



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**DIEGO RAONI DA SILVA ROCHA**

**ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE**  
**SÃO PAULO ATRAVÉS DE UM MODELO AGROMETEOROLÓGICO**  
**ESPECTRAL**

**MACEIÓ - AL**  
**FEVEREIRO - 2012**

**DIEGO RAONI DA SILVA ROCHA**

**ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE  
SÃO PAULO ATRAVÉS DE UM MODELO AGROMETEOROLÓGICO  
ESPECTRAL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas como requisito para obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientador: **Prof. PhD. Humberto Alves  
Barbosa**

**MACEIÓ - AL  
FEVEREIRO - 2012**

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
**Bibliotecária Responsável: Fabiana Camargo dos Santos**

R672e Rocha, Diego Raoni da Silva.  
Estimativa de produtividade de cana-de-açúcar no estado de São Paulo através de um modelo agrometeorológico espectral / Diego Raoni da Silva Rocha. -- 2012.  
[108] f. : il.

Orientador: Humberto Alves Barbosa.  
Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2012.

Bibliografia: f. 69-73.  
Apêndices: f. 74-108

1. IVDN. 2. PMS. 3. Evapotranspiração potencial. 4. Monitoramento agrometeorológico. I. Título.

CDU: 551.501.8:551.86



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**  
**COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO**

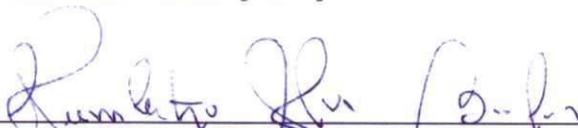
**N.º de ordem: MET-UFAL-MS-093.**

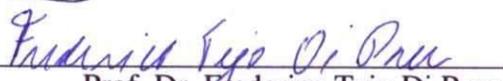
**“ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO ATRAVÉS DE UM MODELO AGROMETEOROLÓGICO ESPECTRAL”**

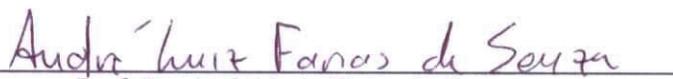
***Diego Raoni da Silva Rocha***

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Humberto Alves Barbosa  
(Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Frederico Tejo Di Pace  
(Membro Interno – ICAT)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. André Luiz Farias de Souza  
(Membro Externo – CONAB)

**Fevereiro/2012**

## DEDICATORIA

*Especialmente ao meu filho, Gabriel, pois seu carinho e amor é o que mais me motiva todos os dias, à Thais meu grande amor, esposa e companheira de todas as horas, aos meus pais que estão sempre ao meu lado e que, além do amor me deram a educação mais importante que poderia receber em minha vida.*

*Especialmente a vocês, Dedico...*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pois com suas Bênçãos foi possível estar aqui hoje;

Ao meu filho e esposa por todo o amor, companheirismo e compreensão dedicados durante os momentos de ausência;

A toda minha família, em especial, meus pais Joadir e Maria José pelo carinho e apoio uma vez que mesmo distante, estão sempre ao meu lado transmitindo confiança, fé e sabedoria;

Aos meus tios Ernane e Sônia, que me acolheram durante um período muito importante de minha vida e me oportunizaram valiosos momentos com toda sua família;

A todos meus familiares em Gurupi, Palmas e Brasília que me ajudaram de diferentes maneiras, em momentos importantes nessa jornada de trabalho e estudos;

Ao meu orientador, Humberto Alves Barbosa, que além de transmitir seus conhecimentos científicos, experiências profissionais, sempre se preocupou com meu desenvolvimento, minha aprendizagem proporcionando-me ótimas oportunidades e incentivando nos projetos de pesquisa;

Ao André Souza, pela amizade, confiança em meu trabalho e potencial, pelos conhecimentos transferidos e os valiosos momentos de orientação dedicados;

Aos colegas Gisele, Táris e Clóvis, que durante o pouco tempo de convivência trabalhando na Gerência de Geotecnologias da CONAB, compartilharam seus conhecimentos e companheirismo;

Ao meu amigo Ivon Wilson, que recebeu a mim e minha família de braços abertos em sua casa e também por seu auxílio e conhecimento compartilhado durante este período de convivência;

Aos professores e colegas de Pós-Graduação, seus pelos ensinamentos e amizades construídas durante este período de formação e convivência;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de auxílio ao longo do curso.

## RESUMO

A influência que a dinâmica atual da economia mundial exerce sobre o agronegócio exige que tanto a iniciativa privada quanto os órgãos governamentais monitorem de perto o comportamento das safras, inclusive em grande escala. Os últimos avanços nas áreas de geotecnologias e sensoriamento remoto ampliaram substancialmente a capacidade de monitoramento agrícola, permitindo também a aplicação de modelos agrometeorológicos na estimativa e/ou previsão de safras. Recentes estudos indicam que existe potencial para aprimoramento destes visando aplicações operacionais. Por essa razão, este trabalho objetivou estimar a produtividade da cana-de-açúcar, através de um modelo agrometeorológico espectral, nos municípios de Barretos e Morro Agudo, no Estado de São Paulo, tendo como variáveis de entrada os produtos decendiais de PMS, IVDN S10 derivados do sensor VEGETATION-2, com resolução de 1 km e o produto LSA SAF MET ETo, obtido a partir das imagens do sensor SEVIRI a bordo do satélite METEOSAT-9, e dados de saída do modelo europeu ECMWF, com resolução espacial de 4 a 5 km e temporal de 30 minutos. O período selecionado foram os anos safra de 2009/2010 e 2010/2011. Após organizar o banco de dados necessário para alimentar o modelo, foram desenvolvidos rotinas em scripts para dinamizar o processamento e extração dos dados. Os resultados mostraram que, as séries temporais de IVDN e PMS foram capazes de expressar as variações no ciclo fenológico, e o produto MET ETo, foi capaz de estimar a penalização hídrica sofrida pela cultura. Os resultados do modelo mostram que houve uma variação de 0,16 t/ha na produtividade agrícola média da cana de açúcar em Barretos durante o período analisado, o que é corroborado pelos dados oficiais apresentados pelo IBGE que não mostrou variação interanual por outro lado a dados da CONAB apresentaram uma variação de 3 t/ha a menos no segundo ano/safra analisado. Já em Morro Agudo, houve um declínio de aproximadamente 4 t/ha na produtividade média no período analisado, comportamento que também foi observado pelos dados das usinas sucroalcooleiras da região, fornecidos pela CONAB diferindo apenas no volume estimado que chegou a aproximadamente 6 t/ha. Os resultados indicam que o modelo proposto tem potencial para ser explorado, e que mais estudos devem ser realizados para ampliar o período de análise em diferentes regiões e, se possível, utilizando dados de campos para realizar a calibração dos dados.

**Palavras-chave:** IVDN. PMS. Evapotranspiração potencial. Monitoramento agrometeorológico.

## ABSTRACT

The influence that the current dynamics of the world economy exerts on agribusiness requires that both private and government monitor closely the behavior of the crops, including large scale. The latest advances in geotechnology and remote sensing expanded substantially the monitoring capacity, allowing also the application of agrometeorological models to estimate and predict crops. Recent studies indicate that there is potential to improve these models aiming operational applications. For this reason, this study objectified estimate the productivity of the sugar cane, through a spectral agrometeorological model, in Barretos and Morro Agudo cities, in São Paulo state, having as input variables the ten-days-interval products of DMP, NDVI S10 derivatives of the VEGETATION-2 sensor, with resolution of 1km, and the product LSA SAF MET ETo, got from the images of the SEVIRI sensor aboard the METEOSAT-9 satellite, and output data of the ECMWF european model, with spatial resolution of 4 and 5 km and temporal of 30 minutes. The selected period were the crop-years of 2009/2012 and 2010/2011. After organizing the database necessary to feed the model, were developed routines in scripts to streamline the data processing and extraction. The model results show that there was a variation of 0.16 t/ha in average agricultural productivity of sugarcane in Barretos during the analysis period, which is confirmed by official data provided by the IBGE showed no interannual variation otherwise the CONAB data showed a variation of 3 t/ha less in the second year/harvest analyzed. Back in Morro Agudo, a decline of about 4 t/ha in average productivity in the analyzed period, behavior was also observed by the data of sugar and alcohol plants in the region, provided by CONAB differing only in that estimated volume was approximately 6 t/ha. The results indicate that the model proposed has potential to be explored, and that more studies must be done to amplify the period of analyze in different regions, and if it's possible using the field data to calibrate the data.

Key-words: NDVI. DMP. Potential evapotranspiration. Monitoring agrometeorological.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases do desenvolvimento e estádios da cana-de-açúcar desde a emergência até a fase de maturação. ....	18
Figura 2 - Áreas de cultivo de cana-de-açúcar no estado de são paulo no ano safra2010/2011. ....	30
Figura 3: Fluxograma metodológico. ....	33
Figura 4 - Mapa de relevo da área de estudo.....	45
Figura 5 - Comportamento dos índices de vegetação IVDN (índice de vegetação por diferença normalizada), FCV (fração de cobertura vegetal) e IAF (índice de área foliar), no período setembro de 2009 a setembro de 2011, no município de barretos. ....	47
Figura 6 - Comportamento dos índices de vegetação IVDN (índice de vegetação por diferença normalizada), FCV (fração de cobertura vegetal) e IAF (índice de área foliar), no período setembro de 2009 a setembro de 2011, no município de morro agudo – (decêndios). ....	48
Figura 7 - Comportamento do IVDN e a precipitação acumulada no município de barretos ..	49
Figura 8 - Comportamento do IVDN e a precipitação acumulada no município de morro agudo. ....	50
Figura 9 - Comportamento do produto PMS e a produtividade estimada parcial decendial no município de barretos. ....	52
Figura 10 - Comportamento do produto PMS e a produtividade estimada parcial decendial no município de morro agudo. ....	52
Figura 11 - Imagens da produtividade total estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral para os dois anos safra analisados.....	55
Figura 12 - Relação do comportamento interanual da produtividade de cana-de-açúcar na usina "A". ....	58
Figura 13 - Relação do comportamento interanual da produtividade de cana-de-açúcar na usina "B". ....	59
Figura 14 - Relação do comportamento interanual da produtividade de cana-de-açúcar na usina "C". ....	59
Figura 15 - Imagens da produtividade total estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral para os dois anos safra analisados.....	62
Figura 16 - Relação do comportamento interanual da produtividade de cana-de-açúcar na usina "A". ....	64
Figura 17 - Relação do comportamento interanual da produtividade de cana-de-açúcar na usina "B". ....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Duração do ciclo da cana-de-açúcar em função do planejamento da época do plantio .....	20
Tabela 2 - Coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) da cultura de cana-de-açúcar. ....	37
Tabela 3 - Fator de resposta de produtividade por período fenológico ( $k_y$ ).....	38
Tabela 4 - Relação entre Temperatura Média (TM) em °C e a Taxa de Produtividade de Matéria Seca (TPMS) em Kg/ha/h para o grupo da cana-de-açúcar .....	39
Tabela 5 - Classes de Relevo e Declividade.....	43
Tabela 6 - Comparação entre as áreas estimadas de cultivo de Cana-de-Açúcar, para o ano de 2010. ....	44
Tabela 7 - Calendário agrícola da cana-de-açúcar na mesorregião de Ribeirão Preto. ....	47
Tabela 8 - Valores da produtividade obtida pela Usina A dentro da área de influencia das lavouras de cana-de-açúcar no município de Barretos .....	56
Tabela 9 - Valores da produtividade obtida pela Usina B dentro da área de influencia das lavouras de cana-de-açúcar no município de Barretos .....	57
Tabela 10 - Valores da produtividade obtida pela Usina C dentro da área de influencia das lavouras de cana-de-açúcar no município de Barretos .....	57
Tabela 11- Relação entre os dados oficiais e os resultados da produtividade média modelada .....	60
Tabela 12 - Valores da produtividade obtida pela Usina "A" dentro do município de Morro Agudo .....	63
Tabela 13 - Valores da produtividade obtida pela Usina A dentro do município de Morro Agudo .....	63
Tabela 14 - Relação entre os dados oficiais e os resultados da produtividade média modelada .....	65

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

SIG	Sistemas de Informações Geográficas
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Mapa	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
Conab	Companhia Nacional de Abastecimento
IVDN	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
MVC	Maximum Value Composite Syntheses
SM	Status Map
IAF	Índice de Área Foliar
PMS	Produção de Matéria Seca
PPL	Produtividade Primária Líquida
PPB	Produtividade Primária Bruta
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
RFA	Radiação Fotossinteticamente Ativa
$f_A$ RFA	Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida
ET	Evapotranspiração
LSA-SAF	Land Surface Analysis Satellite Applications Facility
SVAT	Solo-Vegetação-Atmosfera
SRS	Sensoriamento Remoto Satelital
MNP	Modelos Numéricos de Previsão
TESSEL-SVAT	Soil Vegetation Atmosphere Transfer Schemes
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
LSA/SAF	Land Surface Analysis / Satellite Application Facility
MET ETo LSA-16	Evapotranspiração Potencial
FCV	Fração de Cobertura Vegetal
MSG	Meteosat Second Generation
SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
DSSF	Downward Surface Short-wave Flux
DSLFL	Downward Surface Long-wave Flux
AL	Albedo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ETP	Evapotranspiração potencial
ETR	Evapotranspiração Real

FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
EVI	Enhanced Vegetation Index
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
HDF	Hierarchical Data Format
ILWIS	Integrated Land and Water Information System
IVP	Infravermelho Próximo
SM	Status Map
Gdal	Geospatial Data Abstraction Library
NASA	National Aeronautics and Space Administration
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
MDT	modelagem digital do terreno
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
VGT	Vegetation
GEOTE	Gerência de Geotecnologias
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
UNICA	União da Indústria de Cana-de-açúcar
IVOC	Infravermelho de Onda Curta
IAL	Índice de ajuste local

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 OBJETIVOS.....</b>	<b>16</b>
1.1.1 Geral .....	16
1.1.2 Específicos.....	16
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 CARACTERIZAÇÃO DA CULTURA .....</b>	<b>17</b>
2.1.1 Brotação e emergência.....	17
2.1.2 Perfilhamento .....	18
2.1.3 Crescimento dos colmos .....	19
2.1.4 Maturação dos colmos .....	19
2.1.5 Momento de colheita .....	19
<b>2.2 PANORAMA ATUAL DA CANA-DE-AÇÚCAR .....</b>	<b>20</b>
2.2.1 Histórico e Economia das safras de cana-de-açúcar no Brasil .....	20
<b>2.3 PRODUTO SPOT VGT-S10.....</b>	<b>21</b>
<b>2.4 RELAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO .....</b>	<b>22</b>
2.4.1 Produção de Matéria Seca (PMS).....	23
2.4.2 Evapotranspiração de Referência (Eto) .....	25
<b>2.5 MODELOS DE ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA .....</b>	<b>27</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1 ÁREAS DE ESTUDO .....</b>	<b>30</b>
3.1.1.1 Características Climáticas .....	31
<b>3.2 FLUXOGRAMA METODOLÓGICO .....</b>	<b>32</b>
<b>3.3 DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO .....</b>	<b>33</b>
3.3.1 Processamento das séries temporais do produto VGT-S10.....	34
3.3.2 Processamento das séries temporais do produto PMS.....	35
3.3.3 Processamento das séries temporais do produto LSA-ETO.....	35
<b>3.4 CONCEPÇÃO DO MODELO AGROMETEOROLÓGICO-ESPECTRAL .....</b>	<b>37</b>
3.4.1 Modelo Agrometeorológico .....	37
3.4.2 Estimativa da Produtividade Potencial .....	38
3.4.3 Estimativa do Fator de Compensação do Crescimento .....	39
3.4.4 Estimativa do índice de área foliar .....	40
3.4.5 Estimativa da fração de cobertura do solo pela cultura.....	40
<b>3.5 OUTROS DADOS .....</b>	<b>40</b>
3.5.1. Dados Oficiais de Produtividade Agrícola .....	40
3.5.2 Dados Meteorológicos .....	41
3.5.3 Dados Topográficos.....	41
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>42</b>
<b>4.1. RELAÇÃO ENTRE A MÁSCARA DA CANA-DE-AÇÚCAR E O RELEVO.....</b>	<b>42</b>
<b>4.2 ANÁLISE DAS SÉRIES TEMPORAIS DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO .....</b>	<b>46</b>

4.2.1 Relação entre os índices IVDN, FCV e IAF .....	46
4.2.2 Relação entre IVDN e Precipitação.....	49
4.2.3 Relação entre o produto PMS e a Produtividade Estimada Parcial.....	51
<b>4.3 ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE TOTAL GEOESPACIALIZADA .....</b>	<b>53</b>
4.3.1 Barretos.....	54
4.3.2. Morro Agudo .....	61
<b>4.4 ARTIGOS E TRABALHOS DESENVOLVIDOS DURANTE O MESTRADO.....</b>	<b>65</b>
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>67</b>
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>68</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>73</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>83</b>
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>95</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O mapeamento e monitoramento de culturas agrícolas são importantes ferramentas para o estudo e controle da dinâmica de safras. Seus resultados em escala decenal, podem dar informações sobre o comportamento da cultura, bem como dados sobre redução e expansão de áreas, rotação de culturas, podendo até subsidiar ações de políticas públicas voltadas ao produtor rural. Essa é uma tarefa contínua composta por dados de diversas fontes, que vão desde questionários e visitas em campo, até processamento e análise de imagens de satélite.

Com as necessidades e oscilações do mercado cada vez mais rápidas e dinâmicas, a agricultura passou a sofrer maior cobrança econômica sobre seu comportamento, produtividade e expansão. Por este motivo, se tornou importante também avaliar e monitorar a "performance" da lavoura, considerando as condições edafoclimáticas, como um dos fatores mais importantes, para se obter uma melhor produtividade. Contudo, em vista das grandes áreas de cultivo, a obtenção de resultados apenas em campo é uma difícil tarefa. Para isso, são utilizados dados de sensoriamento remoto, meteorológicos e modelos agronômicos.

Nas duas últimas décadas, com a disponibilidade de imagens de satélites e seus produtos derivados, juntamente com a implementação de softwares de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), os estudos agrícolas, envolvendo o monitoramento e modelagem, puderam ser aplicados em grandes áreas, de forma operacional, fornecendo informações para sua quantificação e geoespacialização.

A maioria dos Modelos agronômicos para estimativa de produtividade agrícola tenta representar de forma simplificada, os principais processos que atuam na produtividade, transformando-os em variáveis quantificáveis por meio de equações matemáticas. Para se executar os modelos de estimativa de produtividade de forma mais coerente, as informações obtidas devem ser relacionadas aos aspectos fenológicos, climáticos e às características de manejo da cultura.

O estudo de Abdel-Rahman e Ahmed (2008) relata diversos trabalhos realizados com o intuito de estimar a produtividade agrícola da cana-de-açúcar, com base em modelos agronômicos e dados de satélite. Todavia, nenhum deles encontrou uma metodologia viável para o uso operacional. As limitações inerentes aos diversos tipos de modelo dificultam a estimativa ante as condições adversas que compõem a

produtividade agrícola, tais fatores podem ser responsáveis por perdas e quebras de produtividade durante o período safra.

Com o aumento tecnológico nos cultivares de cana-de-açúcar, como melhoramento genético, melhorias nos insumos e ainda as questões econômicas, os modelos matemáticos acabam excluindo tais influências, que são difíceis de mensurar. Mesmo considerando as dificuldades naturais de um modelo agrônomo, é inegável que os dados, meteorológicos e de sensoriamento remoto, são capazes de gerar resultados espacializados que podem ser relacionados com a variabilidade interanual e da produtividade da cultura de cana-de-açúcar, conforme observado por Sugawara, 2010.

Tendo em vista o relevante papel econômico do setor canavieiro, onde pequenas variações na expectativa de produtividade provocam grandes variações no mercado, principalmente o energético, num contexto em que a expansão do setor recebe cada vez mais estímulos, tanto do Governo como da economia nacional e internacional, é que se faz necessário a implementação de técnicas cada vez mais avançadas para realizar o monitoramento e estimativa de produtividade agrícola, com base em levantamentos de campo e sensoriamento remoto.

Para atender as necessidades de monitoramento e estimativa de produtividade do setor, é que se propõe a aplicação de produtos de satélite, que possam fornecer um melhor acompanhamento da cultura da cana-de-açúcar, avaliando incrementos e perdas na produtividade, onde os resultados obtidos possam contribuir para o melhor controle dessa área.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Geral

Estimar a produtividade da cana-de-açúcar através de dois modelos agrometeorológicos espectrais nos municípios de Barretos e Morro Agudo, no Estado de São Paulo.

### 1.1.2 Específicos

Aperfeiçoar as metodologias existentes para o monitoramento da dinâmica da cana-de-açúcar na agricultura brasileira;

Pesquisar e identificar novos parâmetros e informações que possam contribuir tecnologicamente no setor produtivo canavieiro;

Elaborar rotinas de processamento e extração de dados dos produtos de IVDN, PMS e ETo para obtenção de perfis temporais que subsidiem no monitoramento do comportamento das lavouras de cana-de-açúcar;

Analisar a relação entre o relevo e as áreas de cultivo da cana-de-açúcar;

Estimar o índice de área foliar com dados de sensoriamento remoto para ser utilizado no modelo agrônômico.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Caracterização da cultura

A Cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma gramínea originária da Nova Guiné e foi introduzida no Brasil pelos portugueses no início do século XVI, em duas regiões diferentes: no Nordeste, no estado de Pernambuco, e no Sudeste, no estado de São Paulo. A região de Pernambuco respondeu melhor ao cultivo da cana do que a de São Paulo. A cana-de-açúcar representou o segundo ciclo econômico durante a colonização, após o declínio do ciclo do pau-brasil (BRAUNBECK, 2005).

As informações apresentadas a seguir são descritas pela Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) *apud* Gascho (1983), salvo citações apresentadas no decorrer do texto.

Para a melhor compreensão da fenologia da cana-de-açúcar, é apresentada na Figura 1, que demonstra as fases de desenvolvimento da cultura desde sua emergência até maturação.

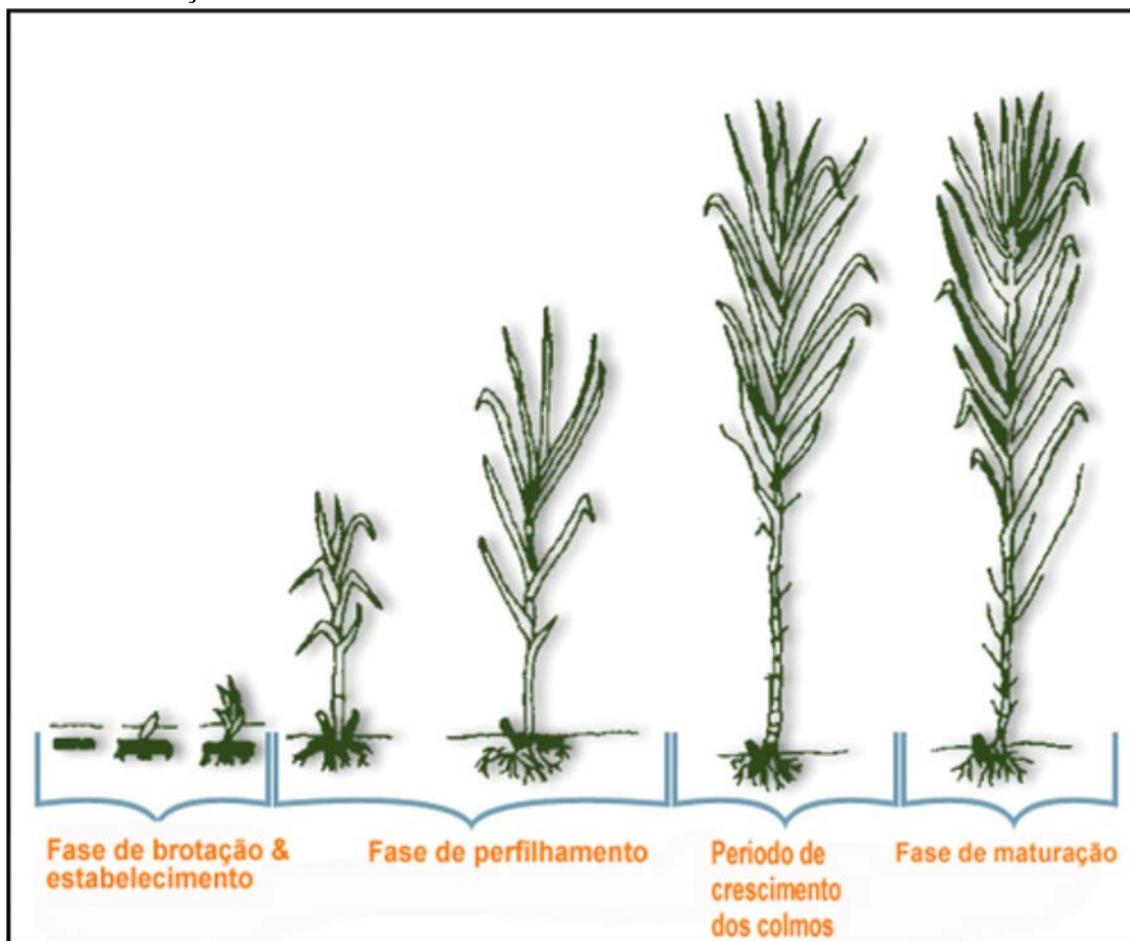
Os estádios fenológicos da cana-de-açúcar e as etapas de corte são definidos em ciclos que iniciam com o plantio da muda (tolete), que brota, perfilha, matura e recebe o primeiro corte; ciclo este que é denominado de cana-planta. No ciclo seguinte, ocorre a brotação da soqueira e o início de um novo ciclo, denominado de cana-soca.

A cada ciclo ocorre uma perda na produtividade agrícola e os ciclos se repetem em intervalos anuais até que a lavoura não seja mais rentável economicamente, quando a cultura passa pelo manejo denominado de reforma e o ciclo reinicia com o plantio de uma nova muda (SUGAWARA, 2010).

#### 2.1.1 Brotação e emergência

O broto rompe as folhas da gema e se desenvolve em direção à superfície do solo. Ao mesmo tempo surgem as raízes do tolete. A emergência do broto ocorre de 20 a 30 dias após o plantio. O broto é um caule em miniatura que surge acima da superfície do solo (chamado de colmo primário). Esta fase depende da qualidade da muda, ambiente, época e manejo do plantio. Neste estágio ocorre ainda, o enraizamento inicial (duas a três semanas após a emergência) e o aparecimento das primeiras folhas.

Figura 1 - Fases do desenvolvimento e estádios da cana-de-açúcar desde a emergência até a fase de maturação.



Fonte: Embrapa apud Gascho & Shih, 1983.

### 2.1.2 Perfilhamento

Início do perfilhamento e formação da touceira: perfilhamento é o processo de emissão de colmos por uma mesma planta, os quais recebem a denominação de perfilhos. O processo de perfilhamento é regulado por hormônios e resulta no crescimento de brotos que vão em direção à superfície do solo. Esses brotos aparecem de 20 a 30 dias após a emergência do colmo primário. Por meio desse processo, ocorre a formação da touceira da cana-de-açúcar e a população de colmos que será colhida. É importante destacar que, a formação do sistema radicular da touceira, é resultado do desenvolvimento das raízes de cada perfilho.

Auge do perfilhamento: é quando ocorre a total cobertura do solo pela folhagem das plantas. Cada touceira possui o máximo de perfilhos.

### 2.1.3 Crescimento dos colmos

A partir do auge do perfilhamento, os colmos sobreviventes continuam o crescimento e desenvolvimento, ganhando altura e iniciando o acúmulo de açúcar na base. O crescimento é estimulado por luz, umidade e calor. Durante essa fase, as folhas mais velhas começam a ficar amareladas e secam.

Crescimento radicular vigoroso: o crescimento do sistema radicular torna-se mais intenso, tanto nas laterais quanto em profundidade. A maior parte das raízes está nos primeiros 40 centímetros de profundidade, sendo esta a zona principal no que concerne a absorção de água e nutrientes por parte da cultura.

Definição da população final de colmos: o canavial pode atingir altura acima de três metros, com a população final de colmos, variando em função das condições de clima e solo.

### 2.1.4 Maturação dos colmos

Maturação inicial: a maturação inicia-se junto com o crescimento intenso dos colmos sobreviventes do perfilhamento das touceiras. É válido mencionar, novamente, que o excesso de açúcar permanece armazenado na base de cada colmo.

Maturação do terço médio: quando as touceiras atingem altura igual ou superior a dois metros, nota-se o amarelecimento e a consequente seca das folhas que se encontram na altura mediana da planta, indicando que já está sendo depositado açúcar nessa região.

Maturação final: no período entre o outono e o inverno, com a presença de chuvas variáveis e temperaturas mais baixas, existe maior atividade de maturação e menor atividade de crescimento, sendo que há intenso armazenamento de açúcar.

### 2.1.5 Momento de colheita

É definido em função da variedade, época de plantio e consequente duração do ciclo (Tabela 1), manejo da maturação e condições climáticas no ambiente.

A Tabela 1 apresenta a duração do ciclo da cana-de-açúcar em função do planejamento da época de plantio.

Tabela 1 - Duração do ciclo da cana-de-açúcar em função do planejamento da época do plantio.

<b>Tipo de Cana</b>	<b>Duração dos ciclos</b>
Cana de ano e meio	14 a 22 meses
Cana de ano	12 meses
Cana soca	12 meses
Cana de inverno	12 a 16 meses

Fonte: Embrapa apud Gascho & Shih, 1983.

## 2.2 Panorama atual da cana-de-açúcar

### 2.2.1 Histórico e Economia das safras de cana-de-açúcar no Brasil

Desde o início dos anos 90, o Brasil tem aumentado sistematicamente suas exportações de açúcar, e de uma participação pouco expressiva neste mercado, passou a representar uma parcela próxima de 40%, nos últimos anos e com tendência a ampliar este índice. Este surpreendente e contínuo crescimento está associado ao processo de redução das políticas públicas para o setor, que se seguiu ao fim do Instituto do Açúcar e Alcool, onde o enorme potencial competitivo que este setor dispunha em estado latente estava represado pelo modelo econômico, o que significou a completa liberação dos mercados da cana e a transferência das decisões sobre a produção e o comércio destes produtos para a iniciativa privada (CONAB, 2008).

Este novo perfil transformou o Brasil no líder incontestável desse mercado e delegando-lhe a tarefa de manter um comportamento comercial previsível, de modo a prevenir crises de oferta, variações desordenadas no comportamento dos preços e uma eventual desorganização da produção (CONAB, 2008).

O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa), e a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), firmaram em 2005 um acordo de cooperação e um plano de trabalho para a promoção do acompanhamento sistemático do comportamento das safras agrícolas da cana-de-açúcar no Brasil (CONAB, 2008).

No caso do álcool, se a economia mundial retomar o seu crescimento, as portas do mercado externo poderão se abrir, o que deixará o Brasil em uma condição favorável, já que é um dos poucos países que detêm tecnologia e áreas disponíveis para a produção de biocombustíveis (CONAB, 2010).

A expansão da produção brasileira de cana-de-açúcar está nos Estados do Centro-Sul e, principalmente, nas áreas de pastagens degradadas, substituição de uso agrícola de terras por arrendamento e outros. Devido às condições climáticas e de relevo favoráveis, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul são os principais Estados onde as indústrias estão se instalando junto com seus canaviais.

Como consequência da distribuição das unidades produtivas e a combinação estadual dos períodos de colheita da cana, o país mantém, com diferentes intensidades, a produção de açúcar e álcool por, praticamente, todos os meses do ano (CONAB, 2010).

