

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL – UFRGS  
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISA EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

FERNANDO ROBERTO JABOINSKI

*Avaliação de produtos do sensor MODIS para aplicações na estimativa de parâmetros biofísicos da cultura da soja, no Estado do Rio Grande do Sul.*

Porto Alegre – Novembro de 2011.

FERNANDO ROBERTO JABOINSKI

*Avaliação de produtos do sensor MODIS para aplicações na estimativa de parâmetros biofísicos da cultura da soja, no Estado do Rio Grande do Sul.*

Dissertação de mestrado apresentada como um dos requisitos para a obtenção do Grau de Mestre em Sensoriamento Remoto, Área de concentração, Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

Dra. Denise Cybis Fontana (Orientadora)

Dr. Ricardo Wanke de Melo (Co-orientador)

Porto Alegre – Novembro de 2011.

## FERNANDO ROBERTO JABOINSKI

*Avaliação de produtos do sensor MODIS para aplicações na estimativa de parâmetros biofísicos da cultura da soja, no Estado do Rio Grande do Sul.*

Dissertação de mestrado apresentada como um dos requisitos para a obtenção do Grau de Mestre em Sensoriamento Remoto, Área de concentração, Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aprovada em sessão pública realizada em 14 de setembro de 2011, composta pelos membros avaliadores da banca examinadora:

---

Dra. Eliana Lima da Fonseca  
(PPGSR / UFRGS)

---

Dr. Moacir Antônio Berlato  
(Faculdade de Agronomia / UFRGS)

---

Dr. Rubens Augusto Camargo Lamparelli  
(CEPAGRI / UNICAMP)

---

Dra. Denise Cybis Fontana  
(Faculdade de Agronomia / UFRGS)

Porto Alegre – Novembro de 2011.

*Ao meu pai, “Engenheiro Agrônomo”*

*Nelson Jerônimo Jaboinski*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, de forma incondicional.

Agradeço a minha família pela educação e pelos ensinamentos compartilhados.

Agradeço às pessoas que estiveram próximas durante esta etapa da minha vida.

Agradeço a Dra. Denise pela impecável atuação no papel de orientadora.

Agradeço ao Dr. Ricardo, pelas aulas e ideias que contribuíram com o trabalho.

Agradeço aos membros avaliadores da banca examinadora, Dra. Eliana, Dr. Moacir e Dr. Rubens, pelas valiosas contribuições que deram ao trabalho.

Agradeço a todos os professores, colaboradores e colegas do CEPSRM da UFRGS, pelo aprendizado proporcionado, e pela boa convivência.

Agradeço a todos os pesquisadores aqui citados. Que vossa valiosa contribuição continue prosperando, e nos oriente por caminhos melhores.

Agradeço aos institutos de pesquisa que provem dados meteorológicos e imagens de sensoriamento remoto, muitas vezes de forma gratuita, o que é de grande valia aos trabalhos.

Foi ótimo viver e concluir essa etapa. Muito obrigado!

*Avaliação de produtos do sensor MODIS para aplicações na estimativa de parâmetros biofísicos da cultura da soja, no Estado do Rio Grande do Sul.*

Estimativas do rendimento da soja são informações importantes que podem auxiliar as instituições na tomada de decisão quanto à políticas de comercialização. São consideradas também, na liberação de recursos para o financiamento da produção e seguro agrícola. Modelos matemáticos, que se baseiam nas relações clima planta, denominados modelos agrometeorológicos, podem estimar o rendimento médio de grãos, através de dados meteorológicos e biofísicos da cultura, como exemplo: o IAF (Índice de área foliar) da soja pode ser associado ao Kc (Coeficiente de cultura) para estimar o estágio fenológico, e esta informação, ser associada à parametrização dos modelos. O objetivo geral deste trabalho foi avaliar as possibilidades de se utilizar imagens do sensor MODIS, para estimar parâmetros biofísicos da soja, aplicáveis à modelagem do rendimento de grãos. A área de estudo abrangeu a porção norte do estado do Rio Grande do Sul. Foram obtidas as imagens do IAF, MOD15A2, e dos índices de vegetação NDVI (Índice de vegetação por diferença normalizada) e NDWI (Índice de umidade por diferença normalizada), do produto MOD13Q1. Foram analisadas duas safras: 2003/04 e 2004/05. O período de safra foi de 15 de outubro até 30 de abril. Foram geradas máscaras de cultivo para as safras, e aplicadas sobre as imagens. Inicialmente, foram comparadas as médias do IAF, MOD15A2, às outras estimativas do IAF obtidas a partir de funções de relação com o NDVI, e analisados os diagramas de dispersão para cinco datas. Então foi estimado o Kc\_1 com as médias do IAF, MOD15A2, conforme Martorano (2007), e comparadas ao Kc\_2 ajustado conforme Matzenauer, 2002. Foi calculado o balanço hídrico meteorológico da cultura a fim de se obter o Índice de Satisfação das Necessidades de Água das plantas (ISNA), sendo ISNA\_1 considerando o Kc\_1, e o ISNA\_2, o Kc\_2. Foram obtidos os índices de correlação entre o ISNA\_1 e 2 e os índices NDVI e NDWI, para o ciclo completo da cultura e para períodos de baixo ISNA. Como resultado, o IAF, MOD15A2 apresentou coerência com a evolução do IAF durante o ciclo, porém, em média, apresentou valores inferiores aos observados por Fontana et al. (1992) e Martorano (2007). Já como estimador do Kc, apresentou coeficientes de variação inferiores ao observado no Kc\_2. Observou-se também que no IAF, MOD15A2 ocorriam valores superestimados do Kc entre a semeadura e o máximo desenvolvimento, e após, subestimados, o que potencializou períodos de déficit hídrico acentuado durante a floração e enchimento de grãos, em ambas as safras. Já, avaliando os índices de correlação, o ISNA\_1, apresentou correlações de maior significância com os índices de vegetação do que o ISNA\_2. Com isso podemos supor que, mesmo o IAF, MOD15A2 não tendo apresentado valores compatíveis com os da soja, demonstrou maior significância nas correlações, o que indica que imagens MODIS, podem gerar estimativas adequadas tanto do IAF, quanto do Kc, e também, representar adequadamente as condições hídricas. É recomendável avaliar estimativas do IAF da soja, a partir de suas relações com o NDVI, a fim de se obter resultados compatíveis com a soja.

Palavras-chave: MODIS, Índice de área foliar, coeficiente de cultura, rendimento.

*Evaluation of MODIS's products for applications in biophysical parameters estimation for soybean in State of Rio Grande do Sul.*

Estimates of soybean yield are useful information that can assist institutions in decisions related by commercial policies. It is considered also in financing of production and agricultural insurance. Mathematical models, which are based in climate plant relationship known as Agrometeorological Models, can provide an estimate for grain yield through meteorological and biophysical data correlated with the culture, as an example: the LAI (Leaf Area Index) of soybean can be related with the Kc (Culture's coefficient) to estimate the phenological stage, and this information, applied to model's parameters. The main objective of this work was evaluated of possibilities of MODIS's images, in estimation of biophysical parameters, which are applicable in yield's modeling for soybean. The studying area was a portion of northern of State of Rio Grande do Sul. Were obtained images from LAI, MOD15A2, and vegetation indexes, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and NDWI (Normalized Difference Water Index) from MOD13Q1 product. Were analyzed two harvests: 2003/04 and 2004/05. The length of time for harvest was 15<sup>th</sup> October to 30<sup>th</sup> April. Soybean's areas was detected and masks were applied on the images. Firstly, were compared the means between LAI, MOD15A2 and two different methodologies of LAI's estimation based on relationship with NDVI. The scatter plots were discussed between LAI, MOD15A2 and other methodologies, for five key-dates. The culture's coefficient Kc\_1 was estimated through LAI, MOD15A2, according to Martorano (2007), and compare with Kc\_2, which were obtained from fitted culture's coefficient by Matzenauer (2002). The water balance were calculated aiming the index for Plant's water satisfaction needs (ISNA), which, ISNA\_1 has considered the Kc\_1, and ISNA\_2, the Kc\_2. Correlation indexes were obtained between ISNA\_1 and 2, and vegetation indexes NDVI and NDWI, for the whole culture's cycle and specific periods of low ISNA. As results, LAI, MOD15A2, has presented coherence with soybean's cycle progress, however, as a rule, it presents lower values, comparing to Fontana et al. (1992) and Martorano (2007). Even now as a Kc's estimator, Kc\_1 has presented lower variation's coefficient compared to Kc\_2. Was observed also overrated in Kc\_1 between the sowing to maximum development, and after, underestimated, what provokes periods of accented hydric deficiency during flowering and grain forming stages, in both harvests. Now, as to correlation's indexes, we observed more significance correlations between both vegetation's indexes and ISNA\_1. This way, these results has indicated that remote sensing images can provide accurate estimates of IAF as much as Kc, and also indicate the hydric conditions of plants. It is recommended to improve the LAI's mean values on the images, exploring the relationship with NDVI, looking for adequate values for the case of soybean.

Key-words: MODIS, Leaf area index, culture's coefficient, soybean yield.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Objetivos .....	3
1.1.1 Objetivo Geral .....	3
1.1.2 Objetivos Específicos .....	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	4
2.1 A Cultura da Soja .....	4
2.1.1 Os principais produtores de soja no Brasil e no mundo .....	4
2.1.2 A produção de soja no Brasil e o aspecto econômico .....	4
2.1.3 Exigências bioclimáticas da cultura da soja .....	6
2.1.4 Ciclo fenológico .....	6
2.1.5 Zoneamento agroclimático .....	7
2.1.6 Calendário Agrícola .....	9
2.2 Balanço hídrico associado aos cultivos agrícolas .....	10
2.2.1 Evapotranspiração .....	11
2.2.2 Coeficiente da cultura (Kc) .....	12
2.3 Índice de satisfação das necessidades de água das plantas .....	12
2.4 Comportamento espectral da vegetação verde .....	13
2.5 Índices de vegetação .....	14
2.6 O uso do sensoriamento remoto aplicado aos cultivos agrícolas .....	14
2.7 Informação espectral associada à modelagem do rendimento da soja .....	16
2.8 O sensor MODIS e suas principais características .....	16
2.8.1 Índice de vegetação NDVI obtido a partir do produto MOD13Q1 .....	18
2.8.2 Índice de vegetação NDWI .....	18
2.8.3 Índice de área foliar do produto MOD15A2 .....	19
2.9 O mapeamento de áreas de cultivo de soja por sensoriamento remoto .....	20
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	22
3.1 Área de abrangência e período do estudo .....	22
3.2 Aquisição das imagens MODIS .....	23
3.3 Obtenção das máscaras de cultivo de soja .....	25
3.4 Obtenção das imagens do índice de área foliar da soja (IAF) .....	26
3.5 Obtenção das imagens ISNA .....	27

3.5.1 Obtenção dos dados meteorológicos.....	28
3.5.2 Obtenção da evapotranspiração potencial (ETp).....	29
3.5.3 Obtenção do coeficiente de cultura.....	30
3.5.4 Obtenção da evapotranspiração real (ETr).....	31
3.5.5 Processamento das imagens ISNA.....	31
3.6 Obtenção das imagens NDWI.....	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4.1 Máscaras de cultivo.....	34
4.2 O IAF, MOD15A2 aplicado à cultura da soja.....	38
4.3 O IAF, MOD15A2 como estimador do coeficiente da cultura.....	47
4.4 Análises entre os índices de vegetação NDVI/NDWI e o ISNA_1 e ISNA_2.....	50
5 CONCLUSÕES.....	56
REFERÊNCIAS.....	57
APÊNDICE A.....	62
APÊNDICE B.....	67
APÊNDICE C.....	72
APÊNDICE D.....	76
APÊNDICE E.....	80
APÊNDICE F.....	82
APÊNDICE G.....	84
APÊNDICE H.....	86
APÊNDICE I.....	88

## 1. INTRODUÇÃO

Informações referentes à produção Brasileira de grãos são estratégicas para as instituições públicas e privadas, uma vez que a demanda por estes produtos é crescente, e também, são importantes para a economia do País, sendo o Brasil, um tradicional exportador de grãos.

Devida à representatividade do agronegócio Brasileiro para a economia deste País, são necessárias, ações governamentais para um controle eficiente das importações e exportações dos produtos agrícolas, tanto em relação à balança comercial, quanto ao adequado abastecimento do mercado interno. Estas ações demandam previsões constantes sobre a evolução da produção agrícola. Também são auxiliares quanto à liberação de recursos para o financiamento da produção, e para que os agricultores possam tomar decisões referentes às técnicas de condução dos cultivos e à comercialização da produção.

Um dos componentes essenciais das previsões é o rendimento médio de grãos produzidos por unidade de área, pode ser obtido através de modelos matemáticos denominados de modelos agrometeorológicos. Estes modelos baseiam-se nas relações entre o clima e as plantas. Para tanto, buscam-se associar as condições do cultivo com os parâmetros da cultura agrícola, exemplificando: a satisfação das necessidades de água frente aos diferentes estádios fenológicos da cultura. Dessa forma, é possível se obter um rendimento médio estimado associado a um período sob uma determinada condição. Geralmente, a parametrização dos modelos depende da aquisição de dados tais como: dados meteorológicos, fisiológicos e ambientais da cultura, e do local de cultivo durante o período de desenvolvimento da mesma.

Dados espectrais, provenientes de sensores remotos, apresentam grande potencial no estudo dos cultivos agrícolas, uma vez que é possível adquirir informações de forma ordenada, de uma vasta área de abrangência, de forma simultânea e com um baixo custo associado. Entretanto estes dados podem apresentar limitações de

ordem tecnológica e quanto ao nível de aquisição de dados. Nos últimos anos, diversos trabalhos de pesquisa têm associado dados espectrais, aos parâmetros dos modelos agrometeorológicos, observando resultados satisfatórios nas associações.

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectro Radiometer*), têm se destacado no estudo e monitoramento agrícola, principalmente pela resolução espacial e temporal compatíveis com o tamanho das lavouras e à dinâmica temporal das mesmas. Outro fator positivo é que os dados MODIS são disponibilizados em forma de imagens digitais, em bandas espectrais individuais, ou como produtos, os quais são resultantes da manipulação matemática entre imagens, com o objetivo de gerar novas informações correlacionadas a um objetivo em específico, como por exemplo, o IAF (Índice de área foliar), o NDWI (Índice hídrico por diferença normalizada), o NDVI (Índice de vegetação por diferença normalizada), entre outros.

Se considerarmos que a cultura da soja no Rio Grande do Sul é anual, e geralmente é cultivada em grandes extensões de área, formulou-se a hipótese de que imagens do sensor MODIS, são capazes de gerar informações para o uso na parametrização de modelos agrometeorológicos espectrais, principalmente informações relacionadas com a condição hídrica da cultura.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

Com base na hipótese descrita, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar as possibilidades de se utilizar imagens do sensor MODIS, para estimar parâmetros biofísicos da soja, aplicáveis à modelagem do rendimento de grãos.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Comparar as médias das Imagens IAF, produto MOD15A2, em áreas mapeadas como soja, com outros métodos de estimativa do IAF.
- Analisar a possibilidade de se estimar o coeficiente da cultura ( $K_c$ ) da soja com base nas médias das Imagens IAF, produto MOD15A2.
- Correlacionar os dados espacializados do ISNA com os Índices de vegetação NDVI e NDWI, produto MOD13Q1.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. A cultura da soja

#### 2.1.1. Os principais produtores de soja no Brasil e no mundo

Conforme os dados publicados pelo departamento de agricultura Norte Americano (USDA), o Brasil ocupa a segunda posição como maior produtor de soja, com produção estimada em 75 milhões de toneladas para safra 2010/2011 (USDA, 2011). Grande parte da produção se destina a exportação, atribuindo ao Brasil o rótulo de grande exportador do grão conforme dados apresentados na Figura 1.

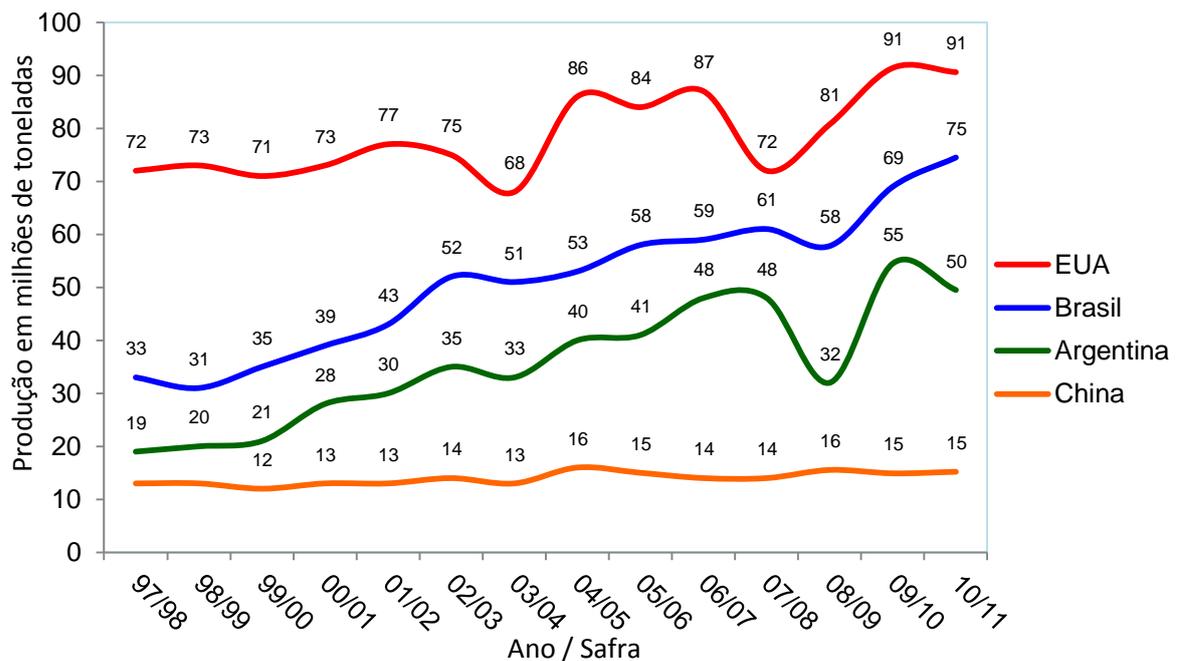


Figura 1. Produção de soja das últimas 14 safras. Fonte: Adaptado de USDA (2011)

#### 2.1.2. A produção de soja no Brasil e o aspecto econômico

No Brasil, o órgão que controla os estoques é a CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento), e o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) gera as estatísticas de safras agrícolas para todos os municípios. Em 2010, o Rio Grande do

Sul ocupou o terceiro lugar como produtor de soja, sendo superado por Mato Grosso e Paraná. Nesse mesmo ano, o Rio Grande do Sul foi responsável por 13% da produção nacional do grão (IBGE, 2011), conforme demonstrado na Figura 2.

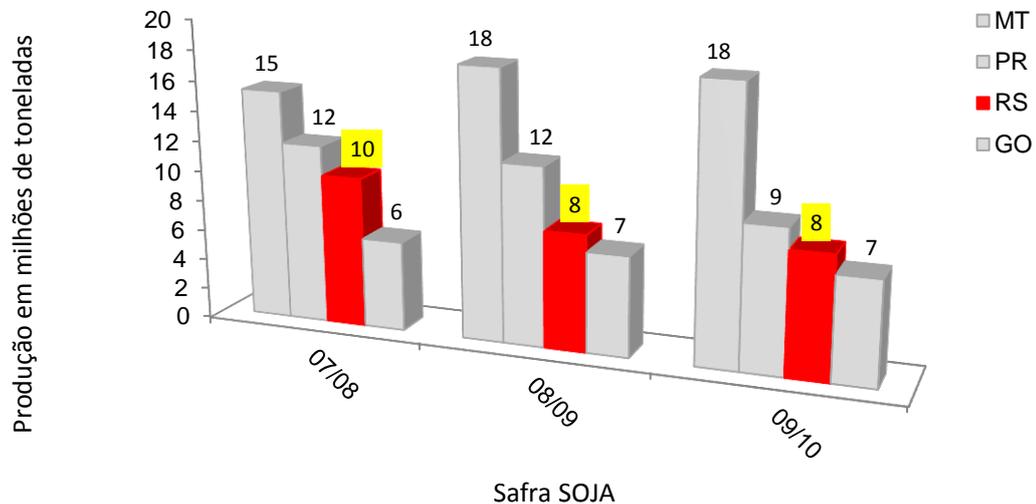


Figura 2. Produção de soja das últimas três safras brasileiras. Principais produtores. Fonte: Adaptado de IBGE (2011).

Já referente ao aspecto econômico das safras de soja, Fürstenau (2004) retratou a euforia dos agricultores com os resultados da safra 2002/03, onde o volume da produção associado aos preços remuneradores recebidos pagos aos produtores criou grandes expectativas para 2003/04. Em 2003, os preços praticados no mercado internacional foram os melhores desde 1997, possibilitando a capitalização dos agricultores, o que os incentivou a investir em maior tecnologia, e aumento na área semeada. As previsões da produção brasileira de soja beiravam os 60 milhões de toneladas. No entanto, com o desenvolvimento das lavouras, foi ficando evidente que as previsões iniciais não haviam considerado que a produção de 2002/03 havia sido obtida em função das condições meteorológicas favoráveis, em todas as regiões produtoras. Em janeiro de 2003 e, com maior intensidade em fevereiro, as adversidades meteorológicas, fizeram a previsão inicial recuar. Em meados do mês de março já era sabido que, na metade norte da Região Centro-Oeste, em Minas Gerais, e na Bahia, o excesso de chuvas em janeiro e fevereiro havia comprometido o rendimento das lavouras. Em alguns destes estados, associou-se as perdas à ocorrência da ferrugem asiática. (Doença foliar relacionada a quebras de até 90%). Já no Sul, o problema foi a escassez das chuvas. No Paraná, as perdas contabilizadas foram de 14% em meados de março, enquanto que no Rio Grande do

Sul, atingiu 33%, o qual parece ter sido o estado mais afetado. As primeiras estimativas para o estado chegaram a prever uma produção superior a safra 2002/03 (9,6 milhões de toneladas), que havia sido um verdadeiro recorde no estado. As previsões iniciais indicavam aumento de 10% na área plantada e consideraram o mesmo rendimento por área de 2002/03, chega-se assim, a uma safra de 10,7 milhões de toneladas. Bem diferente da previsão, o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA) divulgou para 2003/04, safra de 5,6 milhões de toneladas, apresentando redução de aproximadamente de 40% se comparada com a safra 2002/03 que foi de 9,6 milhões de toneladas.

