A.R. Desenvolvimento do trigo avaliado com dois índices de vegetação. [CD-ROM] In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., 1996, Salvador. [Anais...] [São Paulo], 1996 Imagem Multimídia.

ESCOBAR, L.S. **Emissão de gases de efeito estufa em sistemas de manejo em solo do planalto médio do Rio Grande do Sul.** 2008. 104f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. F.; NEUMAIER, N.; OYA, T. Ecofisiologia. In: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). **A cultura da soja no Brasil**. CD-ROM, Londrina: Embrapa Soja, 2000.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. Stages of soybean development. Ames: Iowa State University of Science and Technology (**Special Report, 80**), 12 p, 1977.

FISCH, G. **Camada Limite Amazônica: aspectos observacionais e de modelagem**. 1995. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 1995.

FONTANA, D.C. **Índice de vegetação global para o monitoramento da vegetação e sua correlação com elementos agrometeorológicos e rendimento de grãos de soja**. 1995. 133f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

FONTANA, D.C. *et al.* Modelo de estimativa de rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n. 3, p. 399-403, 2001.

FÓRUM BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS: guia de informação, 2002, Brasília. Tradução: Thiago Costa Serra. [**Anais...**] [Brasília], 2002. Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas, 1. ed. 116p.

FRANK, A.B.; LIEBIG, M.A.; TANAKA, D.L. Management effects on soil CO₂ efflux in northern semiarid grassland and cropland. **Soil & Tillage Research**, v.89, p.78–85, 2006.

GOLDEMBERG, J. **Energia, meio ambiente e Desenvolvimento**. Trad. André Koch, São Paulo: Edusp, 1998. 233p.

GRACE, J. *et al.* Carbon dioxide uptake by undisturbed tropical rain forest in southwest Amazonia, 1992 to 1993. **Science**, v.270, p. 777-780, 1995.

HOUGHTON, R. A.; HACKLER, J. L.; LAWRENCE, K. T. The U.S. Carbon Budget: Contributions from Land-Use Change. **Science**, v.285, p. 574-578, 1999.

ITEP. Instituto de Tecnologia de Pernambuco. **Monitoramento de CO₂**. Disponível em: http://www.itep.br/noticias_ler.asp?codigo_conteudo=1778> acessado em: março. 2010.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Mudanças Ambientais Globais**. Disponível em: <http://www6.cptec.inpe.br/~grupoweb/Educacional/MACA_MAG/>. Acessado em: janeiro 2010.

InSpec, ACORN 4.0 User`s Guide, Boulder: Analytical Imaging and Geophysics, LLC, 2002. 76p.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climatic Change 2007: Synthesis Report**. Pachauri, R.K.; Reisinger, A. (Eds.). Geneva, Switzerland, 2007. 104p.

JACÓBSEN, L. O.; FONTANA, D. C.; SHIMABUKURO, Y. E. Alterações na vegetação em macrozonas do Rio Grande do Sul associadas a eventos El Niño e La Niña, usando imagens NOAA. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. , v.11, p.361 - 374, 2003.

JARVIS, P. G.; MASSHERDER, J. M.; HALE, S. E.; MONCRIEFF, J. B.; RAYMENT, M.; SCOTT, S. L. Seasonal variation of carbon dioxide, water vapor, and energy exchanges of a boreal black spruce forest. **Journal of Geophysical Research**, v.102, p. 28953-28966, 1997.

JENSEN, J.R., 1949 – **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres** / Tradução José Carlos Neves Epiphânio (coordenador) [et.al.]. – São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009. 597p.

JOHANNSEN, C.J.; WHITNEY, P. Using Remote Sensing in State and Local Government: Information for Management and Decision Making, **ESRI Users Conference**, San Diego, CA, v.1076, p.6, 2003.

JOHNSON, J.M.F.; REICOSKY, D.C.; ALLMARAS, R.R.; SAUER, T.J.; VENTEREA, R.T.; DELL, C.J. Greenhouse gas contributions and mitigation potential of agriculture in the central USA. **Soil & Tillage Research**, 83, p. 73–94, 2005.

KUZYAKOV, Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. **ELSEVIER – Soil Biology & Biochemistry** 38, p. 425-448, 2006.

LEAL, L.S.M. **Variação sazonal do fluxo e da concentração de CO₂ na região leste da floresta Amazônica-PA**. 2000. 58f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola). Programa de Pós Graduação em Meteorologia Agrícola. Universidade de Viçosa. Viçosa, 2000.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 3 ed. John Wiley e Sons. Inc. New York, 1995.

LUIZ, S.; OLIVEIRA, C.G.; OKIDA, R. **Comparação entre diferentes métodos de correção geométrica em imagem radarsat-1 no flona Tapajós**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 2003. Belo Horizonte. [Anais...], [Belo Horizonte]: INPE, 2003. p. 325-332.

MACHADO, H.M.; **Determinação da biomassa de cana-de-açúcar considerando a variação espacial de dados espectrais do satélite Landsat 7 – ETM+**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2003.

MALHI, Y.; NOBRE, A. D.; GRACE, J.; KRUIJT, B.; PEREIRA, A. C.; SCOTT, S. Carbon dioxide transfer over a central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**, v.31, p. 31593-31612, 1998.

MATTHEW, M. W. Adler-Golden, S.M. BERK, A. RICHTSMEIER, S.C. LEVINE, R.Y. BERNSTEIN, L.S. ACHARYA, P.K. ANDERSON, G.P. FELDE, G.W. HOKE, M.P. RATKOWSKI, A. BURKE, H.H. KAISER, R.D. MILLER, D.P. Status of Atmospheric Correction Using a MODTRAN4-based Algorithm, **SPIE Proc. Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VI**, v.4049, p. 199-207, 2000.

MELILLO, J. M.; MCGUIRE, A. D.; KICKLIGHTER, D. W.; MOORE III, B.; VÖRÖSMARTY, C. J.; SCHLOSS, A. L. Global climate change and terrestrial net primary production. **Nature**, v.363, p. 234-240, 1993.