### **2.3 Produto SPOT VGT-S10**

Um dos índices mais amplamente utilizados para análise de culturas agrícolas é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN), que é um indicador numérico adimensional que utiliza a diferença entre as reflectâncias do infravermelho próximo e vermelho do espectro eletromagnético, produzindo valores que são representados como uma proporção, variando de -1 a 1, onde na prática os valores negativos representam água, valores em torno de zero representam solo exposto e valores acima de 0,6 representam vegetação densa.

Segundo Ponzoni (2010), o IVDN é uma importante ferramenta para o monitoramento da vegetação, pois a partir de sensores orbitais é possível obter dados em diversas escalas temporais e espaciais, que permitem construir perfis do período de crescimento, picos vegetativos, mudanças fisiológicas nas folhas, períodos de senescência, estimar rendimento das culturas, desempenho de pastagem, entre outros. Muitas vezes é diretamente relacionada aos parâmetros do solo, tais como, fração de cobertura do solo, atividade fotossintética da planta, água de superfície, índice de área foliar e a quantidade de biomassa.

O algoritmo do IVDN subtrai os valores de reflectância do vermelho e do infravermelho próximo e divide pela soma das bandas do infravermelho próximo e vermelho, como descrito por Deering et al. (1975).

$$IVDN = \frac{IVP - V}{IVP + V}$$

O satélite comercial SPOT 5, tem a bordo, diversos sensores para diferentes finalidades, que abrangem desde resoluções pancromática de até 2,5 metros, para fins de mapeamento de alta precisão, até o sensor VEGETATION-2, com resolução espacial de 1 Km e largura de faixa imageada de 2250 Km que permite uma revisita ao mesmo ponto a cada 24 horas, além de conter mais 4 bandas espectrais, sendo que três estão centradas no espectro visível do azul, verde, vermelho e a última no infravermelho próximo, que estão exclusivamente dedicadas para o monitoramento vegetativo em escala regional, com resolução radiométrica de 8 bits.

O produto IVDN VGT-S10, é disponibilizado pelo Flemish Institute for Technological Research (VITO), que é a instituição que administra, gera os dados e produtos provenientes do sensor VEGETATION-2. O produto é obtido a partir da síntese entre órbitas sucessivas, seja no mesmo dia, ou em dias diferentes, que são processadas para extrair os melhores dados possíveis dentro um período determinado, nesse caso, a cada dez dias, através do método Maximum Value Composite Syntheses (MVC), que realiza a seleção dos maiores valores de IVDN. Este método de seleção tende a diminuir interferências atmosféricas (SAINT, 1994).

Cada dado é acompanhado de um Status Map (SM), um produto que tem por objetivo possibilitar a filtragem dos dados de IVDN, classificando cada um dos pixels da imagem, as contaminações presentes no dado, seja por nuvens, corpos d'água, entre outros.

## 2.4 Relação entre os índices de vegetação

Muitos pesquisadores buscam correlações entre dados de sensoriamento remoto e informações obtidas em campo, como Xavier e Vetorazzi (2004), que avaliaram a relação do IVDN obtido a partir de imagens do satélite Landsat, sensor ETM+, com medidas do Índice de Área Foliar (IAF), da cana-de-açúcar, calculadas em campo, onde os autores obtiveram coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,72.

Em outra pesquisa, El Hajj *et al.* (2007), obtiveram uma relação exponencial entre o IVDN gerado a partir de dados do satélite SPOT e o IAF, da cana-de-açúcar medido em campo com valores de ( $R^2$ ) igual a 0,92.

Segundo Dorigo *et al.* (2007), este tipo de abordagem é classificado como estatística, pois busca uma relação consistente entre o índice de vegetação e a variável biofísica de interesse, por meio de medições realizadas em campo, ou em laboratório. Por

outro lado, existe ainda a abordagem física, que consiste na inversão de um modelo de reflectância do dossel, para a estimativa das variáveis biofísicas. Tendo em vista as dificuldades técnicas envolvidas na abordagem física, é que os métodos estatísticos ganham relevância e tornam-se os mais apropriados em estudos cujo objetivo é o desenvolvimento de metodologias mais simplificadas.

Com o foco na cana-de-açúcar, pesquisas realizadas por Picoli *et al.* (2009), determinaram a fração da cobertura do solo ( $F_c$ ), a partir do IVDN, com o uso do método proposto por Choudhury *et al.* (1994), ajustado para a cana-de-açúcar. Em seguida, o IAF é obtido pelo algoritmo recomendado por Rizzi e Rudorff (2007), onde o  $F_c$  é relacionado ao IAF.

Gobron *et al.* (1997) e Casa e Jones (2005), relatam sobre as dificuldades que envolvem o índice de vegetação, a influência dos efeitos da atmosfera, o ângulo de visada, e o solo, onde as abordagens empíricas entre o IVDN e o IAF, se mostraram bem sucedidas para valores de IAF menores do que 4, o que abrange os valores esperados para a cana-de-açúcar.

#### 2.4.1 Produção de Matéria Seca (PMS)

Smets *et al.* (2010), no *BioPar (Product User Manual)*, descreve as características do produto Produção de Matéria Seca (PMS), que fornece uma indicação do aumento de matéria seca de biomassa (taxa de crescimento), da vegetação e está diretamente relacionada com a Produtividade Primária Líquida (PPL), que é o saldo disponível, entre a energia armazenada a partir da fotossíntese (Produtividade Primária Bruta - PPB) e o que é utilizado para a respiração (R). No caso o PMS é personalizado para agro-estatísticas e expresso em quilogramas de matéria seca por hectare dia (kg/MS).

Os dados de PMS são derivados de imagens SPOT-VGT, combinado com dados do modelo meteorológicos ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) sendo disponibilizados com resolução de 1 km e atualizados a cada 10 dias. Em culturas saudáveis, sem restrição hídrica ou de nutrientes, a produção de matéria seca é proporcional à quantidade de luz interceptada pelo seu dossel.

Estimativas da produtividade da vegetação terrestre podem ser feito através da combinação de imagens de satélite, com radiação solar e informações sobre temperatura, utilizando a abordagem clássica (MONTEITH, 1972).

De acordo com Monteith (1972), o aumento da biomassa de matéria seca em uma base diária pode ser formulado como:

$$PMS_1 = R_1 * 0,48 * fRFA_1 * \varepsilon(T_1) * 10000$$

Onde:

$R_1$  [J/m<sup>2</sup>/dia] é a radiação de onda curta que chega do Sol (200-3000 nm), que é composto em média por 48% da RFA (Radiação Fotossinteticamente Ativa de: 400 - 700nm).

$fRFA_1$  é a fração RFA absorvida pela vegetação verde e podem ser estimados a partir de imagens de satélite.

$\varepsilon(T_1)$  [kgDM/JRFA] é o termo de eficiência, relacionado à conversão dessa energia absorvida pela biomassa (uso eficiente da radiação) e para as perdas relacionadas com o transporte fotossintético.

10 000 [m<sup>2</sup>/ha] é o fator que transforma metro quadrado em hectares, a unidade mais comum em agro-estatísticas.

As medições de radiação e temperatura mínima e máxima pode ser obtida por estações meteorológicas ou derivadas de modelos de circulação global a exemplo, ECMWF ou Météo-France. Dados meteorológicos são normalmente fornecidos em uma base diária com uma resolução de 0,25 graus e na projeção WGS-84.

Anteriormente a relação linear entre  $fRFA$  e IVDN, foi utilizada para estimar a  $fAPAR$  a partir de imagens de satélite. Esta relação tem sido muitas vezes demonstrada na literatura, por exemplo, Myneni e Williams, (1994). Assim, os valores da  $fRFA$ , foram estimados para cada pixel de 1 km, a partir da imagem de IVDN por meio da seguinte equação:

$$fRFA = A + B$$

Esta calibração foi realizada por Eerens *et al.* (2000) e resultou nos seguintes valores para SPOT-VEGETATION: A = - 0,247, B = 1,54.

Na implementação atual da  $fRFA$  é estimada por meio de redes neurais artificiais, treinadas em um banco de dados que foi simulado utilizando modelos de transferência radiativa (método Cyclopes: Baret *et al.*, 2007; Weiss *et al.* 2007).

Sendo que o primeiro passo, para a criação de produtos PMS, é a conversão de dados da radiância (R1) e temperatura (T1) diária para formato de imagem, ou seja, o cálculo de uma imagem  $PMS_1 \max$ .

No final de cada período de 10 dias,  $PMS_{10 \text{ max}}$ , é calculado como a média de todas as imagens de  $PMS_{1 \text{ max}}$ . Quando o novo produto VGT S10 torna-se disponível, as reflectâncias do Vermelho e IVP são convertidas para  $fRFA$  e usadas, juntamente com o  $PMS_{10 \text{ máx}}$  para o mesmo período de 10 dias, para o cálculo do produto PMS.

#### 2.4.2 Evapotranspiração de Referência (Eto)

Segundo Rizzi *et al.* (2006), as informações coletadas pelas estações meteorológicas é a principal fonte de dados para alimentar os modelos agronômicos. No entanto, devido à sua distribuição esparsa, principalmente em zonas rurais, juntamente com a representatividade pontual das mesmas e a disponibilidade de dados que atendam as necessidades dos modelos, a utilização plena de dados observados pode ser comprometida.

Conforme o Product User Manual, o algoritmo de evapotranspiração (ET), também desenvolvido pela LSA-SAF, objetiva a quantificação do fluxo de vapor de água da superfície do solo (solo e copa), para a atmosfera utilizando dados de entrada derivados dos satélites MSG. O método segue uma abordagem física e pode ser descrito como uma versão modificada e simplificada do módulo de transferência Solo-Vegetação-Atmosfera (SVAT), para aceitar como forçante dados de Sensoriamento Remoto Satelital (SRS), combinados com outras fontes, principalmente Modelos Numéricos de Previsão (MNP). A física deste modelo é baseada na física do esquema de superfície para processos exteriores, acima da terra - Esquema TESSEL-SVAT (VITERBO e BELJAARS, 1995; VAN DEN HURK *et al.*, 2000).

Para suprir essa dificuldade, é que se propõe o uso de dados provenientes de modelos numéricos do tempo que podem dispor de uma ampla gama de informações meteorológicas, com frequência diária para grandes áreas e formato compatível com dados de sensoriamento remoto, conforme trabalhos realizados por Rizzi *et al.* (2006), e Sugawara (2010), que demonstraram resultados aceitáveis com o uso do modelo regional de previsão do tempo ETA, utilizado no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), na ausência de dados observados. Por outro lado, observamos também algumas desvantagens que podem ser fatores limitantes como a disponibilidade de um banco de dados acessível, a precisão do modelo para determinadas regiões, além da resolução espacial, que no caso do modelo ETA está operacional em versões de 20 e 40 km.

Em abril de 2011, o programa europeu Land Surface Analysis Satellite Application Facility (LSA/SAF) disponibilizou, através do sistema de transmissão de dados de satélites EUMETCast, o produto LSA-16 (MET), que é o dado de Evapotranspiração Potencial (ETo), derivado a partir de imagens do satélite METEOSAT-9 (MSG), um satélite meteorológico geoestacionário que, através do sensor Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI), imageia 42% do globo, com 15 minutos de resolução temporal, 3 km de resolução espacial no nadir a 0° de latitude e longitude, além de uma banda de 1 km que proporciona um total de 12 canais espectrais com 10 bits de resolução radiométrica.

As principais variáveis radiativas de entrada para concepção da ETo são derivadas pelo LSA-SAF, como o produto Fluxo de Onda Curta Descendente ou Downward Surface Short-wave Flux (DSSF), que são baseados nos três primeiros canais de onda curta (VIS 0.6 $\mu$ m, IV 0.8  $\mu$ m, IVOC 1.6  $\mu$ m). Em seguida o produto Fluxo de Onda Longa Descendente, ou Downward Surface Long-wave Flux (DSLW), derivado a partir de um modelo híbrido baseado em dois esquemas de parametrização de céu claro e nublado, e dados modelados do ECMWF que, juntamente com o produto Albedo (AL) obtido também a partir dos três primeiros canais de onda curta já citada anteriormente, contempla os dados satelitais do MSG-9.

Os dados meteorológicos auxiliares necessários para o algoritmo MET são automaticamente obtidos das previsões ECMWF, pelos módulos de processamento do sistema LSA-SAF. Estes dados originalmente com a resolução espacial do ECMWF, são transpostos para a grade do MSG e espacialmente interpolados.

Atualmente, as variáveis meteorológicas utilizadas pelo algoritmo MET são:

- Temperatura (K) a 2m;
- Temperatura do ponto de orvalho (K) a 2m;
- Velocidade do vento em (m/s) a 10m;
- A pressão atmosférica ao nível do mar (Pa)
- A umidade do solo para as primeiras 4 camadas de solo ( $m^3/m^3$ )
- A temperatura do solo nas primeiras 4 camadas de solo (K)

Na versão 4.0 do algoritmo MET, foram inseridos os dados de cobertura do solo, que são derivados ECOCLIMAP (MASSON *et al.* 2003) e a classificação da cobertura terrestre foi reamostrada para resolução espacial do MSG, pois a resolução original do ECOCLIMAP é de 1km. Neste banco de dados, os parâmetros associados a uma dada grade variam mensalmente e espacialmente (parâmetros associados dependem da região

climática considerada). Esta abordagem é particularmente relevante em paisagens heterogêneas. Na versão atual, na base ECOCLIMAP, os seguintes produtos são explorados: tipos de cobertura do solo, a fração de cobertura de vegetação, índice de área foliar e rugosidade do terreno.

Por fim o produto  $ET_0$  é gerado a cada 30 minutos e recortado para a visada que cobre a América do Sul, com a resolução nominal do MSG-9 de aproximadamente 4 km.

## **2.5 Modelos de estimativa de produtividade agrícola**

Existem diversos métodos de estimativa de produtividade de safras, sendo que os mais aplicados são os métodos estatísticos e os agrometeorológicos.

Os métodos estatísticos utilizam várias técnicas para obtenção de dados como: visitas de campo, contato via telefone e o mais relevante, segundo a Conab (2008), o correto preenchimento dos formulários de levantamento de safra, encaminhados às usinas que dependem totalmente da qualidade das informações. De acordo com Conab (2010), atualmente há uma clara consciência da importância estratégica, econômica e de liderança que o setor sucroalcooleiro tem para o Brasil e para o mundo, além da necessidade de se manter uma parceria permanente entre o poder público e o setor privado.

Segundo a Conab, o levantamento de safras seguindo apenas os questionários pode transmitir a impressão de que os resultados são muito frágeis e sujeitos a distorções estatísticas. Entretanto, o principal argumento para aceitar os resultados divulgados como bastante verossímeis, está na sua consistência com o senso comum de quem atua nesse ramo de atividade e nas publicações de dados semelhantes em outras fontes. São também apresentados outros fatores que permitem assegurar sua credibilidade. O primeiro ponto a ser mencionado está no grande número de unidades visitadas e no enorme conjunto de dados coletados.

Estatisticamente, pequenos erros eventuais desde que não sistemáticos, são diluídos na massa dos dados e não têm como alterar de forma significativa, os resultados apurados. O segundo ponto a assegurar a qualidade das informações, está no nível de organização desse setor cuja regra geral é ter um alto padrão administrativo no funcionamento das unidades, controle efetivo dos parâmetros de seu funcionamento e na designação de membros de seu quadro de gerentes e técnicos habilitados a responder com proficiência aos questionários que são levantados por safra.

Finalmente, é ressaltado o papel dos entrevistadores que acumulam experiência e profissionalismo em tarefas desta natureza. Com isso, é importante notar que tanto a CONAB quanto o IBGE são dotados de uma larga tradição em pesquisa de levantamento de safras em um considerável conjunto de lavouras, nacionalmente.

No entanto, se faz necessário o aprimoramento de metodologias independentes que possam munir o setor agrícola com ferramentas que auxiliem na previsão de produtividade, em escalas regionais e locais, considerando-se os parâmetros de solo e de clima na modelagem de agrossistemas (BARBIERI, 2010).

Para realizar as estimativas de produtividade agrícola são necessárias informações sobre as características relativas à cultura, que, juntamente ao monitoramento dos índices de vegetação das áreas cultivadas podem alimentar o modelo agrometeorológico.

O modelo agrometeorológico proposto visa determinar a penalização da produtividade potencial da cultura, desconsiderando fatores como o tipo de variedade, doenças, pragas e fertilidade, ponderando a deficiência hídrica, que ocorre pelo somatório da relação entre a evapotranspiração real e a potencial (ETR/ETP) e de  $k_y$  que relaciona a deficiência hídrica com a demanda de água pela cultura nos estádios fenológicos (ROSA, *et al.* 2010).

Alguns autores propuseram a incorporação de um termo espectral ao modelo agrometeorológico, o qual é obtido através de imagens de satélite, gerando os denominados modelos agrometeorológico-espectrais. Nestes modelos, segundo Rudorff e Batista (1990), o componente agrometeorológico expressa as condições de radiação solar incidente, temperatura e umidade do ar e disponibilidade hídrica, enquanto que o componente espectral expressa às diferenças de práticas de manejo, cultivares e estresses não incluídos no modelo agrometeorológico (MELO, 2003).

Tais modelos devem ser simples, sem, no entanto, comprometer sua capacidade em descrever as relações biofísicas entre o solo, a vegetação e o ambiente no cálculo da produtividade agrícola. Existem vários modelos de estimativa de produtividade agrícola, que levam em consideração diversos fatores limitantes, como ocorrência de geadas, altas temperaturas, deficiência hídrica, entre outros. Contudo, um método mais comumente utilizado é o modelo agrometeorológico desenvolvido pela FAO (DOORENBOS; KASSAM, 1979), que apresenta de forma simplificada as componentes para estimativa da produtividade agrícola com base na penalização hídrica, características da cultura pela sua demanda hídrica em cada etapa fenológica. O modelo agrônomico da FAO tem por base a seguinte equação (DOORENBOS; KASSAM, 1979):

$$P_{est} = PM \left[ 1 - ky \left( 1 - \frac{ET_r}{ET_m} \right) \right]$$

Em que,  $P_{Est}$ , é a produtividade agrícola penalizada pelos fatores climáticos e edáficos ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ),  $PM$ , é a produtividade agrícola máxima na ausência de deficiência hídrica ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ),  $ky$  é o fator de resposta à produtividade,  $ET_r$  é a evapotranspiração real (mm),  $ET_m$  é a evapotranspiração máxima (mm).

O modelo da FAO pode ser aplicado em diversas configurações temporais e espaciais ao longo do ciclo de uma cultura agrícola. Sendo que, para obtenção do valor da produtividade total, deve ser feita a soma dos valores parciais de PR estimados em intervalos de tempo determinados, o que resulta, na produtividade agrícola do ano safra em avaliação. Além da produtividade, o modelo pode fornecer um índice de penalização, que representa a fração da produtividade agrícola que está sendo perdida em função de limitações do crescimento da cultura em um determinado ano safra (RIZZI *et al.* 2006).

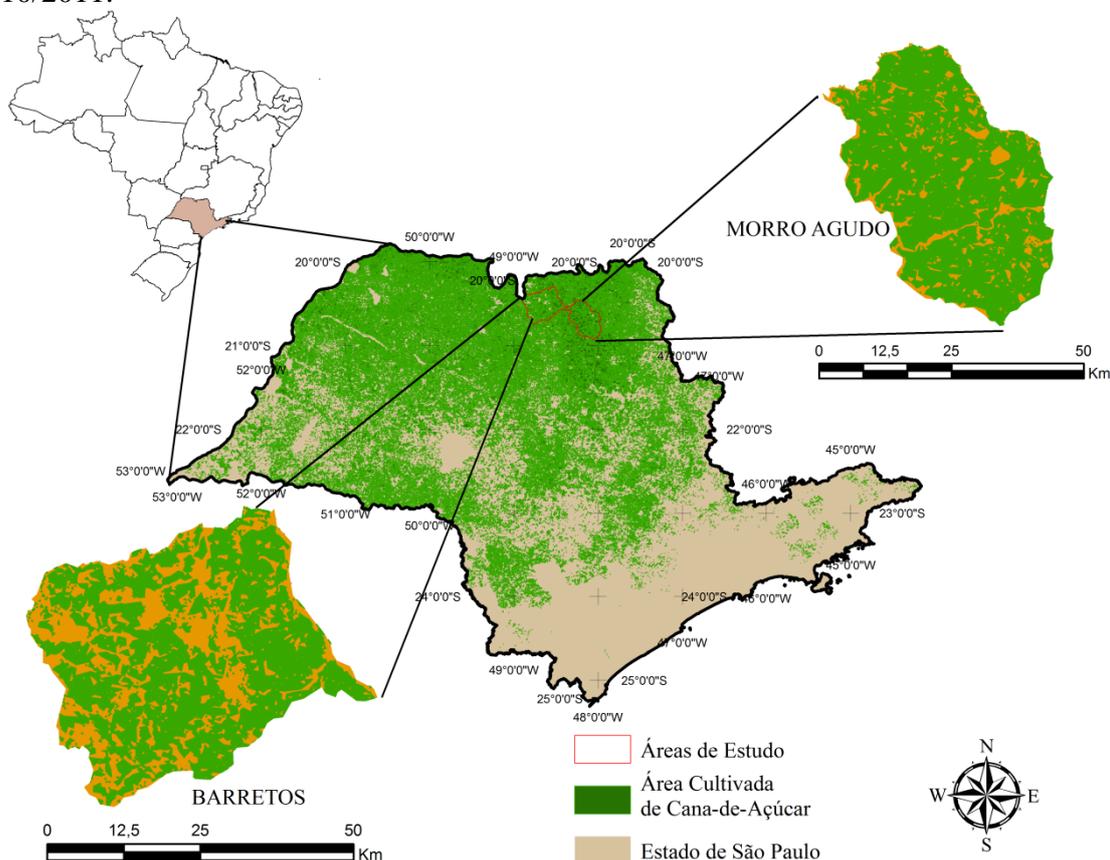
### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Áreas de estudo

O estudo foi realizado nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar, dos municípios de Morro Agudo e Barretos no estado de São Paulo, localizado entre as latitudes sul  $20^{\circ}17'$  e  $20^{\circ}56'$  e longitudes  $48^{\circ}50'$  e  $47^{\circ}58'$ , a oeste de Greenwich (Figura 2) durante os anos safra 2009/10 e 2010/11. As áreas em contraste nos municípios no mapa abaixo são informações vetoriais cedidas pela CONAB e correspondem às lavouras de cana-de-açúcar, que foram mapeadas através do produto EVI (Enhanced Vegetation Index) com resolução de 250 metros, derivado a partir do sensor MODIS para a safra ano de 2010. Este dado foi utilizada como máscara base para recorte, extração e análise de dados específicos das áreas de cana-de-açúcar.

A figura 2 apresenta a localização dos municípios do Estado de São Paulo, com destaque para as áreas de cultivo de cana-de-açúcar nos municípios estudados.

Figura 2 - Áreas de cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo no ano safra 2010/2011.



Fonte: Construído pelo Autor com dados cedidos pela CONAB, 2010.

### 3.1.1 Caracterização Ambiental da Área

A geologia local consiste de basaltos da Formação Serra Geral e de arenitos da Formação Adamantina, ambos componentes do Planalto Ocidental Paulista da Bacia Sedimentar do Paraná. Os solos são predominantemente Latossolo Roxo que se desenvolveram a partir das litologias do basalto; Latossolos Vermelho-Escuro e Amarelo, e os Podzólicos Vermelho-Escuro e Amarelo desenvolveram-se a partir das litologias do arenito, na área ainda ocorrem remanescentes de vegetação de Floresta Estacional Semidecidual e Cerrado, fragmentados, ocorrem em ambiente altamente antropizados (MOTA, 1999).

#### 3.1.1.1 Características Climáticas

A atividade agrícola depende fundamentalmente das oscilações do tempo e do clima, comprometendo-se, tanto nas relações espaciais como nas temporais. As primeiras têm a ver mais com as associações ecológicas, e as segundas regulam o ritmo da produção agrícola (MARTINELLI, 2010 *apud* MONTEIRO, 1976).

O Estado de São Paulo comporta os climas A - tropical e C - temperado úmido. O tropical A se subdivide em Af - tropical úmido sem estação seca e Aw- tropical úmido com inverno seco. Os climas temperados úmidos C se subdividem em Cwa - quente com inverno seco, Cwb - temperado com inverno seco, Cfa - quente sem estação seca e Cfb - temperado sem estação seca (MARTINELLI, 2010).

Segundo a CEPAGRI (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas aplicadas à Agricultura), ambos os municípios de Morro Agudo e Barretos, situam-se a 541m de altitude, e possui o clima do tipo Aw, descrito por Martinelli (2010) como tropical chuvoso com inverno seco e mês mais frio com temperatura média superior a 18°C. O mês mais seco tem precipitação inferior a 60 mm e com período chuvoso que se atrasa para o outono.

Em Morro Agudo a temperatura média anual de 23°C variando entre 19,7°C em julho e de 25,1°C em fevereiro e a precipitação média anual são de aproximadamente 1400 mm, sendo irregularmente distribuído durante o ano, apresentando índices mensais em torno de 252 mm em dezembro (mês mais chuvoso) e 17 mm no mês de agosto (mês mais seco).

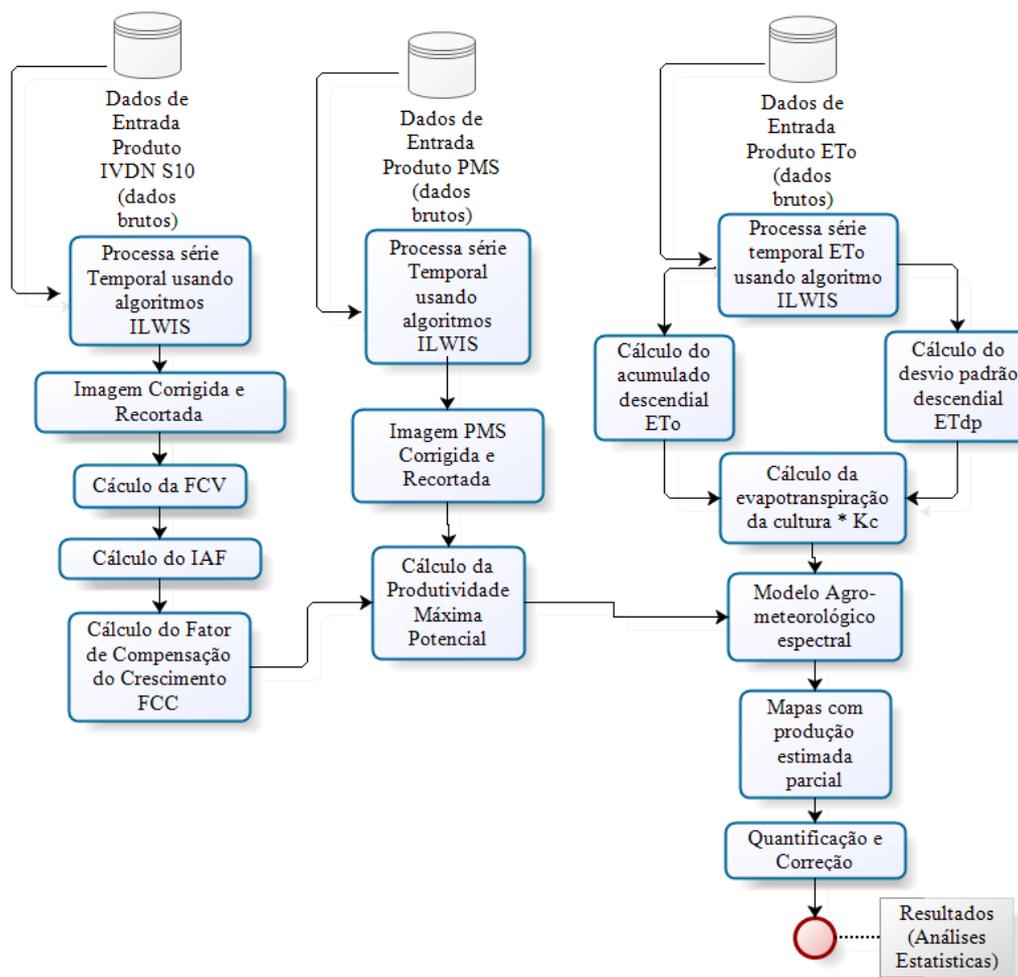
Barretos possui temperaturas médias anuais em torno de 24,8°C, com mínima em 21°C nos meses mais frios (junho e julho), com temperatura máxima de 27°C nos meses

mais quentes (dezembro a fevereiro) e precipitação de aproximadamente 1255 mm distribuídos irregularmente durante o ano, apresentando 229,5 mm em janeiro e 14,1mm em agosto.

### **3.2 Fluxograma metodológico**

Afim de melhor apresentar a sequencia lógica dos passos metodológicos para execução do modelo agrometeorológico espectral, foi elaborado um fluxograma (Figura 3) que abrange desde os dados de entrada no modelo até a última etapa dos resultados e análises estatísticas. O passo inicial se baseia nos bancos de dados brutos de entrada no modelo onde cada produto, IVDN, PMS e ETo, deverá passar pelas etapas subsequentes de preparação e processamento, afim de compatibilizar as áreas de estudo bem como a escala temporal de todos os produtos. Cada etapa é apresentada nos tópicos seguintes, partindo dos dados de sensoriamento remoto, explicando os detalhes de seu processamento, e segue com as etapas de concepção do modelo agrometeorológico espectral, onde a informação espectral é preparada para realizar as simulações em escala descendial.

Figura 3: Fluxograma metodológico.



Fonte: Autor, 2012.

### 3.3 Dados de sensoriamento remoto

Tendo como o foco o desenvolvimento do modelo aplicado para os dois anos safras, foram selecionados os produtos de IVDN e PMS em formato, hdf, disponibilizados pelo Flemish Institute for Technological Research (“VITO”), através do endereço eletrônico <http://www.devocast.eu/user/images/vgt/Form.do>, que possui acesso restrito aos usuários e parceiros do projeto DevoCoCast, no âmbito sistema recepção de dados EUMETCast, GEONETCast.

O produto ETo, foi obtido no mesmo formato, no sítio <http://landsaf.meteo.pt/> disponibilizado pelo Instituto de Meteorologia de Portugal que atua no programa LSA-SAF. Com isso, obteve-se um banco de dados, com todas as variáveis citadas referentes ao período de estudo, para os produtos de IVDN e ETo, o período de estudo foi compreendido

entre 10/09/09 e 09/09/2011 e para o produto PMS foi obtida uma série estendida que compreende o período de 01/01/2000 a 09/09/2011, sendo que os passos para processamento dos mesmos e extração dos resultados são apresentados nos tópicos a seguir.

### 3.3.1 Processamento das séries temporais do produto VGT-S10

Para alimentar o modelo agrometeorológico com informações espectrais é necessário processar um considerável volume de dados, uma vez que os produtos SPOT-Vegetation, são uma síntese do período de 10 dias, disponibilizados após cada processamento e que cobrem toda a América do Sul com resolução de 1 km.

Para tanto, foi escolhido o SIG, ILWIS (Integrated Land and Water Information System), que é *freeware* e *open source* desenvolvido pela UNIVERSITY OF TWENTE na *Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation* em Enschede, Holanda, que juntamente com a extensão GEONETCast Toolbox, desenvolvida pela mesma instituição, com o objetivo de possibilitar a importação e processamento de uma ampla gama de dados meteorológicos e imagens de satélites que são disseminados através do sistema EUMECast e GEONETCast.

Em virtude disso, Rocha (2011) desenvolveu rotinas de processamento e extração de dados das imagens dos produtos SPOT-VGT. O produto IVDN S10, faz parte do portfólio de dados que é recebido através do sistema e processados pelo ILWIS, o que permitiu que o *script*, originalmente construído para realizar a única tarefa de importar os dados recebidos, através da interface gráfica do software, fosse modificado e personalizado para atender as necessidades de processamento do modelo.