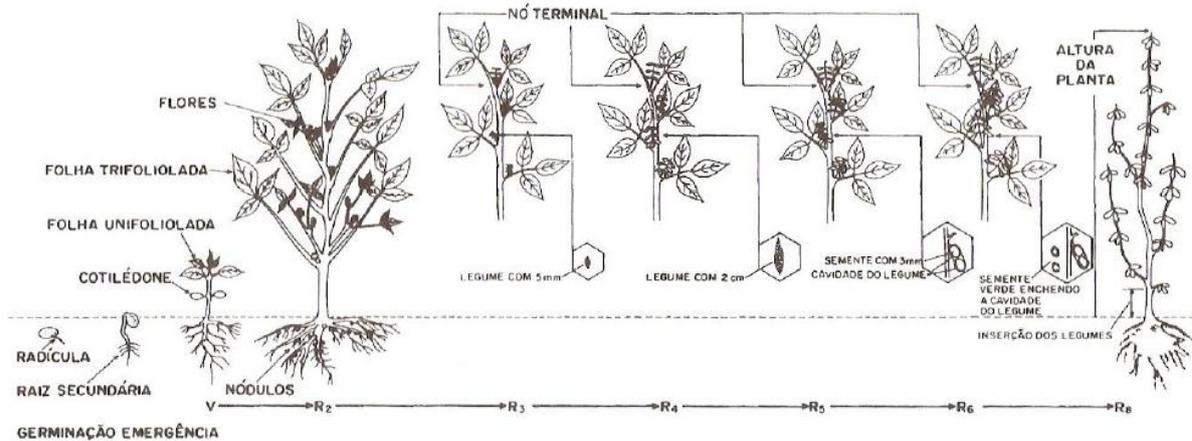
### **2.1.3. Exigências bioclimáticas da cultura da soja.**

De acordo com Farias et al. (2000), a necessidade de água, juntamente com o fotoperíodo e a temperatura, é determinante do desenvolvimento da cultura da soja, bem como, um fornecimento hídrico de 450 a 850 mm durante o ciclo, dependendo de condições climáticas e ambientais. Conforme Sedyama et al. (1996), os períodos mais críticos quanto à demanda por água são durante a germinação seguida pela emergência, floração e enchimento de grãos. Na floração/enchimento de grãos, a falta de água aliada a baixa umidade, pode ocasionar a perda das flores, e vagens, assim, acelerando a senescência da planta. Na germinação/emergência, tanto a falta quanto o excesso de água são prejudiciais ao desenvolvimento das plantas. Quanto ao fotoperíodo, Costa (1996) demonstrou que a soja tem sua floração induzida por horas de luz no dia, sendo que só haverá floração quando a duração do dia for menor que um período determinado. Esse fato exige que a cultivar seja adaptada à latitude. As exigências quanto ao fotoperíodo também estão relacionadas às temperaturas médias locais. Para Farias et al. (2000), temperaturas entre 20°C e 30°C são ideais para a soja. Já temperaturas abaixo de 10°C e acima de 40°C podem ocasionar situação de estresse à planta.

### **2.1.4. Ciclo fenológico**

Sedyama et al. (1996) citaram que o ciclo fenológico completo para soja pode variar de 75 até 200 dias. Conforme Fehr & Cavines (1977), o ciclo fenológico da soja é

dividido em duas fases distintas: a fase vegetativa e a fase reprodutiva, conforme demonstrado na Figura 3:



#### Estádios de desenvolvimento da fase vegetativa:

VE (Emergência): Cotilédones se apresentam acima da superfície do solo

VC (Estádio cotiledonar): Folhas primárias com as margens não mais se tocando

V1 (Primeiro nó): Folhas primárias desenvolvidas

V2 (Segundo nó): Folha trifoliada desenvolvida no nó acima das folhas

V3 (Terceiro nó): Três nós do caule com folhas começando com o nó das folhas primárias

Vn (Enésimo nó): "n" nós do caule com folhas começando com o nó das folhas primárias

#### Estádios de desenvolvimento da fase reprodutiva:

R1 (Início do florescimento): Uma flor em qualquer nó do caule

R2 (Florescimento completo): Uma flor em um dos dois últimos nós do caule com folha

R3 (Florescimento): Flores nos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida

R4 (Início da formação de legumes): Um legume, em um dos quatro últimos nós do caule

R5 (Formação de legumes): Um legume, em um dos quatro últimos nós do caule com folha

R6 (Início do enchimento de grãos): Grãos em um dos quatro nós do caule com folha

R7 (Máximo volume de grãos): Legume contendo, ao menos, um grão verde com folha

R8 (Maturação fisiológica): Um legume normal, no caule, que atingiu a cor de legume

R9 (Maturação): 95% dos legumes atingiram a cor de legume maduro

Figura 3: Estádios fenológicos da soja. Fonte: Adaptado de Fehr & Cavines (1977) e de Costa (1996).

### **2.1.5. Zoneamento agroclimático**

De acordo com Cunha et al. (2001), o zoneamento agroclimático delimita as regiões onde ocorrem as condições climáticas e ambientais favoráveis ao desenvolvimento da soja. No Rio Grande do Sul, o zoneamento agroclimático é definido a através da caracterização dos riscos climáticos, com base na Capacidade de Água Disponível no solo (CAD) e no Índice de Satisfação das Necessidades de Água das plantas

(ISNA), conforme exemplificado na Figura 4. Informações mais detalhadas do ISNA serão apresentadas no item 2.3.

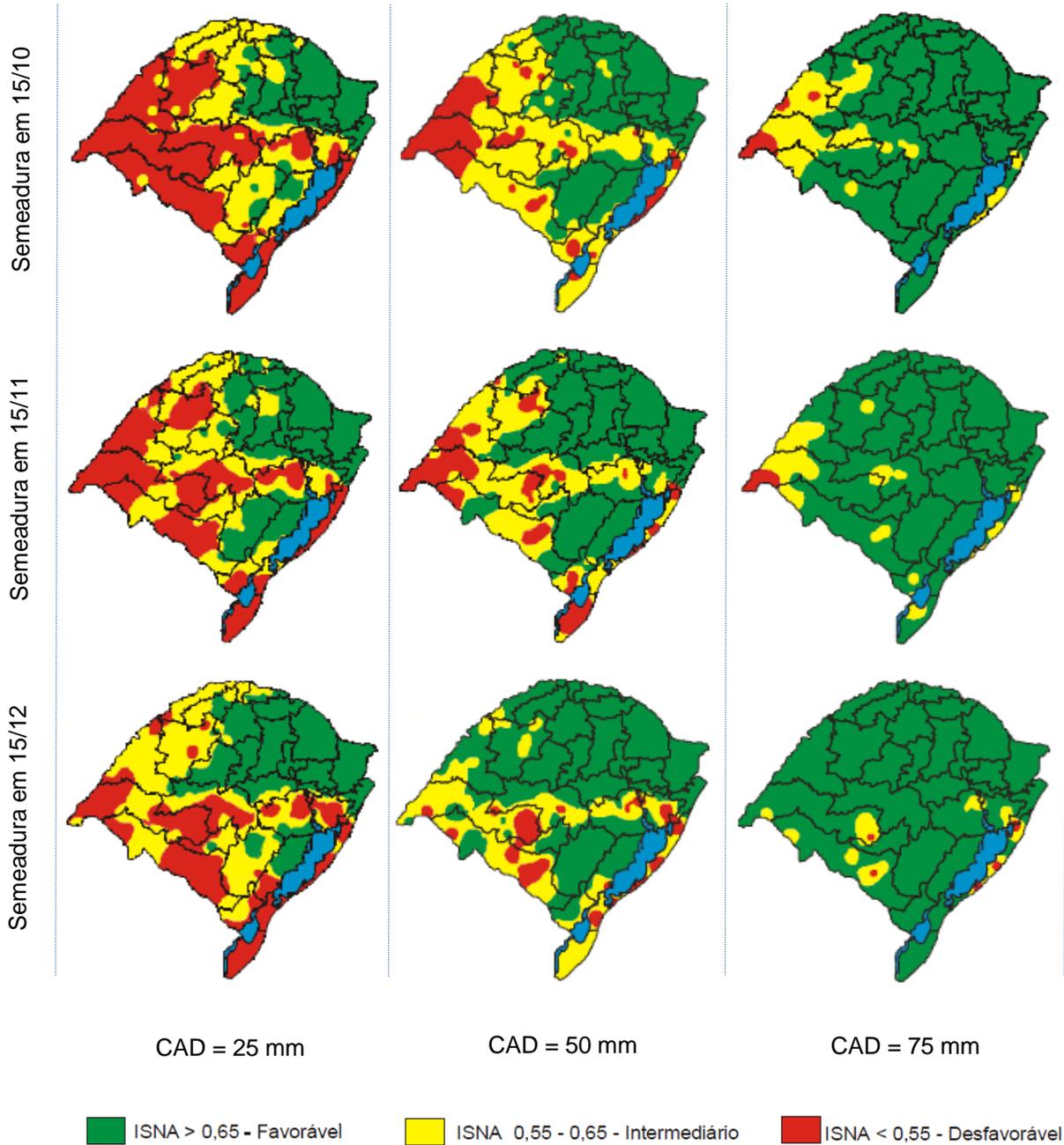


Figura 4: Caracterização de riscos climáticos com base no Índice de Satisfação das Necessidades de Água das plantas (ISNA) para cultivares de soja, subdivididos em função da capacidade de água disponível no solo (CAD) e das diferentes épocas de semeadura. Fonte: Adaptado de Cunha et al. (2001).

Com base no valor obtido do ISNA, as áreas são classificadas como: favorável, intermediário e desfavorável, sendo que 80% das observações devem pertencer a classe de correspondência. Por final, os resultados são agregados a um sistema de informações geográficas (SIG) para delimitação do zoneamento agroclimático, conforme exemplificado na Figura 4.

### 2.1.6. Calendário Agrícola

No Rio Grande do Sul, o calendário agrícola da soja é divulgado pelas regionais da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER), e indica os períodos em que ocorrem as etapas: desenvolvimento vegetativo, floração, enchimento de grãos, maduro e colhido, para cada regional da EMATER. Estas estão posicionadas estrategicamente, e realizam o acompanhamento com os produtores e cooperativas, para a publicação do calendário, conforme exemplificado na Figura 5.

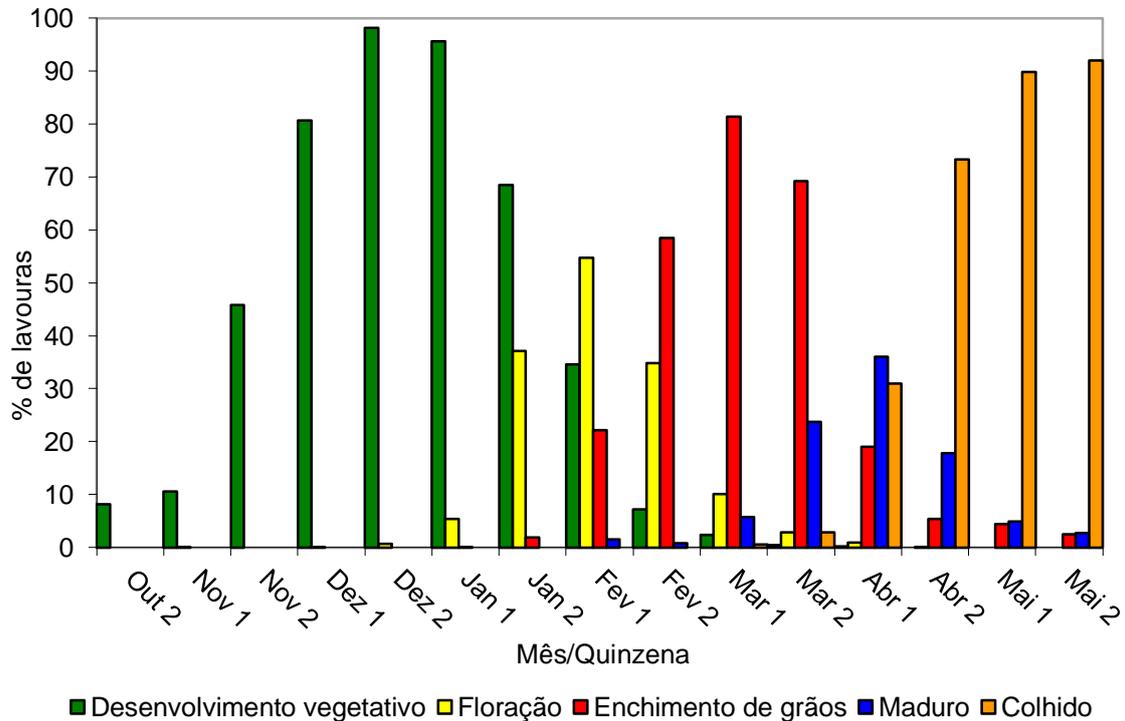


Figura 5: Calendário agrícola médio para a cultura da soja no Rio Grande do Sul, abrangendo as safras de 2000/01 até 2009/10. Fonte: Dados da EMATER.

Conforme dados da EMATER, com base na Figura 5, no Rio Grande do Sul, em média, o desenvolvimento vegetativo da cultura ocorre de outubro até abril, tendo o maior número de lavouras nesta etapa, em meados de dezembro. Períodos de grande demanda por água, como a floração e o enchimento de grãos, também são considerados no calendário, e ocorrem em meados de fevereiro e março. Conforme a EMATER, o calendário agrícola é geralmente associado ao acompanhamento de algumas etapas do ciclo da cultura, geração de informações para estimativas de rendimento e acompanhamento de quebras em safras (Gutterres & Fontana, 2011).

## **2.2. Balanço hídrico associado aos cultivos agrícolas**

O conceito de um balanço hídrico compara-se ao de um sistema contábil, o qual representa a água disponível no solo para a planta, e resulta da aplicação do princípio da conservação de massa para a água em um volume de solo. Ao desenvolver o balanço hídrico, pode-se observar a dinâmica de água no solo, a partir do armazenamento, deficiência e excedentes hídricos. (Tucci, 1997).

Para aplicações em agricultura, Pereira et al. (1997) destaca que o monitoramento do armazenamento, das entradas e saídas de água no solo, assim como a definição dos períodos com provável deficiência hídrica, podem ser realizados de forma eficiente aplicando a metodologia proposta por Thornthwaite & Mather (1955).

O método de cálculo do balanço hídrico desenvolvido por Thornthwaite & Mather (1955) determina o regime hídrico de uma localidade, sem a necessidade de medidas diretas das condições do solo. Para sua elaboração, há necessidade de definir, para uma determinada região ou local, a CAD, os valores de precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) para um período considerado. Com essas informações básicas, pode-se estimar, para o mesmo período, o armazenamento da água no solo (ARM), a evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>), deficiência (DEF) e excedente hídrico (EXC) (Pereira et al. 1997).

### **2.2.1. Evapotranspiração**

Para Souza (2001), a evapotranspiração potencial (ETP) pode ser definida como a perda de água para a atmosfera, de uma superfície natural, sem restrição hídrica, por transpiração ou evaporação no solo. Já a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) é definida pela ETP submetida a uma cobertura vegetal padrão. No Brasil, Doorenbos & Pruitt (1975) estabeleceram a grama batatais como cobertura vegetal padrão, e denominaram que a ETP sob esta condição padrão, seria denominada de ET<sub>o</sub>.

Já a evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>) se define como a perda de água de uma superfície natural, sob uma determinada condição de umidade no solo e cobertura vegetal. A ET<sub>r</sub> é derivada da ETP, pois em agricultura, a evapotranspiração não é considerada potencial devido as variações de umidade e cobertura do solo (Pereira et al. 1997).

Existem vários métodos que podem estimar a ET<sub>o</sub> a partir de dados meteorológicos, dentre estes, o método de PENMAN (Penman, 1956), é um dos mais utilizados. Outro método que se destaca é o de Priestley & Taylor (1972), que foi obtido a partir de uma simplificação da equação geral de PENMAN (Araújo, 2008).

O método de PENMAN requer a entrada de alguns dados meteorológicos tais como: temperatura média do ar ao longo do dia, umidade relativa do ar, radiação solar ou sua estimativa a partir da medida de horas de insolação, e velocidade do vento, tomadas a 2 m de altura ou corrigidas para esse patamar. Já na simplificação proposta no método de Priestley & Taylor (1972), os dados de velocidade do vento não são utilizados (Araújo, 2008).

No caso da soja, onde os valores do coeficiente da cultura (K<sub>c</sub>) são conhecidos, é possível se obter dados mais aproximado a esta condição específica, neste caso, a evapotranspiração do cultivo (ET<sub>c</sub>). A ET<sub>c</sub> resulta da multiplicação entre a ET<sub>o</sub> e o K<sub>c</sub> para um determinado período do desenvolvimento da cultura. Este período geralmente é associado aos estádios fenológicos da cultura, os quais, fazem alterar o K<sub>c</sub>, portanto a ET<sub>c</sub> é a quantidade de água que as plantas utilizam, em uma

respectiva fase do desenvolvimento, sem restrição hídrica. (Doorenbos & Pruitt, 1975; Allen et al. 1998; Souza & Gomes, 2008).

### **2.2.2. Coeficiente da cultura (Kc)**

O coeficiente da cultura (Kc) é um indicador de significado físico e biológico, uma vez que depende diretamente do índice de área foliar, da arquitetura do dossel, do tipo de cobertura vegetal e da transpiração da planta (Allen et al. 1998).

O valor de Kc se altera com o desenvolvimento vegetativo, variando também com a fração de cobertura da superfície do solo (Fc), a medida em que as plantas atingem a maturação. O Kc pode variar de acordo com a textura e com o teor de água no solo, com a profundidade e densidade do sistema radicular, e com as características fenológicas específicas das plantas (Sediyama et al. 1998).

Pode se obter um Kc ajustado para a cultura da soja, no Rio Grande do Sul, através da relação direta entre a evapotranspiração máxima (ETm) e a evapotranspiração de referência (ETo) ajustadas. Os valores específicos do Kc foram ajustados em função do estágio fenológico da cultura (Matzenauer 2002).

### **2.3. Índice de satisfação das necessidades de água das plantas**

Conforme Cunha et al. (2001), o Índice de satisfação das necessidades de água das plantas (ISNA) pode indicar as condições hídricas da cultura da soja, frente aos estádios fenológicos. O ISNA é definido conforme a Equação 1.

$$ISNA = ETr/ETc \quad (1)$$

Em que, a evapotranspiração real (ETr) é obtida através do cálculo do balanço hídrico meteorológico da cultura para o período, associada a uma CAD. E a ETc, é obtida através da ETo, associada ao coeficiente da cultura da soja (Kc).

De acordo com Cunha et al. (2001), no Rio Grande do Sul, o ISNA é utilizado para caracterizar o mapa de riscos climáticos para a cultura da soja, e posteriormente, delimitar o zoneamento agroclimático.

#### **2.4. Comportamento espectral da vegetação verde**

De acordo com Jensen (2009), a interação entre a radiação eletromagnética (REM), proveniente do sol, e o vegetal, ocorre principalmente nas folhas, onde acontece o processo da fotossíntese.

Na faixa de comprimento de onda da luz visível do espectro eletromagnético (situada entre os comprimentos de onda de 0,4 até 0,7  $\mu\text{m}$ ) ocorre uma alta taxa de absorção da radiação incidente, esta promovida pela presença dos pigmentos fotossintéticos, que são constituintes das folhas verdes. Os maiores picos de absorção estão no comprimento de onda do vermelho e do azul, ocorrendo um pico de refletividade em torno do verde (0,55  $\mu\text{m}$ ) (Jensen, 2009).

Conforme aumenta o Índice de Área Foliar (IAF), promovido pelo desenvolvimento da cobertura vegetal, ocorre o conseqüente aumento na quantidade dos pigmentos fotossintéticos, e conseqüentemente, uma grande redução na taxa de refletância do vermelho visível. Já no infravermelho próximo (comprimento de onda entre 0,7 a 1,3  $\mu\text{m}$ ) a refletância aumenta com o surgimento da biomassa. Isto é resultante do forte contraste entre os índices de refração da água presente no conteúdo celular das folhas e do ar presente nos espaços intercelulares, o que provoca reflexões e refrações da REM no interior da folha (Ponzoni & Shimabukuro, 2007).

Entre 1,3 e 2,5  $\mu\text{m}$  (infravermelho médio), a refletância das folhas diminui em função das bandas de absorção da água, por volta dos comprimentos de onda 1,4, 1,9, e 2,7  $\mu\text{m}$  (Lillesand & Kiefer, 2000).

## **2.5. Índices de vegetação**

Os Índices de vegetação (IV) são definidos como medições radiométricas, utilizadas para estimativas dos parâmetros biofísicos da vegetação. Possuem uma relação direta de dependência com características da vegetação, tais como: estrutura e fisiologia da vegetação, geometria do dossel (ângulo de inserção, distribuição, orientação e espaçamento das folhas), propriedades espectrais das folhas e do solo, teor de pigmentos presentes nas folhas (principalmente a clorofila), conteúdo de água nos tecidos vegetais, grau de senescência, e estresses ambientais ou nutricionais aos quais as plantas são submetidas. No sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação, os IV, são obtidos através de operações matemáticas entre duas ou mais bandas espectrais, com o objetivo de melhorar a relação destes dados com os parâmetros de desenvolvimento da vegetação (Baret & Guyot, 1991).

Um índice de vegetação ideal deve detectar as sensíveis variações dos parâmetros biofísicos (apresentar uma relação linear com esses parâmetros), frente a alterações das condições da vegetação, e normalizar os efeitos do solo e da topografia (Huete et al. 1999).

Os índices de vegetação mais amplamente difundidos utilizam bandas espectrais que correspondem a regiões do visível e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético, desta forma, visam evidenciar os mínimos e os máximos de absorção da vegetação, buscando realçar feições da curva de refletância da vegetação e dos demais alvos (Crósta, 1992).

## **2.6. O uso do sensoriamento remoto aplicado aos cultivos agrícolas**

Dados provenientes de sensores remotos orbitais podem estar correlacionados com parâmetros biofísicos da vegetação e apresentam grande potencial na aquisição de

dados que representem de uma forma adequada a superfície vegetada (Huete et al. 1999).

Para Rizzi & Rudorff (2007), as maiores expectativas quanto ao uso da informação espectral em estudos aplicados aos cultivos agrícolas estão geralmente associadas à representação de parâmetros biofísicos, climáticos e ambientais.

Porém, Ponzoni & Shimabukuro (2007) destacam as limitações tecnológicas, e de nível de aquisição de dados que os sensores apresentam, uma vez que os cultivos agrícolas são dinâmicos, e necessitam de resolução espacial e temporal adequadas, bem como, bandas espectrais e produtos para fins específicos.

Santos (2010) destacou o caso específico da soja no Rio Grande do Sul, que devido ao seu ciclo anual, se faz necessário obter dados regularmente, ou seja, imagens livres de interferência (cobertura por nuvens, entre outras), com resolução temporal adequada, possibilitando, o estudo da evolução do cultivo. Geralmente, a aquisição de dados se inicia desde o período da semeadura até o pós-colheita.

Gutterres & Fontana (2011), compararam a evolução temporal dos perfis do NDVI, com os dados dos calendários agrícolas para soja no Rio Grande do Sul, para as principais regionais da EMATER. Foi observado que não houve distinção entre os perfis temporais do NDVI obtidos do produto MOD13Q1, evidenciando que o ciclo da cultura é semelhante entre as regionais estudadas, e que o calendário agrícola pode gerar informações úteis ao monitoramento da cultura.

Nos últimos anos, diversos trabalhos de pesquisa têm demonstrado que os dados do sensor MODIS, aumentam consideravelmente as chances de se obter informações de forma periódica, devido à larga área imageada, a resolução temporal, e a forma em que as imagens são processadas e disponibilizadas. Obviamente, estes fatores têm suas implicações diretas quanto à resolução espacial, tornando limitado o uso na interpretação visual ou de contexto. Já em estudos de maior escala, por exemplo: estudos de escala regional, estes dados são amplamente utilizados por usuários e pesquisadores, e têm demonstrado resultados úteis associados ao estudo dos

cultivos agrícolas (Rizzi, 2005; Rudorff et al. 2007; Klering, 2007; Junges, 2008; Fonseca & Varella, 2009, Santos, 2010).

## **2.7. Informação espectral associada à modelagem do rendimento da soja**

Melo et al. (2003) buscaram associar os dados de rendimento médio da soja, obtidos com modelo agrometeorológico de Jensen (1968), modificado por Berlato (1987), adicionando um termo espectral aos resultados do modelo, obtido a partir de médias do NDVI máximo entre os meses de dezembro e janeiro. Os autores buscaram ainda ajustar a metodologia para modelagem do rendimento da soja no Rio Grande do Sul, para implementação em programas de previsão de safras. Neste estudo foram utilizadas imagens do sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)*. Berka et al. (2003) integraram informações espectrais do sensor MODIS ao modelo agrometeorológico de Doorembos & Kassam (1979) a fim de obter um modelo agrometeorológico espectral para modelagem do rendimento de soja, associando os resultados a um sistema de informações geográficas (SIG). Esta metodologia foi implementada em linguagem LEGAL/SPRING e incorporada ao *software* SPRING, como ferramenta, denominada de AGROMET tornando simples aos usuários a aplicação desta metodologia.