MELO, R. W. **Modelo agrometeorológico-espectral de estimativa do rendimento da soja para o estado do Rio Grande do Sul**. 2003. 71f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) Programa de Pós Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

MENOSSO, O. G. Descrição Botânica. In: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). **A cultura da soja no Brasil**. CD-ROM, Londrina: Embrapa Soja, 2000.

MORAES, O.L. *et al.* Fluxos turbulentos: o diálogo entre a superfície e a atmosfera. **Ciência & Ambiente**, n.34, p.115-135, 2007.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 3. ed. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005. 320p.

MUDANÇA DO CLIMA. **Cadernos NAE**, n.3, Brasília, 2005. Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, Brasília, 2005. 250p.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. 2010. **Orbiting Carbon Observatory Mission Overview**. Disponível em: http://www.nasa.gov/mission_pages/oco/mission/index.html>. Acesso em: abril. 2010.

NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L.; FARIAS, J.R.B. **Estádios de desenvolvimento da cultura de soja**. In: BONATO, E.R. (Ed.). Estresses em soja. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 2000. p. 19-44.

PAULA, M. D DE; FILHO, W. P. Estimativa de Carbono em um Fragmento de Floresta Madura na Mata Atlântica Nordestina com o Uso de Índices Espectrais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, (SBSR), 2009. Natal. **Anais...**, Natal: INPE, 2009. p. 2881-2888.

PCI Geomatics, OESE OrthoEngine Satellite Edition Version 8.2 **The User's Manual**, Richmond Hill, Canada, 2001.

PEDRINI, H. **Análise de Imagens Digitais: princípios, algoritmos e aplicações**. São Paulo: Editora THOMSON, 2008. 508p.

PONZONI, F. J. **Comportamento Espectral da Vegetação. Sensoriamento remoto reflectância dos alvos naturais**. Brasília: Universidade de Brasília - UNB, 2001. p. 157-199.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos, SP, Editora Parentese, 2007. 126p.

RAICH, J. W. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. **Tellus**, 44B, p. 81-99, 1992.

RICHARDS, J. A.. **Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction**. New York, Springer Verlag, 1986. 281p.

ROBERTI, D. R., MORAES, O. L. L., AMADO, T. J. C., FIORIN, J. E., JACQUES, R. J. S., TEICHRIEB C. A., ZIMERMANN, H. R., 2011. Net carbon flux in a subtropical no-tillage soybean/black oat succession in southern Brazil. Submitted to **Journal Geophysical Research** – Biogeophysical

RODHE, H.; CHARSON, R.; CRAWFORD, E. Svante Arrhenius and the greenhouse effect. **Ambio**. v.1, p. 2-5, 1997.

ROUSE J. W.; HAAS Jr, R. H.; SCHELL J. A., D. W. DEERING, Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In. NASA ERTS SYMPOSIUM, 3, 1973. Maryland. [Anais...] Washington, D.C.: NASA, v.1, p.309-317, 1973.

RUDDIMAN, W. F. How did Humans First Alter Global Climate?. **Scientific American, Inc.**, p. 46 – 56, 2005.

SANTOS, E.O. **Contribuição ao estudo do fluxo de dióxido de Carbono dentro da Floresta Amazônica.** 1999. 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 1999.

SANTOS, S.N.M. **Modelo de fluxos de energia, água e CO₂ aplicado em ecossistema de floresta tropical.** 2001. 116f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Programa de Pós Graduação em Meteorologia Agrícola).Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2001.

SCHIMMEL, D. S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. **Global Change Biology**, v.1, p. 77-91, 1995.

SOEGAARD, H.; JENSEN, N.O.; BOEGH, E.; HASAGER, C.B.; SCHELDE, K.; THOMSEN, A. Carbon dioxide exchange over agricultural landscape using eddy correlation and footprint modelling. **Agricultural and Forest Meteorology**, 114. p. 153–173, 2003.

STULL, R.B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology.** Dordrecht, NL: Kluwer Academic Press, 1988.

SYVERTSEN, J.P.; LLOYD, J.J. Citrus. In: SCHAFFER, B.; ANDERSEN, P.C. (Ed.). **Handbook of environmental physiology of fruit crops.** Boca Raton: CRC, v.2, p. 65-99, 1994.

TANNUS, R. N. **Funcionalidade e sazonalidade sobre Cerrado e sobre ecótono FlorestaCerrado: uma investigação com dados micrometeorológicos de energia e CO₂.** 2004. 92f. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, New York, 8(2), 127-150p, 1979.

UNESCO/IHA. **Measurement specification guidance for evaluating the GHG status of man-made freshwater reservoirs,** 2009

VAREJÃO Silva, M.A. **Meteorologia e Climatologia**. Brasília: INMET, 2001.

VERMONT, E. F.; EL SALEOUS, N. Z.; JUSTICE, C. O. Atmospheric Correction of Modis data in the visible to middle infrared: first results, **Remote Sensing of Environment**, 83, p. 97-111, 2002.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C.R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucária utilizando imagens do Satélite Ikonos II. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 169-181, abr.-jun., 2009.

WIEGAND, C.L.; RICHARDSON, A.J.; ESCOBAR, D.E.; GERBERMAN, A.H. Vegetation indices in crop assessments. **Remote Sensing of Environment**, New York, 35(2): 105-119, 1991.