Dessa forma o *script* possibilitou processar toda a série de forma dinâmica executando as seguintes etapas:

- 1° Importação dos dados brutos de IVDN e IVDN\_SM (*Status Map*) no padrão .hdf para o formato nativo do ILWIS (.mpr), através da biblioteca *Gdal*;
- 2° Conversão do fator de escala do IVDN utilizando a equação  $ND * 0,004 - 0,1$ , onde ND é o número digital que varia de 0 a 255;
- 3° Checagem dos bits do produto IVDN\_SM, para classificação e geração da máscara para a imagem de IVDN;
- 4° Aplicação da máscara gerada no *Status Map* no produto IVDN;

5° Recorte do produto IVDN através das máscaras das lavouras de cana-de-açúcar geradas para cada área de estudo;

6° Geração do histograma da imagem para as áreas de estudo, para obtenção dos dados estatísticos de cada imagem.

Após esse processamento, a série de dois anos de dados, totalizou 72 imagens para cada município, que foram utilizadas para alimentar o modelo agrometeorológico-espectral.

### 3.3.2 Processamento das séries temporais do produto PMS

O produto PMS obtido compõe uma série de quase 12 anos de dados, que foram processados através de um *script* específico desenvolvido por Rocha (2011), etapas semelhantes das utilizadas no IVDN com a principal diferença de que neste, o produto já é entregue com as correções derivadas da máscara de nuvens e corpos d'água aplicadas. Os passos seguem na ordem abaixo:

1° Importação dos dados brutos de PMS no padrão hdf para o formato .mpr, através da biblioteca Gdal;

2° Conversão do fator de escala do PMS utilizando a equação  $ND * 0,01$ , onde ND é o número digital;

3° Recorte do produto PMS através das máscaras das lavouras de cana-de-açúcar geradas para todas as áreas de estudo;

4° Geração do histograma da imagem para as áreas de estudo, para obtenção dos dados estatísticos de cada imagem;

Com isso, obteve-se uma série temporal, composta por 421 imagens decendiais para cada município, que permitiu estimar a produção de matéria seca para os dois anos de análise, e desta forma alimentar o modelo agrometeorológico espectral.

### 3.3.3 Processamento das séries temporais do produto LSA-ETO

O dado de Evapotranspiração Potencial, que é gerado a cada 30 minutos, ao ser solicitado através no portal de produtos LSA SAF, pode ser disponibilizado individualmente e com intervalos de tempo com precisão de até 30 minutos, para que a seleção de dados seja possível e que tenham apenas a cobertura diurna da área de estudo,

uma vez que é produto e gerado 24 horas por dia. No entanto, esta tarefa se torna inviável, quando se é necessário realizar uma solicitação com grande abrangência temporal. Neste sentido, no portal, existe a possibilidade de realizar pedidos em lotes de vários meses, o que permite agilizar o processo de organização e *download*. Por outro lado, os dados entregues nessa opção cobrem tanto o período diurno como o noturno, quando não ocorre evapotranspiração e devem ser descartados.

Por isso, foi criado um script para deletar os dados do período noturno que não contém qualquer informação útil, o que propiciou uma redução significativa no volume de dados a ser processados.

Após a preparação dos dados foi utilizado um *script* desenvolvido por ROCHA, (2011) para realizar o processamento dos dados recebidos, as etapas realizadas são apresentadas a seguir:

- 1° Importação dos dados brutos de ETo no padrão .hdf para o formato .mpr, através da biblioteca Gdal;
- 2° Conversão do fator de escala do ETo utilizando a equação  $\text{iff}(\text{ND} > -1, \text{ND} / 10000, 0)$ , onde ND é o numero digital;
- 3° Recorte do produto ETo através das máscaras das lavouras de cana-de-açúcar geradas para cada áreas de estudo.

Em seguida, diretamente no ILWIS, todos os dados foram organizados para os mesmos decêndios dos produtos de IVDN e PMS, através da ferramenta *map list*. Em seguida, foram calculados a soma e desvio padrão de todos os decêndios para cada município. No total foram processados aproximadamente 19.170 produtos gerados a cada meia hora do período diurno.

Posteriormente, foi desenvolvido um *script* com base no trabalho realizado por ROCHA (2011), para obter a Evapotranspiração da Cultura calculada para todos os decêndios analisados em cada município através da equação:

$$ET_c = ET_0 * ET_{DP} * k_c$$

Onde:

$ET_c$  = Evapotranspiração da Cultura;

$ET_0$  = Evapotranspiração Potencial decendial;

$ET_{DP}$  = Desvio padrão da Evapotranspiração decendial;

$Kc$  = Coeficiente da cultura da cana-de-açúcar, dado por Doorenbos e Kassam, (1979), disponível na tabela 2.

A Tabela 2 apresenta os valores do coeficiente da cultura da cana-de-açúcar, apresentados por Doorenbos e Kassam (1979).

Tabela 2 - Coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) da cultura de cana-de-açúcar.

<b>Cultura</b>	<b><math>K_{c_{ini}}</math></b>	<b><math>K_{c_{med}}</math></b>	<b><math>K_{c_{fim}}</math></b>
Cana-de-açúcar	0,40	1,25	0,75

Fonte: Doorenbos e Kassam, 1979.

### 3.4 Concepção do modelo agrometeorológico-espectral

#### 3.4.1 Modelo Agrometeorológico

O modelo agrônômico de estimativa de produtividade agrícola apresentado pela Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO) foi adaptado por diversos autores para tornar possível a assimilação de dados espectrais. As etapas de sua concepção são apresentadas nos tópicos seguintes. Ademais, a equação 1 descreve o modelo FAO proposto por Doorenbos e Kassam, (1979):

$$PEst = PM \left[ 1 - ky \left( 1 - \frac{ET_c}{ET_o} \right) \right] \quad (1)$$

Em que:

$PEst$  = Produtividade Estimada;

$PM$  = Produtividade Potencial ou Máxima;

$ET_r$  = Evapotranspiração da cultura;

$ET_o$  = Evapotranspiração potencial;

$ky$  = Fator de resposta da vegetação à disponibilidade hídrica, dado por Doorenbos & Kassam, (1979), apresentado na Tabela 3.

A Tabela 3 apresenta o fator de resposta de produtividade por período fenológico apresentado por Doorenbos e Kassam (1979).

Tabela 3 - Fator de resposta de produtividade por período fenológico ( $k_y$ )

<b>Cultura</b>	<b>Período Vegetativo</b>	<b>Ganho de Produtividade</b>	<b>Maturação</b>
Cana-de-açúcar	0,75	0,5	0,1

Fonte: Doorenbos e Kassam, 1979.

### 3.4.2 Estimativa da Produtividade Potencial

A produtividade máxima representa o potencial que a cultura pode atingir sem restrições hídricas, déficit nutricional, baixa radiação solar, doenças e pragas. A equação 2 e seus termos, foram adaptados para cada município, e são apresentados abaixo:

$$P_M = F_{CC} * F_r * F_{pa} * TE * ILA * PMS \quad (2)$$

Em que:

$F_{CC}$  = fator de compensação do crescimento;

$F_r$  = fator de respiração da cultura;

$F_{pa}$  = fator de produtividade agrícola;

$TE$  = período de tempo entre duas estimativas consecutivas (em dias);

$ILA$  = Índice local de ajuste;

$PMS$  = Produção de massa de matéria seca bruta do grupo da cultura.

O  $F_r$  é utilizado para compensar o gasto de energia que as plantas utilizam no processo de respiração em função da temperatura. Quando a temperatura média é inferior a 20 °C, a planta utiliza 40% da energia gerada para a sua própria manutenção e o valor de compensação é 0,6 em temperaturas médias acima de 20 °C. A planta utiliza 50% desta energia, o que resulta em 0,5 que é o valor adotado. O fator de produtividade agrícola adotado foi de 2,9 propostos por Rudorff (1985) e o valor de  $TE$  é 10, conforme a escala temporal dos dados.

Para a determinação do PM, foi proposta uma adaptação a partir da relação média descrita por Doorenbos e Kassam (1979) descrita na tabela 4, onde se adotou uma temperatura média de 25 °C para os dois municípios, o que corresponde ao valor de 65 kg/ha/h.

Todavia, este valor fixo representa apenas uma média que varia durante todo o período fenológico da planta, e sem dados meteorológicos suficientes para abordar os diferentes métodos, optou-se por calcular a média da série temporal de 11 anos referentes ao produto PMS, que foi processado para as áreas de estudo.

Através do processamento do histograma, obteve-se a informação da média de cada imagem decendial. Posteriormente, calculou-se a média de todo o período e seu resultado foi relacionado ao valor de 65 kg/ha/h. Dessa forma, foi possível gerar um índice local de ajuste e associá-lo ao comportamento da cultura observado no produto PMS, com o patamar médio da taxa de produtividade descrita na tabela 4, tornando o índice PM dinâmico e coerente, ao comportamento da safra, sendo que o resultado obtido foi de 6,52 para o município de Barretos e 6,65 para Morro Agudo.

A Tabela 4 mostra a relação entre a temperatura média em °C e a taxa de produtividade de matéria seca em Kg/ha/h para o grupo de cana-de-açúcar.

Tabela 4 - Relação entre Temperatura Média (TM) em °C e a Taxa de Produtividade de Matéria Seca (TPMS) em Kg/ha/h para o grupo da cana-de-açúcar

<b>TM (°C)</b>	5	10	15	20	25	30	35	40	45
<b>TPMS (Kg/ha/h)</b>	0	0	5	45	65	65	65	45	5

Fonte: Doorenbos e Kassam, 1979.

### 3.4.3 Estimativa do Fator de Compensação do Crescimento

O Fcc é calculado pela equação 3, que foi definida por Berka *et al.* (2003), com base em dados tabulares apresentados em Doorenbos e Kassam (1979) onde:

$$F_{cc} = 0,515 - e^{(-0,644 - (0,515 * IAF))} \quad (3)$$

Onde:

FCC = Fator de Compensação do Crescimento

IAF = Índice de Área Foliar varia conforma a fase fenológica da cana-de-açúcar.

### 3.4.4 Estimativa do índice de área foliar

Para estimar o IAF foi utilizada a equação 4 proposta por Norman et al. (2003).

$$IAF = -2\ell n (1 - F_c) \quad (4)$$

Em que:

$F_c$  é a fração do solo coberta pela cultura.

### 3.4.5 Estimativa da fração de cobertura do solo pela cultura

O índice  $F_c$ , foi determinado por meio da equação 5, com base na relação dos valores de índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN), proposta por Choudhury, *et al.* (1994) para área de estudo.

$$F_c = 1 - \left( \frac{IVDN_{max} - IVDN}{IVDN_{max} - IVDN_{min}} \right)^{0,9} \quad (5)$$

Em que:

$F_c$  = Fração do solo coberto pela cultura;

$IVDN_{max}$  = Valor máximo do IVDN da imagem;

$IVDN_{min}$  = Valor mínimo do IVDN da imagem;

IVDN = Valor do índice em cada pixel da imagem.

## 3.5 Outros dados

### 3.5.1. Dados Oficiais de Produtividade Agrícola

Foram obtidos dados históricos detalhados de produtividade agrícolas declarados através de questionários de levantamento de safra diretamente nas usinas na área de influência dos municípios de Barretos e Morro Agudo, cedidos pela CONAB para fins de pesquisa. Os dados do IBGE foram disponibilizados através do Sistema IBGE de Recuperação Automática, que pode ser acessado no endereço eletrônico <http://www.sidra.ibge.gov.br/>

### 3.5.2 Dados Meteorológicos

Através do Instituto Nacional de Meteorologia, foram obtidos dados horários da estação meteorológica de Barretos das respectivas variáveis: temperatura máxima, mínima, média, ponto de orvalho, umidade, precipitação, radiação global, velocidade e direção do vento. Porém, a estação foi instalada somente em 19/06/2010 o que impossibilitou o seu pleno aproveitamento no estudo.

Através dos dados disponibilizados, foram calculados os valores diários de precipitação acumulada, que foram relacionados ao comportamento do IVDN em cada município, uma vez que Morro Agudo encontra-se na área de influência da estação.

### 3.5.3 Dados Topográficos

Além dos dados espectrais, meteorológicos e de localização das áreas de cultivo de cana-de-açúcar, foram processados, através de rotinas do SIG ILWIS, produtos de declividade e modelagem digital do terreno, a partir de imagens obtidas pela missão de levantamento topográfico por radar sub-orbital realizada pela NASA, por meio da nave Endeavour - Missão “Shuttle Radar Topographic Mission” - (SRTM).

Os dados têm resolução espacial de 90m, e foram obtidos no seguinte endereço eletrônico: <http://dds.cr.usgs.gov/srtm/>.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Relação entre a máscara da cana-de-açúcar e o relevo

Os municípios foram selecionados com base nas informações disponibilizadas pelo IBGE, que apontam Barretos como segundo maior produtor de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo com 5,8 milhões de toneladas e Morro Agudo o maior produtor da cultura no País chegando a quase 8 milhões de toneladas.

Os valores mencionados são baseados em trabalhos estatísticos, o que torna indispensável manter o monitoramento das áreas produtivas, que variam ano a ano. Trabalho este, que é realizado pela CONAB, que para este estudo disponibilizou os dados vetoriais das áreas de cultivo por ser um componente fundamental, não só para localização, como o processamento e extração de dados que alimentará o modelo agrometeorológico espectral. A "máscara" das áreas de cana-de-açúcar corresponde ao mapeamento realizado para o ano de 2010 e foi gerada através de metodologias de processamento de imagens MODIS, que proporcionou um produto com resolução de 250 metros.

Para este estudo, a "máscara" foi reamostrada para a resolução de 1 km, tornando-se compatível com os dados de entrada do modelo. Através da máscara também foi possível correlacionar as áreas de cultivo, com as características do relevo presente nos dois municípios, com base no processamento das imagens de radar SRTM, onde foi realizada a sobreposição do produto de declividade, modelagem digital do terreno (MDT) e as máscaras de cana-de-açúcar para cada município.

Os resultados são apresentados na Figura 4, sendo que, a declividade gerada em graus foi classificada conforme a Resolução CONAMA n. 289 de 25 de outubro de 2001 e é apresentada na tabela 5.

Analisando a Figura 3, podemos observar que as regiões com maior declive apresentam menor concentração de áreas de cultivo. Nota-se ainda que as maiores lavouras estão no entorno das feições entre os cursos d'água. Os dados de declividade mostram que grande parte do município de Barretos tem relevo classificado como plano a suave ondulado, com exceção a sua porção leste cujo relevo oscila entre plano a muito ondulado, próximo aos cursos d'água.

Em Morro Agudo, quase a totalidade de seu relevo foi classificado entre plano e suave ondulado. Esta característica é um dos pontos que explicam suas extensas áreas de cultivo, abrangendo praticamente 80% da área do município, salvo as áreas circundantes à

sua sede, às regiões nas margens dos corpos d'água e pequenas áreas com relevo pouco mais acidentado.

O MDT revelou feições de uma rica rede de drenagem nos dois municípios, o que possibilita a utilização de irrigação para evitar ou minimizar o estresse hídrico na cultura. A característica do relevo plano possibilita a prática da agricultura mecanizada. Sendo este, mais um fator que contribui para os altos índices de produção na região dos dois municípios.

Tabela 5 - Classes de Relevo e Declividade.

<b>Classes de Relevo</b>	<b>Classes de Declividade</b>
<b>Descrição</b>	<b>Em graus</b>
Plano	0 - 3
Suave Ondulado	3 - 6
Ondulado	6 - 9
Muito Ondulado	9 - 14
Forte Ondulado	14 - 25
Áreas de Uso Restrito	25 - 45
Área de Preservação Permanente	> 45

Fonte: Adaptado CONAMA 289/2001.

Foram comparados os dados relativos à área plantada para o ano de 2010 nos dois municípios. É importante ressaltar que o IBGE é o único instituto que apresenta dados oficiais por município. Os valores de área cultivada atribuídos à CONAB na tabela 6 são derivados a partir da "máscara" utilizada neste estudo.

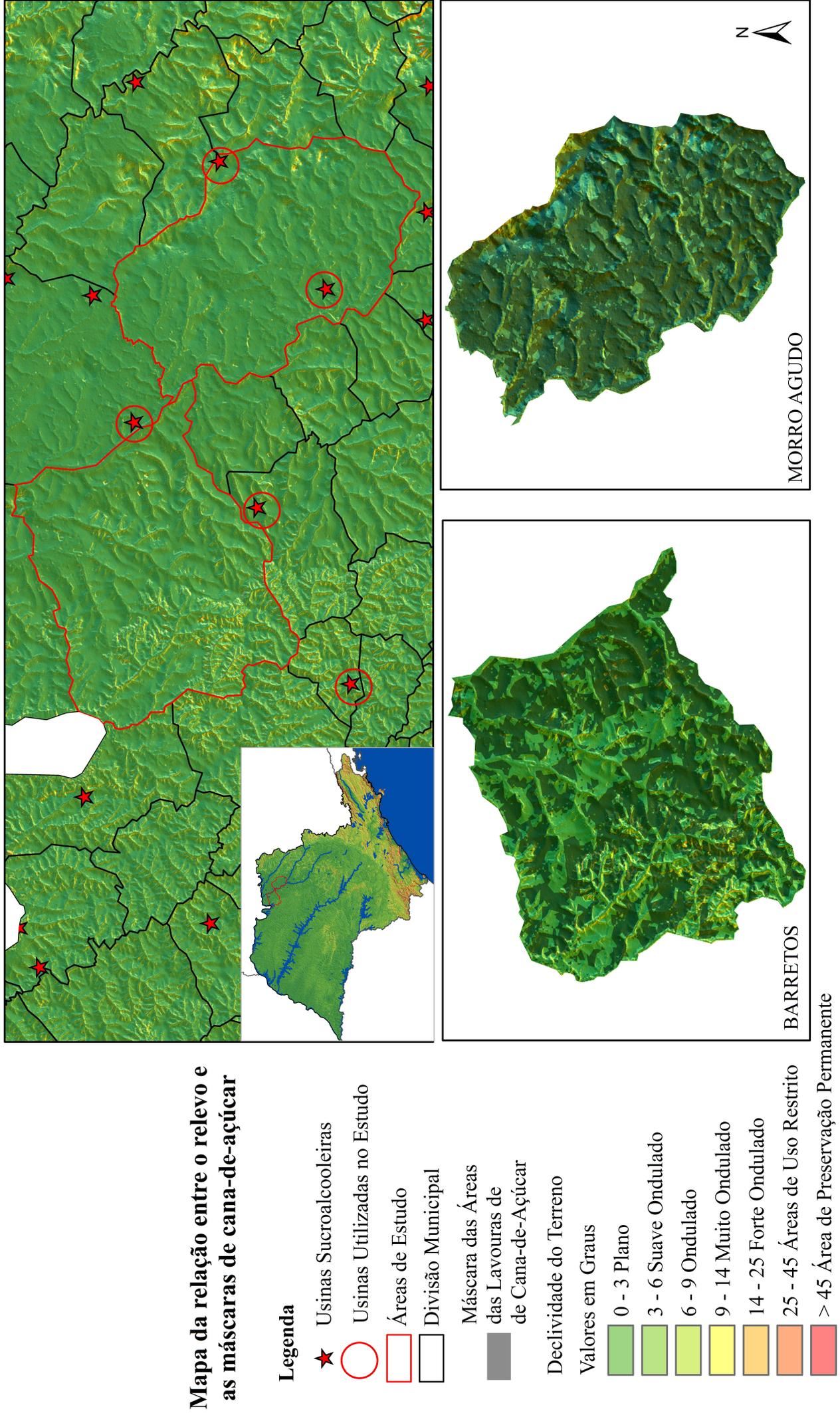
Os dados provenientes do mapeamento da CONAB apresentam uma área significativamente maior em Barretos, com uma diferença de 25 mil hectares. Em Morro Agudo, os dados da máscara também foram superiores, mas com diferença por volta de 11 mil hectares. Apesar desta discrepância, as duas informações devem ser consideradas, pois foram utilizadas diferentes metodologias para a concepção do dado.

Tabela 6 - Comparação entre as áreas estimadas de cultivo de Cana-de-Açúcar, para o ano de 2010.

<b>Áreas de Lavouras de Cana-de-Açúcar (ha)</b>		
<b>Safra 2010</b>	<b>IBGE</b>	<b>CONAB</b>
Barretos	64.554	89.828
Morro Agudo	96.900	108.481

Fonte: Autor, 2012.

Figura 4: Mapa de relevo e localização das usinas de cana de açúcar utilizadas na área de estudo



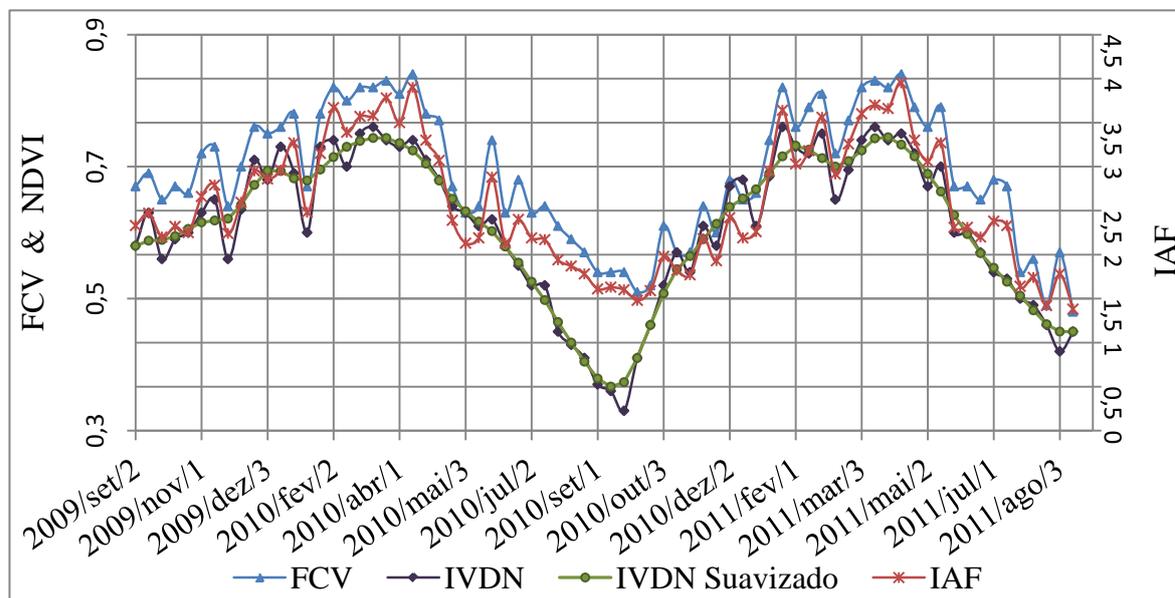
## 4.2 Análise das séries temporais dos índices de vegetação

### 4.2.1 Relação entre os índices IVDN, FCV e IAF

Com o desenvolvimento de rotinas na forma de scripts, foi possível realizar o processamento em lotes e, ao mesmo tempo, extrair os dados estatísticos da série de imagens, o que dinamizou várias etapas metodológicas e permitiu monitorar o comportamento do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN), Fração de Cobertura Vegetal (FCV) e Índice de Área Foliar (IAF).

Através do histograma de cada imagem, obteve-se a média dos índices de vegetação para as áreas de cultivo nos municípios estudados. E, para o comportamento do IVDN, foi utilizado um filtro que calcula a média de um ponto com seus dois vizinhos mais próximos, dessa forma o filtro foi aplicado até a terceira interação, quando apresentou uma melhor suavização do perfil, esse procedimento foi realizado nos dois perfis de IVDN de cada município. Em Barretos (Figura 5), o comportamento do IVDN apresentou o perfil característico do ciclo da cana-de-açúcar, que abrange o início da resposta vegetativa por volta do mês de outubro, que está diretamente relacionado ao início da estação chuvosa e ao estágio fenológico de brotação e desenvolvimento vegetativo, que é apresentado no calendário agrícola (Tabela 7), elaborado pela Gerência de Geotecnologias (GEOTE\CONAB) para a mesorregião de Ribeirão Preto, na qual Barretos está inserido.

Figura 5 - Comportamento dos índices de vegetação IVDN (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), FCV (Fração de Cobertura Vegetal) e IAF (Índice de Área Foliar), no período setembro de 2009 a setembro de 2011, no município de Barretos.



Fonte: Autor, 2012.

Tabela 7 - Calendário agrícola da cana-de-açúcar na mesorregião de Ribeirão Preto.

Mesorregião	CANA-DE-AÇÚCAR											
	JUL		AGO		SET		OUT		NOV		DEZ	
Ribeirão	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>										
	M/C		M/C		P		B	B/DV		DV		
Preto – SP	JAN		FEV		MAR		ABR		MAI		JUN	
	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>										
	DV										M/C	
Sistema de Ano (Ciclo médio: 320 dias)												

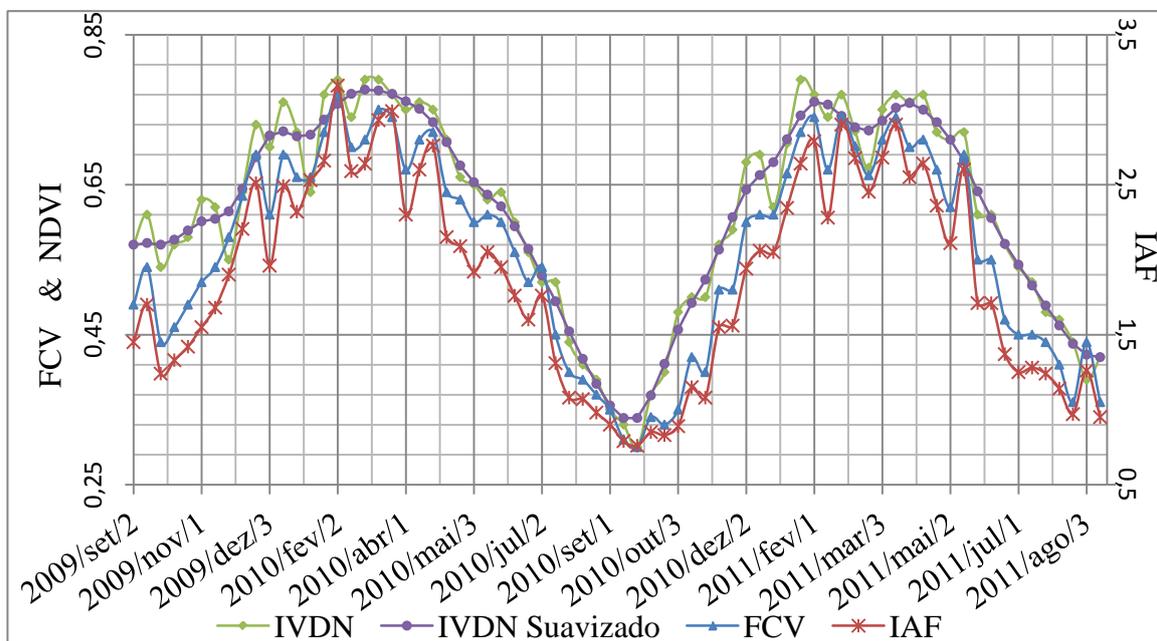
**Legenda:**

P	Plantio	DV	Desenvolvimento Vegetativo	C	Colheita
B	Brotação	M	Maturação	11 <sup>a</sup> quinzena	2 <sup>a</sup> quinzena

Fonte: Adaptado GEASA/CPTEC. Elaboração: GEOTE

A Figura 6 refere-se ao comportamento dos índices de vegetação em Morro Agudo, onde é possível notar as semelhanças com os índices encontrados em Barretos que pode ser atribuída à proximidade geográfica entre os municípios e à qualidade da máscara das áreas de cultivo, que permitiu realizar a filtragem dos dados.

Figura 6 - Comportamento dos índices de vegetação IVDN (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), FCV (Fração de Cobertura Vegetal) e IAF (Índice de Área Foliar), no período setembro de 2009 a setembro de 2011, no município de Morro Agudo – (decêndios).



Fonte: Autor, 2012.

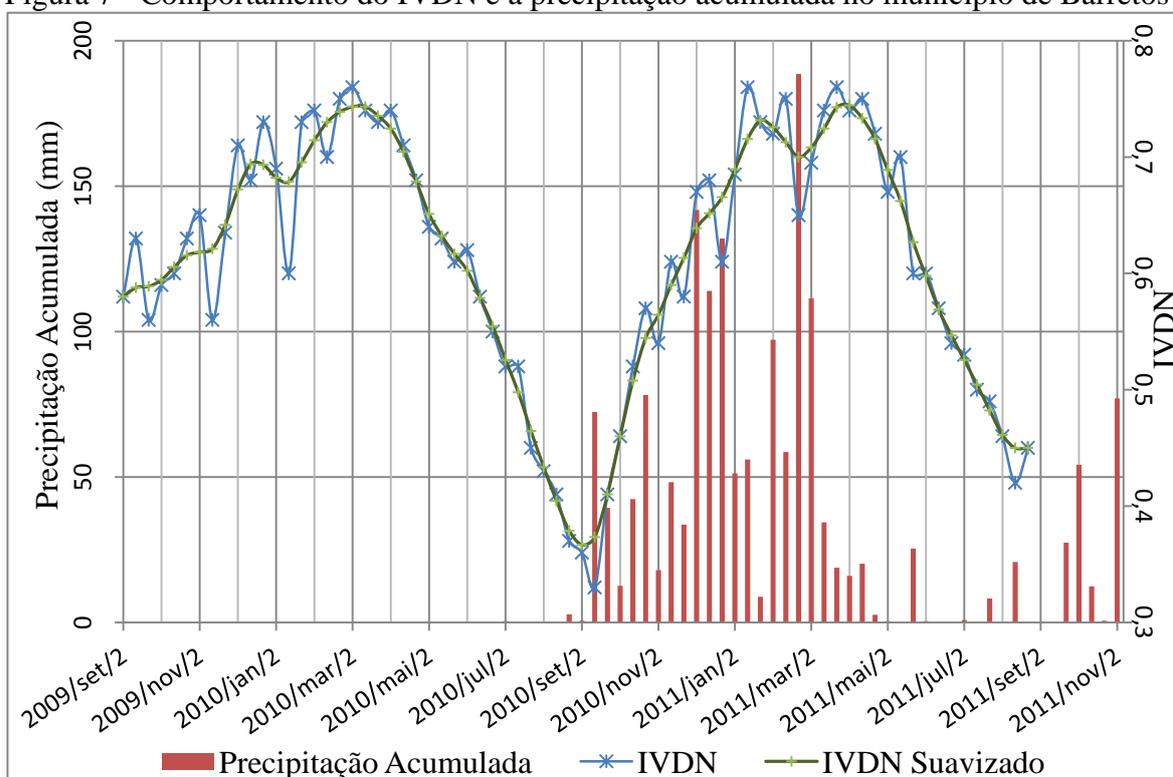
O perfil do comportamento dos índices FCV e IAF acompanhou o perfil do IVDN nos dois municípios, como já eram esperados, uma vez que metodologicamente, eles são derivados da mesma fonte de dados. O IAF apresentou valores coerentes para a cultura da cana de açúcar em máximo desenvolvimento fenológico, conforme estudos realizados por Nassif (2010), que encontrou valores entre 2,7 a 3,5 ( $m^2$  de folha/ $m^2$  de área de solo), em cultivos experimentais nos municípios de Piracicaba e Pradópolis.

Dentre as poucas diferenças encontradas nas figuras 5 e 6, está a relação entre o FCV e o IAF, que em Barretos se deslocou do IVDN no período entre safras, isso pode ser atribuído a possíveis contaminações na máscara de cana, que nesta época é mais sensível, pode gerar tais diferenças. Já que em Morro Agudo o mesmo não ocorreu, o que pode ser um indicativo da qualidade da máscara nessa região que proporcionou baixos pontos de contaminação.