Posteriormente, Rizzi (2005) buscou comparar os resultados obtidos por modelos agrometeorológicos, com e sem a introdução de informações espectral. Conforme conclusão, no que tange ao desempenho dos modelos, ambos os métodos retornaram estimativas semelhantes para rendimento médio estimado.

## **2.8. O sensor MODIS e suas principais características**

Conforme Justice et al. (2002), o sensor MODIS, do inglês *Moderate Resolution Imaging Spectro Radiometer* é um Espectrorradiômetro com moderada resolução

espacial, que tem a capacidade de aquisição de dados em 12 bits de quantização. Possui ao todo 36 bandas espectrais posicionadas desde comprimentos de onda da ordem do visível (0,405  $\mu\text{m}$ ) até ao infravermelho termal (14,385  $\mu\text{m}$ ), com largura variando entre 10 e 500 nm. Algumas delas em posições chaves do espectro eletromagnético para o estudo da vegetação. Algumas características do sensor MODIS são verificadas na Tabela 1.

Conforme Justice et al. (2002), o sensor MODIS é um instrumento integrante de duas plataformas orbitais do projeto EOS (*Earth Observing System*): plataforma orbital TERRA e ACQUA, e administrado por um consórcio entre vários países. Possui resolução espacial de 250 m nas primeiras duas bandas, 500 m nas bandas 3 a 7 e 1.000 m nas demais 29 bandas espectrais. O MODIS têm características apropriadas ao estudo da vegetação no que se refere à resolução temporal. Em função da larga faixa imageada (2.330 Km), coleta dados da superfície terrestre quase que diariamente. Antes de serem divulgados, os dados são processados, e disponibilizados de formatos distintos. Alguns produtos MODIS, como exemplo: o MOD13Q1, que contém os índices de vegetação NDVI e EVI, são disponibilizados no formato de composições de máximo valor (CMV), de 16 dias. Isso implica reunir as imagens obtidas pelo sensor no período de 16 dias, e selecionar os pixels de melhor qualidade radiométrica. Já no caso do MOD15A2, que contém valores biofísicos do índice de área foliar (IAF), a CMV é para o período de 8 dias. Ambos os produtos são disponibilizados com elevado grau de processamento. (Justice et al. 2002).

**Tabela 1: Especificações técnicas do sensor MODIS, plataforma EOS/TERRA.**

Órbita:	705 km, sol síncrona, polar, 10:30 a.m descendente; 1:30 p.m ascendente
Faixa espectral:	0.4 $\mu\text{m}$ ~ 14.4 $\mu\text{m}$ .
Cobertura espacial:	$\pm 55^\circ$ ; 2.330 km em fileira ("scans" contínuos em Nadir no equador).
Resolução espacial no Nadir:	250 m (2 bandas), 500 m (5 bandas), 1.000 m (29 bandas) em Nadir.
Precisão Radiométrica:	5% absoluto > 3 $\mu\text{m}$ ; 2% de refletância.
Repetição de cobertura:	Diária.
Quantização:	12 bits.
Taxa de dados:	6,2 Mbps (média), 10,8 Mbps (dia) e 2,5 Mbps (noite).
Potência:	162,5 W (média para uma órbita) e 168,5 W (pico).

Fonte: Adaptado de Justice et al. 2002.

### **2.8.1. Índice de vegetação NDVI obtido a partir do produto MOD13Q1**

O produto MOD13Q1 contém, entre outros dados, as imagens do NDVI, com resolução espacial de 250 m, obtidas através de CMV de 16 dias. Vermote et al. (2002) descreveu que o produto MOD13Q1 é obtido a partir das imagens de refletância de superfície do produto MOD09A. Neste caso o NDVI é obtido através da manipulação entre duas bandas espectrais do produto MOD09A, conforme Equação 2.

$$NDVI = (\rho_{IVP} - \rho_V) / (\rho_{IVP} + \rho_V) \quad (2)$$

Em que, "ρ" é o fator de refletância bidirecional nas bandas do infravermelho próximo (IVP) e do vermelho visível (V).

Huete et al. (2002) mencionou que o NDVI é mais sensível a presença de clorofila e outros pigmentos da vegetação responsáveis pela absorção da radiação solar na banda do vermelho. Para Moreira (2000), o NDVI é o índice de vegetação mais utilizado nos estudos que envolvem o sensoriamento remoto aplicado a agricultura. Porém, apesar da vasta utilização, Ponzoni & Shimabukuro (2007) alertaram para a existência de alguns fatores limitantes quanto ao seu uso: os pontos de saturação diferenciados nas duas regiões espectrais, interferência atmosférica, influência do solo.

### **2.8.2. Índice de vegetação NDWI**

A presença de água no dossel vegetal pode ser detectada e quantificada através da relação entre absorção e reflexão entre bandas espectrais distintas. O Índice hídrico por diferença normalizada (NDWI) é um índice associado a esta possibilidade, e é obtido através da manipulação matemática entre as bandas espectrais da região do IVP e do infravermelho médio (IVM) (Gao, 1996). No caso do sensor MODIS, o NDWI é obtido através da manipulação entre duas bandas espectrais, conforme Equação 3:

$$NDWI = (\rho_{IVP} - \rho_{IVM}) / (\rho_{IVP} + \rho_{IVM}) \quad (3)$$

Em que, "ρ" é o fator de refletância bidirecional nas bandas do infravermelho próximo (IVP) e do infravermelho médio (IVM).

### **2.8.3. Índice de área foliar do produto MOD15A2**

O Índice de área foliar (IAF) do produto MOD15A2 é inicialmente calculado por um algoritmo, denominado de algoritmo principal, e tem como principais variáveis de entrada, as imagens de refletância de superfície do produto MOD09GQK, e sua respectiva condição de iluminação e de visada, de sete bandas espectrais centradas nos seguintes comprimentos de onda do espectro eletromagnético: 0,648; 0,858; 0,470; 0,555; 1,240; 1,640 e 2,130 μm (Myneni et al. 2003).

Conforme Wang et al. (2001), atualmente apenas as bandas centradas no vermelho (0,648 μm) e no infravermelho próximo (0,858 μm) são utilizadas pelo algoritmo, pois para as outras bandas, existe um alto grau de incerteza associado.

Conforme Myneni et al. (2003), a segunda variável de entrada é um mapa global de bioma (MOD12Q1 nível 3), o qual foi gerado a partir da análise e classificação das imagens MODIS adquiridas ao longo do ano 2000. Conforme Friedl et al. (2002), este mapa é estratificado em seis classes de vegetação: cereais, arbustos, culturas latifoliadas, cerrado, floresta densa e floresta de pinheiro. Dessa forma, os dados de IAF são estimados por um sistema de *look-up-table* (LUT), que calcula o IAF por um modelo de transferência radiativa tridimensional invertida (Knyazikhin et al. 1998).

O algoritmo compara então a refletância observada e modelada para um grupo de diferentes tipos de vegetação e solos, exemplificando: com base tanto na refletância obtida para determinado pixel quanto no tipo de bioma a que este pertence, o algoritmo atribui um valor de IAF (Myneni et al.; 2003).

Conforme Myneni et al. (1997), quando o algoritmo principal falha, um algoritmo secundário assume o cálculo do IAF a partir das relações conhecidas com o NDVI,

também baseado em um sistema de LUT entre o NDVI e o mapa de bioma citado anteriormente. Em geral, dois fatores principais afetam a qualidade dos dados de IAF estimados: as incertezas das variáveis de entrada e as incertezas nos modelos que dão suporte aos algoritmos.

Conforme Myneni et al. (1997), os valores de IAF do produto MOD15A2 devem variar entre 0 a 10, sendo que o produto possui ainda uma série de valores de preenchimento para o caso de áreas não vegetadas ou pixels não computados, conforme apresentado na Tabela 2, por exemplo, quando os valores de refletância de superfície ultrapassam os limites permitidos pelo sistema LUT, não é possível de se calcular o IAF; neste caso é atribuído ao pixel um valor de preenchimento, ou seja, que não correspondente a um valor biofísico de IAF.

Tabela 2 – Descrição dos valores de preenchimento do produto MOD15A2.

Valor	Descrição
249	Não classificado
250	Áreas urbanas
251	Áreas permanentemente alagadas
252	Neve, gelo, tundra
253	Desertos ou vegetação muito esparsa
254	Água
255	Valor padrão de preenchimento, para pixels não computados

Fonte: Myneni et al. (1997)

## 2.9. O mapeamento de áreas de cultivo de soja por sensoriamento remoto

Os SIGs são amplamente utilizados em estudos que necessitam da representação individual e espacial de um determinado fenômeno ou ocorrência. Para a agricultura, os SIGs se apresentam como uma ferramenta fundamental na representação espacial dos resultados, sendo no mapeamento das áreas de cultivo, como na modelagem de rendimento (Berka et al. 2003).

No caso da soja, diversas metodologias são desenvolvidas para o mapeamento das áreas de cultivo, através do sensoriamento remoto. No caso das imagens do sensor MODIS, o mapeamento da soja pode ser obtido com resultados satisfatórios, através da metodologia do "Limiar empírico aplicado a Imagem Diferença" proposta por Wagner et al. (2007) e posteriormente discutida por Santos (2010).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Área de abrangência e período do estudo**

Foi delimitada uma área de estudo que abrange 225 municípios da porção norte do Rio Grande do Sul, a qual, atualmente representa em torno de 90% da produção da soja no estado, de acordo com dados do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA) (IBGE, 2011).

O vetor de borda da área de estudo havia sido desenvolvido em trabalhos anteriores pela equipe do Laboratório de Estudos em Agricultura e Agrometeorologia (LEAA) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), o qual se utilizou no trabalho.

Algumas informações referentes à área de abrangência: a região apresenta um relevo suavemente ondulado com altitude média de 465 m. Quanto à classe de solo, predomina o Latossolo Vermelho, que corresponde a aproximadamente 50 % da área (Melo, 2003). Conforme o zoneamento agroclimático da soja no Rio Grande do Sul, a região apresenta condições meteorológicas favoráveis para o cultivo, entre os meses de outubro a maio (Cunha et al. 2001).

Conforme a classificação climática de Köppen, (Köppen, 1948) a região é "Cfa", que corresponde a um clima subtropical, com precipitação pluvial bem distribuída em todos os meses do ano e temperatura média do mês mais quente acima de 22° C.

O período do estudo compreendeu as safras de soja de 2003/04 e 2004/05. Foi considerado o período de cultivo da soja iniciando em 15 de outubro até 1° de maio do ano seguinte.

### 3.2. Aquisição das imagens MODIS

As imagens obtidas para o estudo são provenientes do sensor MODIS, plataforma TERRA adquiridas gratuitamente, pelo site do LPDAAC (*Land Processes Distributed Active Archive Center*). Com a ferramenta GLOVIS (*USGS Global Visualization Viewer*) foi possível selecionar as imagens de interesse, por sensor, por plataforma, por produto, e por *tile*. O *tile* referente à área de estudo é o *h13v11*.

Para cada safra, foi feito *download* dos produtos MOD13Q1 e MOD15A2 de 13 datas consecutivas, correspondentes ao período de cultivo da soja no estado. No produto MOD13Q1, as CMV são de 16 dias, enquanto que no produto MOD15A2 as CMV são de 8 dias.

De posse das imagens, iniciaram-se as etapas de processamento das mesmas. As imagens foram reprojetaadas para a projeção cilíndrica equidistante, quanto ao *datum* permaneceu o WGS-84. Devido ao fato de que os produtos apresentavam diferentes resoluções espaciais, o IAF, MOD15A2, foi reamostrado para resolução espacial de 250 m. Esta operação tornou-se necessária para viabilizar o uso das mesmas máscaras de cultivo tanto em um quanto no outro produto MODIS. Na sequência, as 13 imagens correspondentes a cada uma das safras, foram agrupadas em um único arquivo.

Executou-se o recorte das imagens utilizando o vetor de borda da área de estudo, e para os pixels não pertencentes à área de estudo, foram atribuídos valores nulos, não numéricos.

Como etapa final da formatação dos dados MODIS, foi feita a compatibilização das bordas das imagens conforme coordenadas ilustradas na Figura 6. A Figura 7 demonstra a localização da área de estudo no Rio Grande do Sul.

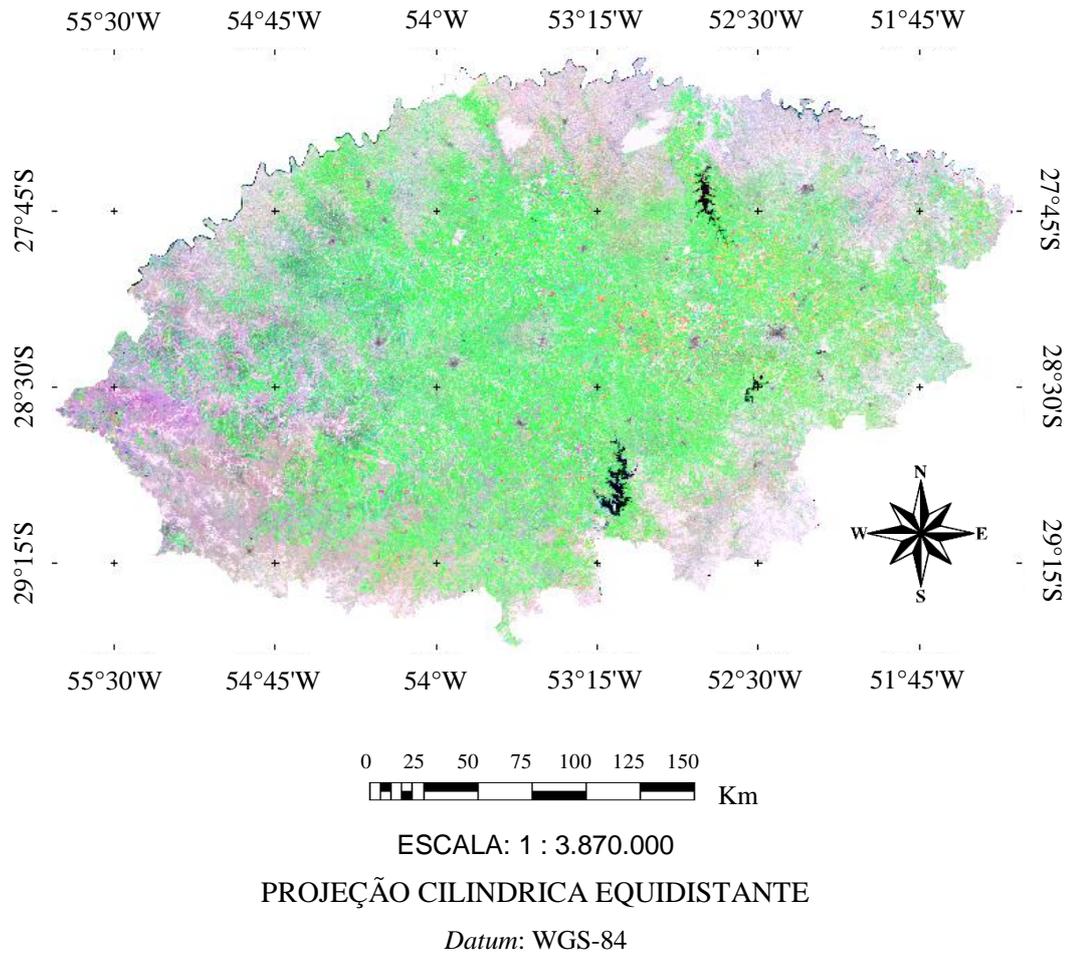


Figura 6: Área de abrangência do estudo. Porção norte do Rio Grande do Sul.

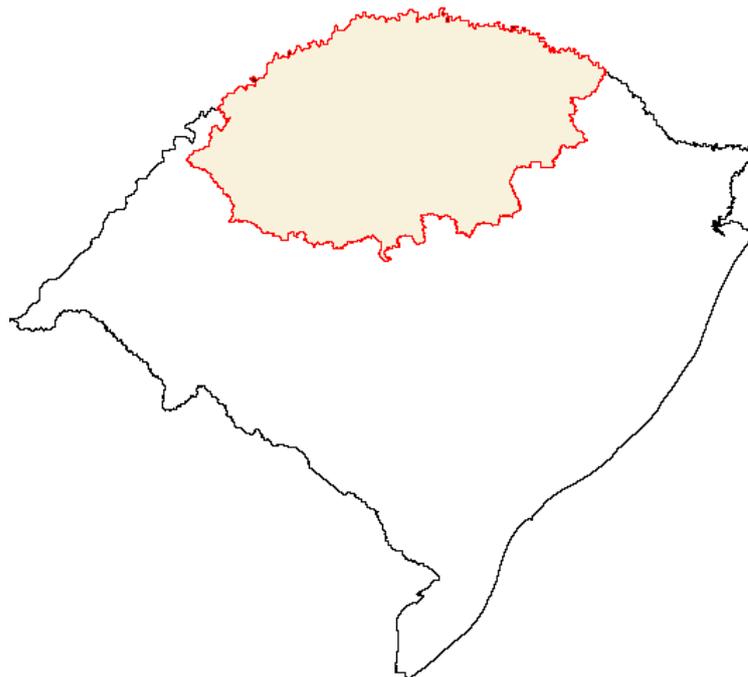


Figura 7: Posição da área de estudo em relação ao território do Rio Grande do Sul.

### 3.3. Obtenção das máscaras de cultivo de soja

As máscaras de cultivo, para as safras 2003/04 e 2004/05 foram obtidas através da metodologia "Limiar Empírico Aplicado a Imagem Diferença" proposta por Wagner et al. (2007) e posteriormente testada por Santos (2010).

Para obtenção da "Imagem de mínimo valor NDVI" foram utilizadas seis imagens NDVI, do produto MOD13Q1, referentes ao período de 15 de outubro até 31 de dezembro. Para obtenção da "Imagem de máximo valor NDVI" foram utilizadas cinco imagens, referentes ao período de 1º de fevereiro até 30 de março. De posse das duas imagens, obteve-se a Imagem diferença, subtraindo a imagem de mínimo valor da imagem de máximo valor. Conforme o arranjo da subtração, os maiores valores de diferença de NDVI da Imagem diferença serão os mais prováveis de pertencerem à classe soja.

Conforme resultados de Santos (2010), adotou-se como critério de classificação de área com soja, os pixels presentes no intervalo de 0,39 a 1,0 da Imagem diferença. Após, foram geradas imagens temáticas dos pixels classificados como soja, e para os demais, foram atribuídos valores nulos, não numéricos. As máscaras de cultivo obtidas foram aplicadas sobre as imagens MODIS, para o NDVI, MOD13Q1 e o IAF, MOD15A2. Por final, foi feita uma análise dos resultados obtidos sob dois aspectos principais:

- Quanto aos valores máximos e mínimos dos histogramas das imagens, a fim de estabelecer se o NDVI e o IAF apresentavam valores compatíveis com a soja.
- Quanto à área mapeada pela metodologia, comparada com os dados oficiais de área colhida, divulgada pelo LSPA / IBGE para o período.

### 3.4. Obtenção das imagens do índice de área foliar da soja (IAF)

As imagens do índice de área foliar da soja foram obtidas através do produto MODIS MOD15A2, e estas, comparadas a duas metodologias de estimativas do IAF a partir do NDVI, MOD13Q1.

A metodologia 1, denominada IAF\_M1, consistiu em estimar o IAF através de uma função de relação obtida entre o IAF e o NDVI conforme apresentado e discutido por Almeida (2008). A autora obteve o NDVI da soja através de medições de refletância sobre o dossel de parcelas experimentais, com um Espectrorradiômetro. Já para o IAF, foram coletadas amostras de plantas e medido o IAF com um planímetro eletrônico. Para a obtenção da função apresentada como Equação 4, a autora considerou o período correspondente a um ciclo completo. Por final obteve uma relação entre as variáveis de  $R^2=0,806$ .

$$IAF\_M1 = 0,111e^{4,384NDVI} \quad (4)$$

Foi calculado o IAF por operação pixel a pixel, para cada uma das 13 datas obtidas para cada safra.

A metodologia 2, denominada IAF\_M2, constituiu em estimar inicialmente a fração de cobertura do solo ( $F_c$ ), conforme proposta na Equação 5 (Choudhury et al. 1994).

$$F_c = 1 - \left( \frac{NDVI_{Max} - NDVI}{NDVI_{Max} - NDVI_{Min}} \right)^{0,6} \quad (5)$$

Sendo o  $NDVI\_Max$  é o maior valor NDVI do histograma, o  $NDVI\_Min$  é o menor valor, e o NDVI é o valor do pixel (Linha/Coluna), calculado pixel a pixel, para cada uma das 13 datas obtidas para cada safra.

Após serem obtidas as imagens  $F_c$ , o IAF foi estimado pela Equação 6, conforme proposto por Norman et al. (2003).

$$IAF_{M2} = -2\ln(1 - F_c) \quad (6)$$

Em que  $F_c$  corresponde a fração de cobertura do solo, obtida através da Equação 5, e calculado pixel a pixel, para cada uma das 13 datas obtidas para cada safra. A discussão dos resultados se deu sob dois aspectos:

- Quanto a análise das médias das imagens, discutidas em forma de perfis temporais, obtidas para os três métodos, para o período do estudo.
- Quanto a análise dos diagramas de dispersão entre o IAF, MOD15A2 comparado às outras duas metodologias testadas, para 5 principais datas:
  - 15 de novembro (Início de ciclo / semeadura / emergência),
  - 1° de janeiro (Desenvolvimento vegetativo),
  - 1° de fevereiro (Máximo desenvolvimento do IAF),
  - 1° de março (Maturação fisiológica, enchimento de grãos, senescência) e,
  - 1° de maio (Colhido).

### 3.5. Obtenção das imagens ISNA

As imagens ISNA foram obtidas da seguinte forma:

ISNA\_1: Obtendo o  $Kc_1$  através de uma função de relação entre o  $Kc$  e o IAF (Martorano, 2007), e neste caso, utilizando as médias das imagens IAF, MOD15A2.

ISNA\_2: Obtendo o  $Kc_2$  através dos dados ajustados para a soja no Rio Grande do Sul (Matzenauer, 2002), distribuídos ao longo do ciclo pelo calendário agrícola da soja (EMATER, 2008).

Assim é possível observar as diferenças que os coeficientes da cultura Kc\_1 e Kc\_2, têm no ISNA, uma vez que, conforme Cunha et al. 2001, é o índice associado a condição hídrica da soja. As etapas desenvolvidas para a obtenção das imagens ISNA\_1 e ISNA\_2, foram:

- Obtenção dos dados meteorológicos,
- Obtenção da evapotranspiração potencial (ETp),
- Obtenção dos coeficientes de cultura (Kc\_1 e Kc\_2),
- Cálculo do balanço hídrico meteorológico da cultura (ETr\_1 e ETr\_2),
- Processamento das imagens ISNA\_1 e ISNA\_2.

### **3.5.1. Obtenção dos dados meteorológicos**

Foram obtidos dados meteorológicos diários de cinco estações meteorológicas convencionais (Tabela 3), da rede de estações meteorológicas convencionais do 8º Distrito de Meteorologia (8º DISME), associado ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para o período entre 1º de abril de 2003 até 30 de setembro de 2005. Os dados obtidos foram:

- Temperatura máxima (°C),
- Temperatura mínima (°C),
- Insolação (h/dia) e,
- Precipitação (mm).

Observou-se que em algumas datas apresentavam valores sem registro de dados. Para estes casos, as datas foram eliminadas do cálculo do balanço hídrico.