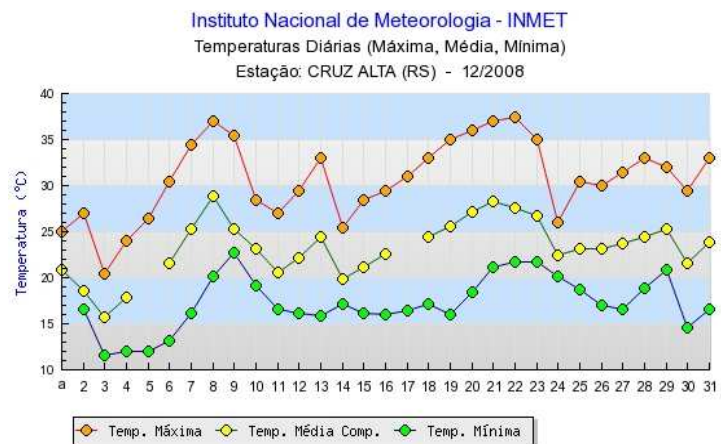
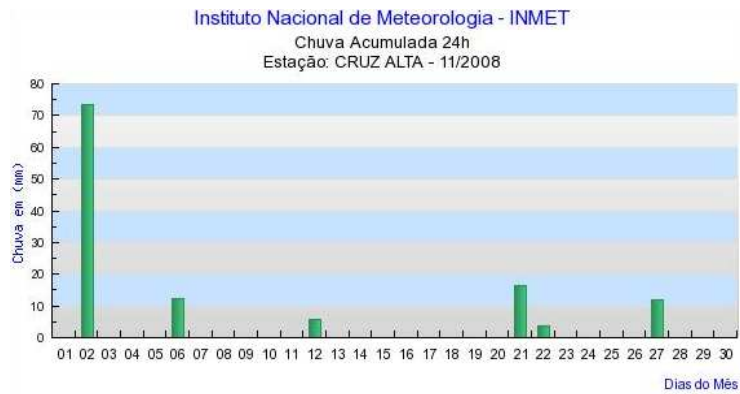
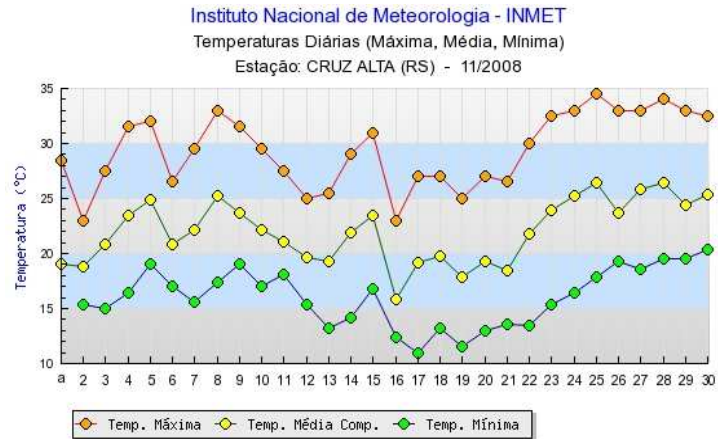
YORINORI, J. T. **Cancro da haste da soja: epidemiologia e controle**. Londrina: EMBRAPA-CNPQ (EMBRAPA-CNPQ. Circular Técnica, 14), 75p, 1996.

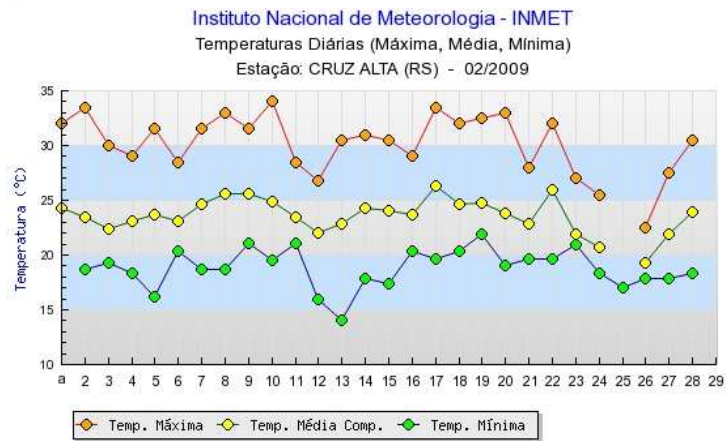
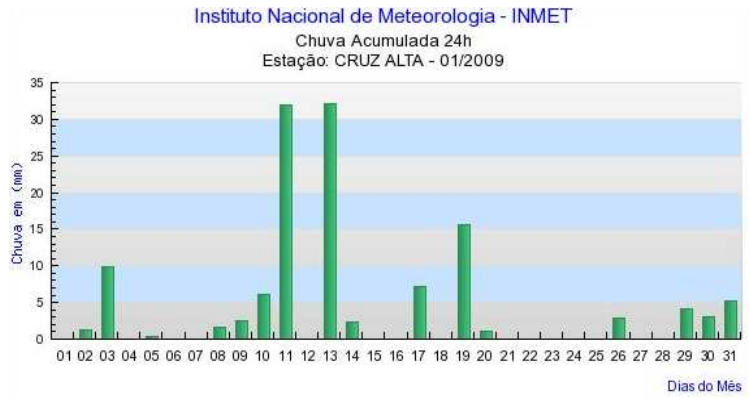
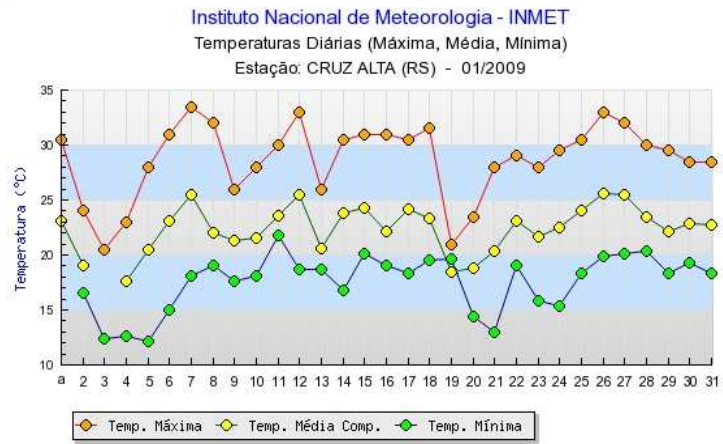
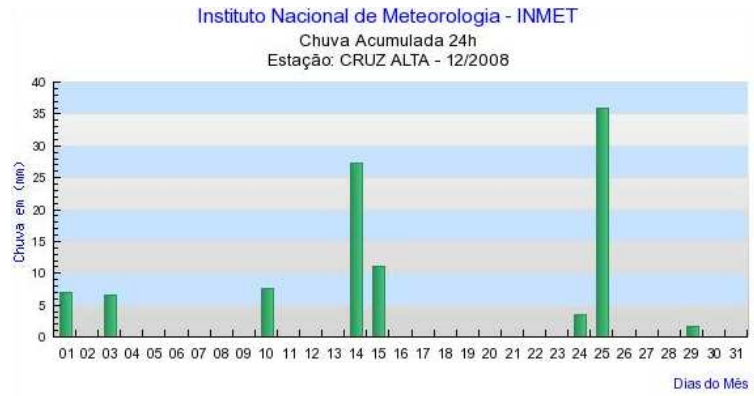
ZABOT, L. **Caracterização agrônômica de cultivares transgênicas de soja cultivadas no Rio Grande do Sul**. 2009. 280f. Tese (Doutorado em Agronomia). Programa de Pós Graduação em Agronomia. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