#### 4.2.2 Relação entre IVDN e Precipitação

Na Figura 7, observa-se a relação entre a precipitação acumulada decenal, gerada a partir da estação meteorológica do INMET, que foi instalada em Barretos em junho de 2010, e a média decenal de IVDN em Barretos, tornando possível observar que a defasagem entre a ocorrência de totais pluviométricos mais significativos e o aumento do IVDN, fica em torno de 1 mês. Observamos ainda que o IVDN suavizado foi melhor para apresentar o comportamento da cana, uma vez que os dados originais do índice estão sujeitos a todos os tipos de interferências temporais como presença de nuvens, principalmente no período em que o índice encontra-se mais elevado, o que está diretamente relacionado a precipitação local. Dessa forma o filtro atingiu seu objetivo minimizando esses efeitos adversos. Esta análise pode ser melhor definida, em virtude da alta resolução temporal dos dados de IVDN que foram capazes de mostrar a interferência de efeitos locais nos dados originais.

Figura 7 - Comportamento do IVDN e a precipitação acumulada no município de Barretos

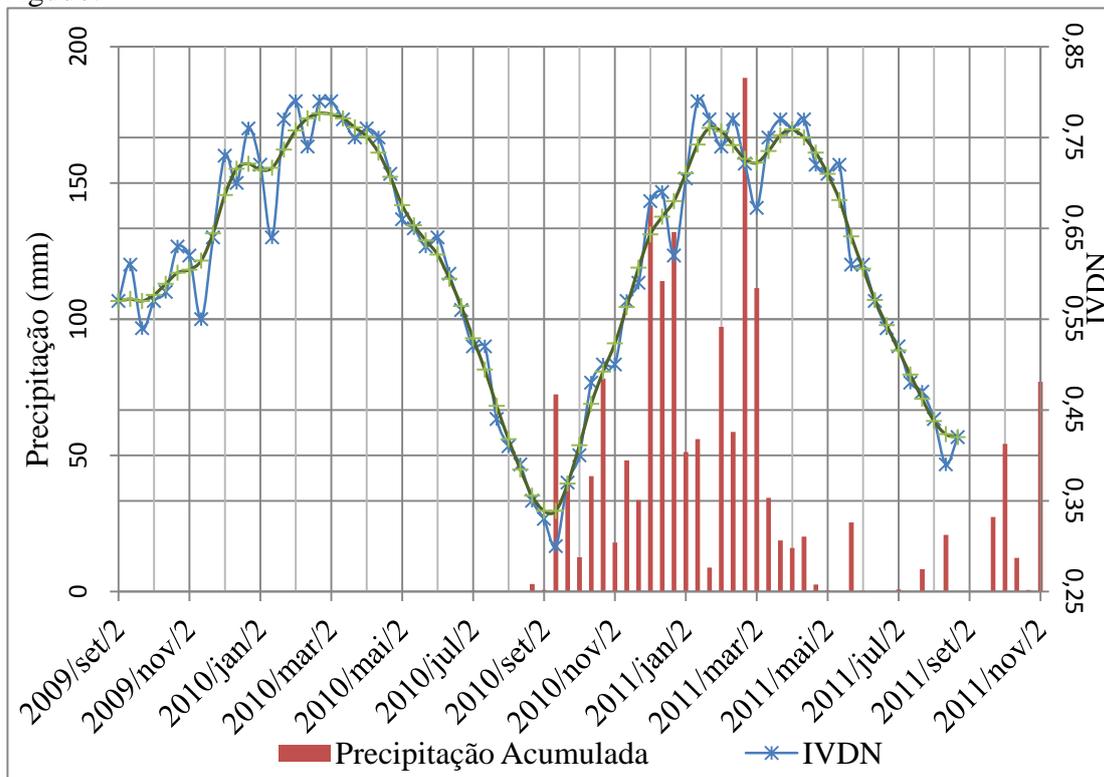


Fonte: Autor, 2012.

Na Figura 8, observa-se também a relação entre a precipitação acumulada decenal e a média decenal de IVDN no Município de Morro Agudo, sendo observado da mesma

forma, uma defasagem entre a ocorrência de totais pluviométricos mais significativos e o aumento do IVDN, em torno de 1 mês.

Figura 8 - Comportamento do IVDN e a precipitação acumulada no município de Morro Agudo.



Fonte: Autor, 2012.

Observa-se ainda que no ano safra 2009/2010 o comportamento dos índices de vegetação atingiu seu máximo por volta de março/2010 e iniciou o declínio no fim de abril, o que pode indicar o fim do período de maturação e início da colheita, quando ocorre uma queda mais acentuada, onde o IVDN varia do patamar de 0,7 para aproximadamente 0,5 nos valores médios.

A análise do perfil de IVDN permitiu estimar o período do início da colheita, o que contribuiu na seleção do intervalo de tempo a ser considerado para determinar a produtividade total estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral. Dessa forma, na safra 2009/2010 foram selecionados os dois últimos meses anteriores ao início do declínio do IVDN que correspondem a março e abril, que estão relacionados também ao período de maior desenvolvimento vegetativo e maturação que precede a colheita que ocorre entre maio e junho.

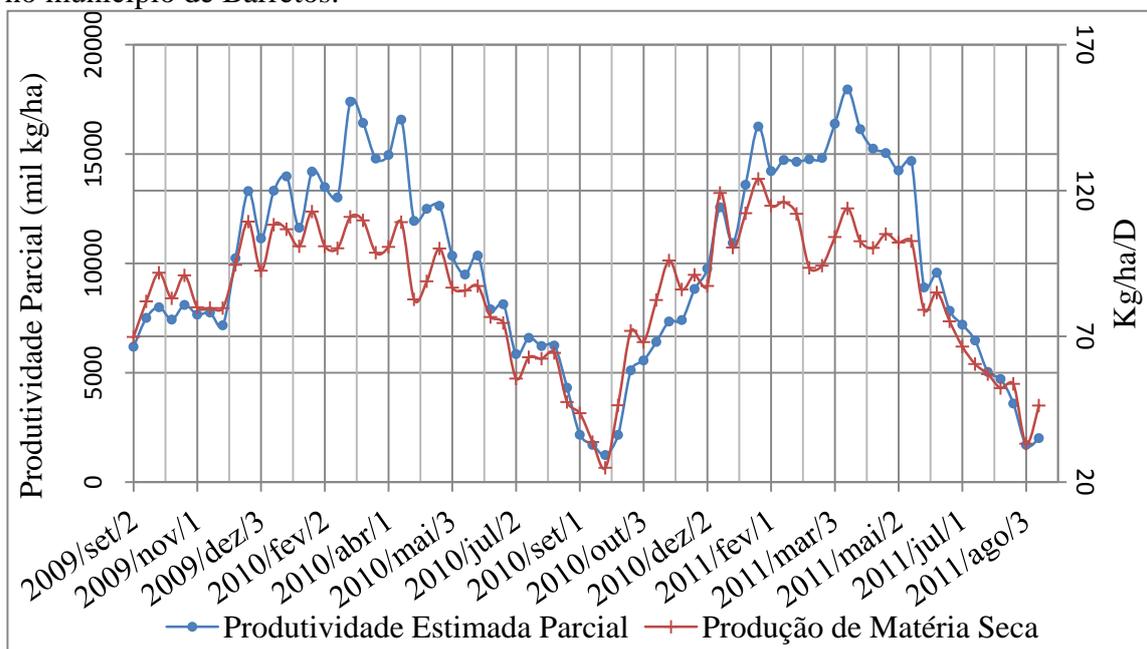
O ano safra 2010/2011, apresentou um desenvolvimento vegetativo mais tardio, se comparado à safra anterior, observa-se no IVDN, que apenas em novembro houve um crescimento significativo, chegando a 0,57, quando no mesmo período no ano anterior este valor já atingia 0,63. Segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA), a falta de chuvas que ocorreu nos meses de julho, agosto e setembro de 2010, atrasou o preparo da lavoura e conseqüentemente todo o ciclo da cultura no Estado, que aliado a pouca renovação dos canaviais e baixo investimento dos produtores em insumos, provocou uma quebra de 6,16% neste ano safra.

Com base no comportamento do IVDN, foi determinado que o período de colheita ocorrido no primeiro decêndio de junho de 2011 e da mesma forma que a safra anterior, foram considerados os dois últimos meses de maturação que correspondem a abril e maio como o período preferencial para estimativa da produtividade total.

#### 4.2.3 Relação entre o produto PMS e a Produtividade Estimada Parcial

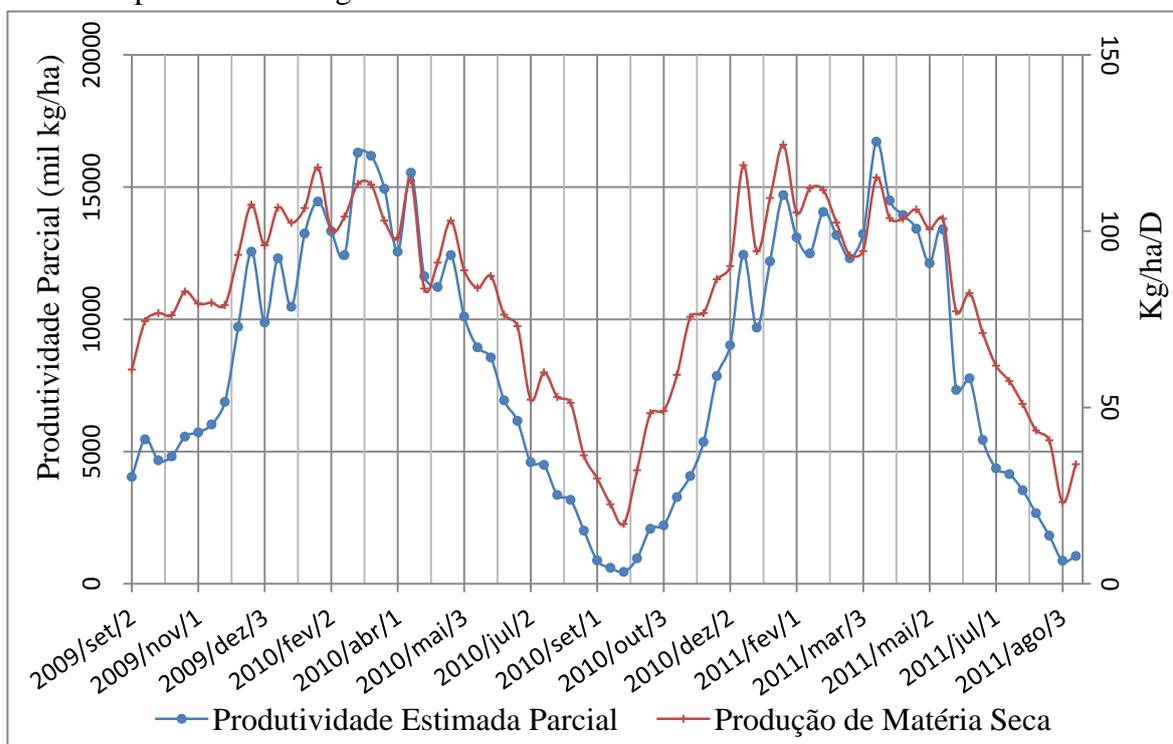
As Figuras 9 e 10 apresentam a relação entre os dados médios do dado Produção de Matéria Seca (PMS) e a média dos resultados parciais gerados pelo modelo agrometeorológico-espectral, denominada produtividade estimada parcial, onde observamos que, o comportamento dos produtos estão em diferentes proporções, mas na mesma fase. Esse resultado é um indicativo de que, a produtividade estimada parcial acompanha a tendência do desenvolvimento fenológico da cultura.

Figura 9 - Comportamento do produto PMS e a Produtividade Estimada Parcial decendial no município de Barretos.



Fonte: Autor, 2012.

Figura 10 - Comportamento do produto PMS e a Produtividade Estimada Parcial decendial no município de Morro Agudo.



Fonte: Autor, 2012.

Numa análise mais aprofundada das figuras anteriores, torna-se evidente a queda da produtividade estimada parcial, na mesma proporção e nos dois municípios, sendo que no

ano safra 2009/2010, o declínio ocorreu paulatinamente a partir da queda nos índices, no final de abril.

No ano safra seguinte (2010/2011), os valores de produtividade estimada decaíram de forma abrupta a partir de junho, o que demonstra influência direta do processo de colheita tardio, que adentrou o período de estiagem, conforme observamos os totais de precipitação acumulados encontrados nas figuras 7 e 8.

#### **4.3 Estimativa da produtividade total geoespacializada**

Diversos autores realizaram estudos utilizando dados meteorológicos e dados de sensoriamento remoto para a estimativa da produtividade de culturas agrícolas. Dentre eles, destacam-se Rudorff (1985), Rudorff e Batista (1991), Bach, (1998), Fontana *et al.* (2001), Berka *et al.* (2003), Rizzi e Rudorff (2007) e mais recentemente, Sugawara (2010) que tiveram como principal fonte de informação a variável do índice de vegetação, extraída de imagens de sensoriamento remoto, cuja a resposta espectral indica que o vigor vegetativo das culturas é relacionada à produtividade agrícola através de modelos agrometeorológicos-espectrais adaptados para o uso de diferentes dados.

Estimativas da produtividade agrícola da cana-de-açúcar têm grande relevância para o planejamento de atividades no setor sucroalcooleiro e também para o planejamento nas operações das usinas e órgãos governamentais.

Em geral, as estimativas de produtividade agrícola das áreas canavieiras de uma usina, são feitas antes do início da colheita por técnicos que percorrem os canaviais e observam o desenvolvimento das lavouras, atribuindo-lhes valores de produtividade, com base na experiência adquirida e em informações de anos anteriores. Esta análise pode ser tendenciosa e não permite a análise dos erros envolvidos (PICOLI *et al.*, 2009)

Por esta razão, modelos agrometeorológicos-espectrais que possibilitem a geoespacialização de seus resultados e que identifiquem as maiores regiões produtoras, pode ser uma ferramenta diferenciada na análise da produtividade o que permite subsidiar desde estratégias nas políticas até os investimentos do setor privado.

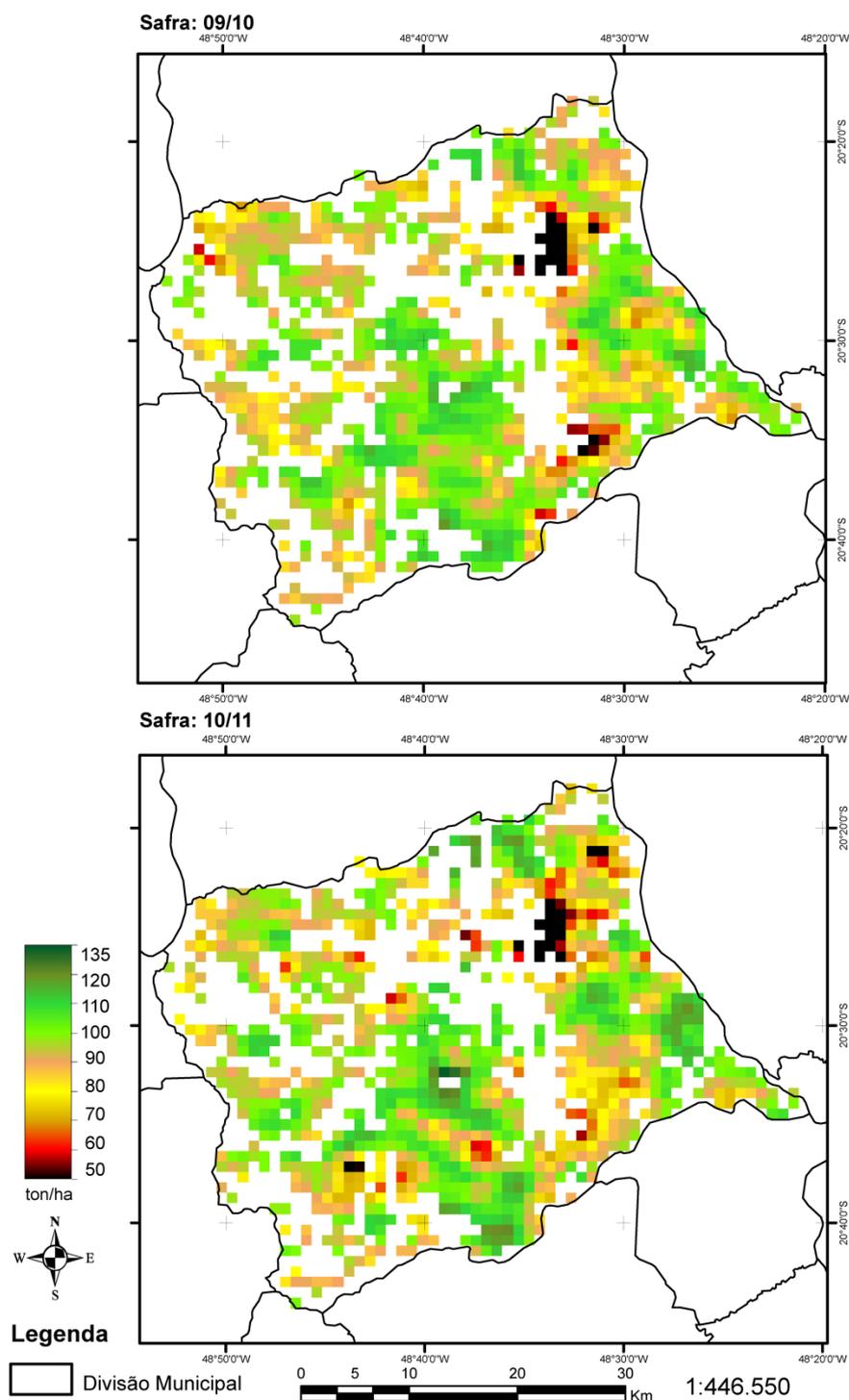
#### 4.3.1 Barretos

O município de Barretos, apesar de estar entre os maiores produtores de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo, não possui nenhuma usina sucroalcooleira em sua área, estando sob a influência das usinas localizadas nos municípios vizinhos.

Para melhor avaliar os resultados obtidos pelo modelo agrometeorológico-espectral, foram utilizadas informações disponibilizadas pela Conab, sobre três usinas localizadas nas proximidades de Barretos. A Conab considera que, em média, cada usina obtém cana-de-açúcar num raio de 50 km, sendo esta a sua área de influência. Contudo, por razões de confidencialidade particular de cada usina, a Conab não permitiu a exposição do nome ou razão social das mesmas, sendo então tratadas com as letras A, B e C, no caso de Barretos e A e B, para as duas usinas localizadas em Morro Agudo, totalizando cinco diferentes Usinas sucroalcooleiras.

Esses dados são importantes, pois cada usina tem lavouras de cana-de-açúcar em diferentes fases de corte. Diferenças encontradas em cada corte podem ser relacionadas aos resultados obtidos na Figura 11, onde os resultados do modelo agrometeorológico-espectral em Barretos é apresentado.

Figura 11 - Imagens da produtividade total estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral para os dois anos safra analisados.



Fonte: Autor, 2012.

Na Figura 11, temos as imagens acumuladas dos dois últimos meses antes da data de colheita, conforme observado através dos índices de vegetação.

A mesma escala de cores foi utilizada nas duas imagens e representa os valores maiores que 50ton/ha. Os pixels na cor preta representam as áreas onde ocorreu uma

possível contaminação dos dados, sendo excluídos da análise em virtude dos baixíssimos valores nela encontrados.

Na safra 2009/2010, observamos áreas mais homogêneas, com os valores de produtividade mais equilibrados e extensas áreas na faixa de 90 a 100 ton/ha. Na safra seguinte, nota-se a maior concentração de áreas de menor e maior produtividade, ocasionando uma distribuição espacial mais heterogênea.

A imagem abaixo na Figura 11 trata dos resultados obtidos para o ano safra 2010/2011, onde se pode observar que a maior parte das áreas classificadas como contaminação da máscara se repete e confirmam os resultados que foram desconsiderados.

Para ampliar a análise dos resultados geoespacializados obtidos pelo modelo, buscou-se dados mais detalhados das usinas sucroalcooleiras da região de Barretos. As informações cedidas pela Conab apresentam apenas a produtividade das usinas, separadas em tipos de corte, ou reuso de áreas com a mesma lavoura, sem qualquer geolocalização das mesmas. Contudo, identificam as áreas de influência dentro do município analisado.

No ano safra 2009/2010, o modelo obteve um valor máximo de 118,9 ton/ha, o que se aproxima dos valores máximos declarados pela usina "C" (Tabela 10) de 118,01 ton/ha, para a cana de 2º corte, e na usina "A" (Tabela 8) com 115,85 ton/ha para áreas com cana de 18 meses.

Tabela 8 - Valores da produtividade obtida pela Usina Adentro da área de influencia das lavouras de cana-de-açúcar no município de Barretos

<b>USINA SUCROALCOOLEIRA - (A) - Área de Influência do Município de Barretos</b>			
<b>Ciclos</b>	<b>Itens</b>	<b>2009/2010</b>	<b>2010/2011</b>
<b>12 meses</b>	Produtividade (t/ha)		47,28
<b>18 meses</b>	Produtividade (t/ha)	115,85	126,73
<b>2º corte</b>	Produtividade (t/ha)	106,09	103,98
<b>3º corte</b>	Produtividade (t/ha)	96,08	102,54
<b>4º corte</b>	Produtividade (t/ha)	90,80	103,06
<b>5º corte</b>	Produtividade (t/ha)	85,16	98,85
<b>6º corte</b>	Produtividade (t/ha)	81,23	95,84
<b>TOTAL</b>	<b>Produtividade Média (t/ha)</b>	<b>96,04</b>	<b>104,24</b>

Fonte: CONAB, 2011.

Tabela 9 - Valores da produtividade obtida pela Usina B dentro da área de influência das lavouras de cana-de-açúcar no município de Barretos.

**USINA SUCROALCOOLEIRA- (B) - Área de Influência do Município de Barretos**

<b>Ciclos</b>	<b>Itens</b>	<b>2009/2010</b>	<b>2010/2011</b>
<b>12 meses</b>	Produtividade (t/ha) (Renovação)	85,73	
<b>12 meses</b>	Produtividade (t/ha) (Expansão)	85,19	
<b>18 meses</b>	Produtividade (t/ha) (Renovação)	127,00	124,69
<b>18 meses</b>	Produtividade (t/ha) (Expansão)	131,64	124,14
<b>2º corte</b>	Produtividade (t/ha)	106,75	96,94
<b>3º corte</b>	Produtividade (t/ha)	87,73	88,34
<b>4º corte</b>	Produtividade (t/ha)	76,83	74,60
<b>5º corte</b>	Produtividade (t/ha)	70,38	69,32
<b>6º corte</b>	Produtividade (t/ha)	62,07	63,16
<b>TOTAL</b>	<b>Produtividade Média (t/ha)</b>	<b>91,08</b>	<b>85,52</b>

Fonte: CONAB, 2011.

Tabela 10 - Valores da produtividade obtida pela Usina C dentro da área de influência das lavouras de cana-de-açúcar no município de Barretos.

**USINA SUCROALCOOLEIRA - (C) - Área de Influência do Município de Barretos**

<b>Ciclos</b>	<b>Itens</b>	<b>2009/2010</b>	<b>2010/2011</b>
<b>12 meses</b>	Produtividade (t/ha)	98,22	121,60
<b>18 meses</b>	Produtividade (t/ha)	110,54	113,27
<b>2º corte</b>	Produtividade (t/ha)	118,01	112,50
<b>3º corte</b>	Produtividade (t/ha)	100,22	88,54
<b>4º corte</b>	Produtividade (t/ha)	88,73	83,91
<b>5º corte</b>	Produtividade (t/ha)	82,01	72,26
<b>6º corte</b>	Produtividade (t/ha)	74,73	74,40
<b>TOTAL</b>	<b>Produtividade Média (t/ha)</b>	<b>101,53</b>	<b>90,11</b>

Fonte: CONAB, 2011.

A variação da produtividade do ano safra de 2009/2010 abrange os valores registrados nas Usinas "A" e "C" até os valores máximos, com exceção da usina "B", cujo valor máximo de 131,64 ton/ha supera muito o máximo encontrado pelo modelo para o mesmo ano safra.

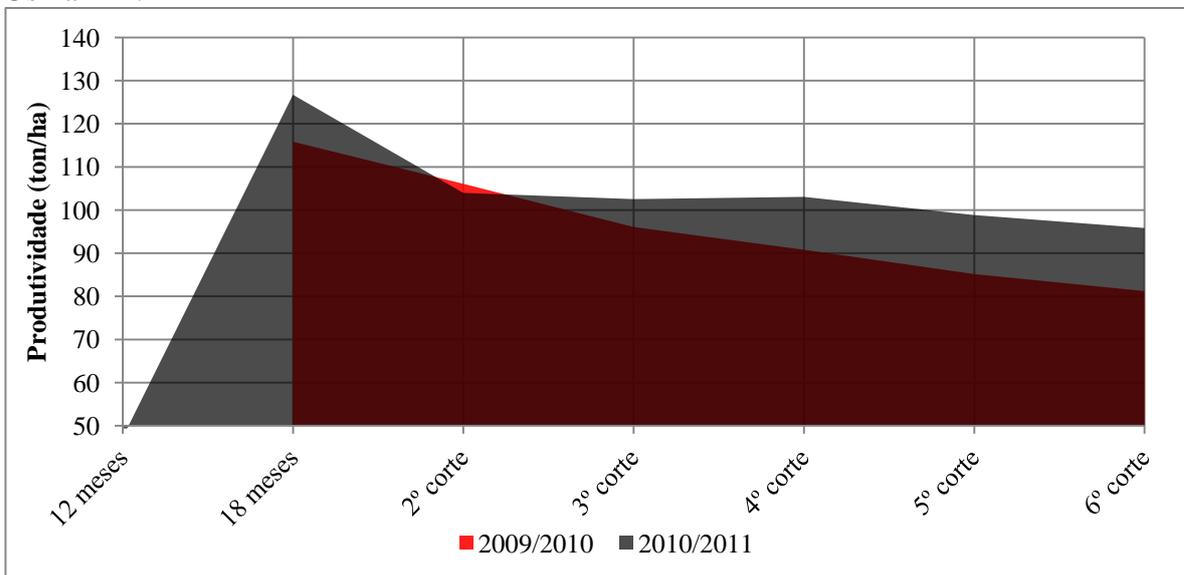
Na safra seguinte, o modelo obteve o valor máximo de 133,5 ton/ha, que pode ser comparado apenas ao máximo registrado na usina "A" com 126,73 ton/ha, para cana de 18 meses, e na usina "C" com 121,6 ton/ha para cana de 12 meses. A produtividade obtida

pelo modelo apresenta toda a variação produtiva encontrada pelos diferentes cortes de cana.

As Figuras 12, 13 e 14, apresentam gráficos gerados para melhor interpretar a variação interanual encontrada em cada usina, comparando os valores de produtividade em cada corte. Dessa forma percebe-se que, a usina "A" obteve uma produtividade média superior na safra 2010/2011, resultado que difere da tendência encontrada nas usinas "B" e "C", quando cada usina apresentou valores superiores na safra 2009/2010, com médias de até 11ton/ha a mais que o ano seguinte.

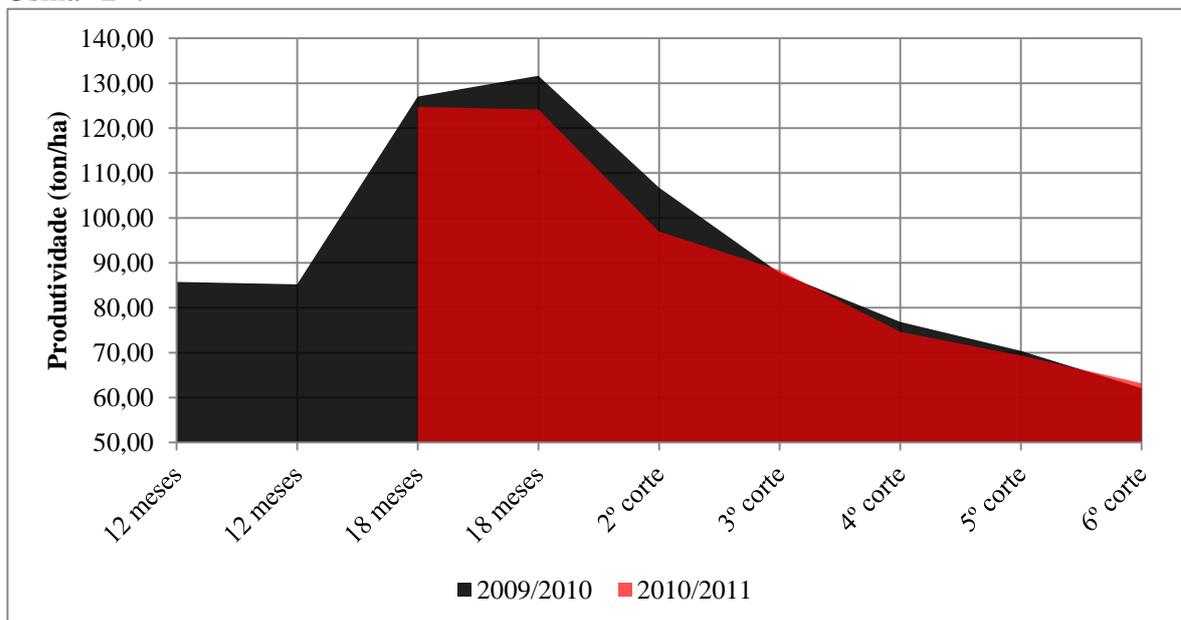
Também é evidente a taxa de perda de produtividade que ocorre a cada ano safra, nos diferentes cortes de cana. A usina "B" apresentou a maior variação pelo corte da cana nas áreas de renovação/expansão quando atingiram uma produtividade de aproximadamente 130 ton/ha, enquanto que a área de sexto corte, produziu 62 ton/ha, valor este que corresponde a 46% do máximo encontrado na mesma região, e, abaixo da média observada na usina.

Figura 12 - Relação do comportamento interanual da produtividade de cana-de-açúcar na Usina "A".



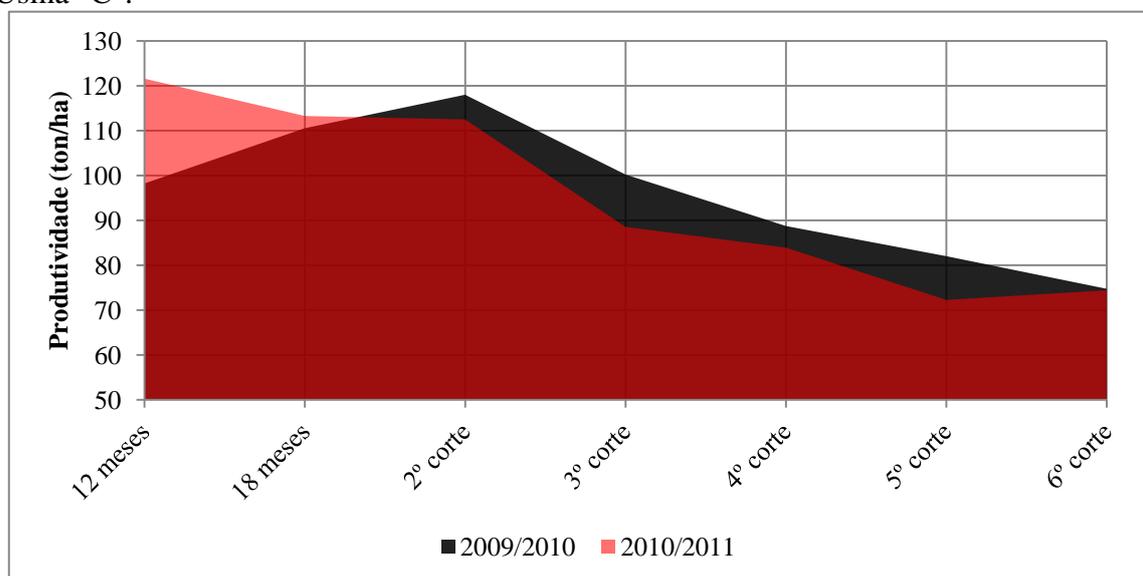
Fonte: Autor, 2012.