**Tabela 3. Estações meteorológicas convencionais consideradas no estudo.**

Localidade:	Longitude (°)	Latitude (°)	Altitude (m)
Cruz Alta	-53,60	-28,63	472 m
Iraí	-53,23	-27,18	222 m
Lagoa Vermelha	-51,50	-28,22	840 m
Passo Fundo	-52,40	-28,22	667 m
São Luiz Gonzaga	-55,02	-28,40	260 m

### 3.5.2. Obtenção da evapotranspiração potencial (ETp)

A ETp foi obtida pelo método de Priestley & Taylor (1972) dado pela Equação 7:

$$ETp = \alpha \left[ \frac{s}{s+\gamma} \right] (Rn - S) \quad (7)$$

Em que,  $\alpha$  é a constante de proporcionalidade para superfícies gramadas,  $s$  é a tangente à curva que relaciona tensão de saturação e a temperatura;  $\gamma$  é a constante psicrométrica, que neste trabalho foi de 0,0665,  $Rn$  é o saldo de radiação, e  $S$  o fluxo de calor no solo. Foi utilizado o parâmetro  $\alpha=1,26$ , e desprezado o valor de  $S$  conforme sugerido por Berlato e Fontana (1987). A tangente à curva que relaciona a tensão de saturação e a temperatura ( $s$ ) foi obtida conforme Equação 8:

$$s = \left( \frac{2503}{(T+237,3)^2} \right) e^{\left( \frac{17,27T}{(T+237,3)} \right)} \quad (8)$$

Em que,  $T$  é a temperatura média em °C.

A radiação solar global ( $Rs$ ) foi estimada a partir do dado de Insolação, conforme Equação 9, conforme equação de Ångstron, ajustada por Fontana & Oliveira (1996):

$$Rs = Ra \left[ b_0 + \left( b_1 \cdot \frac{n}{N} \right) \right] \quad (9)$$

Em que,  $Ra$  é a radiação solar global incidente no topo da atmosfera,  $b_0$  e  $b_1$  são coeficientes da equação de Ångstron,  $n$  é insolação (h/dia) e  $N$  é o número de horas de insolação astronomicamente possível. O saldo de radiação ( $Rn$ ) foi obtido através da Equação 10 (Bergamaschi & Guadagnin, 1990), ajustada para superfícies gramadas:

$$Rn = -18,81 + 0,69(Rs) \quad (10)$$

Em que,  $Rs$  é a radiação solar global, obtida pela equação 9, dada em  $\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ .

### 3.5.3. Obtenção do coeficiente de cultura

O  $Kc\_1$  foi obtido através de uma função de relação entre o IAF e o Kc (Equação 11 obtida por Martorano, (2007), calculado com base nas médias das imagens MODIS.

$$Kc\_1 = 0,65 + 0,24(IAF) - 0,028(IAF)^2 \quad (11)$$

Em que, IAF são as médias das imagens MODIS, do IAF, produto MOD15A2.

O  $Kc\_2$  foi obtido através dos dados de Kc ajustados para a soja no Rio Grande do Sul (Matzenauer, 2002), distribuídos ao longo do ciclo conforme calendário agrícola da soja (Dados da EMATER), exemplificado na Figura 8.

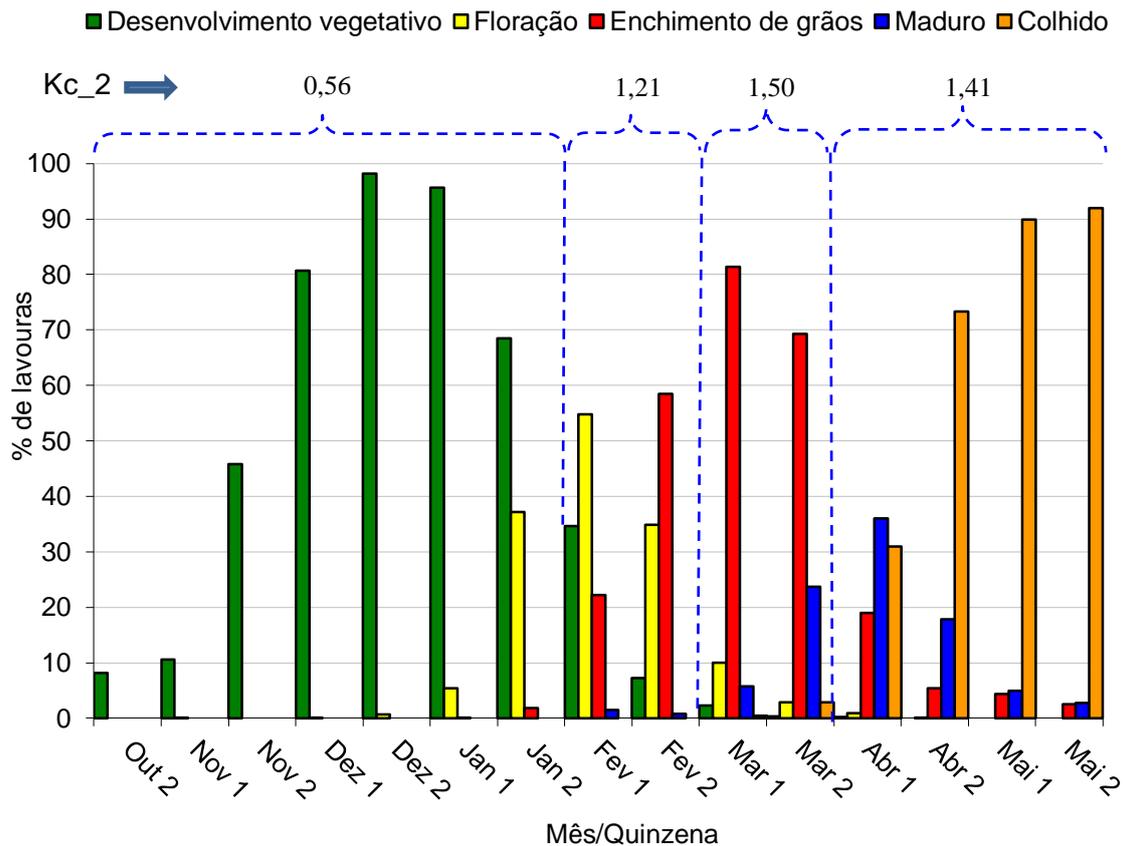


Figura 8. Calendário agrícola médio da soja no Rio Grande do Sul, com os dados de Kc ajustados conforme as médias dos períodos. Fonte: Matzenauer (2002), dados da EMATER.

### 3.5.4. Obtenção da evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>)

A evapotranspiração real foi obtida pelo cálculo do balanço hídrico meteorológico da cultura, segundo Thornthwaite & Matter (1955), com alteração na regra de decisão quanto a obtenção da variável ET<sub>r</sub>, que considera a ET<sub>c</sub> ao invés da ET<sub>p</sub>, a qual sugere o método. Segue abaixo exemplificado:

$$\text{Se } P > ET_c \text{ então } ET_r = ET_c$$

$$\text{Se } P < ET_c \text{ então } ET_r = P_i - \Delta ARM_i$$

Foi considerada uma CAD de 75 mm para a região de estudo.

### 3.5.5. Processamento das imagens ISNA

Conforme proposto por Cunha et al. (2001), o ISNA foi obtido através da relação entre as variáveis ET<sub>r</sub> e a ET<sub>c</sub> do balanço hídrico meteorológico da cultura da soja, conforme Equações 12 e 13:

$$ISNA_1 = ET_r / ET_{c\_1} \quad (12)$$

$$ISNA_2 = ET_r / ET_{c\_2} \quad (13)$$

Os dados diários de cada estação meteorológica foram organizados em médias correspondentes aos períodos das CMV do produto MOD13Q1. Para a espacialização das médias, foi criado um *grid*, compatível com as imagens MODIS. Para a interpolação dos dados entre estações, foi utilizado o método de interpolação do Inverso do quadrado da distância (Berka et al. 2003). Por final as imagens foram formatadas e ajustadas conforme descrito no item 3.2 e sob estas aplicadas as respectivas máscaras de cultivo, para as safras. Na Figura 9, segue as etapas executadas para obtenção das imagens ISNA.

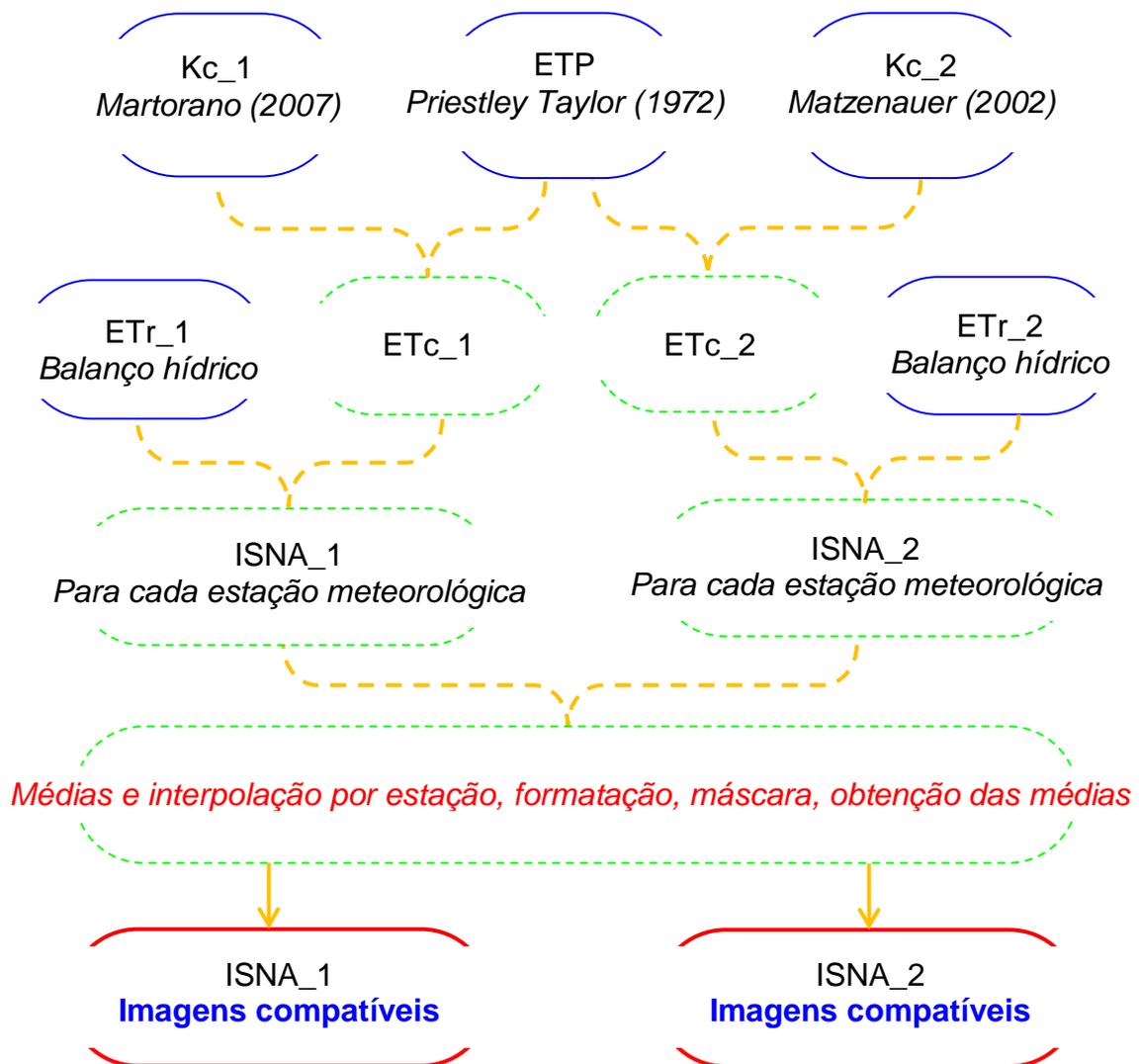


Figura 9. Etapas do processamento para obtenção das imagens ISNA\_1 e ISNA\_2.

### 3.6. Obtenção das imagens NDWI

As imagens NDWI foram obtidas conforme Equação 14 (Gao, 1996).

$$NDWI = (b2 - b7)/(b2 + b7) \quad (14)$$

Em que  $b2$  corresponde a banda espectral 2, da região do infravermelho próximo (0,841 a 0,875  $\mu\text{m}$ ) e,  $b7$  a banda espectral 7, da região do infravermelho médio (2,105 a 2,155  $\mu\text{m}$ ) ambas obtidas do produto MOD13Q1.

A banda espectral 7 tem originalmente resolução espacial de 500 m, porém, quando disponibilizada com o produto MOD13Q1, a banda está reamostrada para resolução espacial de 250 m.

Quanto aos coeficientes Kc\_1 e Kc\_2, a discussão dos resultados foi baseada nos perfis temporais, considerando as médias e os coeficientes de variação obtidos para ambos os métodos, e suas repercussões nos perfis temporais do ISNA\_1 e ISNA\_2.

Quanto aos índices NDVI e NDWI, MOD13Q1, e os dados espacializados do ISNA\_1 e ISNA\_2, a discussão dos resultados foi baseada nos índices de correlação obtidos entre as médias das imagens para cada data NDVI e o NDWI, e então, os índices de correlação destes, com as médias dos dados espacializados do ISNA\_1 e ISNA\_2 para cada data, correspondente aos períodos:

- Ciclo completo (15 de novembro a 1° de abril)
- Períodos com ISNA inferior a 0,55, os quais são:
  - 1° de fevereiro a 1° de abril para a safra 2003/2004, e,
  - 15 de janeiro a 15 de março para a safra 2004/2005.

Sendo o NDVI\_1, o índice que indica a correlação entre o NDVI com o ISNA\_1; o NDVI\_2 indica a correlação entre o NDVI com o ISNA\_2; e assim, sucessivamente, para o NDWI.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Máscaras de cultivo**

As máscaras de cultivo de soja obtidas através da metodologia do Limiar empírico aplicado a Imagem diferença, seguem apresentadas nas Figuras 10 e 11.

Nas imagens NDVI, foram observados valores mínimos de -0,2000 e -0,1991, já enquanto que os valores máximos foram de 0,8872 e 0,9901, respectivamente, para as safras 2003/04 e 2005/05. Estes valores são compatíveis com os intervalos de valores válidos para este índice, visto que, segundo Huete et al. (2002) os pixels NDVI, MOD13Q1 devem apresentar valores entre o intervalo de -1 a 1. Dessa forma, os pixels NDVI que serão utilizados neste trabalho, nas estimativas do IAF\_M1 e IAF\_M2, demonstram valores válidos.

Já para o IAF, MOD15A2, foram observados valores máximos correspondentes aos valores de preenchimento do produto MOD15A2 (Tabela 2) para ambas as safras. Conforme Myneni et al. (2003), os valores biofísicos do IAF, no produto MOD15A2, devem apresentar valores no intervalo de 0 a 10. A ocorrência dos pixels inválidos para o IAF está demonstrada nas Figuras 12 e 13, onde pode ser vista a localização dos pixels inválidos, para as safras 2003/04 e 2004/05, respectivamente.

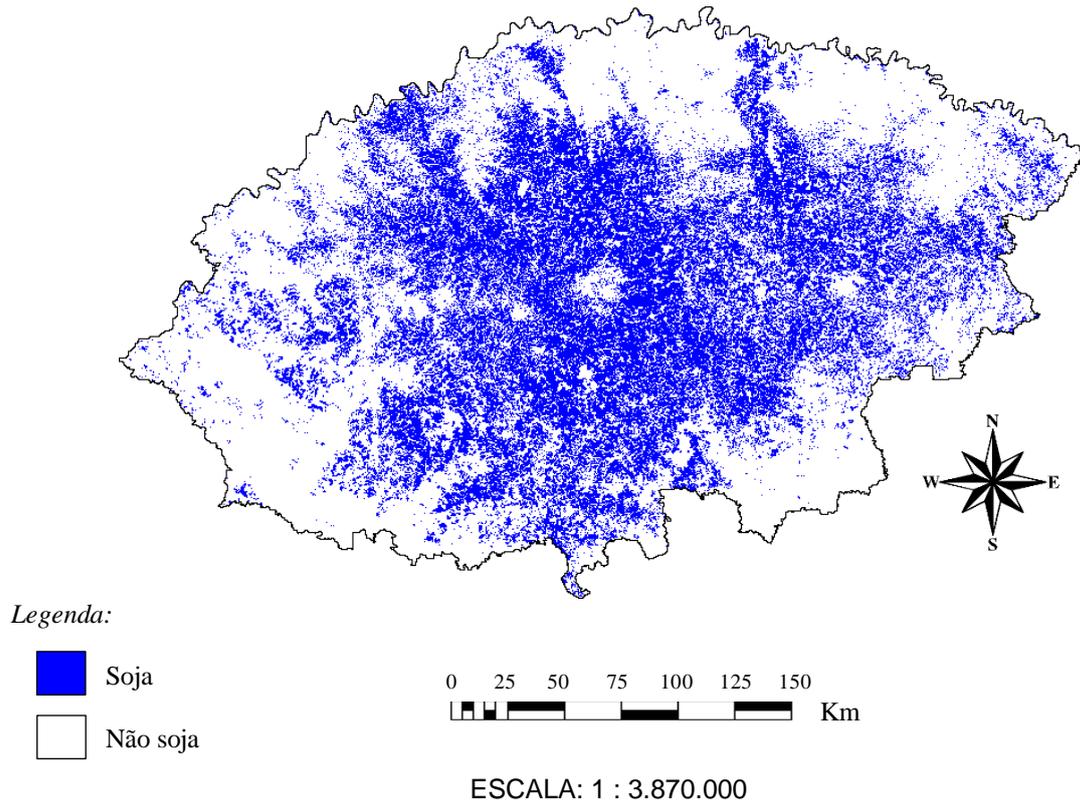


Figura 10: Máscara de cultivo de soja para a safra 2003/2004.

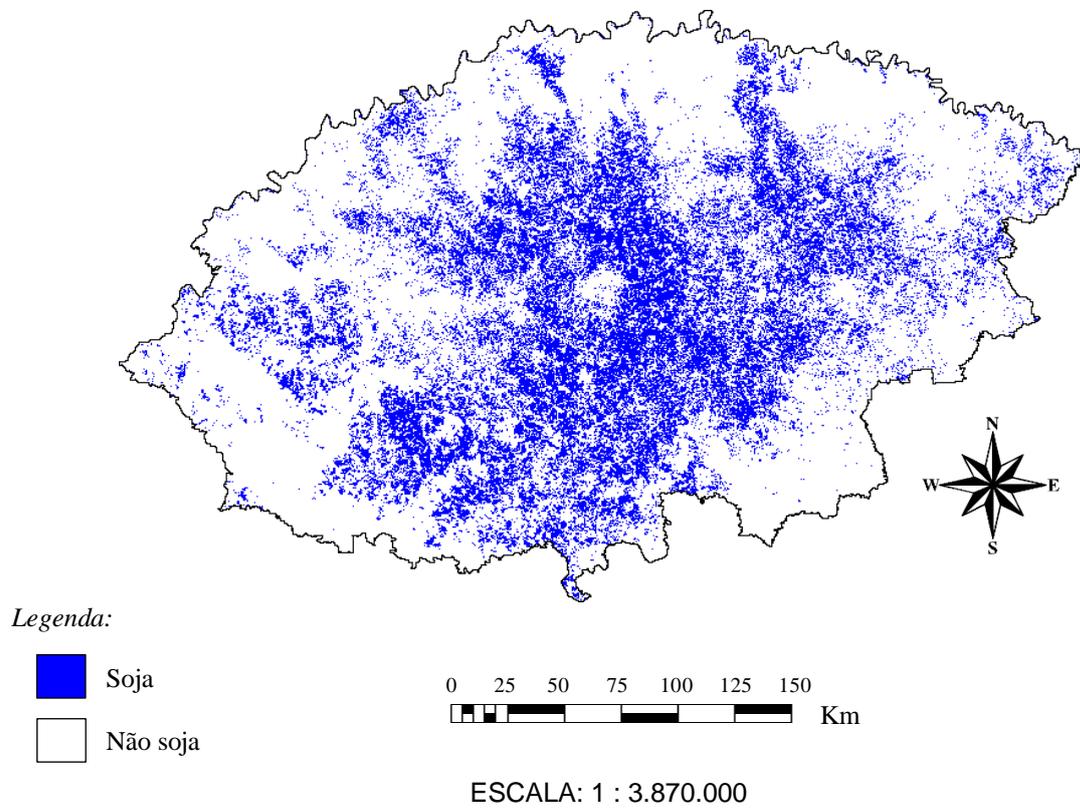


Figura 11: Máscara de cultivo de soja para a safra 2004/2005.

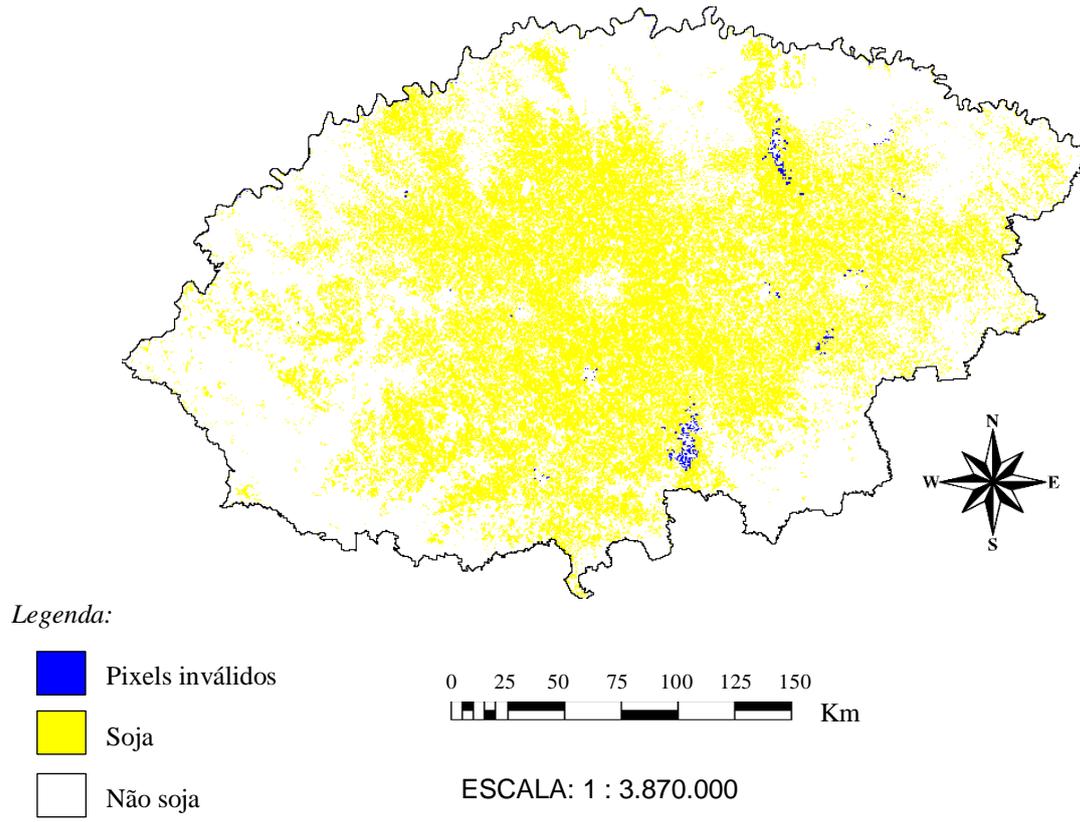


Figura 12: Localização dos pixels inválidos para o IAF, MOD15A2, safra 2003/04.