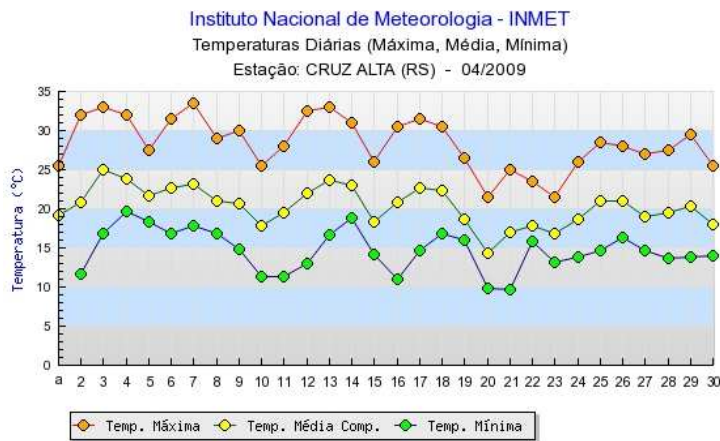
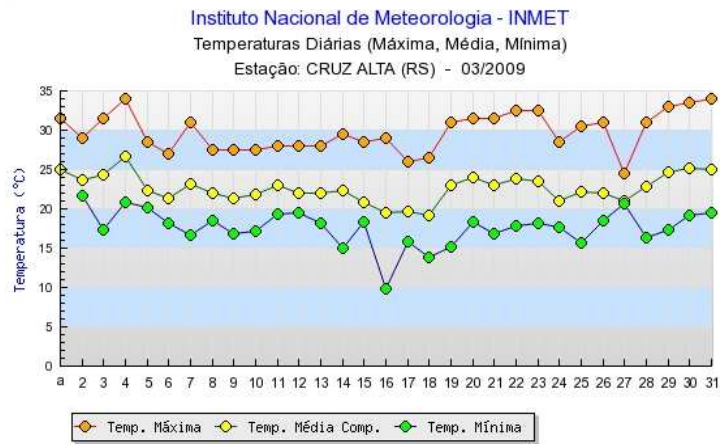
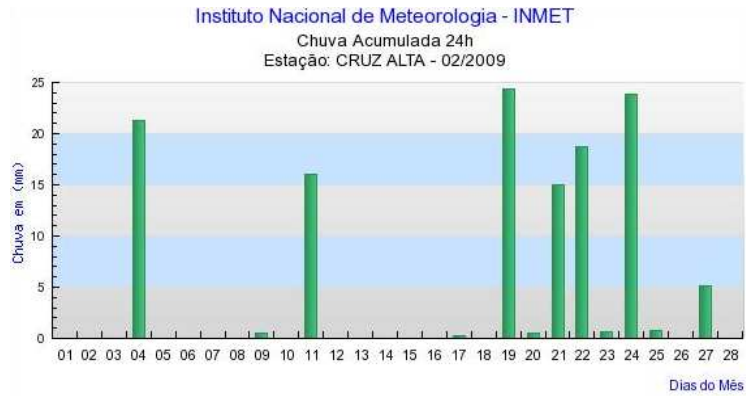
ZULLO, J.R. **Correção atmosférica de imagens de satélite e aplicações**. 1994. 204f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

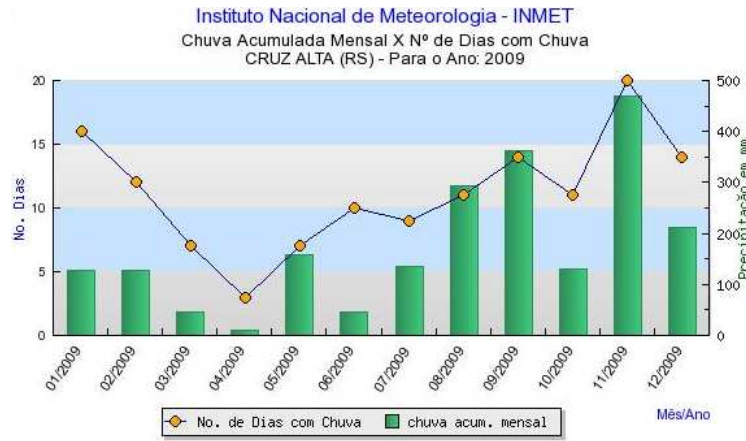
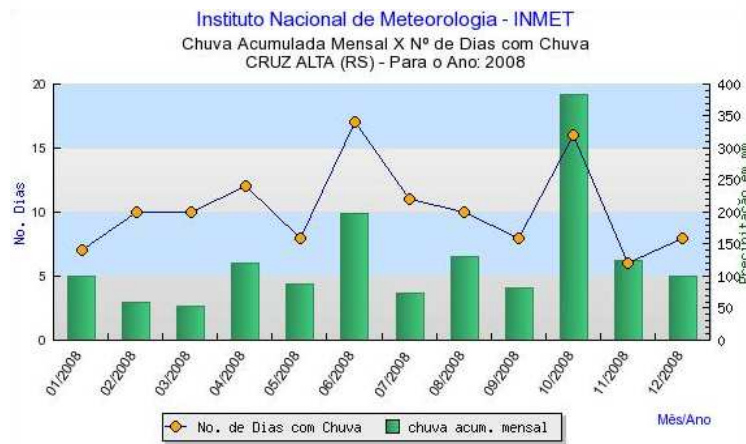
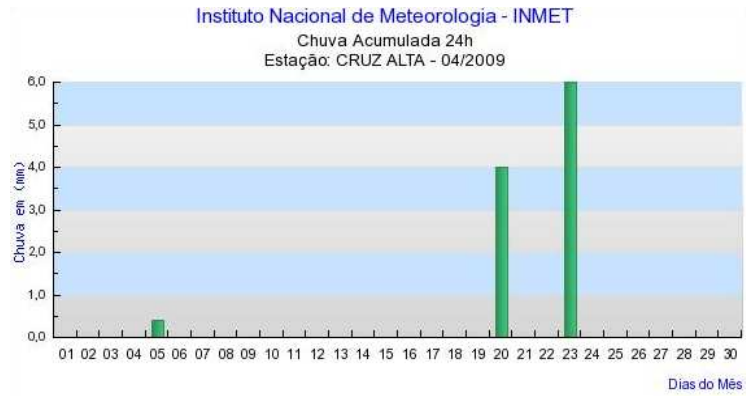
ANEXO 1