Figura 13 - Relação do comportamento interanual da produtividade de cana-de-açúcar na Usina "B".



Fonte: Autor, 2012.

Figura 14 - Relação do comportamento interanual da produtividade de cana-de-açúcar na Usina "C".



Fonte: Autor, 2012.

Os valores médios encontrados pelo modelo em cada ano safra foram comparados com os dados oficiais obtidos conforme Tabela 11. Como a CONAB não divulga os resultados por municípios, efetuou-se uma média com base na média da produtividade total das 3 usinas apresentadas.

Os resultados médios do modelo para as áreas de cultivo de Barretos tiveram um sensível aumento de produtividade, sendo considerado como uma relativa estabilidade,

tendo em vista que são apenas dois anos de análise. Os dados da CONAB apresentam uma quebra de 3% na produtividade sendo que em 2010/2011 a produtividade média encontrada foi a mesma, enquanto que os dados do IBGE, apresentam estabilidade absoluta sem variação interanual, resultado este que pode ser atribuído aos dados estatísticos coletados nos municípios não considerando a variação interanual da produtividade municipal ,além de interesses políticos que influenciam importantes regiões produtivas.

Os resultados médios do modelo agrometeorológico, ficaram 3 ton/ha acima da produtividade apresentada pelo IBGE e abaixo dos resultados apresentados pela CONAB para o ano de 2009/10. Considerando que os resultados abaixo descritos foram obtidos por três diferentes metodologias, o modelo agrometeorológico-espectral demonstrou excelente comportamento no município de Barretos, com valores no mesmo patamar dos resultados de instituições oficiais.

Tabela 11- Relação entre os dados oficiais e os resultados da produtividade média modelada.

<b>Barretos</b>	<b>Produtividade Média (t/ha)</b>	
	<b>2009/2010</b>	<b>Safra 2010/2011</b>
<b>Modelo Agrometeorológico</b>	93,15	93,31
<b>Conab</b>	96,21	93,29
<b>IBGE</b>	90,00	90,00

Fonte: Autor, 2012.

#### 4.3.2. Morro Agudo

Os resultados geoespacializados para os dois anos safra analisados, são apresentados na figura 15 que utiliza a mesma escala de cores para facilitar a interpretação.

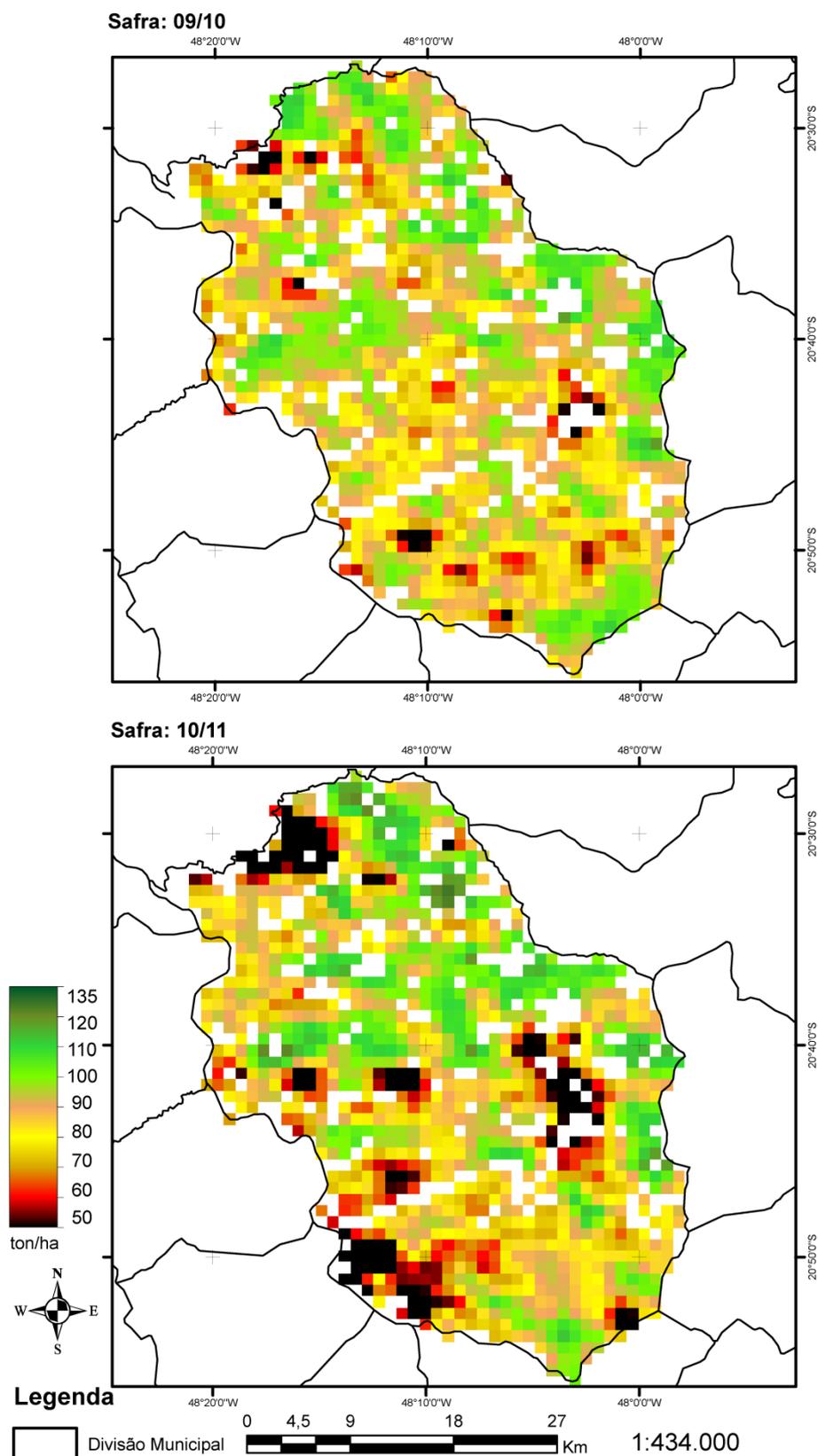
Na figura 15 percebe-se, inicialmente, que na safra 2009/2010 o município teve uma produtividade com uma distribuição espacial mais homogênea e com valores mais altos que na safra seguinte.

Na safra 2010/2011, houve o aumento da ocorrência de áreas com produtividade inferior a 50 ton/ha, o que já é um indicativo da diminuição da produtividade média do município. Todavia, observamos áreas na região norte do município onde houve um aumento da produtividade estimada.

Os resultados modelados para Morro Agudo também foram relacionados aos dados das duas usinas instaladas no município, disponibilizados pela CONAB nas Tabelas 12 e 13, onde verificamos que o modelo na safra 2009/2010 obteve o valor máximo de 118,3 ton/ha que é semelhante aos números encontrados na Usina "A", que chegou a produzir 116,85 ton/ha nas áreas de cana de 18 meses. Já a Usina "B", produziu um máximo de 110,49 ton/ha.

Na safra 2010/2011 o modelo obteve os resultados máximos de produtividade em uma área diferente a do ano anterior, chegando a 126 ton/ha resultado compatível com o observado na Usina "B", que para a cana de 12 meses obteve uma produtividade de 123,85 ton/ha.

Figura 15 - Imagens da produtividade total estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral para os dois anos safra analisados.



Fonte: Autor, 2012.

Nas tabelas 12 e 13 encontramos a relação entre os valores de produtividade de diferentes cortes para os dois anos safra analisados nas Usinas "A" e "B", respectivamente.

Tabela 12 - Valores da produtividade obtida pela Usina "A" dentro do município de Morro Agudo

<b>USINA AÇUCAREIRA - (A) - Município de Morro Agudo</b>			
<b>Ciclos</b>	<b>Itens</b>	<b>2009/2010</b>	<b>2010/2011</b>
<b>12 meses</b>	Produtividade (t/ha)	93,64	90,49
<b>18 meses</b>	Produtividade (t/ha)	116,85	102,14
<b>2º corte</b>	Produtividade (t/ha)	103,75	95,56
<b>3º corte</b>	Produtividade (t/ha)	93,15	86,85
<b>4º corte</b>	Produtividade (t/ha)	87,86	84,49
<b>5º corte</b>	Produtividade (t/ha)	85,00	81,75
<b>6º corte</b>	Produtividade (t/ha)	82,26	80,65
<b>TOTAL</b>	<b>Produtividade Média (t/ha)</b>	<b>94,03</b>	<b>87,42</b>

Fonte: CONAB, 2011.

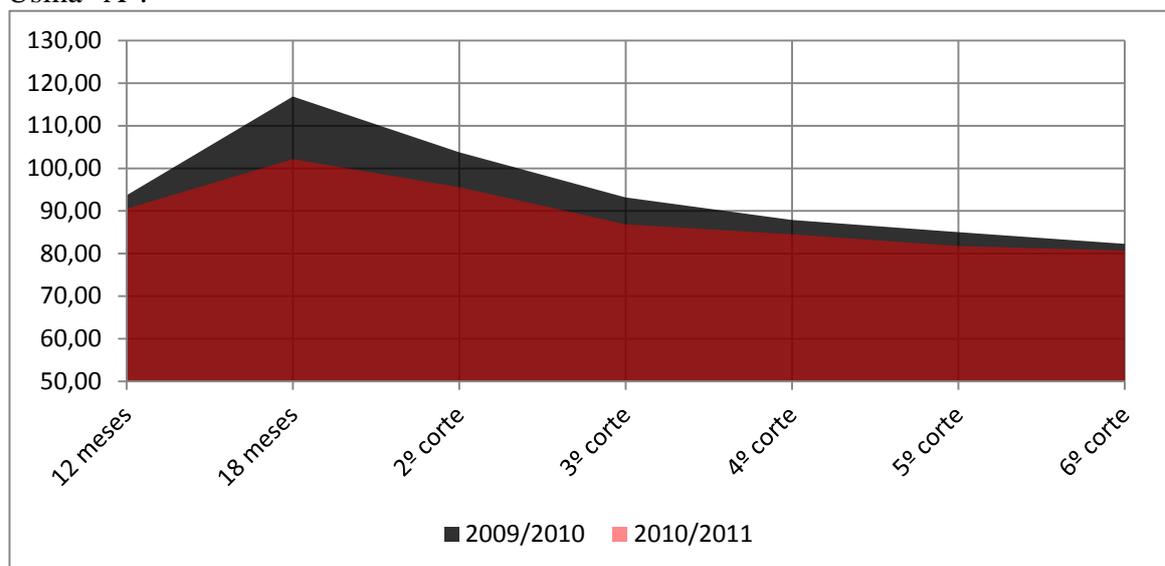
Tabela 13 - Valores da produtividade obtida pela Usina Adentro do município de Morro Agudo

<b>USINA AÇUCAREIRA - (B) -Município de Morro Agudo</b>			
<b>Ciclos</b>	<b>Itens</b>	<b>2009/2010</b>	<b>2010/2011</b>
<b>12 meses</b>	Produtividade (t/ha)	100,18	123,85
<b>18 meses</b>	Produtividade (t/ha)	110,49	89,20
<b>2º corte</b>	Produtividade (t/ha)	108,66	95,96
<b>3º corte</b>	Produtividade (t/ha)	95,97	83,18
<b>4º corte</b>	Produtividade (t/ha)	94,64	88,21
<b>5º corte</b>	Produtividade (t/ha)	89,72	83,45
<b>6º corte</b>	Produtividade (t/ha)	83,99	79,97
<b>TOTAL</b>	<b>Produtividade Média (t/ha)</b>	<b>92,66</b>	<b>86,55</b>

Fonte: CONAB, 2011.

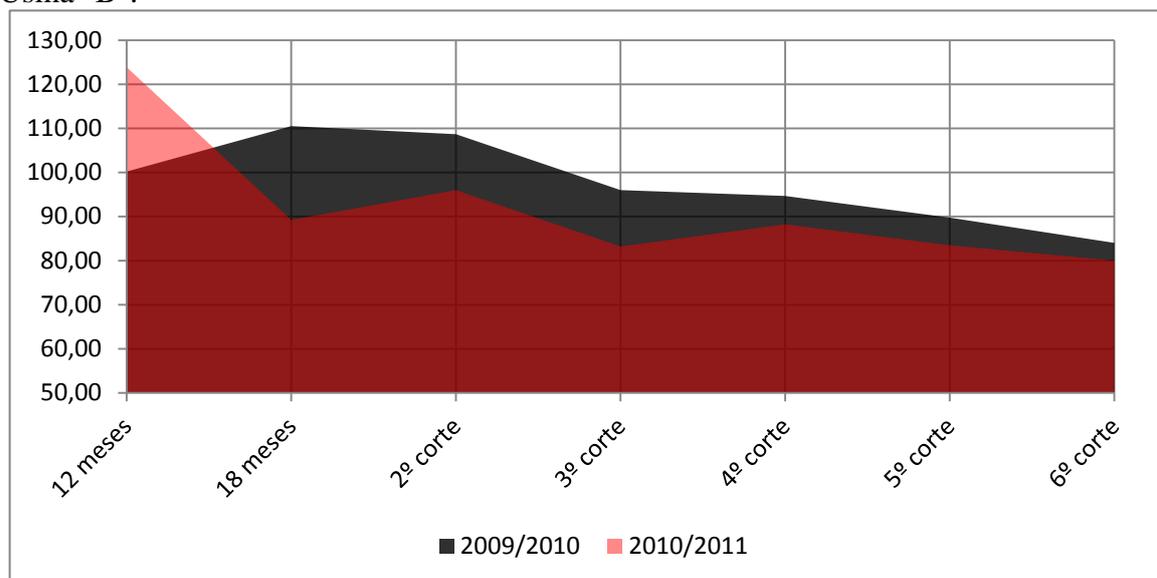
Através da análise das figuras 16 e 17, observa-se que a produtividade decresce ao longo do tempo e que o comportamento da variação interanual das duas usinas foi semelhante ao encontrado pelo modelo agrometeorológico-espectral, pois houve uma variação negativa na produtividade entre as safras de 2009 a 2011, sendo que o valor máximo registrado tanto no modelo quanto nas Usinas ocorreram na última safra analisada. Este comportamento indica que o modelo conseguiu se adaptar às condições encontradas em Morro Agudo.

Figura 16 - Relação do comportamento interanual da produtividade de cana-de-açúcar na Usina "A".



Fonte: Autor, 2012.

Figura 17 - Relação do comportamento interanual da produtividade de cana-de-açúcar na Usina "B".



Fonte: Autor, 2012.

Na figura 17, a produtividade média estimada de Morro Agudo se apresentou conforme a análise geoespacial, com uma queda de quase 4 ton/ha, seguindo a mesma tendência dos dados obtidos pela média das duas usinas anteriormente citada, porém com menor intensidade, sendo importante notar a variação interanual que o modelo apresentou e que condiz com os valores registrados pelas usinas. Já a produtividade do IBGE

apresentadas na tabela 14 se manteve em estabilidade absoluta. Da mesma forma, que em Barretos.

O modelo também estimou valores próximos dos dados oficiais do IBGE e a média dos dados da CONAB com uma variação total de 6 ton/ha a mais que o IBGE e a menos que a CONAB na safra 2009/2010. Na safra seguinte conseguiu um resultado ainda mais próximo, variando 3 ton/ha, em relação a média CONAB e apenas 2 ton/ha, da estimativa oficial do IBGE.

Tabela 14 - Relação entre os dados oficiais e os resultados da produtividade média modelada.

<b>Morro Agudo</b>	<b>Produtividade Média (t/ha)</b>	
	<b>2009/2010</b>	<b>2010/2011</b>
<b>Modelo Agrometeorológico</b>	87,96	84,10
<b>Conab</b>	93,60	87,25
<b>IBGE</b>	82,00	82,00

Fonte: Autor, 2012.

#### **4.4 Artigos e trabalhos desenvolvidos durante o mestrado**

Durante o Mestrado foram publicados três trabalhos relacionados à área temática da dissertação, conforme descrição abaixo.

O primeiro intitulado: Avaliação do comportamento do IVDN utilizando dados SPOT VEGETATION em quatro municípios do Estado de Alagoas, aceito nos anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, disponível no link:

<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1237.pdf> (Apêndices A).

O segundo trabalho foi um capítulo no Manual de Aplicações GEONETCast – DevCoCast, que foi desenvolvido no treinamento avançado que foi realizado na UNIVERSITY OF TWENTE na Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation em Enschede, Holanda; disponível no link:

[ftp://ftp.itc.nl/pub/52n/gnc\\_devcocast\\_applications/description/chapter6.pdf](ftp://ftp.itc.nl/pub/52n/gnc_devcocast_applications/description/chapter6.pdf) (Apêndice B).

Concernente ao terceiro, este trabalho foi elaborado para o Manual de Aplicações GEONETCast – DevCoCast, tornou-se um artigo na Revista Brasileira de Geografia Física, vol. 4, n.3 em set/2011, com o título: A GIS APPROACH USING REMOTE SENSING DERIVED PRODUCTS FOR QUANTIFICATION OF SUGAR CANE

PRODUCTIVITY IN BRAZIL. disponível no link:  
<http://www.ufpe.br/rbgfe/index.php/revista/article/viewFile/205/190> (Apêndice C)

## 5 CONCLUSÃO

Tendo em vista os objetivos propostos e os resultados alcançados neste trabalho, foi possível concluir que:

O modelo agrometeorológico-espectral proposto conseguiu atender as expectativas, e estimar a produtividade média da cana-de-açúcar com valores próximos aos divulgados pelos órgãos oficiais;

O modelo foi capaz de identificar e quantificar a variabilidade espacial da produtividade agrícola, nas áreas de cultivos dos municípios analisados;

Os métodos desenvolvidos para o processamento e extração de dados, se mostraram eficientes na obtenção de perfis temporais para monitorar as lavouras de cana-de-açúcar;

A análise dos dados SRTM ajudou a explicar as características regionais, encontradas nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar;

O índice de área foliar estimada apresentou os valores esperados para a cultura analisada;

A aplicação do índice de ajuste local (IAL) com base no produto PMS para cada município contribuiu com a sensibilidade do modelo para identificar as variações interanuais na produtividade agrícola;

O uso dos produtos da série SPOT-VGT e LSA SAF MET, para o monitoramento e estimativa de produtividade em grandes áreas se mostraram viável com base nas rotinas de processamento, análise espacial e extração de dados que foi desenvolvida.

## REFERÊNCIAS

ABDEL-RAHMAN, E. M.; AHMED, F. B. **The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum spp. hybrid*) production: a review of the literature.** International Journal of Remote Sensing. V. 29, n. 13, p. 3753-3767, July 2008.

BACH, H. **Yield estimation of corn based on multitemporal LANDSAT-TM data as input for an agrometeorological Model.** Vista Remote Sensing Applications in Geosciences, Anton-Ferstl-Straße 11, D-82234. IOP Publishing Ltd 0963-9659/98/040809+17\$19.50 c 1998. Wessling, Germany Received 10 October 1997, in final form 23 February 1998.

BARBIERI, Valter. SILVA, F.C. DIAS-AMBRONA, C.G.H. **Modelagem de cana-de-açúcar para previsão de produtividade de canaviais no Brasil e na Austrália.** 39JAIIO - CAI 2010 - ISSN:1852-4850. p. 745. Disponível em <http://oa.upm.es/6621/1/39jaiio-cai-122.pdf>. Acesso em 25 Jun 2011.

BARET, F.; BUIS, S. **Estimating canopy characteristics from remote sensing observations. Review of methods and associated problems.** In: S. Liang (Editor), Advances in Land Remote Sensing: System, Modelling, Inversion and Application. Springer. p. 171-200. 2007.

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

CÂMARA G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphic.** V.20, p.395-403, 1996.

CASA, R.; JONES, H. G. LAI retrieval from multiangular image classification and inversion of a ray tracing model. **Remote Sensing of Environment.** V. 98, n. 4, p. 414-428, Oct. 2005.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **O etanol como um novo combustível universal no período de 2006 a 2011.** Edição: Ago 2008.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Estudos de prospecção de Mercado. Diretoria de Política Agrícola e Informações.** Safra 2009/2010.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Perfil do setor do açúcar e do álcool no Brasil.** Edição Safra 2008/2009. Mai. 2010.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 289, de 25 de outubro de 2001.**

CHOUDHURY, B.J.; AHAMED, N.U.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J.; DAUGHTRY, C.S.T. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. **Remote Sensing of Environment**. V.50, p.1-17, 1994.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 193. p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 33). 1979.

DOORENBOS, J., Plusje, J.M.G.A.; KASSAM, A.H.; BRANSCHIED, V.; BENTVELSEN, C.L.M. **Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome**. FAO Irrigation and Drainage Paper (1986). Disponível no site: <http://agris.fao.org/agrissearch/search/display.do?f=2010/SO/SO1001.xml;SO2005100014>. Acesso em 05 Ago 2011.

DORIGO, ZURITA-MILLA, DE WIT. *et.al.* (2007). A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. V. 9, n. 2, p. 165-193. May 2007.

EERENS, H.; WOUTERS, K.; BUFFET, D. **Use of 1km<sup>2</sup> resolution imagery in the Belgian Crop Growth Monitoring System (B-CGM)**. Proceedings VEGETATION 2000, 3-6 April 2000, Space Applications Institute, Joint Research Centre of the European Commission, Lake Maggiore, Italy. 2000.

EL HAJJ, M.; BÉGUÉ, A. GUILLAUME, S. Multi-source information fusion: Monitoring sugarcane harvest using multi-temporal images, crop growth modeling, and expert knowledge. In: **MULTITEMP-2007, Fourth International Workshop on the Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images**, Provinciehuis Leuven, Belgium. July 18-20, 2007, 6p. Proceedings... Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp.jsp?arnumber=0429364>. Acesso em 02 Set. 2010.

EMBRAPA *apud* GASCHO, G.J.; SHIH, S.F. Sugarcane. In: TEARE, I.D.; PEET, M.M. (Ed.) **Crop-water relations**. New York; Wiley-Interscience. P. 445-479. 1983. Disponível em: [http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_68\\_22122006154840.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_68_22122006154840.html) Acesso em 15 Jul de 2011.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; LAUSCHNER, M.H.; MELO, R.W. **Modelo de estimativa de rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul**. Pesquisa Agropecuária Brasileira. V. 36, p. 399-403, 2001.

FRANK, Rosillo-Calle; BAJAY, Sergio V.; ROTHMAN, Harry. **Uso de biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. Campinas, SP. Ed. UNICAMP, 2005.

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugarcane. In: TEARE, I. D.; PEET, M. M. (Ed.). **Crop-water relations**. New York: Wiley-Interscience, 1983. p. 445-479.

GOBRON, N., PINTY, B., & VERSTRAETE, M. **Theoretical limits to the estimation of the leaf area index on the basis of visible and near-infrared remote sensing data**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. V. 35, n. 6, p. 1438-1445, Nov. 1997.

IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA**. Previsão de Safra. Cana-de-açúcar. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em 09 Nov 2011.

KOFFLER, N. F.; DONZELI, P. L. **Avaliação dos solos brasileiros para cultura da cana-de-açúcar**. In: Paranhos, S. B. (coord.) Cana-de-açúcar. Cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill. P. 19-41. 1987.

MARTINELLI, M. Clima do Estado de São Paulo. **Revista franco-brasileira de geografia**. Vol. 8, 2010.

MASSON, V.; CHAMPEAUX, J. L.; CHAUVIN, F. **Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models**. J. Climate 16 (9), 1261-1282. 2003.

MELO, R. W. **Modelo agrometeorológico-espectral de estimativa do rendimento da soja para o estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia), Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. Janeiro -2003. Disponível no site: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/1820/000358654.pdf?sequence=1>  
Acesso em 18 Ago 2011.

MONTEITH, J.L. **Solar radiation and productivity in tropical ecosystems**. J. Applied Ecology, 19:747-766. 1972.

MONTEIRO, C.A.F. **O clima e a organização do espaço no estado de São Paulo: problemas e perspectivas**. São Paulo: IGEOG, 1976.

MOTA, Sonia M. de B. **Análise Geoambiental do município de Barretos**. Dissertação Doutorado, UNESP. 1999. Disponível em: [http://www.rc.unesp.br/igce/geologia/GMA\\_doutorado/gma-d28.htm](http://www.rc.unesp.br/igce/geologia/GMA_doutorado/gma-d28.htm)  
Acesso em 03 Out 2011.

MYNENI, R., Williams, D. **On the relationship between fAPAR and NDVI**. Remote Sensing of Environment, 19:200-211. 1994.

NORMAN, ANDERSON, KUSTAS. *et al.* (2003) Remote sensing of evapotranspiration for precision-farming applications. In: International Geoscience And Remote Sensing Symposium, 2003, Toulouse. **Proceedings**. Toulouse: IGARSS, p.21-25. 2003.

PICOLI, M. C. A. **Estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar utilizando agregados de redes neurais artificiais: estudo de caso Usina Catanduva**. São José dos Campos. (INPE-14669-TDI/1222). Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 90p. 2006.

PICOLI, M. C. A.; RUDORFF, B. F. T.; RIZZI, R.; GIAROLLA, A. **Índice de vegetação do sensor Modis na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar**. Bragantina. V. 68, n. 3, p. 789-795, Set. 2009. Disponível no site: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0006-87052009000300028](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052009000300028)  
Acesso em 17 Jun 2011.

PONZONI, Flavio Jorge. SHIMABUKURO, Yosio Edemir. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São Jose dos Campos. Ed. A. Silva Vieira. 2010.

ROCHA, D.; BARBOSA, H.; SILVA, L. A Gis Approach Using Remote Sensing Derived Products for Quantification of Sugar Cane Productivity in Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, América do Sul, 424 09 2011.

ROCHA, D.; BARBOSA, H.; SILVA, L. **A Gis Approach Using Remote Sensing Derived Products for Quantification of Sugar Cane Productivity in Brazil**. Application Manual. P. 71 – 81. 2011. Disponível no site:

[ftp://ftp.itc.nl/pub/52n/gnc\\_devcast\\_applications/description/chapter6.pdf](ftp://ftp.itc.nl/pub/52n/gnc_devcast_applications/description/chapter6.pdf)

Acesso em 28 Out 2011.

RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T. **Imagens do sensor Modis associadas a um modelo agrônômico para estimar a produtividade de soja**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 42, n. 1, p. 73-80, Jan. 2007.

RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T.; FREITAS, R. M.; FONTANA, D. C. **Monitoramento e estimativa da produtividade de soja auxiliados pelo modelo regional de previsão de tempo ETA**. Ambiente e Água. V. 1, n. 2, p. 28-38. 2006.

ROSA, V. G.; MOREIRA, M. A.; RODORFF, B. F. T. **Estimativa da produtividade de café com base em um modelo agrometeorológico-espectral**. Pesq. agropec. bras. Brasília, v.45, n.12, p.1478-1488, dez. 2010.

ROUSE, HAAS, SCHELL. (1973). **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS**. In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3, Washington, 1973. Proceedings. Whashington: NASA, 1974, v.1, p.309-317, 1973.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. **Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models**. Remote Sensing of Environment. V. 33, n. 3, p. 183-192, Sep. 1990.

RUDORFF, B.F.T. **Dados Landsat na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar**. 1985. 114p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos.

SAINT, G. **Products - Vegetation System**. Version 2, 1994-05-18. Disponível no site: <http://www.spot-vegetation.com/pages/VegetationSystem/products.htm#es>  
Acesso em 08 Ago 2011.

SMETS *et.al.* **Towards an Operational GMES Land Monitoring Core Service. BioPar Product User Manual. Dry Matter Productivity (DPM)**. geoland2, FP7-SPACE-2007-1 Date Issued: 10-12-2010 Issue: I1.00. Disponível no site:

<http://web.vgt.vito.be/documents/BioPar/g2-BP-RP-BP053-ProductUserManual-DMPV0-I1.00.pdf> Acesso em 25 Nov 2011.

SUGAWARA, L.M. **Variação Interanual da produtividade agrícola da cana de açúcar por meio de um modelo agrônômico**. Tese de Doutorado (Sensoriamento Remoto) orientada pelo Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff, aprovada em 04 de novembro de

2010. Disponível no site: <http://mtc-m19.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2010/10.08.14.39/doc/publicacao.pdf> Acesso em 05 Nov 2011.

VAN DEN HURK, B.; VITERBO, P., BELJAARS, A., 2000. **Offline validation of the ERA40 surface scheme**. ECMWF Techn. Memorandum No.295, 42 p. 2000.

VITERBO, P.; BELJAARS, A. **An improved surface parametrization scheme in the ECMWF model and its validation**. J. Climate 8, 2716-2748. 1995.

WEISS, M.; BARET, F.; GARRIGUES, S. CYCLOPES global products derived from VEGETATION. part 2: Valid MODIS Collection 4 products. **RSE SPOT-VGT in Mediterranean and C 2006**. Pdf H.; 2002, "Estimation of carbon mass fluxes over Euro data.", Remote Sensing of Environment, LAI, fAPAR and fCover Validation and comparison with RSE, 110: 317-331. 2007.

XAVIER, A. C.; VETTORAZZI, C. A. Mapping leaf area index through spectral vegetation indices in a subtropical watershed. **International Journal of Remote Sensing**. V. 25, n. 9, p. 1661-1672, May 2004. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-90162004000300001&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-90162004000300001&script=sci_arttext) Acesso em 15 Ago 2011.

## APÊNDICES

**APÊNDICE A**

## Avaliação do comportamento do IVDN utilizando dados SPOT VEGETATION em quatro municípios do Estado de Alagoas

Diego Raoni da Silva Rocha<sup>1</sup>  
Thais Carraro Di Gregorio<sup>1</sup>  
Humberto Alves Barbosa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade de Federal – UFAL/ICAT  
Campus A. C. Simões, BR 104 Norte Km 97 – 57072-970 – Maceió – AL, Brasil  
{diegorocha, thais.digregorio, barbosa33}@gmail.com

**Abstract.** The NDVI is one of the most used methods to analyze the vegetative behavior in large areas, so this study proposed to analyze the behavior of the medium NDVI from the product S-10 derivative of the sensor Vegetation – 2 onboard the satellite SPOT – 5 in relation to rainfall in the districts of Arapiraca, Maceió, Piranhas e Porto de Pedras, using data from meteorological stations to the year of 2009. The behavior of the NDVI was observed during that year dissociating the districts of the west region inserted in the savanna biome, where the rainfall occurs less frequently and higher seasonality, different from the districts of the east region inserted in the rainforest biome which also has seasonal rain, but in larger amount during the year. The results presented, by the correlation method of (Karl) Pearson, a very strong positive interconnection between the averages of the NDVI and rainfall, lagged by one month to three of the four cities studied, with  $r = 0,767$  (Arapiraca),  $r = 0,779$  (Maceió) e  $r = 0,818$  (Piranhas), and the district of Porto de Pedras with the highest correlation with the lag for two months ( $r = 0,890$ ), however lagged by one month, the correlation was found strong in this city, valued  $r = 0,733$ .

**Palavras-chave:** NDVI, correlation method (Karl) Pearson, rainfall, IVDN, correlação de (Karl) Pearson, precipitação.

### 1. Introdução

O Estado de Alagoas está situado entre as latitudes  $-8^{\circ}48'43''$  a  $-10^{\circ}29'58''$  e longitudes  $-38^{\circ}14'14''$  a  $-35^{\circ}09'08''$ . A sua metade oriental caracteriza-se por um clima quente com temperaturas médias anuais superiores a  $24^{\circ}\text{C}$  e com chuvas de outono-inverno acima de 1400mm. O interior do Estado tem predomínio do clima semi-árido, com pluviosidade abaixo de 1000mm, estando incluído no Polígono das Secas. As estações do ano são definidas pela periodicidade das chuvas: o “verão” tem início em setembro e término em fevereiro, e o período de chuvas caracterizado como “inverno” inicia-se em meados de março findando em agosto.