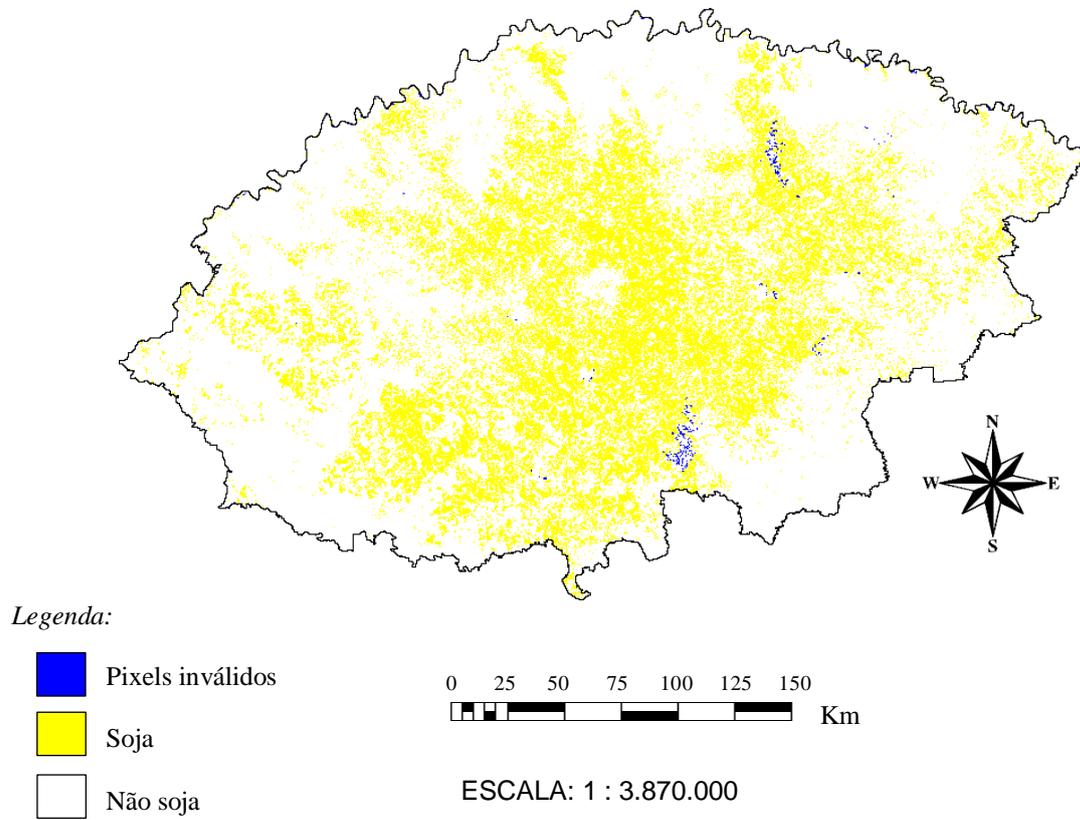


Figura 13: Localização dos pixels inválidos para o IAF, MOD15A2, safra 2004/05.

Observou-se que a maioria dos pixels inválidos encontravam-se próximos as duas barragens situadas na área de abrangência do estudo, e pertencentes aos municípios de Passo Fundo e Forquethinha, ambos produtores de soja, conforme LSPA (IBGE, 2011). Após a identificação, os pixels inválidos foram classificados como “não soja” nas máscaras de cultivo. A Tabela 4 demonstra as alterações na área mapeada.

Tabela 4. Correção na área mapeada de soja, em função da subtração de área que apresentava valores de preenchimento do IAF, MOD15A2.

Safra	Área de soja mapeada (ha)	Área mapeada sem informação IAF (ha)	Área de soja corrigida (ha)	% da area subtraída
2003/2004	3.316.075	41.137	3.274.938	1,24%
2004/2005	2.406.531	31.512	2.375.019	1,31%

A área subtraída de 1,24% e 1,31%, respectivamente, para as safras 2003/04 e 2004/05, permitiu comparação com os dados oficiais, conforme demonstrado na Tabela 5. Os dados oficiais de área colhida para os 225 municípios pertencentes à área de abrangência do estudo, foram obtidas através do site do IBGE (IBGE 2011).

Tabela 5. Comparação entre a área mapeada corrigida, e os dados oficiais do LSPA.

Safra	Área corrigida (ha) (A)	Área colhida LSPA (ha) (B)	Relação (A/B)
2003/2004	3.274.938	3.086.069	6,12% SUP
2004/2005	2.375.019	2.834.744	19,35% SUB

Conforme Tabela 5, na safra 2003/04, a área mapeada e corrigida superestimou o dado oficial em 6,12%. Na safra 2004/05, o dado oficial foi subestimado em 19,35%. Como interpretação visual, percebe-se que as safras demonstraram concordância na distribuição espacial das ocorrências da soja e também que a safra 2003/04 tem área cultivada superior a safra 2004/05, o que foi confirmado pelo LSPA (IBGE 2011).

As diferenças observadas demonstraram semelhança à encontrada em outros trabalhos que envolveram metodologias e imagens de sensoriamento remoto (Santos, 2010; Junges, 2008; Klering, 2007) aplicados ao mapeamento de culturas agrícolas.

Entretanto, Santos (2010) ressalva que áreas cultivadas com outras culturas de verão, como por exemplo: o milho, poderão ser detectadas pela metodologia, e compor as máscaras de cultivo como área de soja, o que infere certo grau de incerteza ao método.

Dadas as constatações referentes à área de soja resultante das máscaras de cultivo corrigidas, estas foram consideradas aptas, para obtenção dos objetivos específicos deste trabalho.

#### 4.2. O IAF, MOD15A2 aplicado à cultura da soja.

As médias obtidas para cada uma das 13 imagens do IAF, MOD15A2 e para as estimativas obtidas a partir do NDVI, MOD13Q1, a IAF\_M1 e a IAF\_M2 foram organizadas na forma de perfis temporais, conforme demonstrado nas Figuras 14 e 15 abaixo:

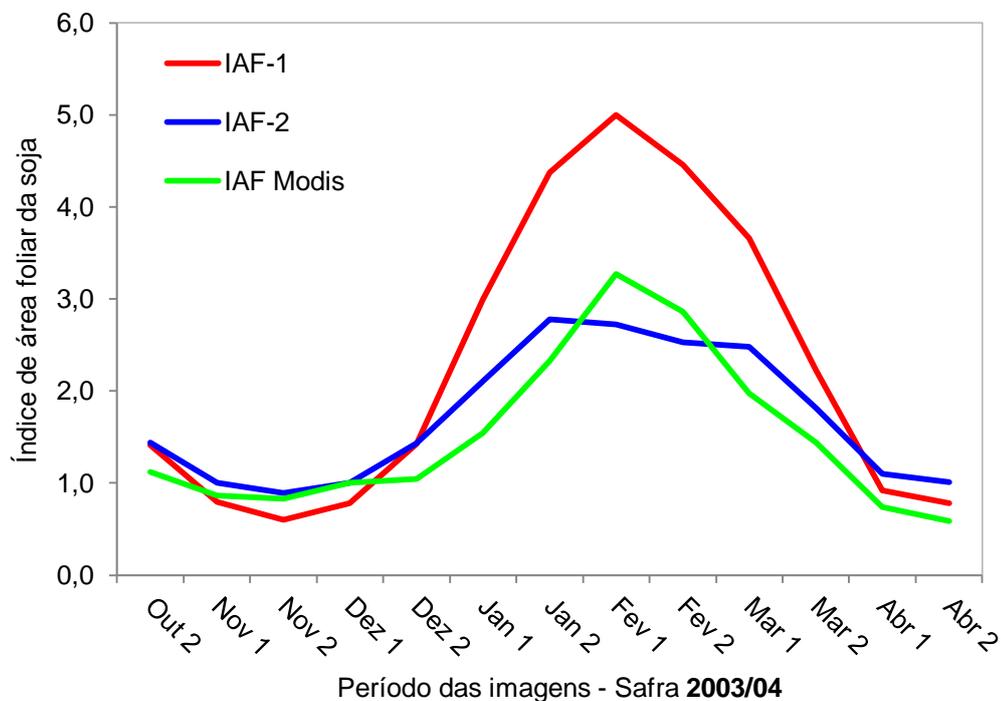


Figura 14. Perfil temporal do IAF para safra 2003/04, considerando o IAF, MOD15A2, o IAF\_M1 e o IAF\_M2.

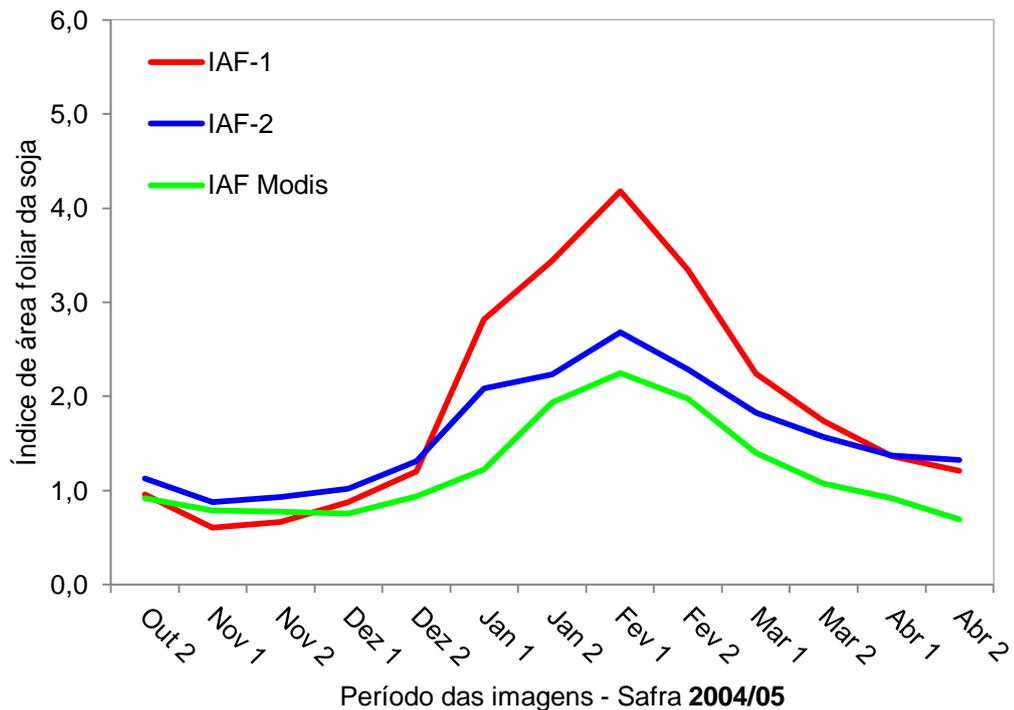


Figura 15. Perfil temporal do IAF para safra 2004/05, considerando o IAF, MOD15A2, o IAF\_M1 e o IAF\_M2.

Para ambas as safras, em média, o IAF, MOD15A2, apresentou valores inferiores aos observados por Fontana et al. (1992) e Martorano (2007) para a cultura da soja.

Fontana et al. (1992), em um estudo micrometeorológico de balanço de radiação e energia, realizado em parcelas experimentais cultivadas com soja, com e sem irrigação, mediram o IAF com um planímetro ótico, encontrando valores entre 0,11 a 6,90 durante o ciclo da cultura conforme observado na Figura 16.

Já Martorano (2007) realizou medições do IAF em parcelas experimentais cultivadas com soja, também com o uso de um planímetro ótico, durante o período de um ciclo da cultura, e obteve valores entre 0,2 e 6,2, resultados semelhantes aos obtidos por Fontana et al. (1992), conforme demonstrado na Figura 17.

Comparando com os valores medidos por Fontana et al. (1992) e Martorano (2007), a metodologia IAF\_M1 mostrou um padrão compatível com o IAF medido para a cultura da soja. Este resultado pode estar associado ao fato de que a metodologia IAF\_M1 ter sido obtida a partir de uma função de regressão entre o IAF e o NDVI,

proposto por Almeida (2008), e, para o caso específico da soja, quando que, o IAF, MOD15A2, pode não apresentar a capacidade de detectar grandes variações do IAF em curto intervalo de tempo, o que é apropriado ao caso da soja. Quanto a esta constatação, se faz necessária maior investigação sobre a sensibilidade do IAF, MOD15A2 quando a grandes variações do IAF em curto intervalo de tempo.

A pequena variação observada no IAF, MOD15A2 pode ser decorrência dos fatores intrínsecos considerados pelo algoritmo principal, que opera o modelo de transferência radiativa tridimensional invertida, associado ao mapa global de bioma (MOD12Q1 nível 3). Para esta situação, se faz necessária maior investigação quanto aos parâmetros e as variáveis envolvidas.

Outros fatores que podem estar associados à baixa variação do IAF, é quanto a qualidade radiométrica dos pixels. A IAF\_M1 foi obtida pelo NDVI, MOD13Q1, obtido a partir de CMV de 16 dias, enquanto que o IAF, MOD15A2 são CMV de 8 dias. A resolução espacial também difere entre os produtos, sendo o NDVI 250 m, enquanto que o IAF é de 1.000 m, sendo posteriormente reamostrado para 250 m.

Mesmo que o IAF, MOD15A2 não tenha demonstrado a variação característica da soja, demonstrou coerência na evolução do ciclo, visto que todos os métodos avaliados, em média, indicaram as mesmas datas para o máximo desenvolvimento vegetativo, início e final de ciclo. Dessa forma, se faz necessária uma maior investigação do IAF, MOD15A2 quanto à capacidade de demonstrar variações compatíveis com as da soja.

Seguem os diagramas de dispersão obtidos entre o IAF, MOD15A2, comparado às outras metodologias testadas para as safras 2003/04 e 2004/05, demonstrados nas Figuras 18, 19, 20 e 21.

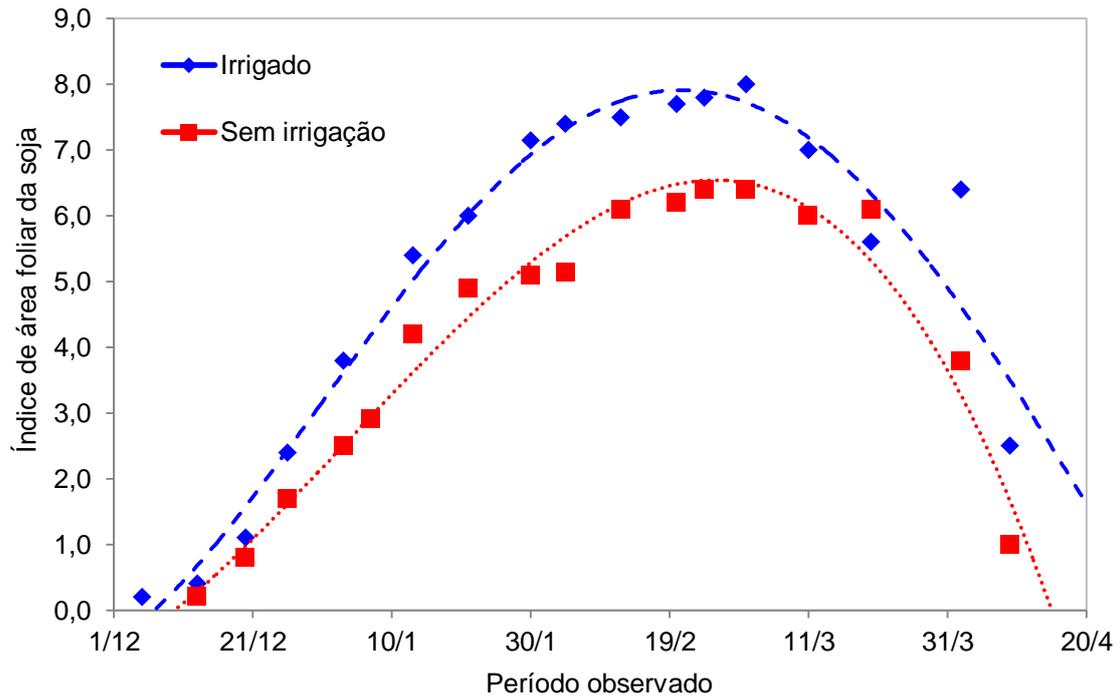


Figura 16. IAF da soja submetida a dois tratamentos, para o período de um ciclo completo da cultura. Fonte: Adaptado de Fontana et al. (1992)

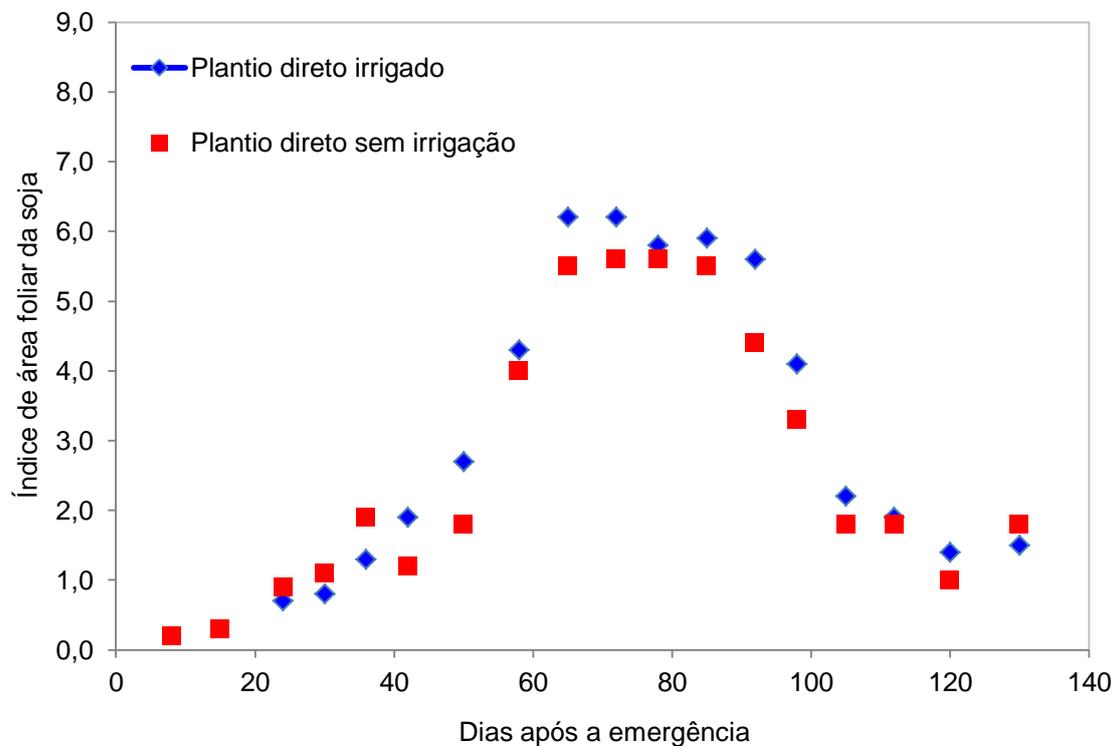


Figura 17. IAF da soja submetida a dois tratamentos, para o período de um ciclo completo da cultura. Fonte: Adaptado de Martorano (2007).

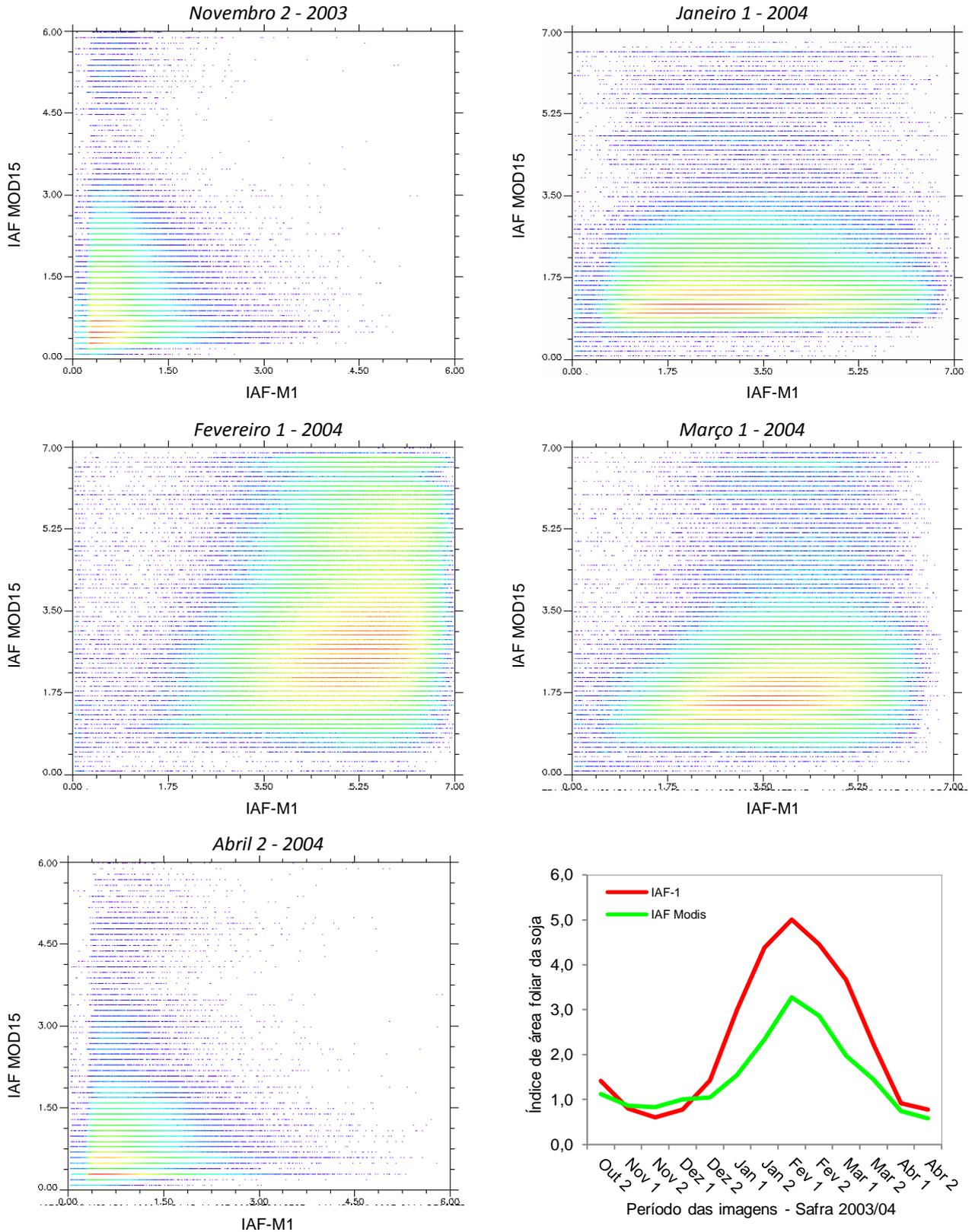


Figura 18. Diagramas de dispersão obtidos entre o IAF MOD15A2 e o IAF-M1 para a safra 2003/04. *Simbologia das cores*: do azul para o vermelho, significa o aumento no número de observações.