Dados de temperatura do ar, insolação, umidade relativa do ar e precipitação pluvial durante o período de avaliação, para a Estação Cruz Alta



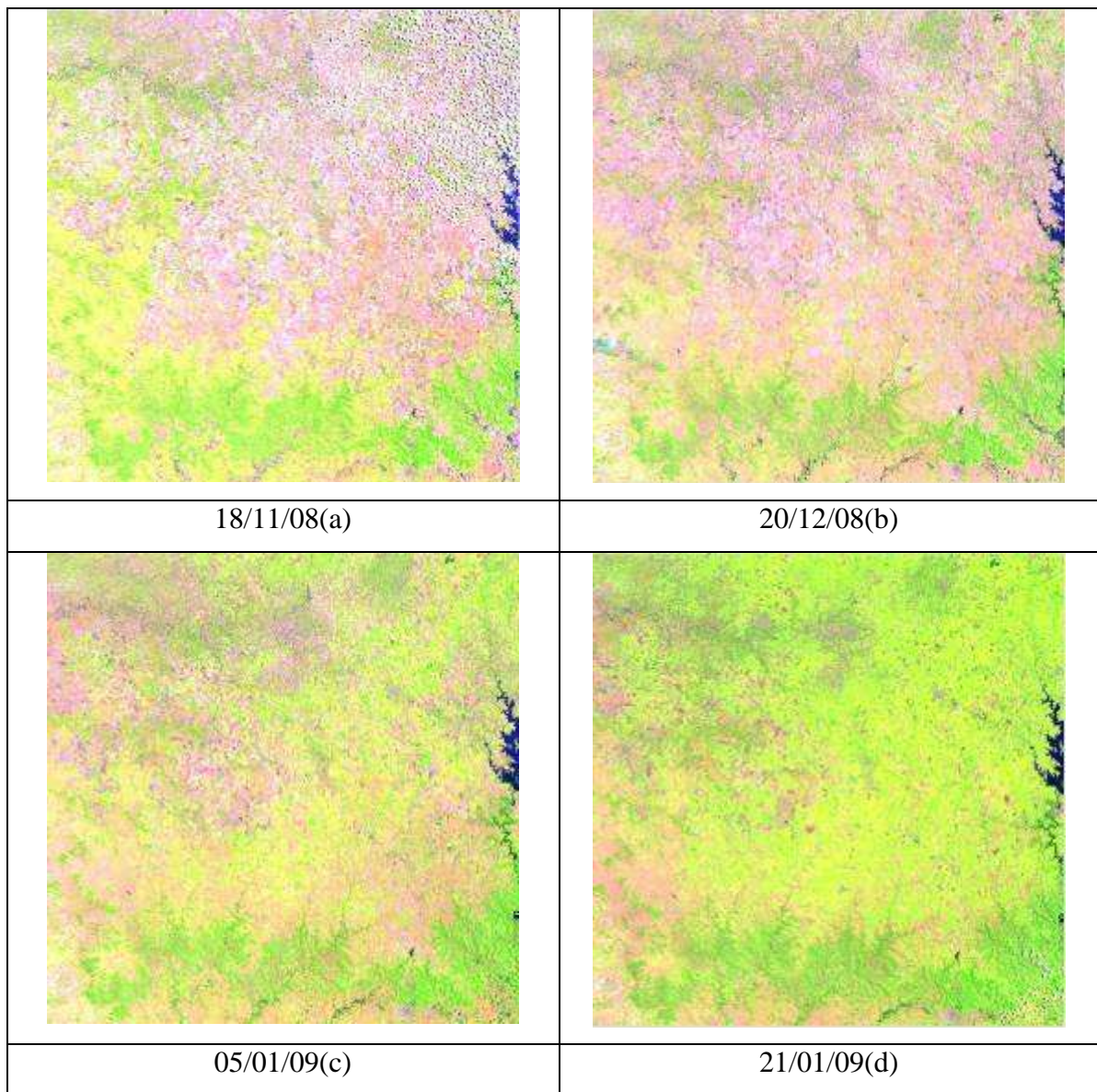


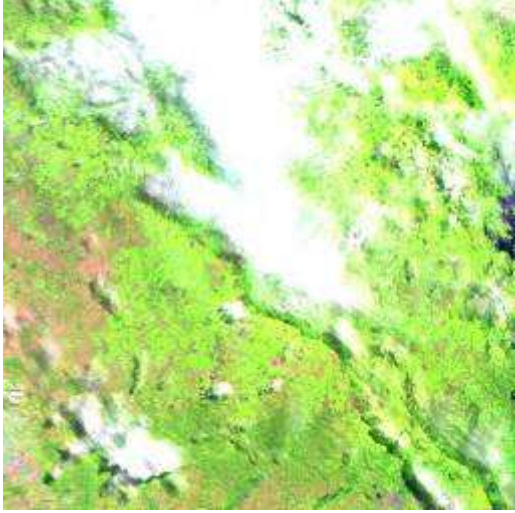