A cobertura vegetal do Estado divide-se, de forma geral, em Caatinga, Mata Atlântica, vegetação de praias, matas ribeirinhas e vegetação de mangues. O Bioma Caatinga abrange a porção mais semi-árida, ocupando aproximadamente 48% de seu território, e se destaca pela presença de caatinga arbustiva, densa ou aberta, que perde sua folhagem no período de estiagem, tornando a florescer no período chuvoso (IBGE, 1985).

Atualmente um dos métodos mais utilizados para analisar o comportamento vegetativo em grandes áreas é o IVDN ou Índice de Vegetação por Diferença Normalizada. Este é um índice adimensional indicativo da densidade, saúde e estado da vegetação, sendo calculado através das bandas do visível (VIS), no comprimento de onda na região do vermelho, e o infravermelho próximo (IVP).

Existem ainda diversos sensores em órbita capazes de imagear especificamente a vegetação. É o caso do SPOT VEGETATION (VGT), lançado em 1998. Apesar de possuir faixa de resolução comparável ao AVHRR/NOAA, ele possui bandas espectrais concebidas especificamente para o monitoramento de vegetação em grandes áreas, atuando nas faixas dos

comprimentos de onda: 0,43-0,47 $\mu$ m (azul), 0,61-0,69 $\mu$ m (vermelho), 0,78-0,89  $\mu$ m (IVP) e 1,58-1,68  $\mu$ m (IVP), conforme manual VGT4Africa (2006).

Lançado em maio de 2002 e atualmente em operação, o SPOT 5 está orbitando a Terra a uma altitude de 830 km e com período de revisita de 26 dias. Possui três instrumentos sensores: HRG, HRS e Vegetation-2, este último permite uma faixa imageada de 2200Km com 1Km de resolução espacial e 24 horas de resolução temporal. Porém, como o resultado dos dados de vegetação são de uma síntese de 10 dias, o fator de cobertura de nuvens torna-se favoravelmente reduzida.

Este estudo propôs analisar o comportamento do IVDN médio em relação à precipitação nos municípios de Piranhas, Arapiraca, Porto de Pedras e Maceió através de dados de estações meteorológicas e do produto S-10 de IVDN do sensor Vegetation-2 a bordo do satélite SPOT – 5, para o ano de 2009.

## 2.2 Metodologia

### 2.1 Área de Estudo

A pesquisa buscou abranger as diferentes regiões ambientais do Estado de Alagoas. A localização geográfica dos municípios escolhidos é apresentada na Figura 1.

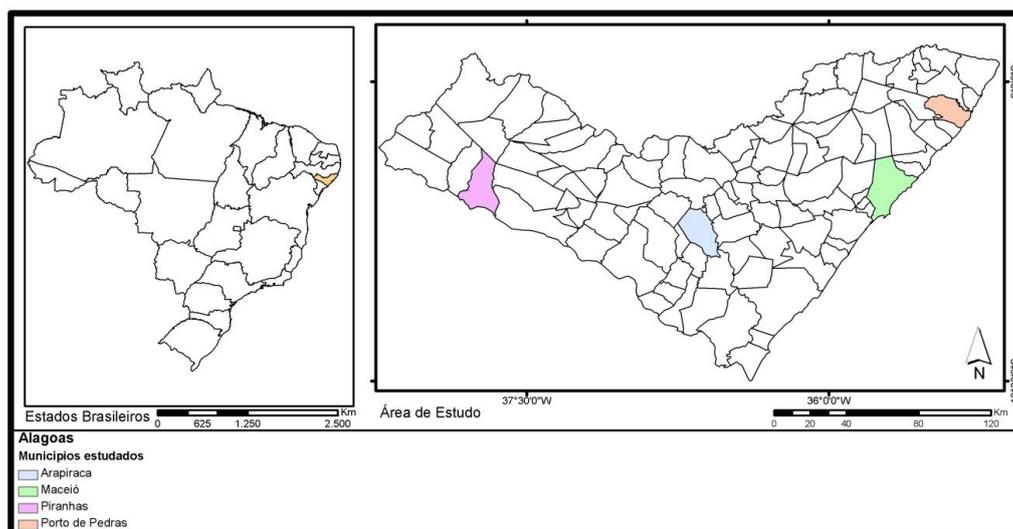


Figura 1 - Localização da área de estudo

### 2.2 Produto IVDN: Sistema SPOT Vegetation

Os dados de IVDN utilizados no trabalho são produtos derivados de uma síntese de 10 dias de imagens do Spot Vegetation, o chamado VGT-S10. Isso significa que ele combina dados diários com correção atmosférica de todos os segmentos de vegetação (medições) decendiais determinando em uma única imagem usando o algoritmo Maximum Value Composite (MVC), que seleciona os pixels com os melhores valores de reflectância do solo. Este produto é composto com resolução radiométrica de 8 bits em que os valores digitais originais estão na escala de níveis de cinza, variando de 0 a 255, e resolução espacial de 1km. Para realizar a conversão para a escala de valores IVDN do Spot Vegetation, que varia entre -1 e +1, foi utilizada a seguinte expressão, conforme indicado pelo VEGETATION programme, disponibilizado em: < <http://www.vgt.vito.be/> >:

$$IVDN = 0,004 * imagem - 0,1 \quad (1)$$

Para cada dado de IVDN é acompanhado um produto denominado *Status Map* (SM), que deve ser usado para filtrar os dados de IVDN que estejam com os valores comprometidos.

Esta correção se dá por uma análise byte a byte no produto SM, que, por sua vez, gera uma máscara que deve ser aplicada ao mapa processado de IVDN a fim de se obter um produto final com as devidas correções necessárias relativas a nuvens, sombras, gelo e neve.

A vegetação saudável absorve a maior parte da luz incidente no comprimento de onda compreendido pela radiação do visível (emitida pelo Sol) e reflete uma grande parte da luz infravermelha. Porém, a não-saudável reflete mais a radiação do visível que a radiação compreendida na faixa do infravermelho próximo. Esta diferença de reflectância nos diferentes comprimentos de onda permite, através de instrumentos de sensoriamento remoto, a detecção do estado da vegetação, mensurando a presença relativa (ou ausência) desta vegetação, simplesmente medindo e comparando suas reflectâncias.

Este cálculo é feito seguindo à Equação 2:

$$IVDN = \frac{(IVP - VIS)}{(IVP * VIS)} \quad (2)$$

onde: *IVP* é a reflectância do infravermelho próximo

*VIS* é a reflectância visível na região do vermelho.

Normalmente os valores de IVDN oscilam em um intervalo de -1,0 e +1,0, embora, segundo o manual do usuário VGT4AFRICA (2006), na prática, uma vez devidamente decodificado, os valores físicos de IVDN do sensor Vegetation-2 a bordo do SPOT-5 estão entre -0,1 e 0,92, onde os valores mais altos indicam mais densa e mais saudável (maior densidade verde) vegetação. Valores de IVDN abaixo de 0,1, por exemplo, geralmente correspondem a áreas com pouca ou nenhuma vegetação (pedras, deserto, gelo). Valores moderados oscilam em torno de 0,2 e 0,3 e correspondem aos arbustos e pastagens; já valores mais altos, acima de 0,5, normalmente correspondem à densa vegetação, como florestas tropicais e áreas de agricultura.

### 2.3 Software ILWIS para processamento de dados e obtenção do IVDN médio.

Selecionou-se o ano de 2009 para realizar a análise do comportamento do IVDN em relação à precipitação. Para o processamento dos dados decendiais VGT-S10, utilizou-se o software Ilwis versão 3.7.1, com a extensão GEONETCast toolbox instalada.

Criou-se um algoritmo que se utiliza das sub-rotinas já existentes no referido software para dinamizar parte do processamento dos dados que seguem nas seguintes etapas:

1° Importação dos dados brutos de IVDN e IDVN\_SM do formato “HDF4” para o formato “.mpar” nativo do Ilwis através da biblioteca Gdal.

2° Aplicação da equação (1) no produto IVDN para converter os valores de níveis de cinza 0 a 255 para valores de IVDN, através da função *MapCalculator*.

3° Processamento do produto IVDN\_SM a fim de gerar o filtro de nuvens e sombras.

4° Cruzamento entre os produtos IVDN e IVDN\_SM, que resulta num produto final consistente sem risco de contaminação dos dados.

Após este processo, foi criada uma série temporal (*Maplist*) que contém as 36 imagens correspondentes aos decêndios do ano de 2009. Em seguida, foi gerado um recorte para área de estudo (*Submap*) referente à cobertura do Estado de Alagoas.

Através da malha municipal vetorizada, obtida no sítio do IBGE (2010), foram calculados os valores médios de IVDN para os quatro municípios estudados, considerando-se os valores de IVDN em todos os pixels existentes na área de cada município conforme a malha municipal e dividido pela quantidade de pixels em cada município. Esse procedimento foi realizado para todas as imagens de IVDN a fim de se observar seu comportamento ao longo do ano na área de cada cidade de forma integrada.

## 2.4 Dados de precipitação

A partir dos dados de precipitação diários provenientes das estações meteorológicas situadas nos municípios de Piranhas (-9.5500°; -37.7667°), Arapiraca (-9.8041°; -36.6189°), Porto de Pedras (-9.1800°; -35.4300°) e Maceió (-9.6700°; -35.7000°), os valores de precipitação foram obtidos através da soma dos decêndios correspondentes às imagens VGT-S10. Os dados de precipitação foram gentilmente cedidos pela Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Alagoas (SEMARH).

## 2.5 Análise Estatística

A partir dos dados médios decendiais de IVDN e dos valores de precipitação acumulada referentes ao mesmo período, foi aplicada a correlação de Karl Pearson (Equação 3) a fim de relacionar a influência da precipitação no IVDN.

$$r = \frac{N\Sigma xy - (\Sigma y)(\Sigma x)}{\sqrt{[N\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2][N\Sigma y^2 - (\Sigma y)^2]}} \quad (3)$$

Sendo:  $x \rightarrow$  valores de IVDN

$y \rightarrow$  valores de precipitação acumulada referente ao período

$N \rightarrow$  número de variáveis

## 3. RESULTADOS DE DISCUSSÃO

Após o processamento das imagens do IVDN, foram extraídos os valores médios nos municípios estudados, considerando o valor de cada pixel pelo número de pixels que integra cada área. Foram confeccionados mapas, Figuras 2 e 3, apresentando a variação espacial dos valores do IVDN para os períodos em que o índice atinge seus picos máximos e mínimos para a maioria das cidades, que correspondem aos meses de dezembro e junho, respectivamente.

Nas imagens, os valores iguais a zero podem corresponder aos pixels que foram filtrados pelo produto IVDN\_SM, eliminando valores contaminados pela presença de nuvens ou mesmo má qualidade da resposta do pixel. Em Maceió, na região litorânea ao sul, esses valores correspondem a Lagoa Mundaú.

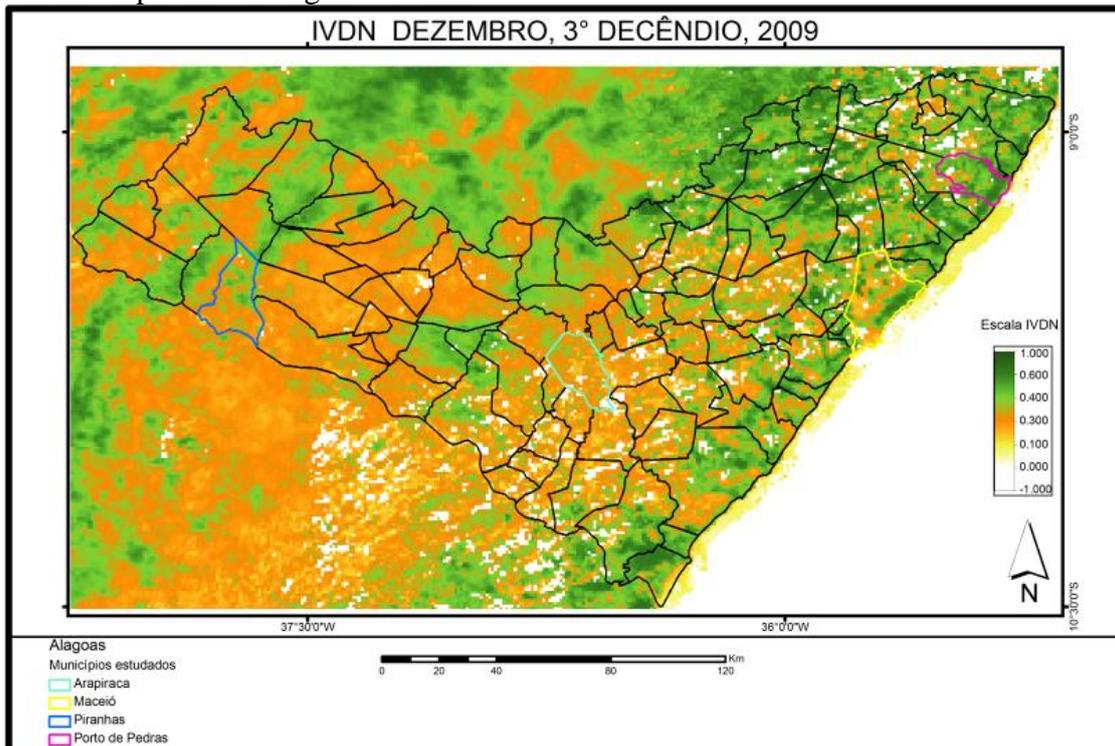


Figura: 2 Mapa com os valores mínimos de IVDN para os municípios estudados

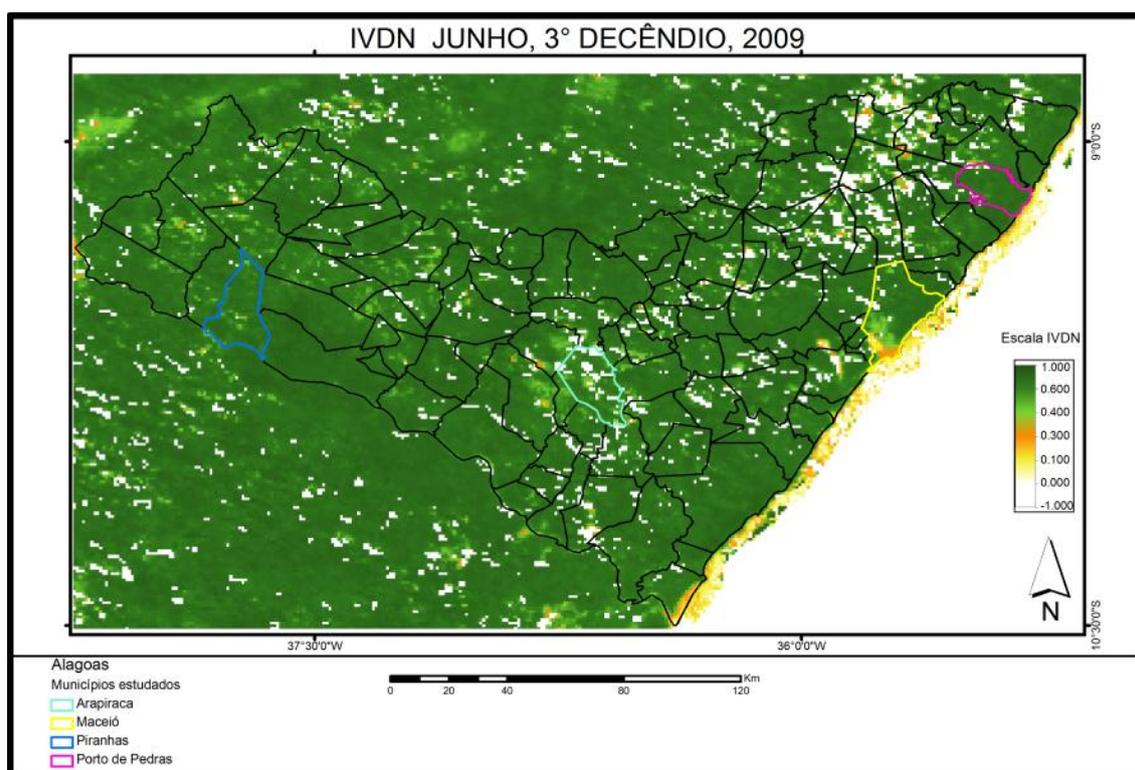


Figura: 3 Mapa com os valores máximos de IVDN para os municípios

Utilizando a correlação de (Karl) Pearson, entre os dados observados de precipitações das estações meteorológicas e dados de IVDN obtidos a partir do sensor *Vegetation-2*, verificou-se que para os municípios de Arapiraca, Maceió e Piranhas, houve maior fator de correlação para a defasagem de um mês com  $r = 0,767$ ,  $r = 0,779$  e  $r = 0,818$ , respectivamente. Enquanto isso, para o município de Porto de Pedras, esta correlação se mostrou maior, com defasagem na resposta da vegetação de dois meses,  $r = 0,890$ , porém tendo alta correlação, acima de 70%, também para um mês, com  $r = 0,733$ , como observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Correlação de Karl Pearson para dados observados de Precipitação e IVDN decendial

Cidades	IVDN x Estação Meteorológica			
	Tempo de Resposta (meses)			
	0	1	2	3
<b>Arapiraca</b>	0,489	0,767	0,643	0,363
<b>Maceió</b>	0,699	0,779	0,506	0,021
<b>Piranhas</b>	0,411	0,818	0,692	0,321
<b>Porto de Pedras</b>	0,412	0,733	0,890	0,499

Trabalhos semelhantes realizados por Gonçalves (2008) relataram que os valores de precipitação e IVDN responderam de forma semelhante, quando houve aumento da precipitação e também ocorreu o aumento do IVDN. Segundo Campos et al.(2009), Lucas e Schuler (2007) e Wang et al. (2003), o comportamento do IVDN está fortemente influenciado pela precipitação, bem como o tempo da defasagem entre a precipitação e o IVDN.

Ávila *et al.*(2009) observou uma defasagem de dois meses entre a resposta do IVDN e a precipitação, detectando ainda que neste processo outras variáveis além da precipitação devem estar envolvidas para determinar o comportamento do IVDN.

No estudo de Liu e Kogan (1996), foi encontrada uma defasagem temporal de um mês na resposta de IVDN entre a ocorrência de precipitação e no déficit hídrico. Relatam também que diferentes tipos de vegetação e de solo podem interferir nesta resposta temporal, além do regime de precipitação, pois são fatores que variam de região para região.

É importante ressaltar que os dados de precipitação são valores pontuais de estações meteorológicas e os valores de IVDN são médias relativas às áreas de cada município selecionado. No entanto, foi constatada uma correlação positiva muito forte. Esse resultado indica que é possível monitorar o comportamento vegetativo nessas regiões a partir da sazonalidade do período de chuvas. Ficou evidenciado também que diferenças nos valores médios de IVDN nos municípios se devem a fatores como a contribuição negativa da área das cidades, as diferentes características ambientais, que apresentaram significativa diferença entre os valores máximos de IVDN obtidos entre os municípios de Piranhas com 0.662 e Porto de Pedras 0.726. Isso pode ser explicado pelas diferentes regiões ambientais de características vegetativas em Piranhas, a caatinga, e em Porto de Pedras, a mata atlântica com áreas de plantações de cana.

Ao mesmo tempo, observaram-se valores muito baixos de IVDN nos municípios de Arapiraca, Piranhas e Porto de Pedras para o último decêndio de fevereiro, conforme figura 3. Isso se deve ao grande número de pixels que foram filtrados na imagem por conter contaminação de nuvens, o que resultou na relação entre o pouco número de pixels por baixos valores de IVDN neles contidos. Devido a esse problema, não foi possível determinar se o último decêndio do mês de fevereiro obteve os valores mais baixos de IVDN no ano, ficando o mês de dezembro com os menores valores.

O comportamento do IVDN mostrou-se sensível à precipitação dentro da defasagem aproximada de um mês. Esta relação pode ser observada nos gráficos a seguir, nos quais os acumulados decadais de precipitação estão relacionados ao valor médio de IVDN no período correspondente (Figura 4).

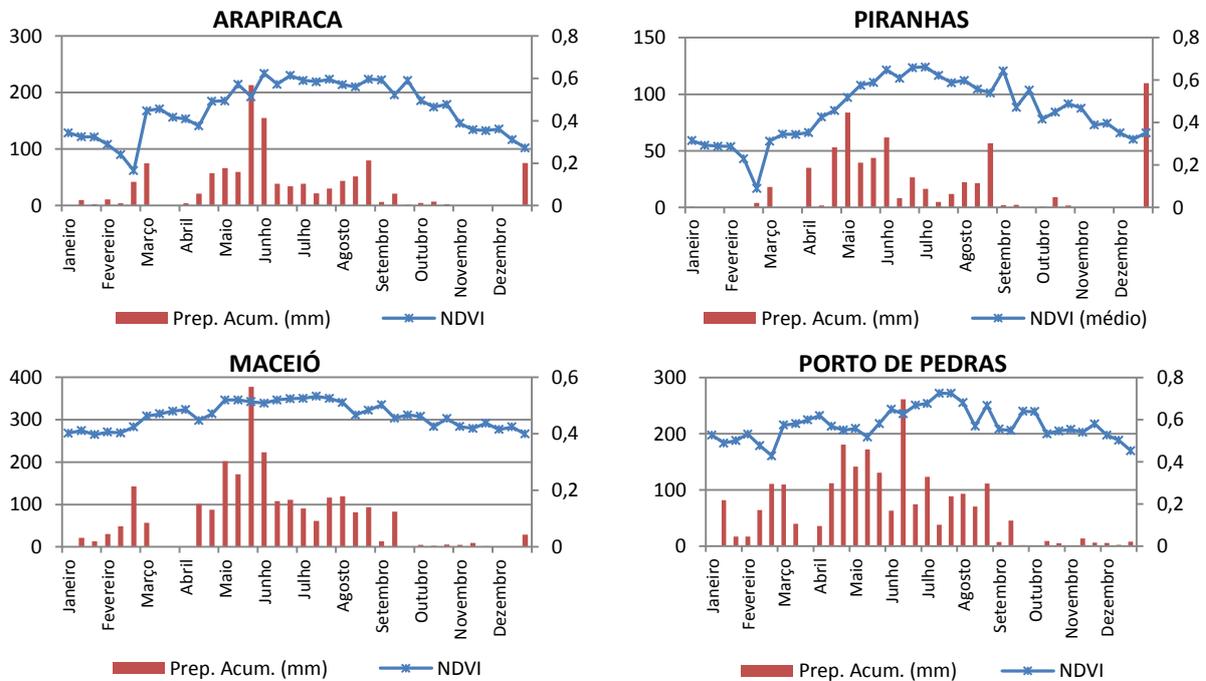


Figura 4 - Relação entre as taxas de precipitação e IVDN para os quatro municípios selecionados.

#### 4. Conclusão

Os dados médios de IVDN e de precipitação para os municípios estudados apresentaram correlação positiva muito forte.

A correlação entre precipitação e IVDN apresentaram defasagem de um mês para três dos quatro municípios estudados.

Os municípios da região oeste inseridos no bioma caatinga apresentaram comportamento do IVDN definido pela sazonalidade das chuvas, diferente dos municípios da área leste inserido no bioma mata atlântica que tem o regime chuvoso com totais de precipitação mais elevados e com maior frequência, o que manteve o IVDN mais elevado durante todo o ano.

### **Agradecimentos**

Agradecemos ao programa de pós-graduação em meteorologia da Universidade Federal de Alagoas, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL) pela concessão da bolsa de mestrado. E à Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Alagoas (SEMARH) pela concessão dos dados de precipitação.

### **Referências Bibliográficas**

Ávila, A.M.H.; Gonçalves, R.R.V.; Pinto, H.S.; Zullo, J.J. Relação entre a precipitação e o NDVI em imagens AVHRR/NOAA para a cana-de-açúcar, no estado de São Paulo. . In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR) 14., 2009, Natal. **Anais...**, São José dos Campos: INPE, 2009. Artigos: p. 553-560. On-line. ISBN:978-85-17-00044-7. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.16.20/doc/553-560.pdf>> . Acesso em: 10 nov. 2010.

Campos, I.B.P.; Paiva, C.M.; Oliveira, L.M.T.; França, G.B. Análise dos efeitos do déficit hídrico na resposta temporal do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em diferentes condições climáticas do Estado do Rio de Janeiro. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR) 14., 2009, Natal. **Anais...**, São José dos Campos: INPE, 2009. Artigos:, p. 4671-4677. On-line. ISBN:978-85-17-00044-7. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.01.18/doc/4671-4677.pdf>> . Acesso em: 10 nov. 2010.

Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 1985. **Atlas Nacional do Brasil (Região Nordeste)** Rio de Janeiro, 1985. (sem paginação)

Gonçalves, R. R. V. **Relação entre a resposta espectral da cana-de-açúcar, registrada nas imagens dos satélites AVHRR/NOAA, em São Paulo, e dados agroclimáticos, no período de 2001 a 2008**. 2008. 185p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Malhas Municipais 2007 - Disponível em: <[ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas/malhas\\_digitais](ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas/malhas_digitais)> Acesso em: 01 set 2010.

Liu, W. T. Kogan, F. N. Monitoring regional drought using Vegetation Condition Index. **International Journal of Remote Sensing**, **17**, 2761-2782, 1996.

Lucas, A. A.; Schuler, C. A. B. Análise do NDVI/NOAA em cana-de-açúcar e Mata Atlântica no litoral norte de Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.11, n.6, p.607-614, 2007.

Vegetation Programme. Disponível em: <<http://www.vgt.vito.be/>>. Acesso em: 10 set. 2010.

VGT4Africa, User Manual – First edition. 2006. Disponível em: <[http://www.vgt4africa.org/PublicDocuments/VGT4AFRICA\\_user\\_manual.pdf](http://www.vgt4africa.org/PublicDocuments/VGT4AFRICA_user_manual.pdf)>. Acesso em: 05 nov. 2010.

Wang, J.; Price, K. P.; Rich, P. M. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the Central Great Plains. **International Journal of Remote Sensing**, v.24, n.11, p.2345-2364, 2003.

**APÉNDICE B**

## 6. A GIS APPROACH USING REMOTE SENSING DERIVED PRODUCTS FOR QUANTIFICATION OF SUGAR CANE PRODUCTIVITY IN BRAZIL

By: **Diego Rocha<sup>1</sup>, Humberto Barbosa<sup>1</sup> & Leandro da Silva<sup>1</sup>**

This application uses GEONETCast products to test a satellite remote sensing approach to improve sugar cane estimates over the Coruripe municipality located in Alagoas, Brazil. The test is performed for the period April to August, 2010. The quantification results presented here show the values of sugar cane production are in the mean range of 27 to 66 Ton ha<sup>-1</sup> at the level of the municipality during the period of test. Results are very encouraging, though a high spatial variability of crop yield is found. This suggests that adjustments are needed to transform the original satellite product-based scheme into satellite derived agro-meteorological parameters. Further studies are needed to better understand these results, which depend on the resolution of the input background fields, their physical content and several other factors. This application represents a first step towards operational use of GIS based quantification of sugar cane productivity in Brazil using GEONETCast delivered products.

### 6.1. Relevance of the application

#### 6.1.1. The gap between science and practical agricultural management

Current management practices in Brazil in the field of agricultural management are very often still based on outdated knowledge and technology. Similarly to what happens in many other regions of the world, frequently scientists plan and develop their methods in isolation, not grasping what is really required by relevant stakeholders. On the other hand, stakeholders are often unaware of what science or knowledge-based alternatives are available. Scientific research is further isolated by lack of proven utility and inadequate representation of results, whilst agricultural policy and management is isolated by legal and professional precedence.

#### 6.1.2. Making crop modeling useful for decision-making: what output is needed, and what input data are required to achieve the modelling goals

In the scientific community frequently model performance is evaluated using procedures and statistical indicators which do not necessarily reflect the usefulness for practical decision-making in the region of interest. Improved awareness of stakeholders' real needs can help scientists to better orient their work. On the other hand, typical current performance rates of crop modelling applications in the region may not be sufficient for practical decision-making. Low model performance is often a consequence of limited input data sets on which the model application is based. However, over the past decades an increasing amount of potentially useful products derived from remote sensing have become available, but their potential for improving model performance in the region has not been well assessed yet.

---

<sup>1</sup>Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Laboratory of Analysis and Processing of Satellite Images (LAPIS), Brazil  
(Corresponding author Diego Rocha) email: [diegorsrocha@gmail.com](mailto:diegorsrocha@gmail.com)

### 6.1.3. Agro-meteorological parameters from satellite remote sensing products and GIS approach

Remote sensing images play an important role in agricultural crop production over large area, quantitatively and non-destructively, because agricultural crops are often difficult to access, and the cost of ground based estimation of productivity can be high. The recent development of GEONETCast–EUMETCast data has provided the capability to obtain frequent and accurate measurements of a number of basic agro-meteorological parameters (e.g. evapotranspiration, surface albedo, surface temperature, solar radiation, rainfall etc.). The GEONETCast real-time data dissemination system represents a global network of communication satellite based data dissemination system to distribute space-based, air-borne and in situ data, metadata and products to diverse user communities. The satellite estimated agro-meteorological parameters provide a complete and spatially dense observations capability for assessing regional vegetation potential productivity (Barbosa et al., 2006; Barbosa et al., 2009). With a Geographic Information System (GIS) approach, it provides a framework to ingest in the analysis the information of agro-meteorological parameters that influence crop yield.

### 6.1.4. Sugar cane crops in Brazil

Agricultural production in the semi-arid region of Brazil is characterized by extensive, low investment subsistence farming focused on limiting the impacts of hydrological and policy risks. As a consequence, agricultural, labor and natural resource productivity has remained low, however at high environmental costs, especially with respect to land degradation and loss of natural resources and biodiversity. Agriculture is the primary social and productive economic sector in the semi-arid Latin American countries and forms the basis for rural welfare and food security, and the platform for structural change and economic take off towards sustainable socio-economic development and growth. Sugar cane is one of the most important cash crops in Brazil. It is an annual crop with solid jointed stems and its mode of photosynthesis is very efficient and growth is quick. Brazil is the biggest grower of sugarcane, which is used to produce sugar and ethanol gasoline-ethanol blends gasohol for transportation fuel. Its bio fuel industry is a leader, a policy model for other countries, and sugarcane ethanol is considered the most successful alternative fuel to date.

## 6.2. Objectives of the application

### 6.2.1. General objective

The general objective of this application is to increase the role of crop modelling applications for estimating sugar cane productivity in Brazil by incorporating satellite remote sensing products to evaluate estimation of productivity of sugar cane crops. A number of tailored and GIS-compatible products are generated and integrated to quantify sugar cane productivity.

### 6.2.2. Specific objective

For this application products that are disseminated through GEONETCast (NDVI S–10, SPOT Vegetation DMP and ETp) are used to develop a remote sensing based approach to improve sugar cane productivity estimation for the municipality of Coruripe, located in Alagoas, Brazil. The study is conducted for the period of April to August, 2010. The sugar cane productivity is derived in 9 computational steps.

## 6.3. Data used

### 6.3.1. Local/Regional (in-situ) data

The application focuses on the sugar cane plantation for the entire Coruripe municipality, located in Alagoas State, Brazil. The sugarcane parameters used are:

- BF = Respiration Factor (0.5 for temperatures  $\geq 20^{\circ}\text{C}$  and 0.6 for temperatures  $<20^{\circ}\text{C}$ ), after Gouvêa (2008);
- APF = Agricultural Productivity Factor (2.9), after Ruddorf (1985);
- Ky= yield response factor, after Doorenbos et al (1979);
- Kc= Crop coefficient.