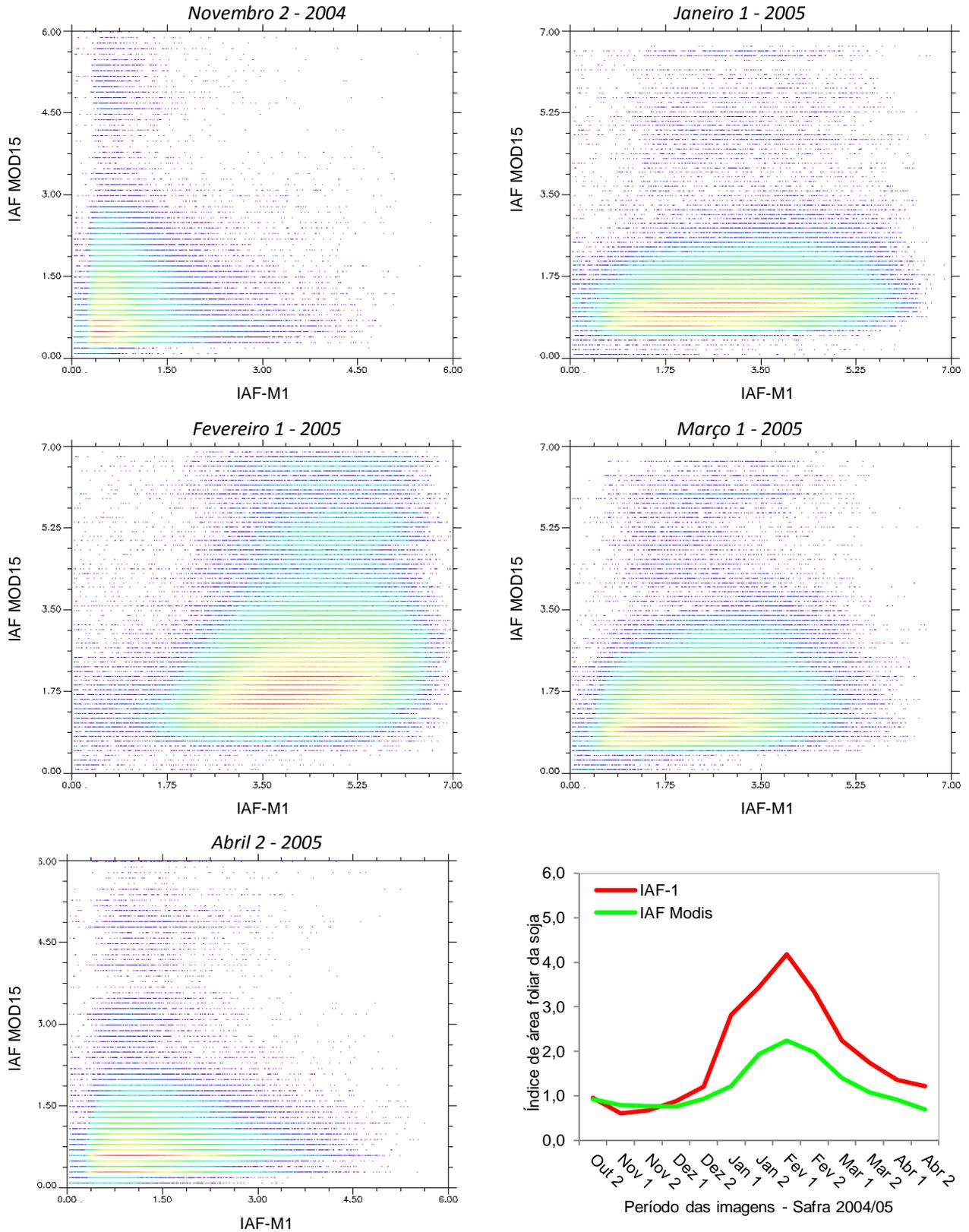


Figura 19. Diagramas de dispersão obtidos entre o IAF MOD15A2 e o IAF-M1 para a safra 2004/05. *Simbologia das cores:* do azul para o vermelho, significa o aumento no número de observações.

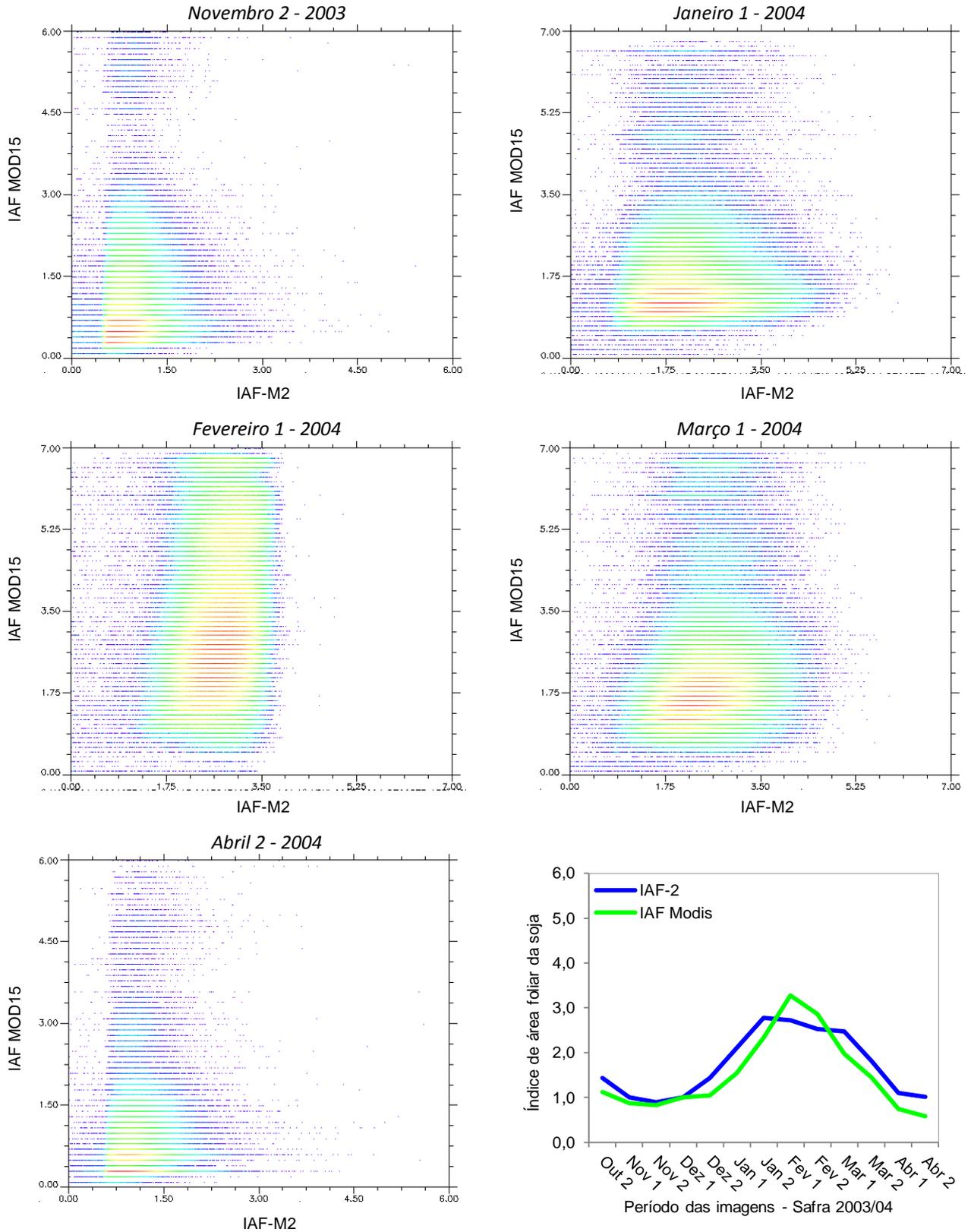


Figura 20. Diagramas de dispersão obtidos entre o IAF MOD15A2 e o IAF-M2 para a safra 2003/04. *Simbologia das cores:* do azul para o vermelho, significa o aumento no número de observações.

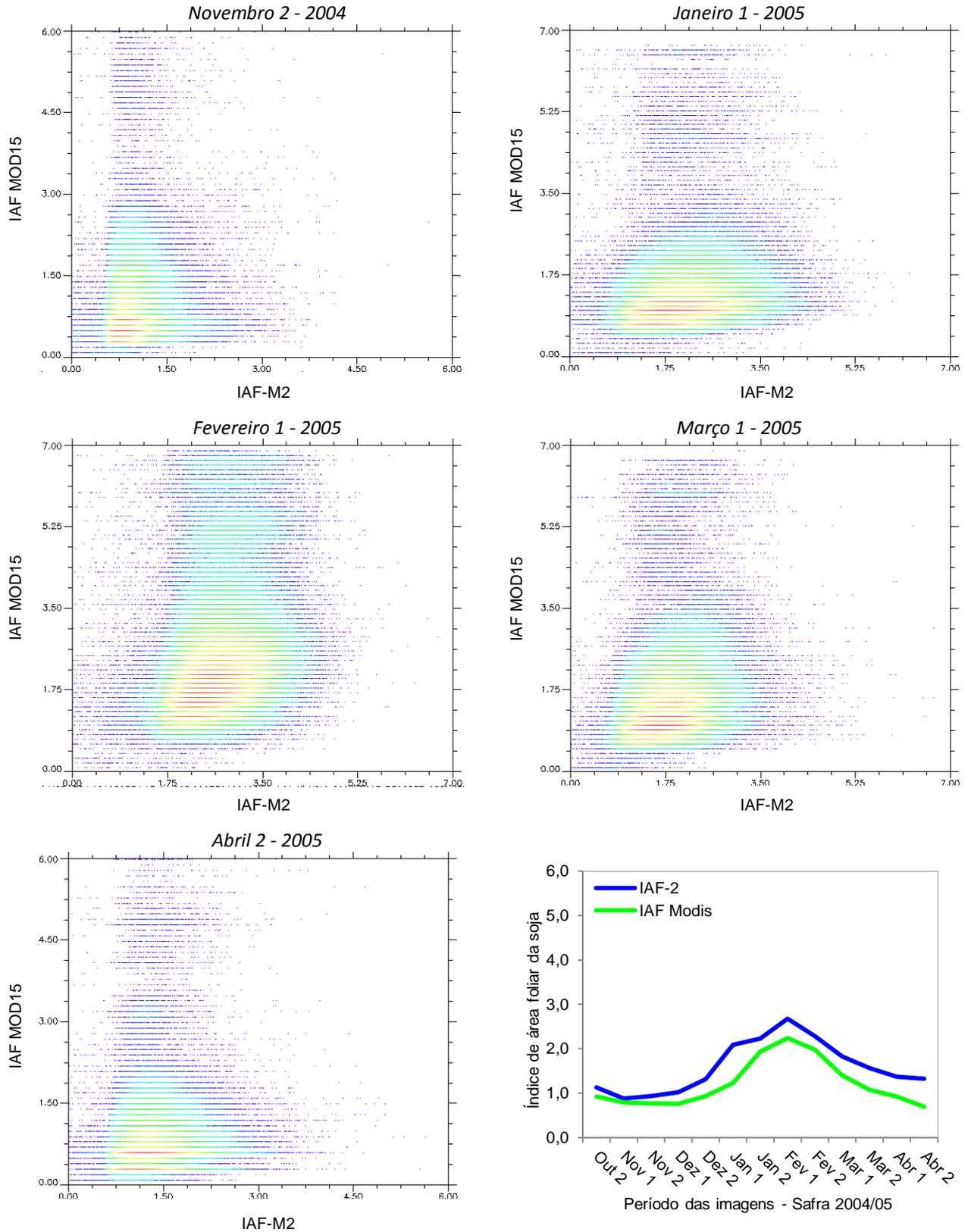


Figura 21. Diagramas de dispersão obtidos entre o IAF MOD15A2 e o IAF-M2 para a safra 2004/05. *Simbologia das cores:* do azul para o vermelho, significa o aumento no número de observações.

Com base na análise dos diagramas de dispersão apresentados na Figura 18, para a safra 2003/04, a IAF\_M1 demonstrou maior variabilidade, se comparada ao IAF, MOD15A2, nas datas correspondentes ao desenvolvimento vegetativo (Janeiro 1) e a maturação fisiológica, enchimento de grãos e senescência (Março 1). Esse resultado pode ser considerado característico das lavouras de soja, uma vez que a semeadura ocorre em datas diferentes, como consequência as lavouras apresentam variabilidade no IAF. Outro fator que pode estar associado a esse resultado é o desenvolvimento diferenciado das plantas, nível de tecnologia empregado nas lavouras, entre outros fatores. Para a data de máximo desenvolvimento vegetativo (Fevereiro 1), a IAF\_M1 demonstrou valores compatíveis com a soja. Analisando o IAF, MOD15A2, percebe-se uma grande variação nos dados, indicando grande concentração das observações em valores até 3,5, de depois, entre 5,0 a 5,5. Já na safra 2004/05 (Figura 19), é possível observar comportamento semelhante a safra anterior. Na safra 2004/05, a data de máximo desenvolvimento vegetativo (Fevereiro 1), chama atenção para os valores baixos na IAF\_M1, a qual demonstrou valores mais próprios ao desenvolvimento vegetativo satisfatório, na safra anterior. Pelo histórico desta safra, acredita-se que esse resultado é influência direta do período de ocorrência do déficit hídrico característico desta safra, no Rio Grande do Sul.

Quanto a IAF\_M2, tanto nos perfis temporais, quanto nos diagramas de dispersão, os valores apresentados não foram compatíveis. Mesmo assim, demonstraram concordância na evolução do IAF durante o ciclo da soja. Esse resultado pode estar associado ao fato de que a Equação 5, utilizada para estimar a fração cobertura do solo ( $F_c$ ) considera valores do NDVI máximos e mínimos da imagem. Este fato exige grande certeza associada a máscara de cultivo, e dessa forma, a valores devem ser compatíveis com os estádios que as lavouras se encontram, por exemplo: na data de máximo desenvolvimento vegetativo, demonstrado na safra 2003/04 na Figura 20, observamos valores mínimo do IAF da soja próximos a zero. Essa incerteza pode inviabilizar a estimativa da  $F_c$  por este método. Outra observação quanto a estimativa da  $F_c$ , diz respeito ao expoente da Equação 5, descrito como 0,6 para cultivos agrícolas, porém, pode não ser estar apropriado ao caso específico soja. Foi possível concluir que o IAF\_M2 apresenta potencial na estimativa do IAF, porém,

requer mais investigação sobre suas limitações, as quais podem inviabilizar seu uso em casos específicos, como no caso da soja.

É possível associar o NDVI, MOD13Q1, e obter estimativas razoáveis para o IAF da soja, durante as safras, através da metodologia IAF\_M1, o que a torna objeto de pesquisa e investigação posterior, com dados e métodos mais específicos, bem como, maior período de estudo.

#### 4.3. O IAF, MOD15A2 como estimador do coeficiente da cultura.

Os valores obtidos para o do Kc\_1 e o Kc\_2 estão demonstrado nas Figuras 22 e 23, apresentados a seguir:

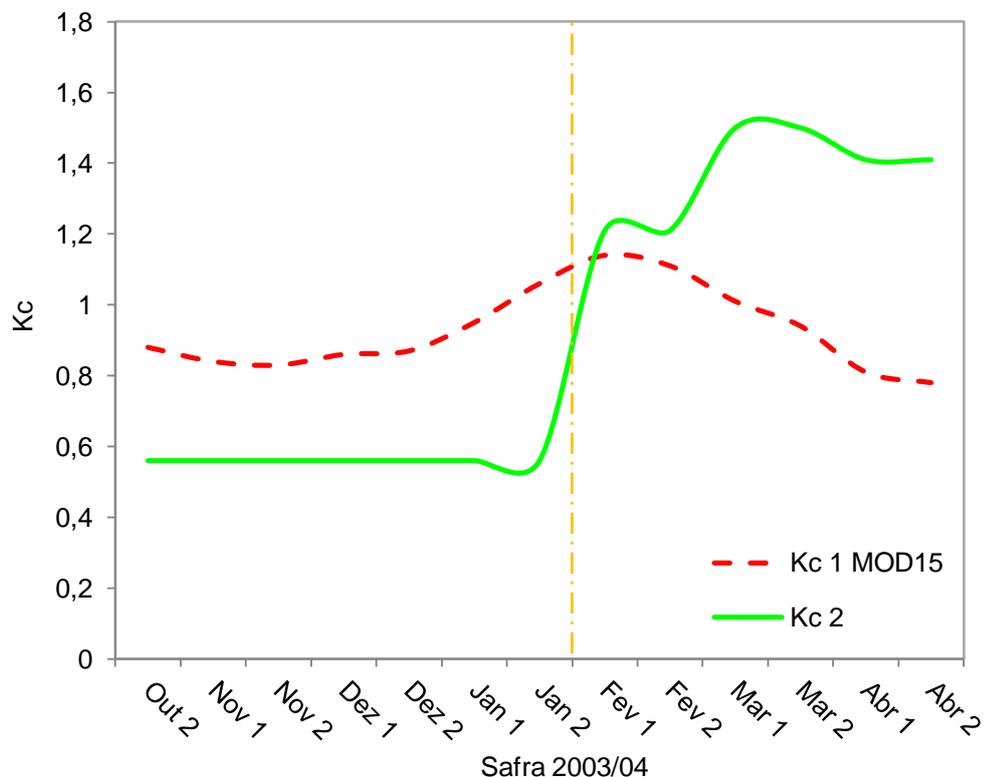


Figura 22. Perfil temporal do Kc\_1 e Kc\_2 para safra 2003/04.

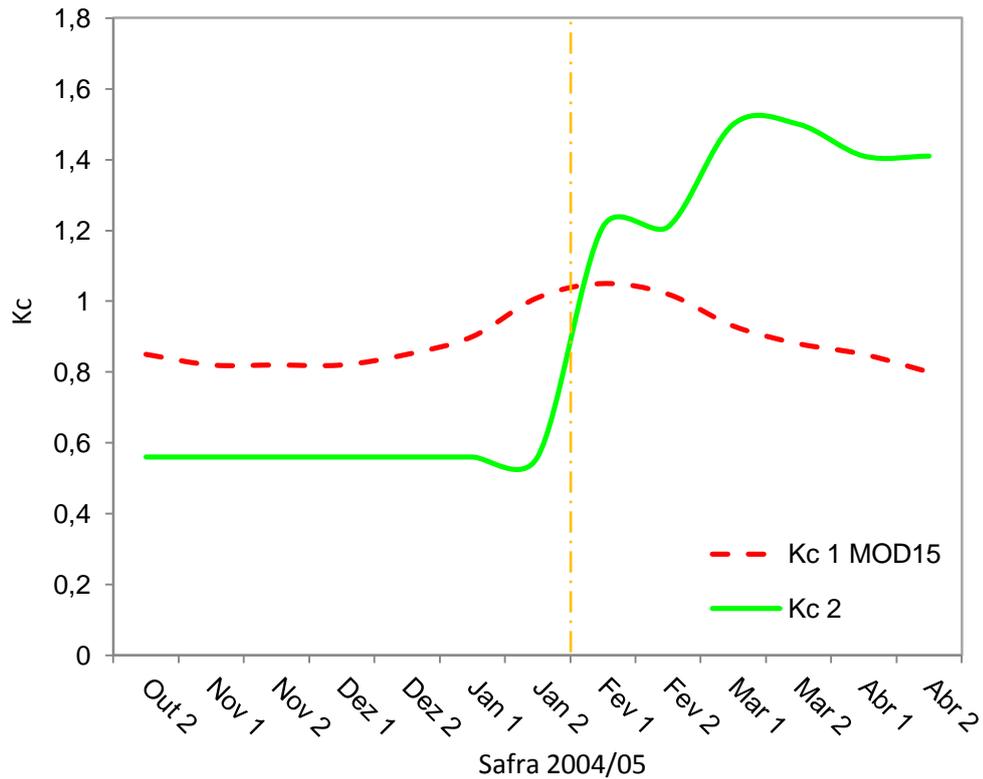


Figura 23. Perfil temporal do Kc\_1 e Kc\_2 para safra 2004/05.

A baixa variação no IAF, MOD15A2, já discutida anteriormente, influenciou o resultado obtido pelo Kc\_1, uma vez que este foi estimado a partir das médias das imagens IAF, MOD15A2. O coeficiente de variação do Kc\_1 foi de 12,6% e 9,5% para as safras 2003/04 e 2004/05, respectivamente. Já o Kc\_2, que demonstra valores médios por período, e que foi obtido para correção da demanda evaporativa de cada ano, apresentou coeficiente de variação de 46,04%, conforme demonstrado na Tabela 6. Foi observado também que o Kc\_1 superestima o Kc\_2 para o período do início do ciclo até o máximo desenvolvimento. Após este período, observou-se uma subestimativa conforme Figuras 22 e 23. Esse resultado é perceptível nas variações apresentadas pelo ISNA\_1 e ISNA\_2, conforme Figuras 24 e 25.

Tabela 6. Variação observada entre os métodos Kc\_1 e Kc\_2.

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Amplitude	Média	Variação
Kc_1 (2003/2004)	0,81	1,06	0,25	0,92	12,66 %
Kc_1 (2004/2005)	0,80	1,05	0,25	0,89	9,50 %
Kc_2 (Ambas)	0,56	1,50	0,94	0,94	46,04 %

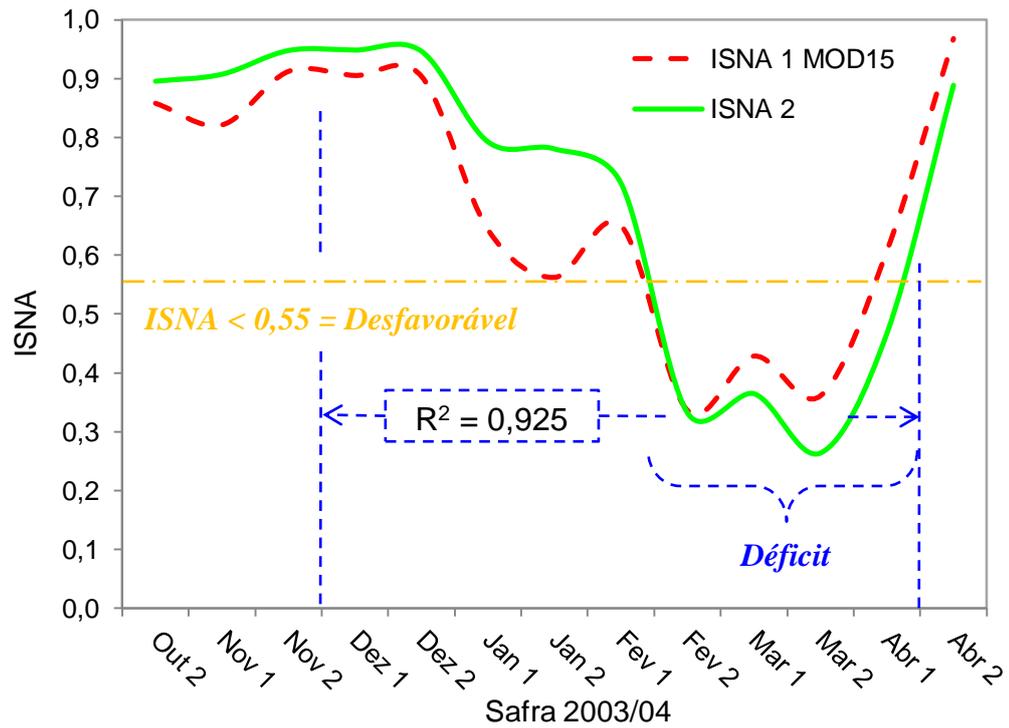


Figura 24. Perfil temporal do ISNA\_1 e ISNA\_2 para safra 2003/04.

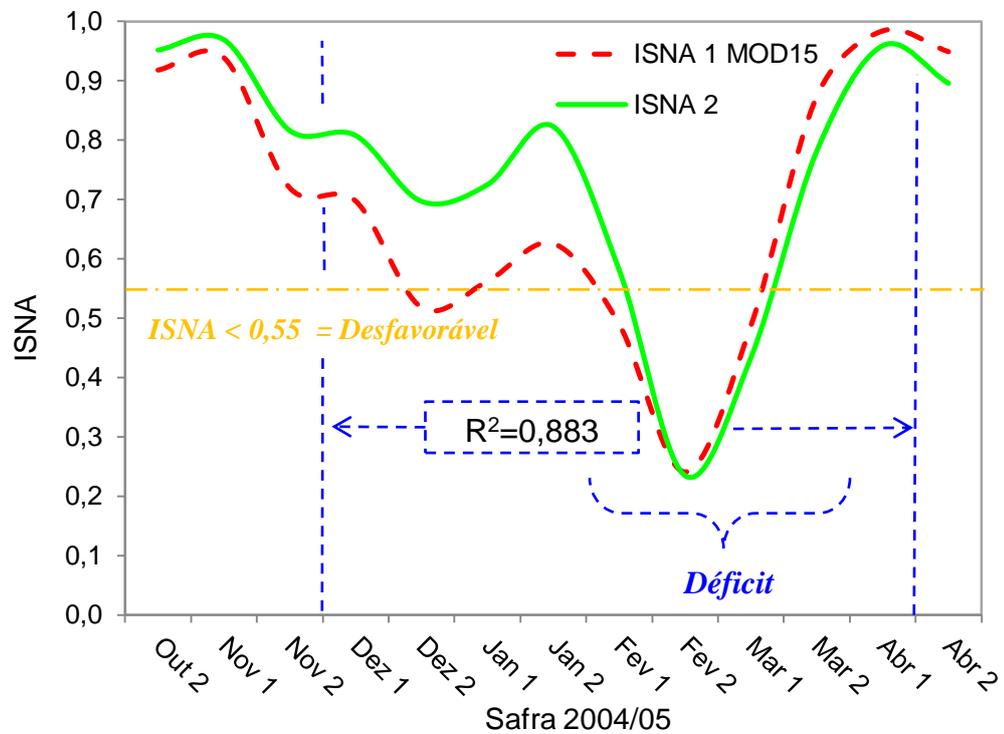


Figura 25. Perfil temporal do ISNA\_1 e ISNA\_2 para safra 2004/05.