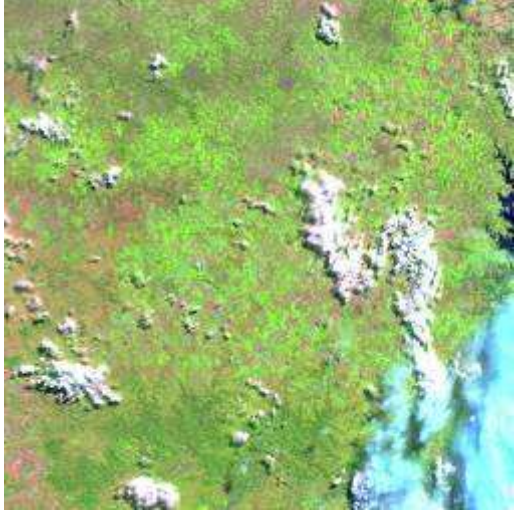

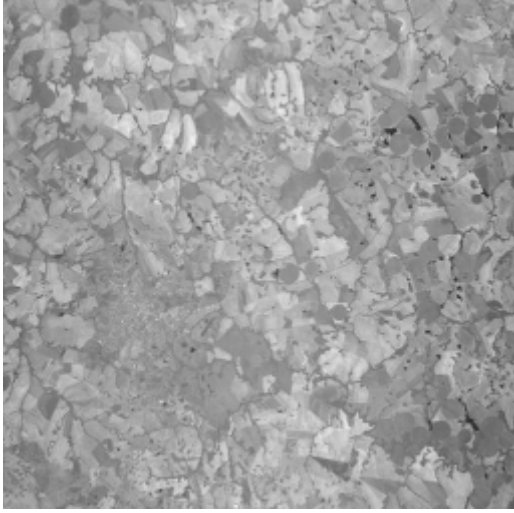




ANEXO 2

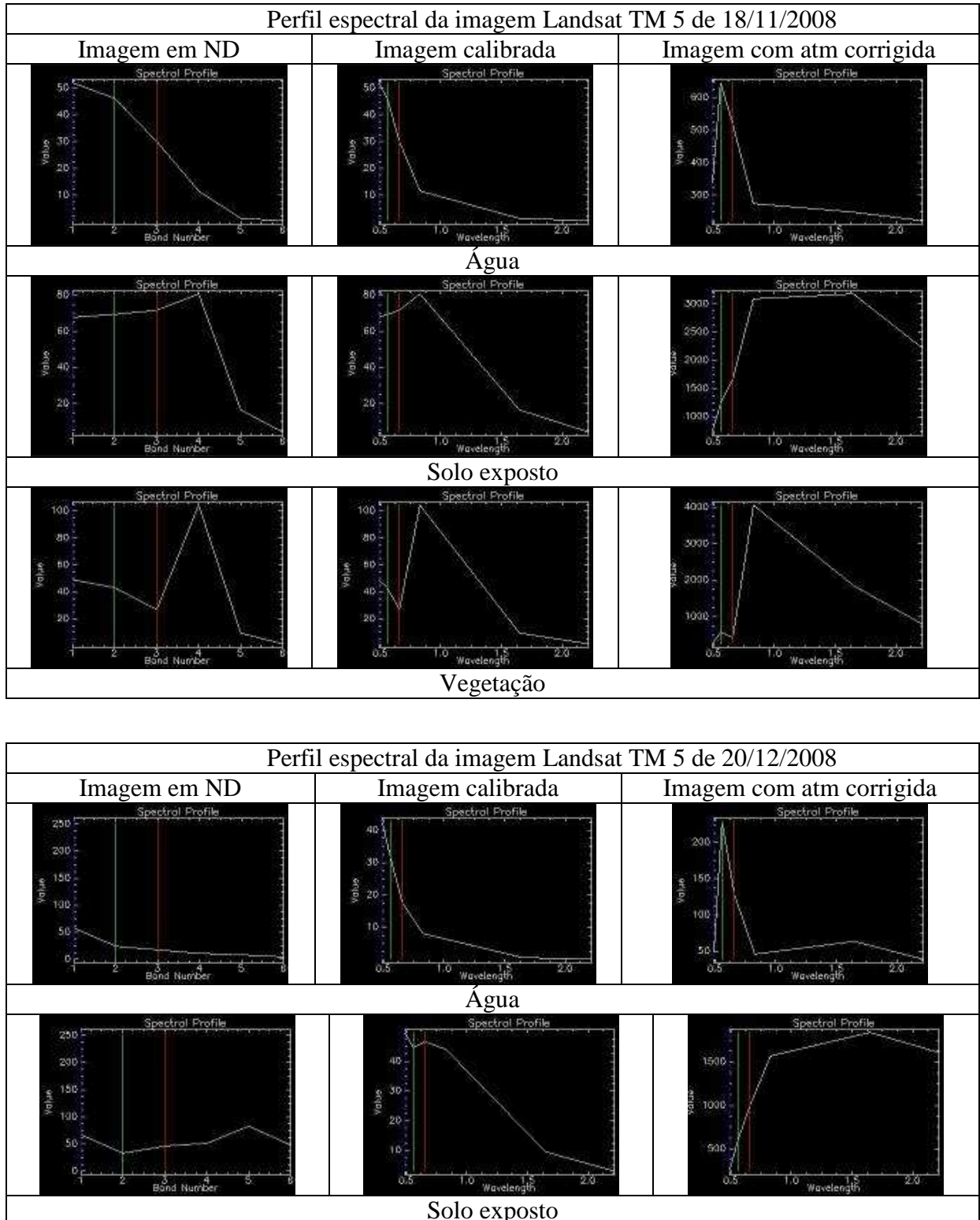
Imagens disponíveis do satélite Landsat TM 5, órbita/ponto 223/080 e do satélite CBERS 2B instrumento HRC, órbita/ponto 160_D/132_3.