The crop coefficient is defined as the ratio of crop evapotranspiration ( $E_{tc}$ ) with respect to reference evapotranspiration ( $E_{T0}$ ).  $K_c$  is crop specific and is depending on the crop growth stage. Crop evapotranspiration at any time during the growing season is the product of reference evapotranspiration and the crop coefficient, expressed as:  $E_{tc} = E_{T0} * K_c$ . Crop coefficients have been developed for nearly all crops by measuring crop water use with lysimeters and dividing the crop water use by reference evapotranspiration for each day during the growing season.

### 6.3.2. Products used from GEONETCast

The following data delivered through GEONETCast has been used for the period April to August, 2010:

- Remote sensing images: SPOT Vegetation-2 and SPOT-5, SEVIRI instrument on METEOSAT-9;
- Remote sensing based products:
  - NDVI S10 (NDVI) and Dry Matter Productivity (DMP) having a spatial resolution of 1Km.;
  - LSA-SAF ETp product for South America.

Source of the data is the GEONETCast ground receiving station installed at the Laboratory of Analysis and Processing of Satellite Images (LAPIS), Federal University of Alagoas (UFAL) (see: <http://www.lapismet.com>) and the SPOT Vegetation products are obtained from the archive, maintained by VITO (see: <http://free.vgt.vito.be/>).

## 6.4. Methodology

This application proposes to test a remote sensing approach to quantify estimates of sugar cane productivity over the Coruripe municipality and sugar cane crop estimates are computed for each map pixel using NDVI, DMP and ETp images by applying radiative, aerodynamic and energy balance physics using 9 computational steps. The flow diagram of the methodology to quantify sugar cane productivity using these satellite derived products is shown in figure 6.1.

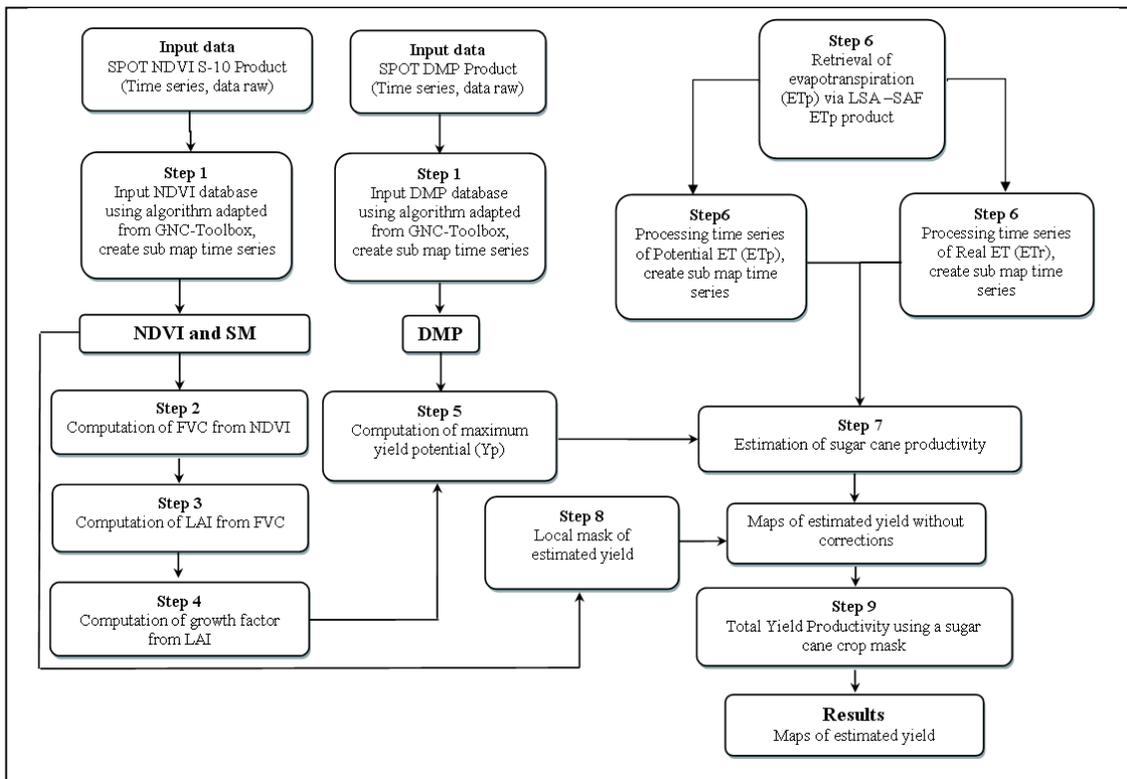


Figure 6.1 Flow chart of the methodology adopted

## 6.5. Data pre-processing for quantification sugar cane productivity

Ensure that you have unzipped the exercise data and move using the ILWIS navigator to this active working directory. Close ILWIS and open ILWIS again and ensure that the path to your active working directory is correct. In order to minimize the data load for this exercise all time series data (NDVI, with and without status mask, DMP, ETp\_avg and ETp\_std) have been pre-processed and sub maps for the Coruripe Municipality have been created. The pre-processing steps are described in the following section.

### 6.5.1. Step 1: Input NDVI and DMP databases using algorithm adapted from GEONETCast Toolbox

To implement a methodology to import both the NDVI and DMP time series raster data into ILWIS, specific routines available within the GEONETCast–Toolbox are adapted for import. Upon import also the status mask was applied, to retain only the map values that meet the flag criteria, such as cloud free, land pixels, good radiometric quality in the Red and NIR bands. For further details see also Chapter 4.5.1.2 as well as Maathuis et al, 2011.

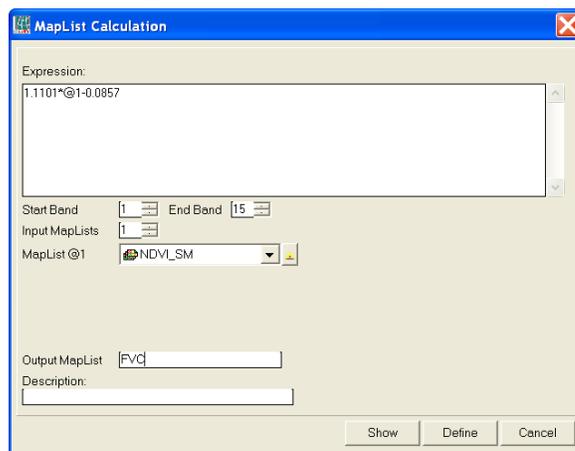
Open the MapList “NDVI\_Coruripe\_Apr\_Aug” and display the time series as an animated map sequence, using as Representation “NDVI1”. Note that there are 15 maps and each map is representing the decadal NDVI computed using a Maximum Value Composite Algorithm. Map layer 1 represents the 1<sup>st</sup> decade of April 2010 and map layer 15 is the last decade of August 2010. Move the mouse, keeping the right mouse button pressed, over the active map display window and note the values. From the menu of the active map display window, select the option “Layers => Add Layer” and select the Polygon Map “coruripe”, in the Display Options window unselect “Info” and select the option “Boundary Only” and press “OK” to see the municipal boundary. Close the Active map window and now display the time series “NDVI\_SM” in a similar manner. Here the status flags have been applied and those pixels that did not meet the flag criteria have been re-assigned as “no-data”, represented by a “?”.

### 6.5.2. Step 2: Computation of FVC from NDVI

The FVC is the one biophysical parameter that determines the contribution partitioning between bare soil and vegetation for surface evapotranspiration, photosynthesis, albedo, and other fluxes crucial to land–atmosphere interactions. The NDVI needs to be converted to FVC. Here use is made of the formula proposed by Muñoz et al (2005), see equation 1. The flag corrected NDVI time series is going to be used.

$$FVC = 1.1101 * NDVI - 0.0857 \quad (\text{Eq 1})$$

To carry out this calculation for each NDVI map within the time series open from the main ILWIS menu the option “Operations => Raster Operations => MapList Calculation” and provide the information as given in figure 6.2.



**Figure 6.2 Calculation the FVC time series from NDVI**

Press “Show” to execute the operation, display the resulting time series as an animated sequence, use as Representation “fvc” and check the values obtained using the mouse, keeping the right mouse button pressed, over the active map display window.

### 6.5.3. Step 3: Computation of LAI from FVC

The LAI, defined, as the total one-sided leaf area per unit ground area, is one of the most important parameters characterizing a canopy. Because LAI most directly quantifies the plant canopy structure, it is highly related to a variety of canopy processes, such as evapotranspiration, interception, photosynthesis and respiration. The FVC is converted to Leaf Area Index (LAI) by means of the formula proposed by Norman et al (2003), see equation 2.

$$LAI = -2Ln(1 - FVC) \quad (Eq 2)$$

To carry out this calculation for each FVC map within the time series open from the main ILWIS menu the option “Operations => Raster Operations => MapList Calculation” and provide the information as given in figure 6.3.

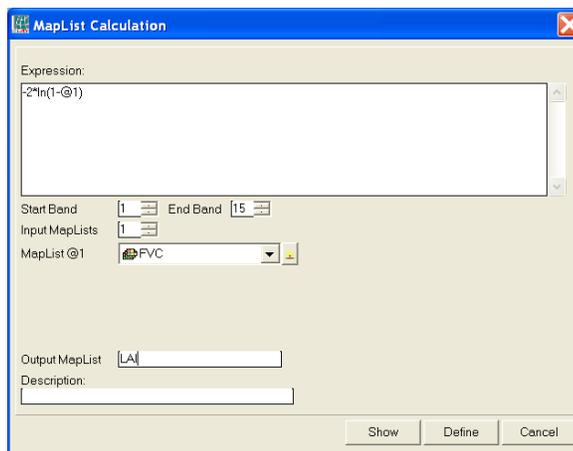


Figure 6.5 LAI MapList calculation to obtain LAI

Press “Show” to execute the operation, display the resulting time series as an animated sequence, use as Representation “lai” and check the values obtained using the mouse, keeping the right mouse button pressed, over the active map display window. Now also check the command line history from the main ILWIS menu by pressing the “drop down” button on the right hand side of the command line. Note the command line string that has been used to create the LAI time series. It is given by the following string:

```
LAI.mpl = maplistcalculate("-2*ln(1-@1)",0,14,FVC.mpl)
```

Check the expression, compare it with figure 6.2. Note that in the following sections the command line expressions to calculate a maplist will be given.

### 6.5.4. Step 4: Computation of growth factor from LAI

Experimental evidence indicated that the growth rate of several agricultural crop species increases linearly with increasing amounts of LAI, when soil water nutrients are not limiting (Doorenbos and Kassam, 1979). Berka et al (2003) developed a simple approach for deriving the growth rate from the LAI, see equation 3.

$$CGF = 0,515 - e^{(-0,667-(0,515*LAI))} \quad (Eq 3)$$

Where: *CGF* = Corrected Growth Factor and *LAI* = Leaf Area Index.

To derive the Corrected Growth Factor (*CGF*) type the following equation on the ILWIS command line:

```
CGF.mpl:=maplistcalculate("0.515-exp(-0.667-(0.515*@1))",0,14,LAI.mpl)
```

Press “Enter” to execute the operation, display the resulting CGF time series as an animated sequence, use as Representation “Pseudo” and check the values obtained using the mouse, keeping the right mouse button pressed, over the active map display window.

#### 6.5.5. Step 5: Computation of maximum yield potential ( $Y_p$ )

The final equation that can be used to derive maximum yield potential ( $Y_p$ ) is based on an equation which includes evaporative fraction corrected growth factor (CGF), respiration factor (BF), agricultural productivity factor (APF) and production of dry matter (DMP) product.

$$Y_p = CGF * BF * APF * DMP \quad (\text{Eq 4})$$

Where  $Y_p$  is the maximum yield potential (kg ha<sup>-1</sup>), BF is the respiration factor (0.5 for temp.  $\geq 20^\circ\text{C}$  and 0.6 for temp.  $< 20^\circ\text{C}$ ), APF is the agricultural productivity factor (2.9) as described in Rudorff (1985) and DMP is the Dry Matter Productivity derived from Spot-Vegetation data. First display using an animated sequence the time series “DMP\_04\_08\_coruripe” using as Representation “Pseudo” and check the map values using the mouse, keeping the right mouse button pressed, over the active map display window. Further information on this product can be found in Bartholomé (2006), the unit is kg/dry matter/ha/day. After you have seen the animated sequence, close the animation.

To calculate the maximum yield potential for each time step, type the following expression on the command line in the main ILWIS menu:

```
Yp.mpl:=maplistcalculate("@1*0.5*10*2.9*@2",0,14,CGF.mpl,DMP_04_08_Coruripe.mpl)
```

Press “Enter” to execute the operation, display the resulting CGF time series as an animated sequence, use as Representation “Pseudo” and check the values obtained using the mouse, keeping the right mouse button pressed, over the active map display window. Note that the factor 10 in the expression above is used to convert from kg/dry matter/ha/day to kg/dry matter/ha/decade!

#### 6.5.6. Step 6: Retrieval of evapotranspiration ( $ET_p$ ) via LSA –SAF $ET_p$ product

The crop coefficient is defined as the ratio of crop evapotranspiration,  $ET_c$ , to reference evapotranspiration,  $ET_p$ .  $K_c$  is crop specific depending on the crop growth stage and details are given in table 6.1. Crop evapotranspiration at any time during the growing season is the product of reference evapotranspiration and the crop coefficient as given by equation 5.

$$ET_c = ET_p * K_c \quad (\text{Eq 5})$$

Crop coefficients have been developed for nearly all crops by measuring crop water use with lysimeters and dividing the crop water use by reference evapotranspiration for each day during the growing season of 2009/2010 (after Toledo Filho, 1988).

Crop species in Alagoas		Crop Growth	Crop coefficients ( $K_c$ )
Days			
<b>CANE PLANT</b>	<b>CANE SOCA</b>		
0 – 60	0 – 60	10% of development	0,25
60 – 300	60 – 300	Greenup	1,65
300 – 450	300 – 360	Senescent / Harvest	1,18

*Table 6.1  $K_c$  for various crop growth stages.*

By use of the newly developed LSA–SAF products, one is now able to obtain frequent and accurate measurements of a number of basic agro-meteorological parameters (e.g. surface albedo, surface temperature, evapotranspiration). The satellite estimated agro-meteorological parameters have several advantages compared to conventional measurements of agrometeorological data using a scattered ground meteorological observation network.

Open the map list “ETp\_avg” and display the time series as an animated sequence, using as Representation “Pseudo”. This maplist has been compiled processing each 30 minutes LSA\_SAF ET-product from 1 April to 31 August 2010. All products have been added on a daily basis, corrected for the time interval, as the product unit is expressed in mm/hr, but the time step is half hourly (therefore the daily sum has been divided by 2). For each decade the respective daily products have been summed and the average was computed to obtain the average ET per decade. Also the standard deviation has been computed and was aggregated to obtain the decadal standard deviation. This map list is called “ET\_std. Display also this map list using as Representation “Pseudo”.

To obtain the crop evapotranspiration the following procedure has been adopted using the time series ETp\_avg and ET\_std data:

For the months of April, May and June a crop coefficient was used of 1.68:

$$\mathbf{ETr} = (\mathbf{ETp\_avg} - \mathbf{ET\_std}) * \mathbf{1.68} \quad (\text{Eq. 6})$$

For the months of July and August a crop coefficient was used of 1.18:

$$\mathbf{ETr} = (\mathbf{ETp\_avg} - \mathbf{ET\_std}) * \mathbf{1.18} \quad (\text{Eq. 7})$$

Type the following equations in the command line of the main ILWIS menu and press enter and “OK” to execute the operations:

```
ETr1:=(etp_avg_0401_coruripe- et_0401_stddeviation_coruripe)*1.68
ETr2:=(etp_avg_0402_coruripe- et_0402_stddeviation_coruripe)*1.68
ETr3:=(etp_avg_0403_coruripe- et_0403_stddeviation_coruripe)*1.68
ETr4:=(etp_avg_0501_coruripe- et_0501_stddeviation_coruripe)*1.68
ETr5:=(etp_avg_0502_coruripe- et_0502_stddeviation_coruripe)*1.68
ETr6:=(etp_avg_0503_coruripe- et_0503_stddeviation_coruripe)*1.68
ETr7:=(etp_avg_0601_coruripe- et_0601_stddeviation_coruripe)*1.68
ETr8:=(etp_avg_0602_coruripe- et_0602_stddeviation_coruripe)*1.68
ETr9:=(etp_avg_0603_coruripe- et_0603_stddeviation_coruripe)*1.68
```

```
ETr10:=(etp_avg_0701_coruripe- et_0701_stddeviation_coruripe)*1.18
ETr11:=(etp_avg_0702_coruripe- et_0702_stddeviation_coruripe)*1.18
ETr12:=(etp_avg_0703_coruripe- et_0703_stddeviation_coruripe)*1.18
ETr13:=(etp_avg_0801_coruripe- et_0801_stddeviation_coruripe)*1.18
ETr14:=(etp_avg_0802_coruripe- et_0802_stddeviation_coruripe)*1.18
ETr15:=(etp_avg_0803_coruripe- et_0803_stddeviation_coruripe)*1.18
```

After all calculations are performed a new map list has to be created. From the main ILWIS menu, select “File => Create => MapList” and add all newly created ETr\* maps in a sequential order to the right hand listing, using the “>” icon. Specify as Map List name “ETr” and press “OK”. Display the newly created map list “ETr” as an animated sequence, using as Representation “Pseudo”, check the map values obtained.

### 6.5.7. Step 7: Estimation of sugar cane productivity

The sugarcane yield estimation model over the growing season, on a decadal basis, is accomplished by using an agrometeorological model (Equation 8) according to Doorenbos and Kassam (1979):

$$Ye = Yp \left[ 1 - ky \left( 1 - \frac{ETr}{ETp} \right) \right] \quad (\text{Eq 8})$$

where Ye is the estimated yield (kg ha-1), Yp the maximum yield (kg ha-1), ky the yield response factor described in (Doorenbos and Kassam, 1979); ETr the actual evapotranspiration (mm) and ETp the maximum evapotranspiration (mm). Maximum yield (Yp) is established by the genetic characteristics of the crop and by the degree of crop adaptation to the environment (Doorenbos and Kassam, 1979). The ky factors used here are for April = 1.2, for May = 1.3, for June = 1.2, for July = 1.1 and for August = 1.1. To calculate the estimated yield the following equations have to be entered from the command line on the main ILWIS menu:

$$Ye1:=Yp\_1*(1-1.2*(1-(ETr1/etp\_avg\_0401\_coruripe)))$$

In the Raster Map Definition window, set the minimum value range to “0” and the “Precision” to “0.01” and press “OK” to execute the operation. Display the map calculated and check the values obtained. Note that each pixel represents an area of 1 km<sup>2</sup> and the estimated yield is expressed in kg ha-1! Repeat the Ye calculations for the other decades using the following set of equations (note the change of the Yp) and keep on setting the minimum map value to “0” and use as Precision “0.01”:

$$\begin{aligned} Ye2 &:= Yp\_2 * (1 - 1.2 * (1 - (ETr2 / etp\_avg\_0402\_coruripe))) \\ Ye3 &:= Yp\_3 * (1 - 1.2 * (1 - (ETr3 / etp\_avg\_0403\_coruripe))) \\ Ye4 &:= Yp\_4 * (1 - 1.3 * (1 - (ETr4 / etp\_avg\_0501\_coruripe))) \\ Ye5 &:= Yp\_5 * (1 - 1.3 * (1 - (ETr5 / etp\_avg\_0502\_coruripe))) \\ Ye6 &:= Yp\_6 * (1 - 1.3 * (1 - (ETr6 / etp\_avg\_0503\_coruripe))) \\ Ye7 &:= Yp\_7 * (1 - 1.2 * (1 - (ETr7 / etp\_avg\_0601\_coruripe))) \\ Ye8 &:= Yp\_8 * (1 - 1.2 * (1 - (ETr8 / etp\_avg\_0602\_coruripe))) \\ Ye9 &:= Yp\_9 * (1 - 1.2 * (1 - (ETr9 / etp\_avg\_0603\_coruripe))) \\ Ye10 &:= Yp\_10 * (1 - 1.1 * (1 - (ETr10 / etp\_avg\_0701\_coruripe))) \\ Ye11 &:= Yp\_11 * (1 - 1.1 * (1 - (ETr11 / etp\_avg\_0702\_coruripe))) \\ Ye12 &:= Yp\_12 * (1 - 1.1 * (1 - (ETr12 / etp\_avg\_0703\_coruripe))) \\ Ye13 &:= Yp\_13 * (1 - 1.1 * (1 - (ETr13 / etp\_avg\_0801\_coruripe))) \\ Ye14 &:= Yp\_14 * (1 - 1.1 * (1 - (ETr14 / etp\_avg\_0802\_coruripe))) \\ Ye15 &:= Yp\_15 * (1 - 1.1 * (1 - (ETr15 / etp\_avg\_0803\_coruripe))) \end{aligned}$$

After all calculations are performed a new map list has to be created. From the main ILWIS menu, select “File => Create => MapList” and add all newly created Ye\* maps in a sequential order to the right hand listing, using the “>” icon. Specify as Map List name “Ye” and press “OK”. Display the newly created map list “Ye” as an animated sequence, using as Representation “Pseudo”, check the map values obtained. Close all active map windows.

### 6.5.8. Step 8: Local mask of estimated yield

The resulting map list of the estimated yield (Ye) should be clipped to the mask of the Coruripe municipality boundaries in the State of Alagoas, Brazil. Right click with the mouse button on the polygon map “coruripe” and from the context sensitive menu, select the option ”Polygon to Raster”, as GeoReference select “CFG\_Coruripe\_Apr\_Aug\_1”, leave the Output Raster Map name as indicated by default and press “Show”. Display the map and note the content. Close the map, right click with the mouse on the RasterMap “coruripe” and from the context sensitive menu, select the option “Properties”. Note that the domain here is specified as Identifier

“coruripe” and although when looking at the map content the “1” which was indicated is representing an identifier number but not a value. In order to use this map in a calculation we have to change it to a value. Type the following expression in the command line of the main ILWIS menu:

```
mask:=iff(coruripe="1",1,0)
```

Note that from the Raster Map Definition window the domain given is now a “value” domain. Press “OK” to execute the operation. Display the map “Mask” and note the content. Now we can use the mask to extract the “Ye” for the Coruripe Municipality. Type the following expression on the command line in the main ILWIS menu:

```
Ye_Coruripe.mpl:=maplistcalculate("iff(mask=1,@1,?)",0,14,Ye.mpl)
```

Press “Enter” to execute the operation, display the resulting “Ye\_Coruripe” time series as an animated sequence, use as Representation “Pseudo” and check the values obtained using the mouse, keeping the right mouse button pressed, over the active map display window.

#### 6.5.9. Step 9: Total Yield Productivity using a sugar cane crop mask

The time series “Ye\_Coruripe” corresponds to the estimated sugar cane yield on a decadal basis. To estimate Total Yield Productivity for whole time series, each decadal period from the Map List Ye\_Coruripe should be accumulated. Enter the following expression on the command line to obtain the sum of the time series and press enter to execute the operation:

```
Ye_sum:=MapMaplistStatistics(Ye_Coruripe.mpl, Sum, 0, 14)
```

Finally to estimate total yield productivity the average amount of water (76 %) without stress is added to the sugar cane and the initial weight of the sugar cane stems during planting has to be added as well (here a value is used of 15 ton/ha). Enter the following expression on the command line to obtain the Total Yield Productivity and press enter to execute the operation:

```
Ye_total:=Ye_sum*1.76+15000
```

Right click with the mouse button on the polygon map “sugarcane\_mask” and from the context sensitive menu, select the option “Polygon to Raster”, as GeoReference select “CFG\_Coruripe\_Apr\_Aug\_1”, leave the Output Raster Map name as indicated by default and press “Show”. Display the map and note the content.

Open from the main ILWIS menu the option “Operations => Raster Operations => Cross”. Select the raster map with the total yield productivity, here called “Ye\_total” as 1st Map. Select raster map “sugarcane\_mask” as 2nd Map. Type “yield\_mask” as Output Table and press “Show”. Note the content of the cross table. The figure below shows the final results of the analysis, using the boundaries of the municipality and the sugar cane mask as overly on the Ye\_total map.

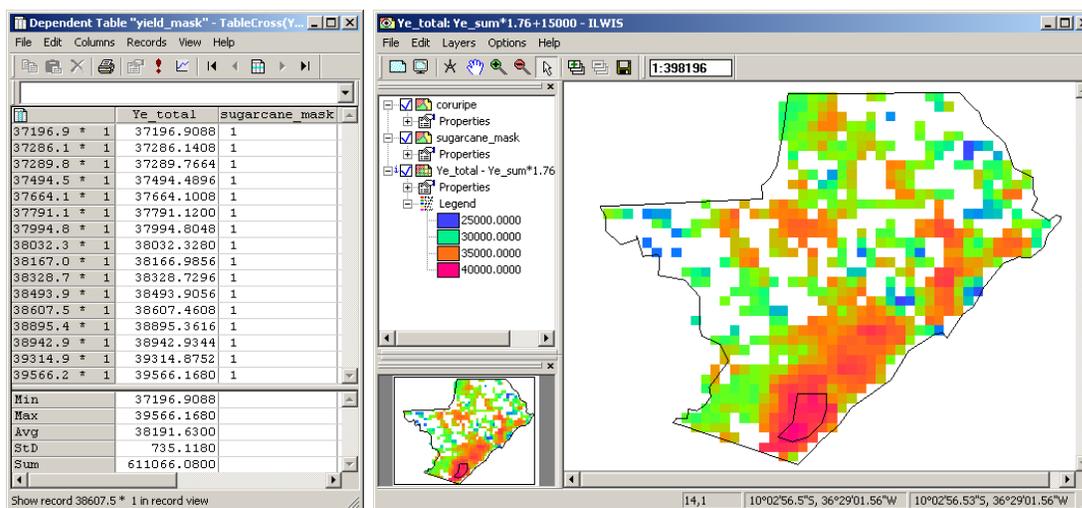


Figure 6.9 *Ye-total for the Cururipe area and cross results using a sugar cane mask.*

## 6.6. Summary and Conclusions

For this exercise GEONETCast– EUMETCast data (NDVI S-10, DMP SPOT and ET<sub>0</sub>) is applied to test a remote sensing approach to improve sugar cane Total Yield Productivity over the Municipality of Coruripe. The test is performed for the period April to August, 2010 and the sugar cane productivity is derived using nine computational steps.

The results show that the methodology adopted has three distinct advantages compared to the generally accepted “ $kc \times ET_0$ ” method for computing ET. First advantage is that the acreage of water-using land is observed directly from the satellite products, so accurate land use is implicit to the process. Second, there is no need to incorporate a crop type map to solve the energy balance, so accurate records of cropping patterns are not required. These features overcome the typical difficulty of assembling accurate records of irrigated areas and cropping patterns, especially for historical analyses. Thirdly, the LSA-SAF ET<sub>0</sub> (aggregated) product can be imported into a GIS for spatial analysis, either alone or in combination with land use and other spatial data, inherently accounting for the effects of salinity, deficit irrigation or water shortage, disease, poor plant stands and other ET-reducing influences on the ET flux. These influences are difficult to take into consideration using the standard “ $kc \times ET_0$ ” computation. Furthermore the software tools have demonstrated a great flexibility and ease of use.

The results presented in this research show the values of sugarcane production are in the average range of 37 to 40 ton/ha at the level of the municipality area during the test period. The sugarcane area finally selected is showing significantly higher values. This is a first indication where the sugar cane areas can be harvested. Results are very encouraging, through a high spatial variability of crop yield is found, suggesting adjustments are needed to transform the original satellite data-based scheme into satellite estimated agro-meteorological parameters. Further studies are required to analyse these results into more detail as these depend for example on the spatial resolution of the input background fields, their physical content and many other factors. Furthermore there is a need to use a longer time series and analyse into more detail the temporal response of e.g. the DMP of the study area. These findings present a first step towards an operational use of ILWIS in Brazil using NDVI S-10, DMP SPOT and ET<sub>0</sub> for operational estimating of sugar cane productivity. This preliminary assessment demonstrates the feasibility of the proposed methodology to be useful in homogenous areas with the same characteristics and to focus on the control factors and incorporate local information to enable better model calibration and thus improve the results.

---

## REFERENCES

---

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998): Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56. 300p.
- Bartholomé, E. (editor) (2006): VGT4Africa user manual. 1st edition. EUR 22344 EN, European Communities. Available online at <http://www.devcoast.eu/ViewContent.do?pageId=40>.
- Berka, L.M.S., Rudorff, B.F.T., Shimabukuro, Y.E. (2003): Soybean yield estimation by an agrometeorological model in a GIS. *Scientia Agricola*, v.60, p.433-440.
- Barbosa, H.; Huete, A; Baethghen, W. (2006): A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. *Journal of Arid Environments* ,67, 288-307.
- Barbosa, H. A. (2009): Linking sustainable indices and climate variability in the State of Ceará, Northeast Brazil. In: The Future of Drylands, 6, 435-445, DOI: 10.1007/978-1-4020-6970-3\_40.
- Choudhury, B.J., Ahmed N.U., Idso S.B., Reginato R.J., Daughtry, C.S.T. (1994): Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment*, v.50, p.1-17.
- Doorenbos, J., Kassam, A.H. (1979): Yield response to water. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO – Irrigation and Drainage Paper no. 33, 193 p.
- Gouvêa, J.R.F. (2008): Mudanças climáticas e a expectativa de seus impactos da cultura de cana-de-açúcar na região de Piracicaba – SP. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 99 p.
- Muñoz, J. C. J.; Sobrino, J.A. Guanter, L.; Moreno, J.; Plaza, A.; Matínez, P. (2005): Fractional Vegetation Cover Estimation from Proba/CHRIS Data: Methods, Analysis of Angular Effects and Application to the Land Surface Emissivity Retrieval. *Proc. 3rd ESA CHRIS/PROBA Workshop*, ESRIN, ESA SP-593, Frascati, Italy, June 2005
- Maathuis, B., Mannaerts, C.; Retsios, B., Schouwenburg, M. and Lemmens, R. (2011): GEONETCast Toolbox. Installation, configuration and user guide of the GEONETCast Toolbox plug-in for ILWIS 3.7, XML version 1.2. ITC. Enschede, The Netherlands. 2011. <http://52north.org/downloads/earth-observation/geonetcast/toolbox>
- Norman, J.M., Anderson, M.C., Kustas, W.P., French, A.N., Mecikalski, J., Torn, R., Diak, G.R., Achmugge, T.J. (2003): Remote Sensing of Evapotranspiration for Precision-Farming Applications. In: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Toulouse. Proceedings IGARSS 2003 – Organizing Committee, 2003. p. 21-25.
- Rudorff, B.F.T. (1985): Dados Landsat na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos. 114 p.
- Toledo Filho, M.R. (1988): Probabilidade de suprimento da demanda hídrica ideal da cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) através da precipitação pluvial na zona canavieira do estado de Alagoas. 1988.72f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Agronomia, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

**APÊNDICE C**



# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: [www.ufpe.br/rbgfe](http://www.ufpe.br/rbgfe)



## A Gis Approach Using Remote Sensing Derived Products for Quantification of Sugar Cane Productivity in Brazil

Diego Raoni da Silva Rocha<sup>1</sup>, Humberto Alves Barbosa<sup>2</sup>, Leandro Rodrigo Macedo da Silva<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Laboratory of Analysis and Processing of Satellite Images, Campus A. C. Simões - Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins - Maceió - AL, CEP: 57072-970. E-mail: [diegorsrocha@gmail.com](mailto:diegorsrocha@gmail.com).

<sup>2</sup>Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Laboratory of Analysis and Processing of Satellite Images, Campus A. C. Simões - Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins - Maceió - AL, CEP: 57072-970. e-mail: [barbosa33@gmail.com](mailto:barbosa33@gmail.com).

<sup>3</sup>Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Laboratory of Analysis and Processing of Satellite Images, Campus A. C. Simões - Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins - Maceió - AL, CEP: 57072-970. e-mail: [macedo.leandror@gmail.com](mailto:macedo.leandror@gmail.com).