Entre o ISNA\_1 e ISNA\_2, foram obtidos índices de correlação de 0,925 para a safra 2003/04 e de 0,883 na safra 2004/05, no período de 15 de novembro a 1º de abril (Ciclo completo da cultura). Analisando as Figuras 24 e 25, ambos demonstraram períodos relacionados ao déficit hídrico ocorrendo em época correspondente à floração, enchimento de grãos e maturação fisiológica. Já para os períodos de semeadura e desenvolvimento vegetativo, a safra 2004/05 apresentou menor ISNA em relação a safra 2003/04.

#### **4.4. Análises entre os índices de vegetação NDVI/NDWI e o ISNA\_1 e ISNA\_2.**

Foram observados coeficientes de correlação altamente significativos entre o NDVI e o NDWI. Para o período que abrangeu datas correspondentes ao início do ciclo até o máximo desenvolvimento (15 de novembro a 1º de fevereiro), a correlação obtida entre as médias das imagens NDVI e NDWI foi de 0,999 para a safra 2003/04, e 0,998 para a safra 2004/05. Já para o período de (15 novembro a 15 de abril), correspondente ao ciclo completo da cultura, a correlação obtida foi de 0,988 para a safra 2003/04 e de 0,977 para a safra 2004/05 (Figuras 26 e 27).

A semelhança observada indica que a banda 2 do sensor MODIS está fortemente associada ao desenvolvimento vegetativo. Assumindo a alta correlação entre o NDVI e a produção de biomassa da soja, demonstrado em diversas publicações (Rizzi, 2005; Martorano, 2007; Almeida, 2008) é possível observar que a safra 2004/05 apresentou desenvolvimento inferior em comparação a safra 2003/04.

Esse fato pode estar associado ao período de déficit hídrico observado em ambas as safras, e também, o possível desinteresse por parte dos agricultores em manter os custos elevados das lavouras na safra 2004/05, mediante a descapitalização, e os prejuízos ocorridos na safra 2003/04. Alguns aspectos econômicos das safras são discutidos por Ferstenu (2004), no item 2.2.1.

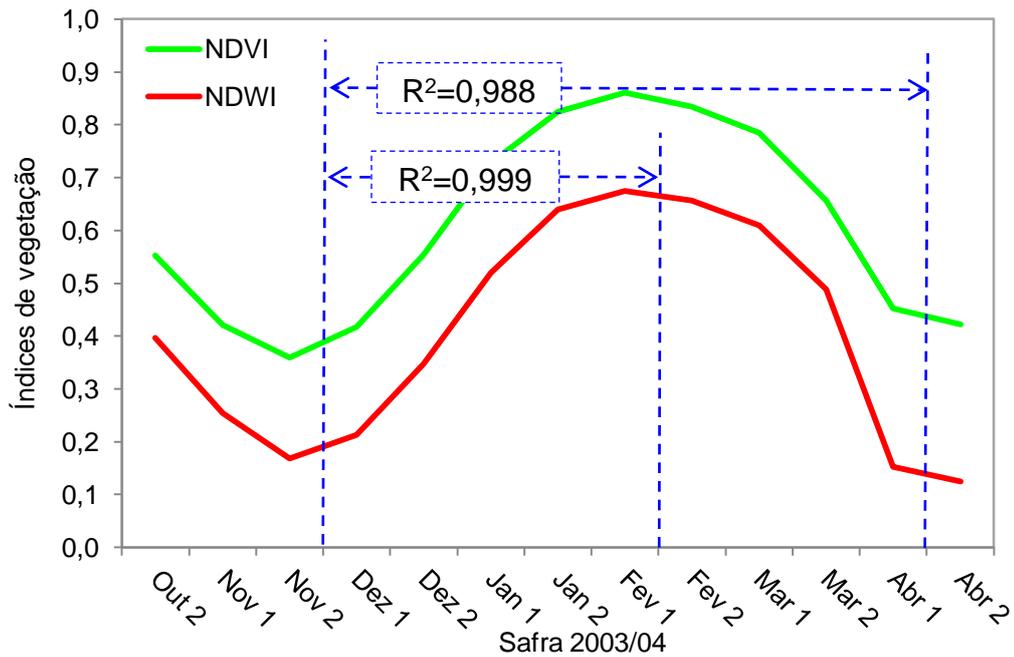


Figura 26. Índices de correlação entre o NDVI e o NDWI para os períodos indicados na safra 2003/04.

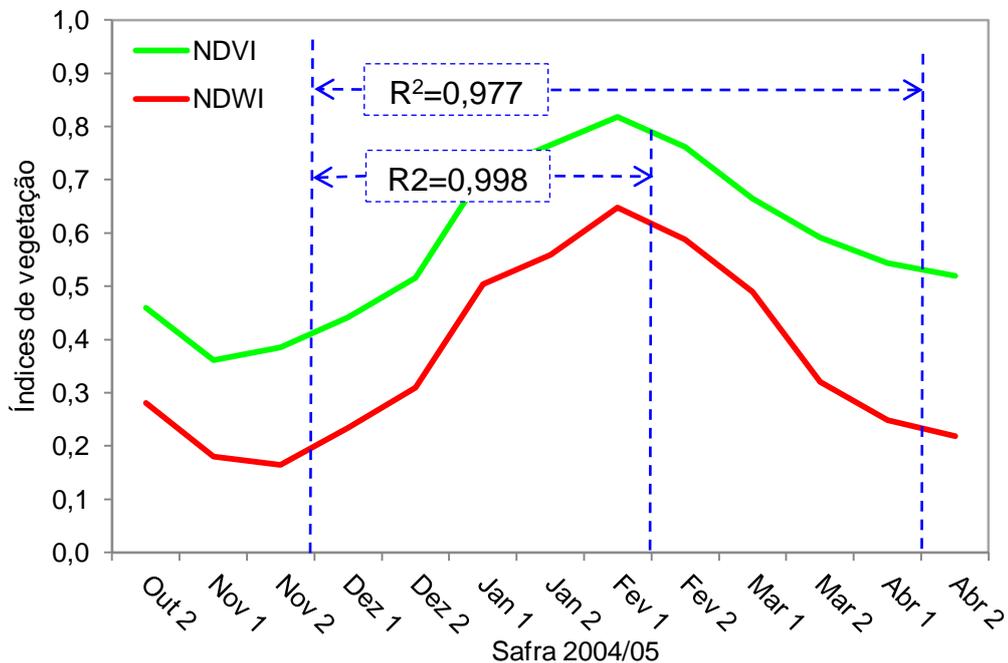


Figura 27. Índices de correlação entre o NDVI e o NDWI para os períodos indicados na safra 2004/05.

Foram também comparadas às correlações obtidas entre os Índices, NDVI e NDWI, com os dados espacializados do ISNA\_1 e ISNA\_2, conforme demonstrados nas Figuras 28, 29, 30, 31.

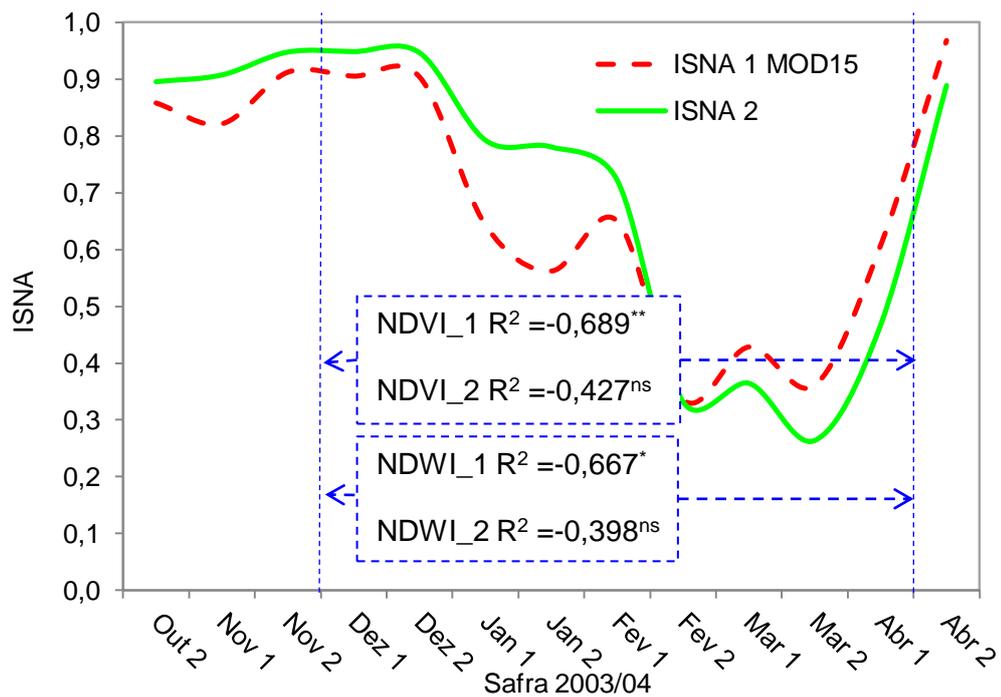


Figura 28. Índices de correlação e significância entre os índices (NDVI / NDWI) e os dados do ISNA\_1 e 2 para o período de ciclo completo da cultura na safra 2003/04.

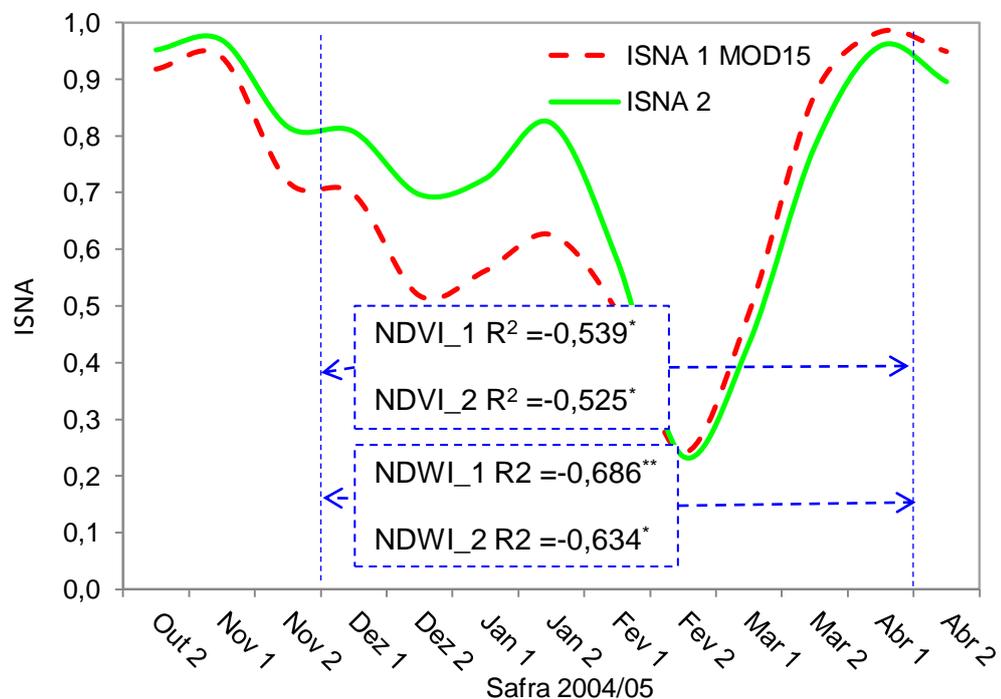


Figura 29. Índices de correlação e significância entre os índices (NDVI / NDWI) e os dados do ISNA\_1 e 2 para o período de ciclo completo da cultura na safra 2004/05.

(\*\*) – nível de significância  $\alpha = 1\%$ , pelo teste "t".

(\*) – nível de significância  $\alpha = 5\%$ , pelo teste "t".

(<sup>ns</sup>) – nível de significância maior que 5% ou não significativo, pelo teste "t".

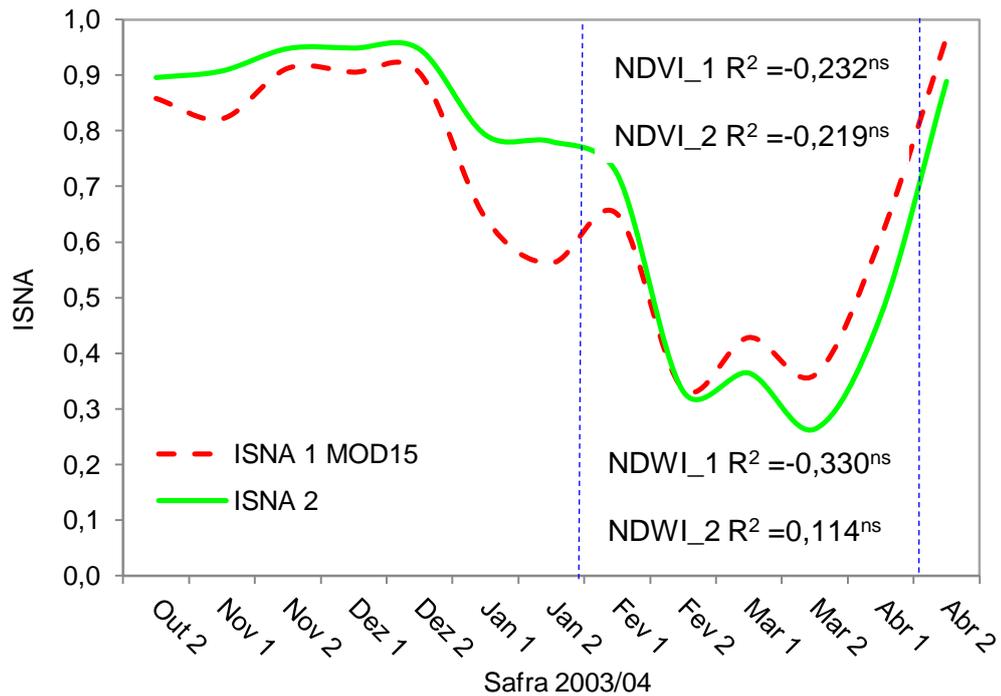


Figura 30. Índices de correlação entre os índices (NDVI / NDWI) e os dados do ISNA\_1 e 2 para o período de ciclo completo da cultura na safra 2003/04.

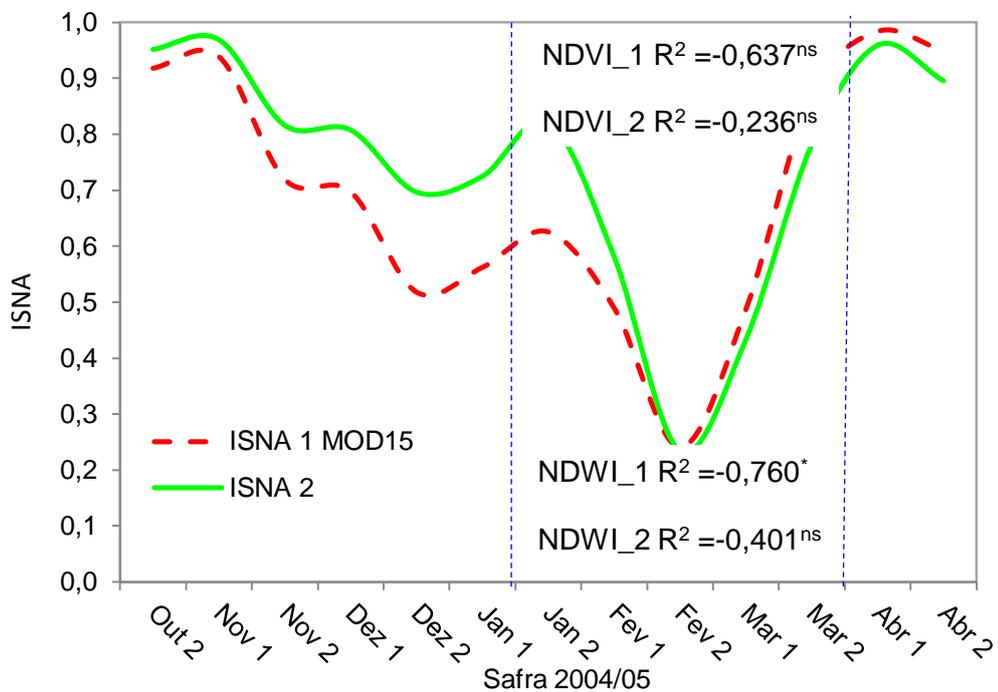


Figura 31. Índices de correlação entre os índices (NDVI / NDWI) e os dados do ISNA\_1 e 2 para o período de ciclo completo da cultura na safra 2004/05.

(\*\*) – nível de significância  $\alpha = 1\%$ , pelo teste "t".

(\*) – nível de significância  $\alpha = 5\%$ , pelo teste "t".

(<sup>ns</sup>) – nível de significância maior que 5% ou não significativo, pelo teste "t".

Quanto à condição hídrica das lavouras, em ambas as safras, é possível observar que o ISNA\_1, apresentou índices mais baixo, relacionados a uma pior condição hídrica, em relação ao ISNA\_2.

Quanto aos níveis de significância observados nas correlações, não foi possível associar resultados que diferenciem o NDWI do NDVI em relação ao ISNA. Em ambas as safras, ambos os índices demonstraram resultados semelhantes, perante o ISNA.

Para o período de ciclo completo da cultura (15 de novembro a 1º de abril), na safra 2003/04, o ISNA\_2 não apresentou correlação significativa com o NDVI e NDWI (Ver Figura 28). Esse resultado poderia estar associado ao método de obtenção do Kc\_2 (Calendário agrícola médio e Kc médio por período). Neste caso, as imagens do IAF, MOD15A2, utilizadas no Kc\_1, podem ter demonstrado, com maior acurácia, a condição hídrica que se deu sobre esta safra, o que justificaria a não significância destas correlações. Porém, devido à metodologia proposta neste trabalho, não foi possível se obter dados conclusivos que justificassem esse resultado, até porque, as imagens IAF, MOD15A2 não apresentaram valores concordantes com os valores de IAF observados em Fontana et al. (1992) e Martorano (2007). Sobre esta constatação, mais pesquisa e investigação sobre as informações obtidas pelo método IAF\_M1, associado a obtenção do ISNA pelo método ISNA\_1, apresentasse resultados mais apropriados.

Em ambas as safras, as correlações observadas entre o ISNA\_1 e os índices de vegetação NDVI e NDWI foram significativas (Figura 29), porém, esse resultado não demonstra a eficácia de um método em relação a outro.

Já em períodos específicos onde o ISNA é igual ou inferior a 0,55, os quais são considerados desfavoráveis ao cultivo da soja (Cunha et al. 2001), que na safra 2003/04, abrangem o período de 1º de fevereiro até 1º de abril, a significância das correlações observadas não foram significativas (Figura 30). Resultado semelhante foi observado para a safra 2004/05, para o período de 1º de janeiro a 15 de março, com exceção da correlação observada entre o NDWI com o ISNA\_1, apresentado

correlação significativa (Figura 31). Se observarmos os níveis de significância das correlações entre o NDWI e o ISNA, é possível verificar que estas são mais correlacionadas e apresentam maior nível de significância na safra 2004/05 do que na 2003/04.

Independente do período, se observarmos os níveis de significância das correlações obtidas, é possível identificar maior significância nas correlações dos índices de vegetação com o ISNA\_1, que foi obtido através do uso de imagens MODIS, IAF, MOD15A2, principalmente para o período que abrange o ciclo completo da cultura, porém, existem restrições quanto aos resultados obtidos deste produto, conforme foi discutido anteriormente.

## 5. CONCLUSÕES

- O MOD15A2 apresenta valores de IAF abaixo do esperado para a soja, porém, através da análise dos perfis temporais, demonstra concordância com o período de desenvolvimento do IAF, indicando quais as imagens que correspondem ao início e final do ciclo, e máximo desenvolvimento. Considera-se com esse resultado que o IAF, MOD15A2 apresenta sensibilidade às variações do IAF da vegetação entre as imagens, porém, necessita de mais pesquisa, quanto aos fatores que resultam em valores abaixo do esperado para a soja.
- Quanto aos pixels com valores de preenchimento presentes nas imagens IAF, produto MOD15A2, os mesmos não são representativos a ponto de inviabilizar a comparação da área mapeada através da metodologia do Limiar empírico aplicado a Imagem diferença, com os dados oficiais do LSPA.
- Quanto à estimativa do IAF da soja, em média, a metodologia IAF\_M1 apresenta resultados semelhantes aos observados para a cultura da soja.
- O ISNA\_1 apresenta coeficientes de correlação de maior significância com os índices NDVI e NDWI do que o ISNA\_2, o que demonstra que a estimativa do IAF, a partir do produto MOD15A2, e posteriormente, a estimativa do Kc, tem o atributo de representar adequadamente condições que os Índices representam.
- Não foi possível observar resultados que diferenciem efeitos diretos do NDWI ou do NDVI frente ao ISNA. Ambos os índices, obtidos pelo produto MOD13Q1, apresentam associação semelhante entre eles e em relação ao ISNA, o que induz ao fato de que a banda espectral do infravermelho próximo do sensor MODIS está diretamente associada ao desenvolvimento da vegetação.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R; PEREIRA L; RAES, D; SMITH M; Crop Evaporation: Guideline for Computing Crop Water Requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper**. Rome: FAO, n. 56, 1998, 300 p.

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

ARAÚJO, M. A. **Modelos agrometeorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa - Paraná**. 108 f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal do Paraná, Curitiba: UFPR, 2008.

BARET, F; G. GUYOT. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and fAPAR assessment. **Remote Sensing of the Environment**, v. 35, p. 161 a 173, 1991.

BERGAMASCHI, H; GUADAGNIN, M. R. **Agroclima da Estação Experimental Agrônômica - UFRGS**. Porto Alegre: UFRGS, 1990.

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, n. 3, p. 433 a 440, 2003.

BERLATO, M. A. **Modelo de relação entre o rendimento de grãos da soja e o déficit hídrico para o estado do Rio Grande do Sul**. 93 f. Tese (Doutorado). Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: INPE, 1987.

BERLATO, M. A; FONTANA, D. C. Parâmetro  $\alpha$  da equação de Priestley & Taylor para a estimativa da evapotranspiração da soja. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 5. **Anais...** Belém: Coletânea de trabalhos, 1987, p. 178 a 179.

CHOUDHURY, B. J; AHMED 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, 1994, p. 1 a 17.

COSTA, J. A. **Cultura da soja**. Porto Alegre: EVANGRAF, 1996, 233 p.

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

CUNHA, G. R. et al. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria: v. 9, n. 3, 2001, p. 446 a 459.

DOORENBOS, J; KASSAM, A. H. Yield response to water. Food and Agriculture Organization of the United Nations, **FAO Irrigation and Drainage Paper**, Roma: n. 33, 1979, 193 p.

DOORENBOS, J; PRUITT, O. Guidelines for predicting crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper**. Roma: n. 24, 1975, 144 p.

FARIAS, J. R. B; NEPOMUCENO, A. F; NEUMAIER, N; OYA, T. Ecofisiologia. In: **A cultura da soja no Brasil**. Londrina: EMBRAPA, 2000.

FEHR, W, R; CAVINES, C, E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, 1977, 21 p. (Special Report 80).

FONTANA, D; BERLATO, M; BERGAMASCHI, H. Alterações micrometeorológicas na cultura da soja submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília: EMBRAPA, v. 27, n. 5, 1992, p. 661 a 669.

FONTANA, D. C; OLIVEIRA, D. Relação entre radiação solar global e insolação para o Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria: v. 4, n. 1, 1996, p. 87 a 91.

FONSECA, E. L; VARELLA, A. Análise dos padrões de resposta espectral multitemporal de cereais de estação fria cultivados para a produção de grãos e para produção de forragem em imagens de média resolução espacial. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14°. **Anais...** Natal: INPE, 2009, p. 191 a 197.