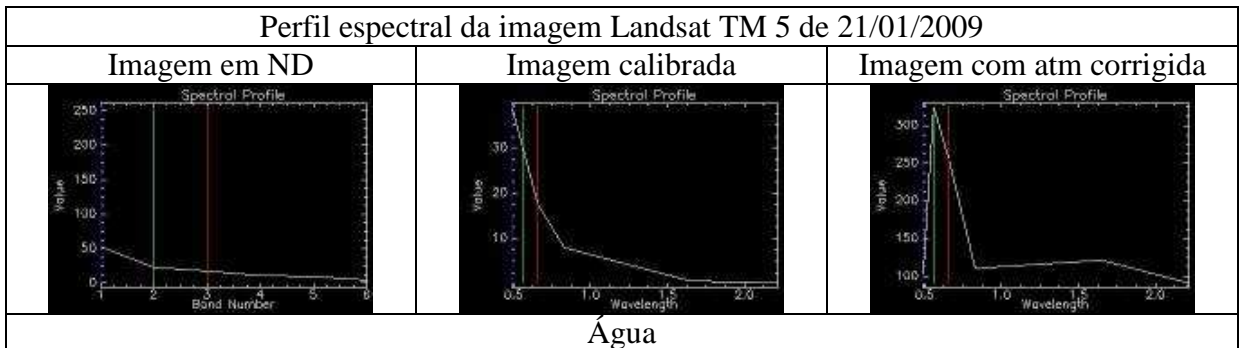
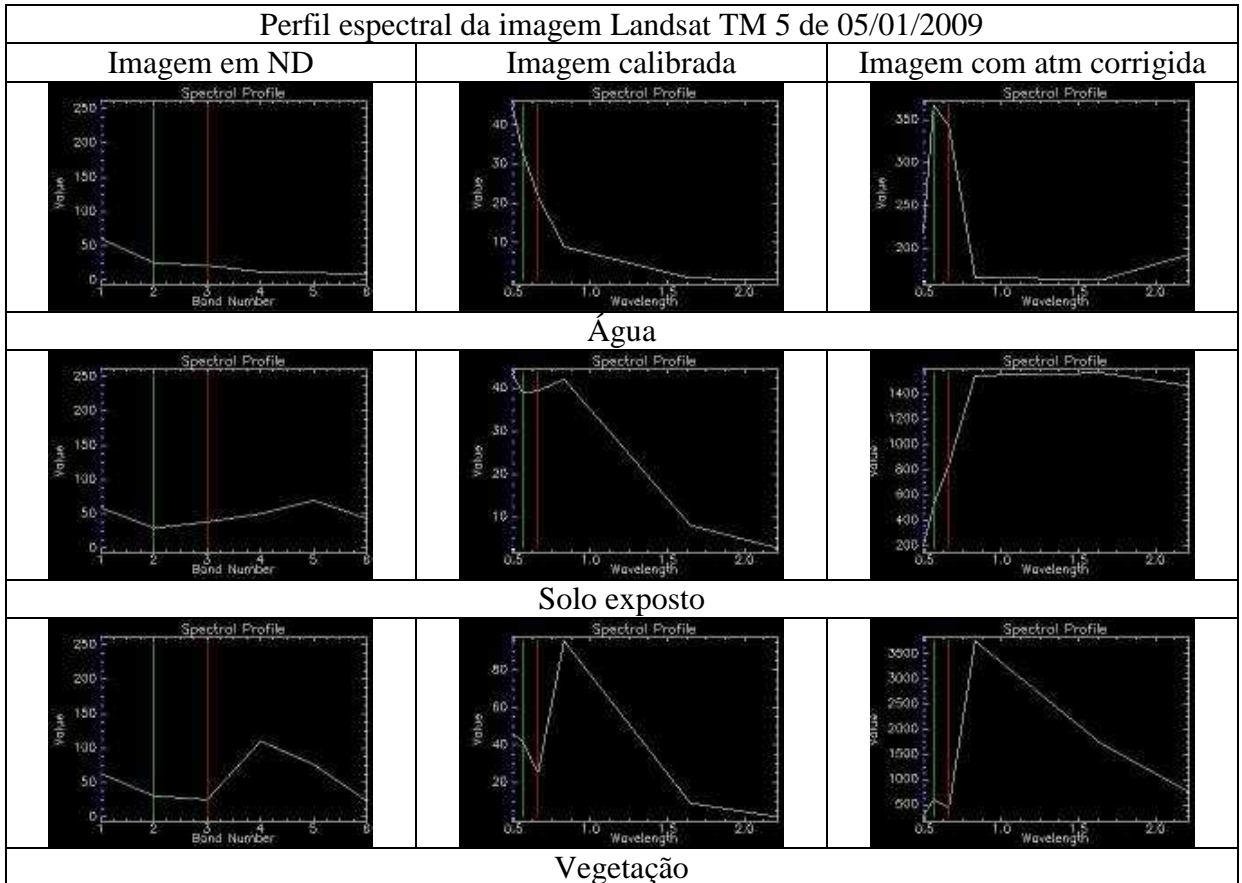
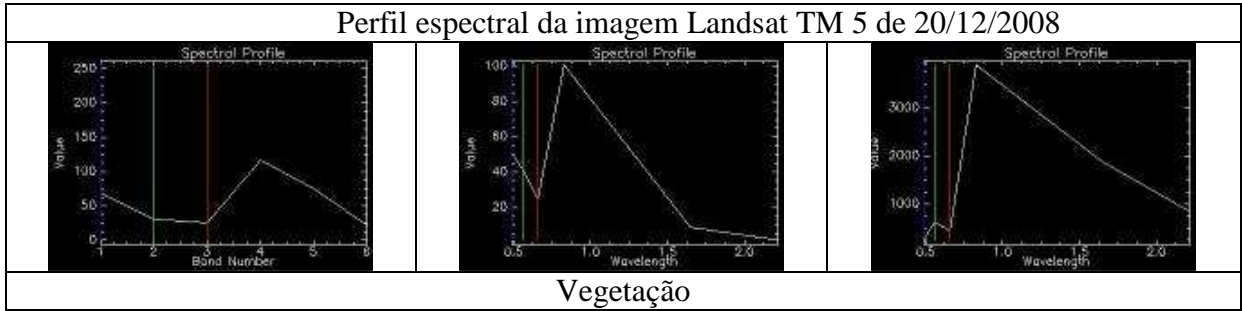