Artigo recebido em 15/08/2011 e aceite em 10/09/2011

### RESUMO

Este estudo teve como objetivo de desenvolver uma metodologia baseada na aplicação de produtos GEONETCast-EUMETCast para estimativa da produtividade da cana-de-açúcar utilizando-se de um modelo agrometeorológico-espectral. O estudo foi desenvolvido no município de Coruripe, localizado no estado de Alagoas, Brasil. O teste foi realizado num período de cinco meses, abril a agosto, do ano de 2010. Conclui-se que a metodologia utilizada indica ser útil para o apoio operacional de estimativa da produtividade da cana-de-açúcar, fornecendo valores médios de 37 a 40 t/ha.

Palavras-chave: Spot Vegetation, Meteosat-9, Produtividade Safra, Ilwis

### ABSTRACT

This study aimed to develop a GEONETCast-EUMETCast product-based method of estimating the productivity of cane sugar using an agrometeorological-spectral model. The study was carried out in the Municipality of Coruripe, located in the state of Alagoas, Brazil. The test was performed over the period of five months, from April to August of 2010. It was concluded that the methodology is useful for developing estimates of operational support for the cane sugar productivity, providing mean values of 37 to 40 t/ha.

Keywords: Spot Vegetation, Meteosat-9, Crop Yield, Ilwis

### 1. Introduction

#### 1.1 The gap between science and practical agricultural management

Current management practices in Brazil in the field of agricultural management are very often still based on outdated knowledge and technology. Similarly to what

happens in many other regions of the world, frequently scientists plan and develop their methods in isolation, not grasping what is really required by relevant stakeholders. On the other hand, stakeholders are often unaware of what science or knowledge-based alternatives are available. Scientific research is further isolated by lack of proven utility

\*E-mail: [diegorsrocha@gmail.com](mailto:diegorsrocha@gmail.com) (Rocha, D. R. S.).

and inadequate representation of results, whilst agricultural policy and management is isolated by legal and professional precedence.

1.2 Making crop modeling useful for decision-making: what output is needed, and what input data are required to achieve the modelling goals

In the scientific community frequently model performance is evaluated using procedures and statistical indicators which do not necessarily reflect the usefulness for practical decision-making in the region of interest. Improved awareness of stakeholders' real needs can help scientists to better orient their work. On the other hand, typical current performance rates of crop modelling applications in the region may not be sufficient for practical decisionmaking.

Low model performance is often a consequence of limited input data sets on which the model application is based. However, over the past decades an increasing amount of potentially useful products derived from remote sensing have become available, but their potential for improving model performance in the region has not been well assessed yet.

1.3 Agro-meteorological parameters from satellite remote sensing products and GIS approach

Remote sensing images play an important role in agricultural crop production over large area, quantitatively and nondestructively, because agricultural crops

are often difficult to access, and the cost of ground based estimation of productivity can be high. The recent development of GEONETCast–EUMETCast data has provided the capability to obtain frequent and accurate measurements of a number of basic agro-meteorological parameters (e.g. evapotranspiration, surface albedo, surface temperature, solar radiation, rainfall etc.). The GEONETCast real-time data dissemination system represents a global network of communication satellite based data dissemination system to distribute space-based, air-borne and in situ data, metadata and products to diverse user communities. The satellite estimated agro-meteorological parameters provide a complete and spatially dense observations capability for assessing regional vegetation potential productivity (Barbosa et al., 2006; Barbosa et al., 2009). With a Geographic Information System (GIS) approach, it provides a framework to ingest in the analysis the information of agrometeorological parameters that influence crop yield.

1.4 Sugar cane crops in Brazil

Agricultural production in the semi-arid region of Brazil is characterized by extensive, low investment subsistence farming focused on limiting the impacts of hydrological and policy risks. As a consequence, agricultural, labor and natural resource productivity has remained low, however at high environmental costs,

especially with respect to land degradation and loss of natural resources and biodiversity. Agriculture is the primary social and productive economic sector in the semi-arid Latin American countries and forms the basis for rural welfare and food security, and the platform for structural change and economic take off towards sustainable socio-economic development and growth. Sugar cane is one of the most important cash crops in Brazil. It is an annual crop with solid jointed stems and its mode of photosynthesis is very efficient and growth is quick. Brazil is the biggest grower of sugarcane, which is used to produce sugar and ethanol gasoline-ethanol blends gasohol for transportation fuel. Its bio fuel industry is a leader, a policy model for other countries, and sugarcane ethanol is considered the most successful alternative fuel to date.

### 1.5 General objective

The general objective of this application is to increase the role of crop modelling applications for estimating sugar cane productivity in Brazil by incorporating satellite remote sensing products to evaluate estimation of productivity of sugar cane crops. A number of tailored and GIS-compatible products are generated and integrated to quantify sugar cane productivity.

### 1.6 Specific objective

For this application products that are disseminated through GEONETCast (NDVI S-10, SPOT Vegetation DMP and ETp) are

used to develop a remote sensing based approach to improve sugar cane productivity estimation for the municipality of Coruripe, located in Alagoas, Brazil. The study is conducted for the period of April to August, 2010. The sugar cane productivity is derived in 9 computational steps.

## 2. Methodology

### 2.1 Data Used

#### 2.1.1 Local/Regional (in-situ) data

The application focuses on the sugar cane plantation for the entire Coruripe municipality, located in Alagoas State, Brazil.

The sugarcane parameters used are:

BF = Respiration Factor (0.5 for temperatures  $\geq 20^{\circ}\text{C}$  and 0.6 for temperatures  $<20^{\circ}\text{C}$ ), after Gouvêa (2008);

APF = Agricultural Productivity Factor (2.9), after Ruddorf (1985);

Ky= yield response factor, after Doorenbos et al (1979);

Kc= Crop coefficient.

The crop coefficient is defined as the ratio of crop evapotranspiration (Etc) with respect to reference evapotranspiration (ET0). Kc is crop specific and is depending on the crop growth stage. Crop evapotranspiration at any time during the growing season is the product of reference evapotranspiration and the crop coefficient, expressed as:  $ET_c = ET_0 * K_c$ . Crop coefficients have been developed for nearly all crops by measuring crop water use with lysimeters and dividing the crop

water use by reference evapotranspiration for each day during the growing season.

## 2.2 Products used from GEONETCast

The following data delivered through GEONETCast has been used for the period April to August, 2010:

Remote sensing images: SPOT Vegetation-2 and SPOT-5, SEVIRI instrument on METEOSAT-9;

Remote sensing based products:

- NDVI S10 (NDVI) and Dry Matter Productivity (DMP) having a spatial resolution of 1Km.;
- LSA-SAF Etp product for South America.

Source of the data is the GEONETCast ground receiving station installed at the Laboratory of Analysis and Processing of Satellite Images (LAPIS), Federal University of Alagoas (UFAL) (see: <http://www.lapismet.com>) and the SPOT Vegetation products are obtained from the archive, maintained by VITO (see: <http://free.vgt.vito.be/>).

This application proposes to test a remote sensing approach to quantify estimates of sugar cane productivity over the Coruripe municipality and sugar cane crop estimates are computed for each map pixel using NDVI, DMP and Etp images by applying radiative, aerodynamic and energy balance physics using 9 computational steps. The flow diagram of the methodology to quantify sugar

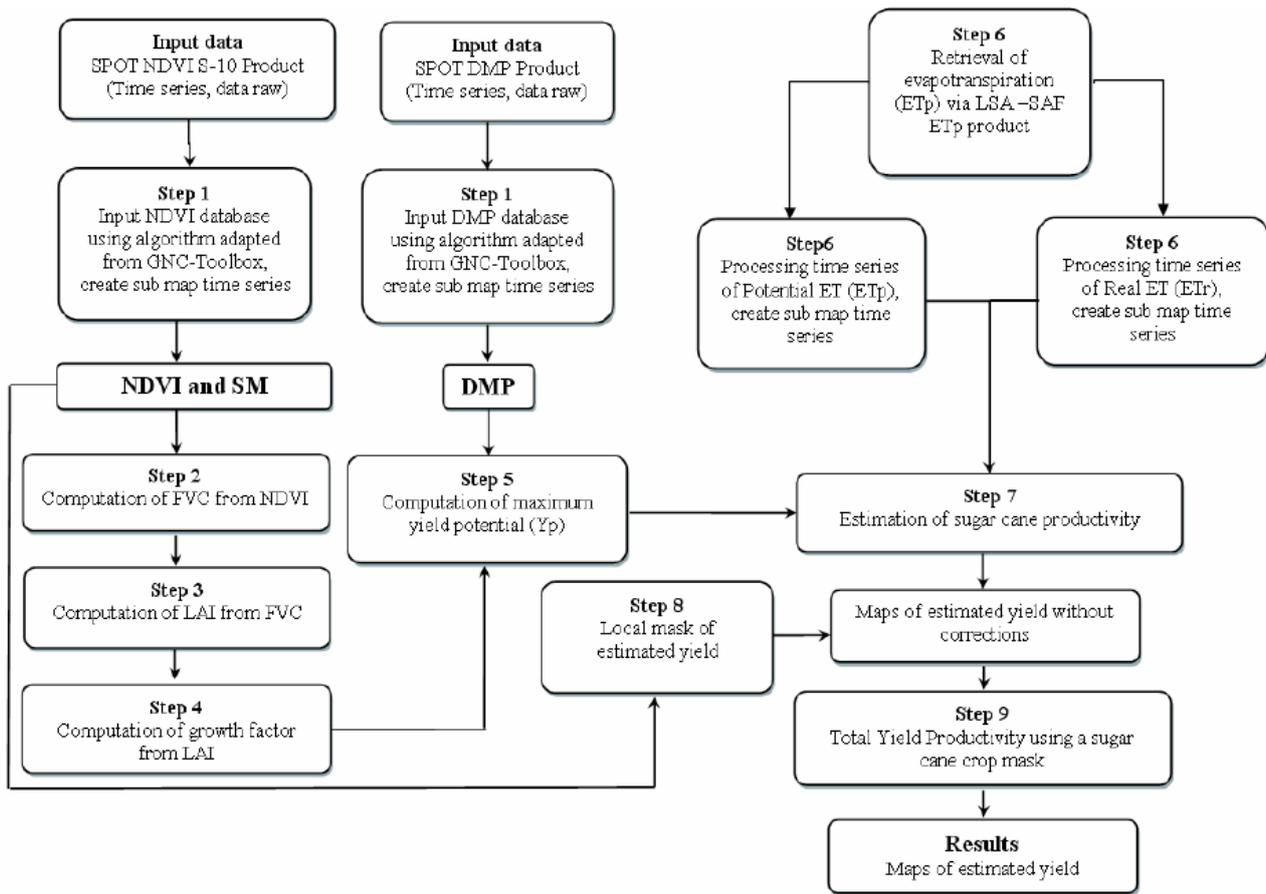
cane productivity using these satellite derived products is shown in figure 1.

## 2.3 Data pre-processing for quantification sugar cane productivity

Ensure that you have unzipped the exercise data and move using the ILWIS navigator to this active working directory. Close ILWIS and open ILWIS again and ensure that the path to your active working directory is correct. In order to minimize the data load for this exercise all time series data (NDVI, with and without status mask, DMP, Etp\_avg and Etp\_std) have been pre-processed and sub maps for the Coruripe Municipality have been created. The pre-processing steps are described in the following section.

## 2.4 Step1: Input NDVI and DMP databases using algorithm adapted from GEONETCast Toolbox

To implement a methodology to import both the NDVI and DMP time series raster data into ILWIS, specific routines available within the GEONETCast-Toobox are adapted for import. Upon import also the status mask was applied, to retain only the map values that meet the flag criteria, such as cloud free, land pixels, good radiometric quality in the Red and NIR bands. For further details see also Chapter 4.5.1.2 as well as Maathuis et al, 2011.



**Figure 1:** Flow chart of the methodology adapted

Open the MapList “NDVI\_Coruripe\_Apr\_Aug” and display the time series as an animated map sequence, using as Representation “NDVI1”. Note that there are 15 maps and each map is representing the decadal NDVI computed using a Maximum Value Composite Algorithm. Map layer 1 represents the 1st decade of April 2010 and map layer 15 is the last decade of August 2010. Move the mouse, keeping the right mouse button pressed, over the active map display window and note the values. From the menu of the active map display window, select the option “Layers => Add Layer” and select the Polygon Map “coruripe”, in the Display Options window unselect “Info” and select the option

“Boundary Only” and press “OK” to see the municipal boundary. Close the Active map window and now display the time series “NDVI\_SM” in a similar manner. Here the status flags have been applied and those pixels that did not meet the flag criteria have been re-assigned as “no-data”, represented by a “?”.

#### Step 2: Computation of FVC from NDVI

The FVC is the one biophysical parameter that determines the contribution partitioning between bare soil and vegetation for surface evapotranspiration, photosynthesis, albedo, and other fluxes crucial to land-atmosphere interactions. The NDVI needs to be converted to FVC. Here

use is made of the formula proposed by Muñoz et al (2005), see equation 1. The flag corrected NDVI time series is going to be used.

$$FVC = 1.1101 * NDVI - 0.0857 \quad (\text{Eq 1})$$

To carry out this calculation for each NDVI map within the time series open from the main ILWIS menu the option “Operations => Raster Operations => MapList Calculation” and provide the information as given in figure 6.2.

Press “Show” to execute the operation, display the resulting time series as an animated sequence, use as Representation “fvc” and check the values obtained using the mouse, keeping the right mouse button pressed, over the active map display window.

### Step 3: Computation of LAI from FVC

The LAI, defined, as the total one-sided leaf area per unit ground area, is one of the most important parameters characterizing a canopy. Because LAI most directly quantifies the plant canopy structure, it is highly related to a variety of canopy processes, such as evapotranspiration, interception, photosynthesis and respiration. The FVC is converted to Leaf Area Index (LAI) by means of the formula proposed by Norman et al (2003), see equation 2.

$$LAI = -2Ln(1 - FVC) \quad (\text{Eq 2})$$

To carry out this calculation for each FVC map within the time series open from the main ILWIS menu the option “Operations => Raster Operations => MapList Calculation”

and provide the information as given in figure 6.3.

Press “Show” to execute the operation, display the resulting time series as an animated sequence, use as Representation “lai” and check the values obtained using the mouse, keeping the right mouse button pressed, over the active map display window. Now also check the command line history from the main ILWIS menu by pressing the “drop down” button on the right hand side of the command line. Note the command line string that has been used to create the LAI time series. It is given by the following string:

$$LAI.mpl = \text{maplistcalculate} \quad ( "-2*\ln(1-@1)",0,14,FVC.mpl)$$

Check the expression, compare it with figure 6.2. Note that in the following sections the command line expressions to calculate a maplist will be given.

### Step 4: Computation of growth factor from LAI

Experimental evidence indicated that the growth rate of several agricultural crop species increases linearly with increasing amounts of LAI, when soil water nutrients are not limiting (Doorenbos and Kassam, 1979). Berka et al (2003) developed a simple approach for deriving the growth rate from the LAI, see equation 3.

$$CGF = 0,515 - e^{(-0,667 - (0,515 * LAI))} \quad (\text{Eq 3})$$

Where: *CGF* = Corrected Growth Factor and *LAI* = Leaf Area Index.

To derive the Corrected Growth Factor (CGF)

type the following equation on the ILWIS command line:

```
CGF.mpl:=maplistcalculate("0.515-exp(-0.667-(0.515*@1))",0,14,LAI.mpl)
```

Press “Enter” to execute the operation, display the resulting CGF time series as an animated sequence, use as Representation “Pseudo” and check the values obtained using the mouse, keeping the right mouse button pressed, over the active map display window.

#### Step 5: Computation of maximum yield potential ( $Y_p$ )

The final equation that can be used to derive maximum yield potential ( $Y_p$ ) is based on an equation which includes evaporative fraction corrected growth factor (CGF), respiration factor (BF), agricultural productivity factor (APF) and production of dry matter (DMP) product.

$$Y_p = CGF * BF * APF * DMP \quad (\text{Eq 4})$$

Where  $Y_p$  is the maximum yield potential (kg ha<sup>-1</sup>), BF is the respiration factor (0.5 for temp.  $\geq 20^\circ\text{C}$  and 0.6 for temp  $<20^\circ\text{C}$ ), APF is the agricultural productivity factor (2.9) as described in Rudorff (1985) and DMP is the Dry Matter Productivity derived from Spot-Vegetation data. First display using an animated sequence the time series “DMP\_04\_08\_coruripe” using as Representation “Pseudo” and check the map values using the mouse, keeping the right mouse button pressed, over the active map display window. Further information on this product can be found in Bartholomé (2006),

the unit is kg/dry matter/ha/day. After you have seen the animated sequence, close the animation.

To calculate the maximum yield potential for each time step, type the following expression on the command line in the main ILWIS menu:

```
Yp.mpl:=maplistcalculate("@1*0.5*10*2.9*@2",0,14,CGF.mpl,DMP_04_08_Coruripe.mpl)
```

Press “Enter” to execute the operation, display the resulting CGF time series as an animated sequence, use as Representation “Pseudo” and check the values obtained using the mouse, keeping the right mouse button pressed, over the active map display window. Note that the factor 10 in the expression above is used to convert from kg/dry matter/ha/day to kg/dry matter/ha/decade!

#### Step 6: Retrieval of evapotranspiration ( $ET_p$ ) via LSA –SAF $ET_p$ product

The crop coefficient is defined as the ratio of crop evapotranspiration,  $ET_r$ , to reference evapotranspiration,  $ET_p$ .  $K_c$  is crop specific depending on the crop growth stage and details are given in table 6.1. Crop evapotranspiration at any time during the growing season is the product of reference evapotranspiration and the crop coefficient as given by equation 5.

$$ET_r = ET_p * K_c \quad (\text{Eq 5})$$

By use of the newly developed LSA–SAF products, one is now able to obtain frequent and accurate measurements of a

number of basic agro-meteorological parameters (e.g. surface albedo, surface temperature, evapotranspiration). The satellite estimated agro-meteorological parameters have several advantages compared to conventional measurements of agrometeorological data using a scattered ground meteorological observation network.

Open the map list “ETp\_avg” and display the time series as an animated sequence, using as Representation “Pseudo”. This maplist has been compiled processing each 30 minutes LSA\_SAF ET-product from 1 April to 31 August 2010. All products have been added on a daily basis, corrected for the time interval, as the product unit is expressed in mm/hr, but the time step is half hourly (therefore the daily sum has been divided by 2). For each decade the respective daily products have been summed and the average was computed to obtain the average ET per decade. Also the standard deviation has been computed and was aggregated to obtain the decadal standard deviation. This map list is called “ET\_std. Display also this map list using as Representation “Pseudo”.

To obtain the crop evapotranspiration the following procedure has been adopted using the time series ETp\_avg and ET\_std data: For the months of April, May and June a crop coefficient was used of 1.68:

$$ETr = (ETp\_avg - ET\_std) * 1.68 \quad (\text{Eq. 6})$$

For the months of July and August a crop coefficient was used of 1.18:

$$ETr = (ETp\_avg - ET\_std) * 1.18 \quad (\text{Eq. 7})$$

Type the following equations in the command line of the main ILWIS menu and press enter and “OK” to execute the operations:

ed. From the main ILWIS menu, select “File => Create => MapList” and add all newly created ETr\* maps in a sequential order to the right hand listing, using the “>” icon. Specify as Map List name “ETr” and press “OK”. Display the newly created map list “ETr” as an animated sequence, using as Representation “Pseudo”, check the map values obtained.

#### Step 7: Estimation of sugar cane productivity

The sugarcane yield estimation model over the growing season, on a decadal basis, is accomplished by using an agrometeorological model (Equation 8) according to Doorenbos and Kassam (1979):

$$Ye = Yp \left[ 1 - ky \left( 1 - \frac{ETr}{ETp} \right) \right]$$

(Eq 8)

where Ye is the estimated yield (kg ha<sup>-1</sup>), Yp the maximum yield (kg ha<sup>-1</sup>), ky the yield response factor described in (Doorenbos and Kassam, 1979); ETr the actual evapotranspiration (mm) and ETp the maximum evapotranspiration (mm). Maximum yield (Yp) is established by the genetic characteristics of the crop and by the degree of crop adaptation to the environment (Doorenbos and Kassam, 1979). The ky factors used here are for April = 1.2, for May = 1.3, for June = 1.2, for July = 1.1 and for

August = 1.1. To calculate the estimated yield the following equations have to be entered from the command line on the main ILWIS menu:

$$Ye1:=Yp_1*(1-1.2*(1-(ETr1/etp_avg_0401_coruripe)))$$

In the Raster Map Definition window, set the minimum value range to “0” and the “Precision” to “0.01” and press “OK” to execute the operation. Display the map calculated and check the values obtained. Note that each pixel represents an area of 1 km<sup>2</sup> and the estimated yield is expressed in kg ha<sup>-1</sup>! Repeat the Ye calculations for the other decades using the following set of equations (note the change of the Yp) and keep on setting the minimum map value to “0” and use as Precision “0.01”:

After all calculations are performed a new map list has to be created. From the main ILWIS menu, select “File => Create => MapList” and add all newly created Ye\* maps in a sequential order to the right hand listing, using the “>” icon. Specify as Map List name “Ye” and press “OK”. Display the newly created map list “Ye” as an animated sequence, using as Representation “Pseudo”, check the map values obtained. Close all active map windows.

#### Step 8: Local mask of estimated yield

The resulting map list of the estimated yield (Ye) should be clipped to the mask of the Coruripe municipality boundaries in the State of Alagoas, Brazil. Right click with the

mouse button on the polygon map “coruripe” and from the context sensitive menu, select the option ”Polygon to Raster”, as GeoReference select “CFG\_Coruripe\_Apr\_Aug\_1”, leave the Output Raster Map name as indicated by default and press “Show”.

Display the map and note the content. Close the map, right click with the mouse on the RasterMap “coruripe” and from the context sensitive menu, select the option “Properties”. Note that the domain here is specified as Identifier “coruripe” and although when looking at the map content the “1” which was indicated is representing an identifier number but not a value. In order to use this map in a calculation we have to change it to a value. Type the following expression in the command line of the main ILWIS menu:

$$mask:=iff(coruripe="1",1,0)$$

Note that from the Raster Map Definition window the domain given is now a “value” domain. Press “OK” to execute the operation. Display the map “Mask” and note the content. Now we can use the mask to extract the “Ye” for the Coruripe Municipality. Type the following expression on the command line in the main ILWIS menu:

$$Ye\_Coruripe.mpl:=maplistcalculate("iff(mask=1,@1,?)",0,14,Ye.mpl)$$

Press “Enter” to execute the operation, display the resulting “Ye\_Coruripe” time series as an animated sequence, use as

Representation “Pseudo” and check the values obtained using the mouse, keeping the right mouse button pressed, over the active map display window.

Step 9: Total Yield Productivity using a sugar cane crop mask

The time series “Ye\_Coruripe” corresponds to the estimated sugar cane yield on a decadal basis. To estimate Total Yield Productivity for whole time series, each decadal period from the Map List Ye\_Coruripe should be accumulated. Enter the following expression on the command line to obtain the sum of the time series and press enter to execute the operation:

$Ye\_sum:=MapMaplistStatistics(Ye\_Coruripe.mpl, Sum, 0, 14)$

Finally to estimate total yield productivity the average amount of water (76 %) without stress is added to the sugar cane and the initial

weight of the sugar cane stems during planting has to be added as well (here a value is used of 15 ton/ha). Enter the following expression on the command line to obtain the Total Yield Productivity and press enter to execute the operation:

$Ye\_total:=Ye\_sum*1.76+15000$

Right click with the mouse button on the polygon map “sugarcane\_mask” and from the context sensitive menu, select the option ”Polygon to Raster”, as GeoReference select “CFG\_Coruripe\_Apr\_Aug\_1”, leave the Output Raster Map name as indicated by default and press “Show”. Display the map and note the content.

Open from the main ILWIS menu the option “Operations => Raster Operations => Cross”. Select the raster map with the total yield productivity, here called “Ye\_total” as 1st Map. Select raster map “sugarcane\_mask” as 2nd Map. Type “yield\_mask” as Output Table

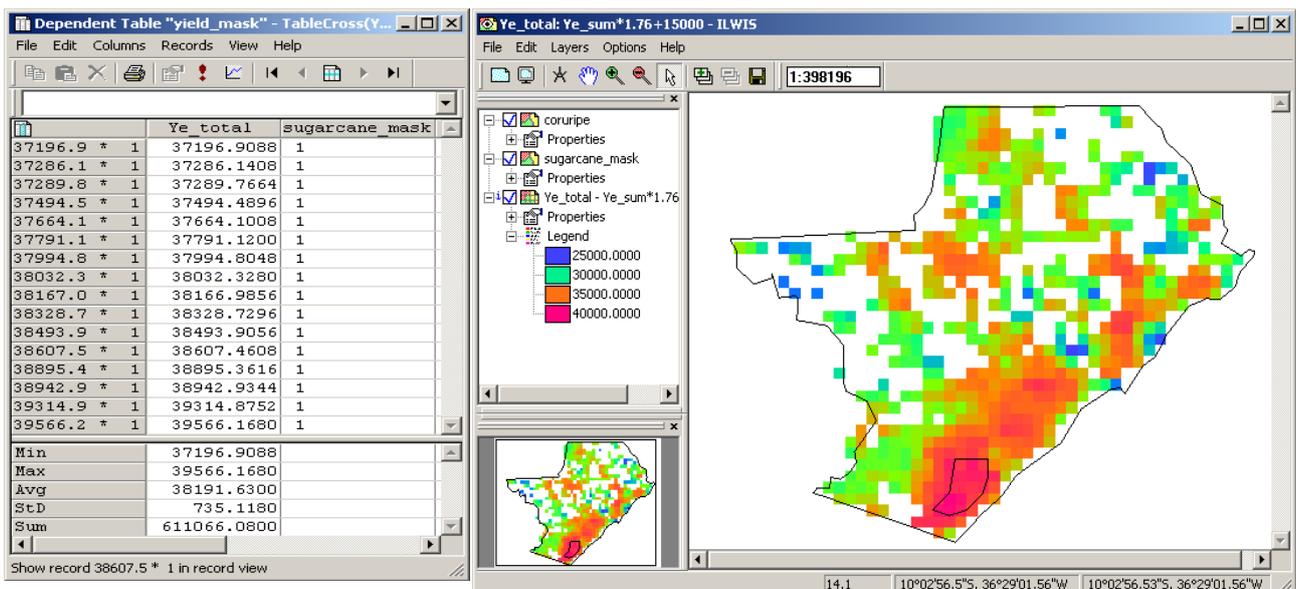


Figure 2. Ye-total for the cururipe area and cross results using a sugar cane mask and press “Show”. Note the content of the cross table. The figure below shows the final results of the analysis, using the boundaries of the municipality and the sugar cane mask as overly on the Ye\_total map.

### 3. Summary and Conclusions

For this exercise GEONETCast–EUMETCast data (NDVI S-10, DMP SPOT and ETo) is applied to test a remote sensing approach to improve sugar cane Total Yield Productivity over the Municipality of Coruripe. The test is performed for the period April to August, 2010 and the sugar cane productivity is derived using nine computational steps.

The results show that the methodology adopted has three distinct advantages compared to the generally accepted “ $kc \times ETo$ ” method for computing ET. First advantage is that the acreage of water-using land is observed directly from the satellite products, so accurate land use is implicit to the process. Second, there is no need to incorporate a crop type map to solve the energy balance, so accurate records of cropping patterns are not required.

These features overcome the typical difficulty of assembling accurate records of irrigated areas and cropping patterns, especially for historical analyses. Thirdly, the LSA-SAF ETo (aggregated) product can be imported into a GIS for spatial analysis, either alone or in combination with land use and other spatial data, inherently accounting for the effects of salinity, deficit irrigation or water shortage, disease, poor plant stands and other ET-reducing influences on the ET flux. These influences are difficult to take into consideration using the standard “ $kc \times ETo$ ” computation. Furthermore the software tools

have demonstrated a great flexibility and ease of use.

The results presented in this research show the values of sugarcane production are in the average range of 37 to 40 ton/ha at the level of the municipality area during the test period. The sugarcane area finally selected is showing significantly higher values. This is a first indication where the sugar cane areas can be harvested. Results are very encouraging, through a high spatial variability of crop yield is found, suggesting adjustments are needed to transform the original satellite data-based scheme into satellite estimated agro-meteorological parameters. Further studies are required to analyse these results into more detail as these depend for example on the spatial resolution of the input background fields, their physical content and many other factors. Furthermore there is a need to use a longer time series and analyse into more detail the temporal response of e.g. the DMP of the study area.

These findings present a first step towards an operational use of ILWIS in Brazil using NDVI S-10, DMP SPOT and ETo for operational estimating of sugar cane productivity. This preliminary assessment demonstrates the feasibility of the proposed methodology to be useful in homogenous areas with the same characteristics and to focus on the control factors and incorporate local information to enable better model calibration and thus improve the results.

#### 4. References

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Cropwater Requirements. Rome: FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56. 300p.
- Bartholomé, E. (editor) (2006). VGT4 Africa user Manual. 1st Edition. EUR 22344 EN, European Communities. Available online at: <http://www.devcoast.eu/ViewContent.do?pageId=40>.
- Berka, L.M.S.; Rudorff, B.F.T.; Shimabukuro, Y.E. (2003). Soybean yield estimation by an agrometeorological model in a GIS. *Scientia Agricola*, v.60, p.433-440.
- Barbosa, H.; Huete, A; Baethghen, W. (2006). A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. *Journal of Arid Environments* ,67, 288-307.
- Barbosa, H. A. (2009). Linking Sustainable Indices and Climate Variability In The State Of Ceará, Northeast Brazil. In: *The Future of Drylands*, 6, 435-445, DOI: 10.1007/978-1-4020-6970-3\_40.
- Choudhury, B.J.; Ahmed N.U.; Idso S.B.; Reginato R.J.; Daughtry, C.S.T. (1994). Relations Between Evaporation Coefficients and Vegetation Indices Studied By Model Simulations. *Remote Sensing of Environment*, v.50, p.1-17.
- Doorenbos, J.; Kassam, A.H. (1979): Yield response to water. Food and agriculture organization of the United Nations, fao – irrigation and drainage paper no. 33, 193 p.
- Gouvêa, J.R.F. (2008). Mudanças climáticas e a expectativa de seus impactos da cultura de cana-de-açúcar na região de Piracicaba – SP. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 99 p.
- Muñoz, J. C. J.; Sobrino, J.A. Guanter, L.; Moreno, J.; Plaza, A.; Matínez, P. (2005). Fractional Vegetation Cover Estimation from Proba/CHRIS Data:Methods, Analysis of Angular Effects and Application to the Land Surface Emissivity Retrieval. Proc. 3rd ESA CHRIS/PROBA Workshop, ESRIN, ESA SP-593, Frascati, Italy, June 2005
- Maathuis, B., Mannaerts, C.; Retsios, B., Schouwenburg, M. And Lemmens, R. (2011). Geonetcast Toolbox. Installation, configuration and user guide of the GEONETCast Toolbox plug-in for ILWSI 3.7, XML version 1.2. ITC. Enschede, The Netherlands. 2011. <http://52north.org/downloads/earth-observation/geonetcast/toolbox>.
- Norman, J.M., Anderson, M.C., Kustas, W.P., French, A.N., Mecikalski, J., Torn, R., Diak, G.R., Achmugge, T.J. (2003). Remote Sensing of Evapotranspiration for Precision-Farming Applications. In: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*,

Toulouse. Proceedings IGARSS 2003 – Organizing Committee, 2003. p. 21-25.

Rudorff, B.F.T. (1985). Dados Landsat na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos. 114 p.

Toledo Filho, M.R. (1988). Probabilidade de suprimento da demanda hídrica ideal da cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) através da precipitação pluvial na zona canavieira do estado de Alagoas. 1988.72f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Agronomia, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.