	
<p>22/02/09(e)</p>	<p>26/03/09(f)</p>
	
<p>04/11/09(g)</p>	<p>25/11/08(h)</p>

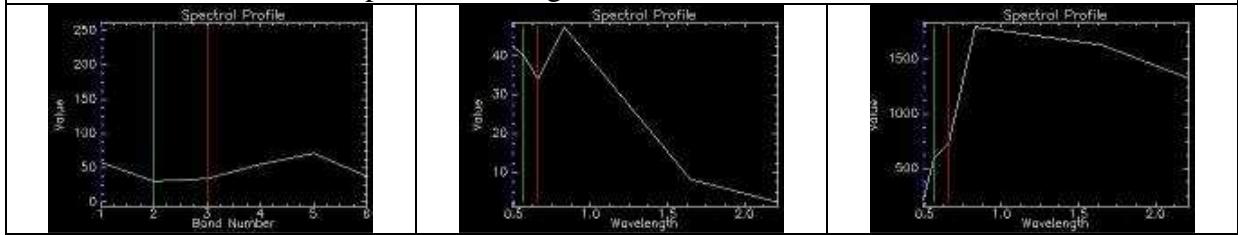
ANEXO 3

Superfícies testes de água, solo exposto e mata para avaliação da correção atmosférica.

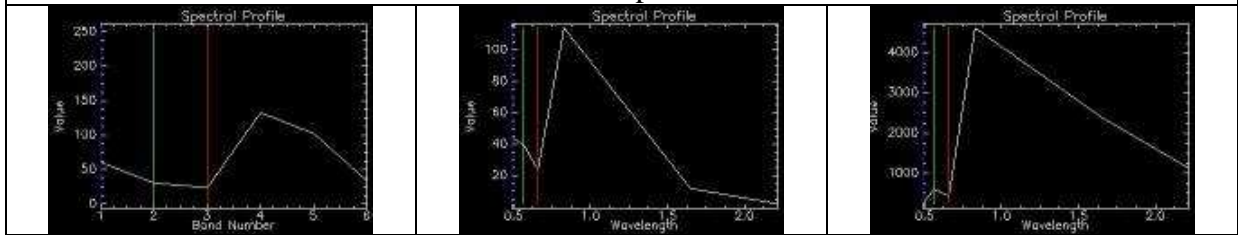




Perfil espectral da imagem Landsat TM 5 de 21/01/2009

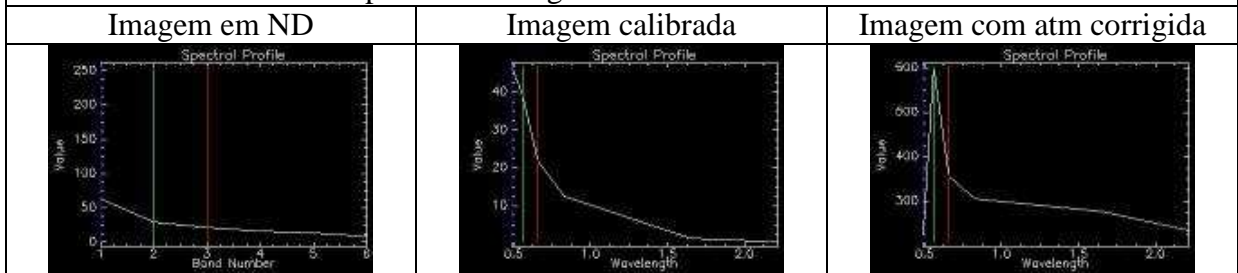


Solo exposto

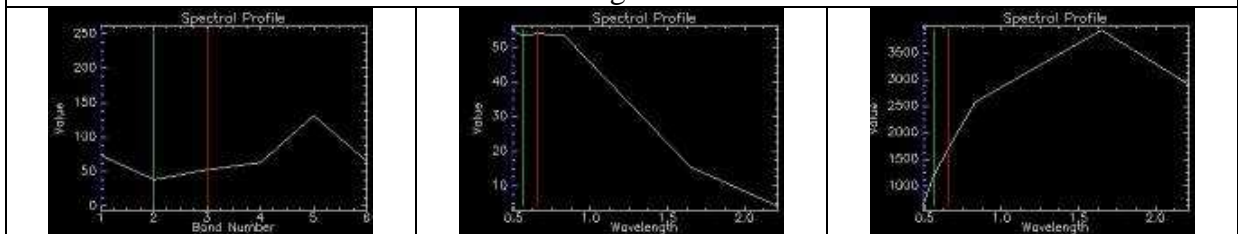


Vegetação

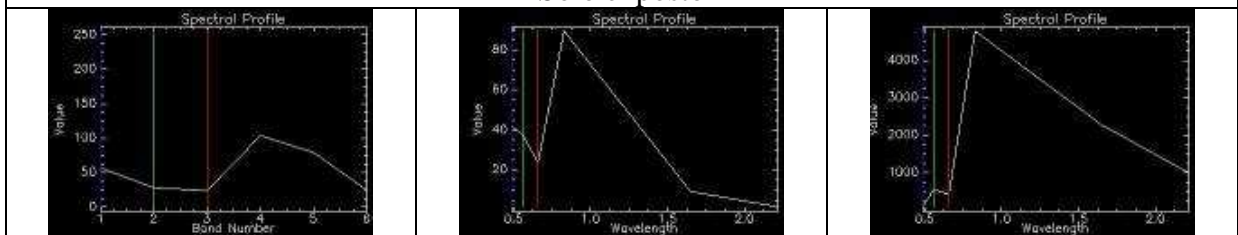
Perfil espectral da imagem Landsat TM 5 de 26/03/2009



Água



Solo exposto



Vegetação