FRIEDL, M. A; MCIVER, D. K; HODGES, J. C. F; ZANG, X. Y; MUCHONEY, D; STRAHLER, A. H; WOODCOCK, C. E; GOPAL, S; SCHNEIDER, A; COOPER, A. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. **Remote Sensing of Environment**. v. 83, 2002, p. 287 a 302.

FÜRSTENAU, V. A safra de grãos de verão 2003/04 no Brasil e no Rio Grande do Sul. **Revista Indicadores Econômicos FEE**, Porto Alegre: FEE, v. 32, n. 2, 2004, p. 95 a 104.

GAO, B. C; NDWI - A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**. v. 58, 1996, p. 257 a 266.

GUTTERRES, D; FONTANA, D, C. Inferências sobre o calendário agrícola da soja a partir de perfis temporais de NDVI em imagens MODIS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15°. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011, p. 148 a 153.

HUETE, A. R; DIDAN, K; MIURA, T; Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, 2002. p. 195 a 213.

HUETE A; JUSTICE, C; LEEUWEN W; **MODIS vegetation index (MOD13) Algorithm Theoretical Basis.** (Document version 3), 1999, 29 p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA)** Disponível em <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/agric>>. Acesso em: 12/05/2011.

JENSEN, M. E. Water consumption by agricultural plants. In: KOZLOWSKY, T. T. **Water deficits and plant growth**, New York: ACADEMIC PRESS, 1968, p. 1 a 22.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente:** uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos: PARÊNTESE, 2009, 598 p.

JUNGES, A. H. **Modelo agrometeorológico espectral de estimativa de rendimento de grãos de trigo no Rio Grande do Sul.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: UFRGS, 2008, 137 p.

JUSTICE, C.O; TOWNSHEND, J.R.G; VERMOTE, E.F; MASUOKA, E; WOLFE, R.E; SALEOUS, N.; ROY, D.P; MORISETTE, J.T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1, 2002, p. 3 a 15.

KLERING, E. V. **Avaliação do uso de imagens MODIS na modelagem agrometeorológica-espectral de rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul.** 131 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto. Porto Alegre: UFRGS, 2007.

KNYAZIKHIN, Y; MARTONCHIK, J. V; MYNENI, R. B; DINER, D. J; RUNNING, S. W. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. **Journal of Geophysical Research**. v. 103, 1998, p. 32.257 a 32.276.

KÖPPEN, W. **Climatología: con un estudio de los climas de la tierra.** Fondo de Cultura Económica. México: 1948, 479 p.

LILLESAND, T. M; KIEFER, R. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**, 2nd edition. Lake Buena Vista: FORESTRY, 721 p; 2000.

MARTORANO, L. G. **Padrões de resposta da soja a condições hídrica dos sistema solo-planta-atmosfera, observados nos campo e simulados no sistema de suporte à decisão DSSAT.** 151 f. Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 2007.

MATZENAUER, R. et al. Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul. **Boletim FEPAGRO n°10.** Porto Alegre: FEPAGRO, 2002. 105 p.

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

MOREIRA, R. C. **Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação.** 181 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos: INPE, 2000.

MYNENI, B; NEMANI, R.R; RUNNING, S. Estimation of global leaf area index and absorbed fAPAR using radiative transfer models. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, 1997, p. 1380 a 1393.

MYNENI, R; KNYAZIKHIN, Y; GLASSY, J; VOTAVA, P; SHABANOV, N. **User`s Guide fAPAR, LAI (ESDT: MOD15A2) 8-day Composite NASA MODIS Land Algorithm.** 2003, 17 p.

NORMAN, J. M; ANDERSON, M. C; KUSTAS, W. P; FRENCH, A. N; MECIKALSKI, J.; TORN, R.; DIAK, G. R.; SCHMUGGE, T .J. Remote sensing of evapotranspiration for precision-farming applications. **International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, Toulouse: 2003, p. 21 a 25.

PENMAN, H. L. Evaporation: an introductory survey. **Netherland Journal of Agricultural Science**, Wageningen: 1956, p. 9 a 29.

PEREIRA, A; VILA NOVA, N. A; SEDYAMA, G. C. **Evapotranspiração.** Piracicaba: FEALQ, 1997, 183 p.

PONZONI, F. J; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação.** São José dos Campos: PARÊNTESE, 2007, 127 p.

PRIESTLEY, C. H. B; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation, using large scale parameters. **Monthly Weather Review.** v. 100, n. 2, 1972, p. 81 a 92.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos: INPE: 2005, 214 p.

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

RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E; CEBALLOS, J. C. **O Sensor MODIS e Suas Aplicações Ambientais no Brasil.** São José dos Campos: PARÊNTESE; 2007, 417 p.

SANTOS, J. S. **Metodologias para o mapeamento da cultura da soja no estado do Rio Grande do Sul utilizando imagens de sensor de moderada resolução espacial**. 112 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: UFRGS, 2010.

SEDIYAMA, T; PEREIRA, M. G; SEDIYAMA, C. S; GOMES, J. L. P. **Cultura da soja**. Viçosa: UFV, 1996, 75 p.

SEDIYAMA, C. G; RIBEIRO, A; LEAL, B. G. Relações clima-água-plantas. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 27°, Poços de Caldas. **Resumos...** Poços de Caldas: UFLA/SBEA, 1998, p. 46 a 85.

SOUZA, J. L. M. **Modelo para a análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para cultura do cafeeiro**. 253 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Agronomia, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba: USP, 2001.

SOUZA, J. L. M; GOMES, S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decenal em função da capacidade de água disponível no solo. **Acta Scientiarum Agronomy**. Maringá: v. 30, n. 2, 2008, p. 153 a 163.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Publications in Climatology**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955, 104 p.

TUCCI, C. E. M; Estimativa do Volume para Controle da Drenagem no Lote. In: Seminário Nacional de Drenagem Urbana, 3°. **Anais...** Curitiba: ABRH, 1998, p. 155 a 163.

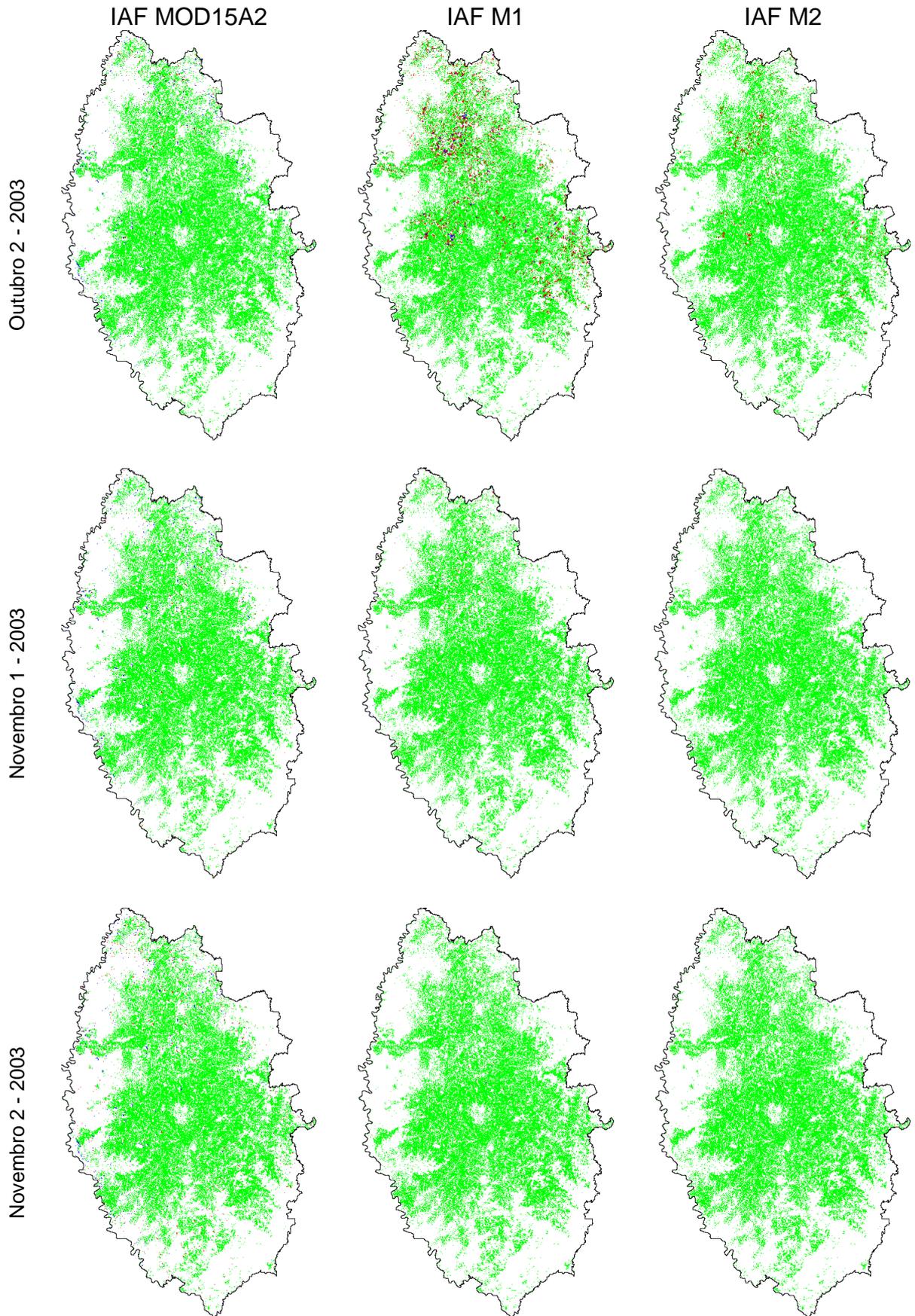
VERMOTE, E. F; SALEOUS, N. Z; JUSTICE, C. O. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: First results. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, 2002, p. 97 a 111.

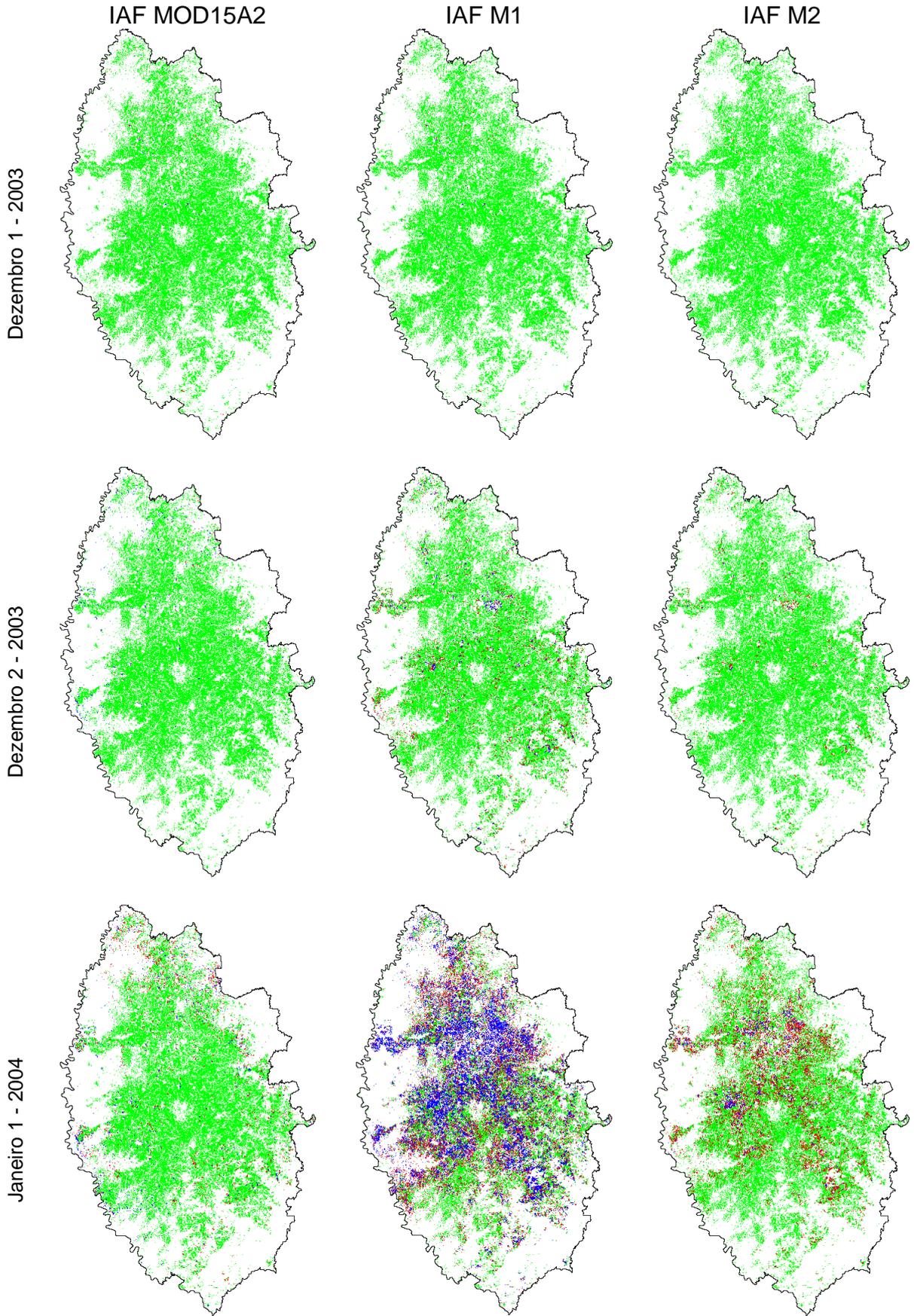
USDA **Boletim de commodities** Disponível em: <http://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/latest.txt>. Acesso em: 12/01/2011.

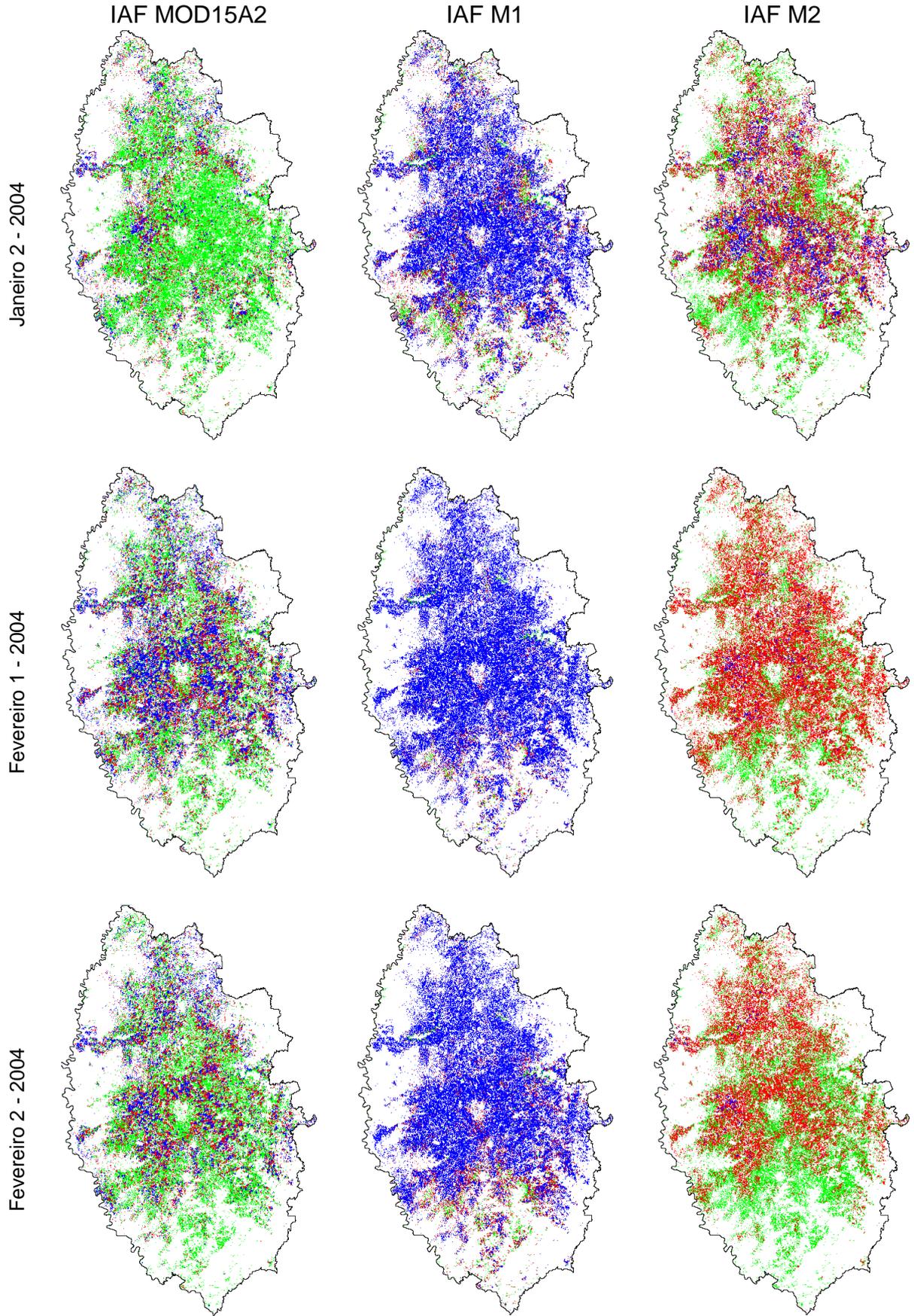
WAGNER, A. P. L; WEBER, E. J; FONTANA, D. C; DUCATI, J. R; KLERING, E. V. Estimativa de área de soja no Rio Grande do Sul utilizando imagens NDVI/MODIS. In: Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, 13. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 457 a 464.

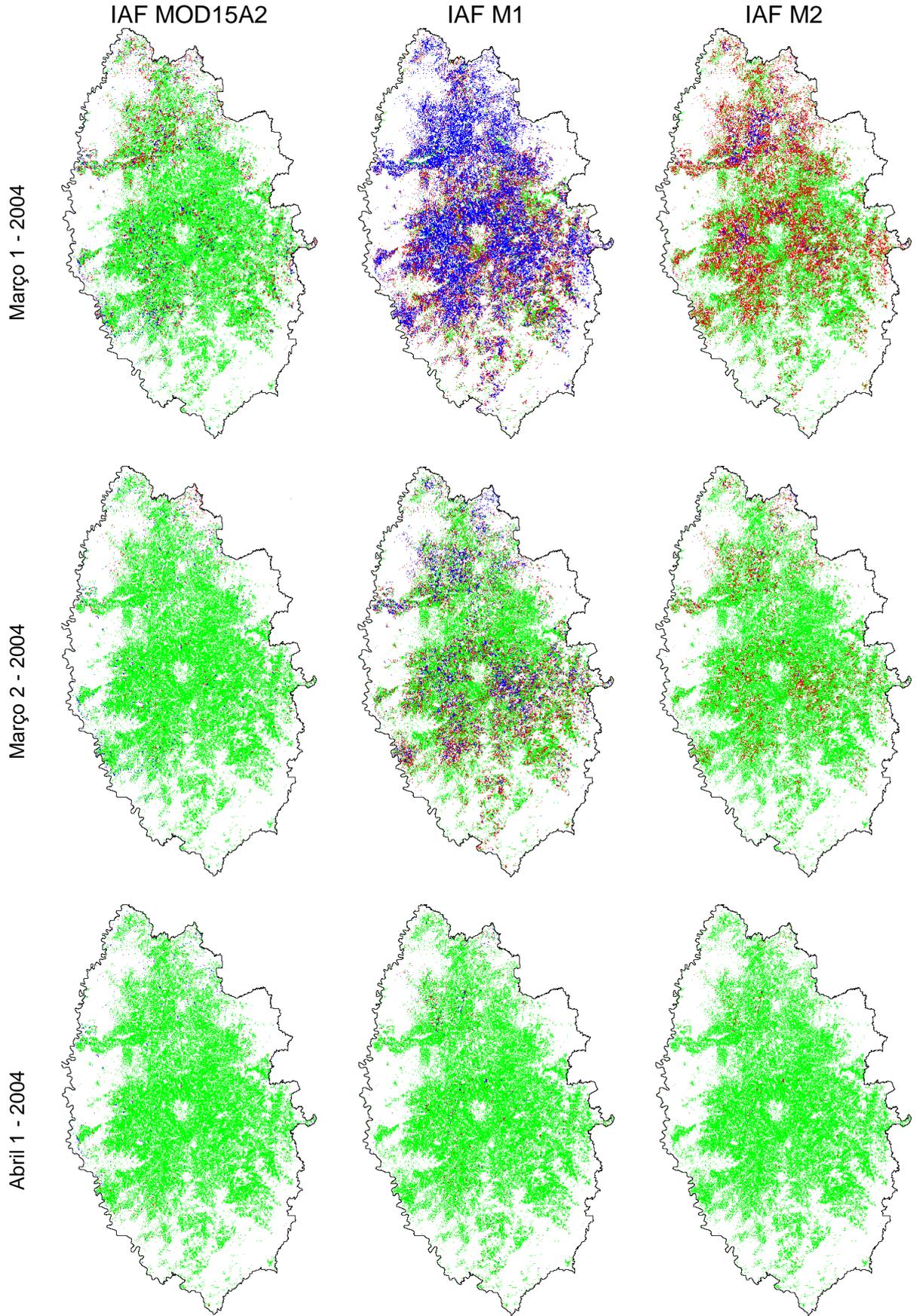
WANG, Y; TIAN, Y; ZHANG, Y; EL-SALEOUS, N; KNYAZIKHIN, Y; VERMOTE, E; MYNENI, R.B. Investigation of product accuracy as a function of input and model uncertainties: case study with SeaWiFS and MODIS LAI/fAPAR Algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 78, 2001, p. 296 a 311.

**Apêndice A – Figuras temáticas do IAF para a safra 2003/04.**

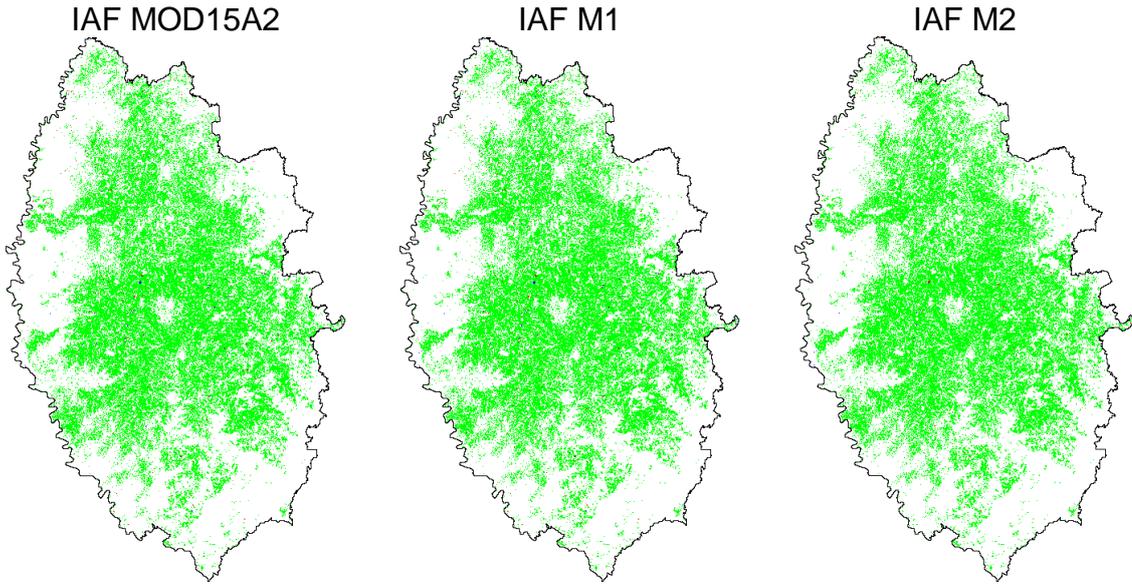








Abril 2 - 2004



Escala do IAF nas imagens:

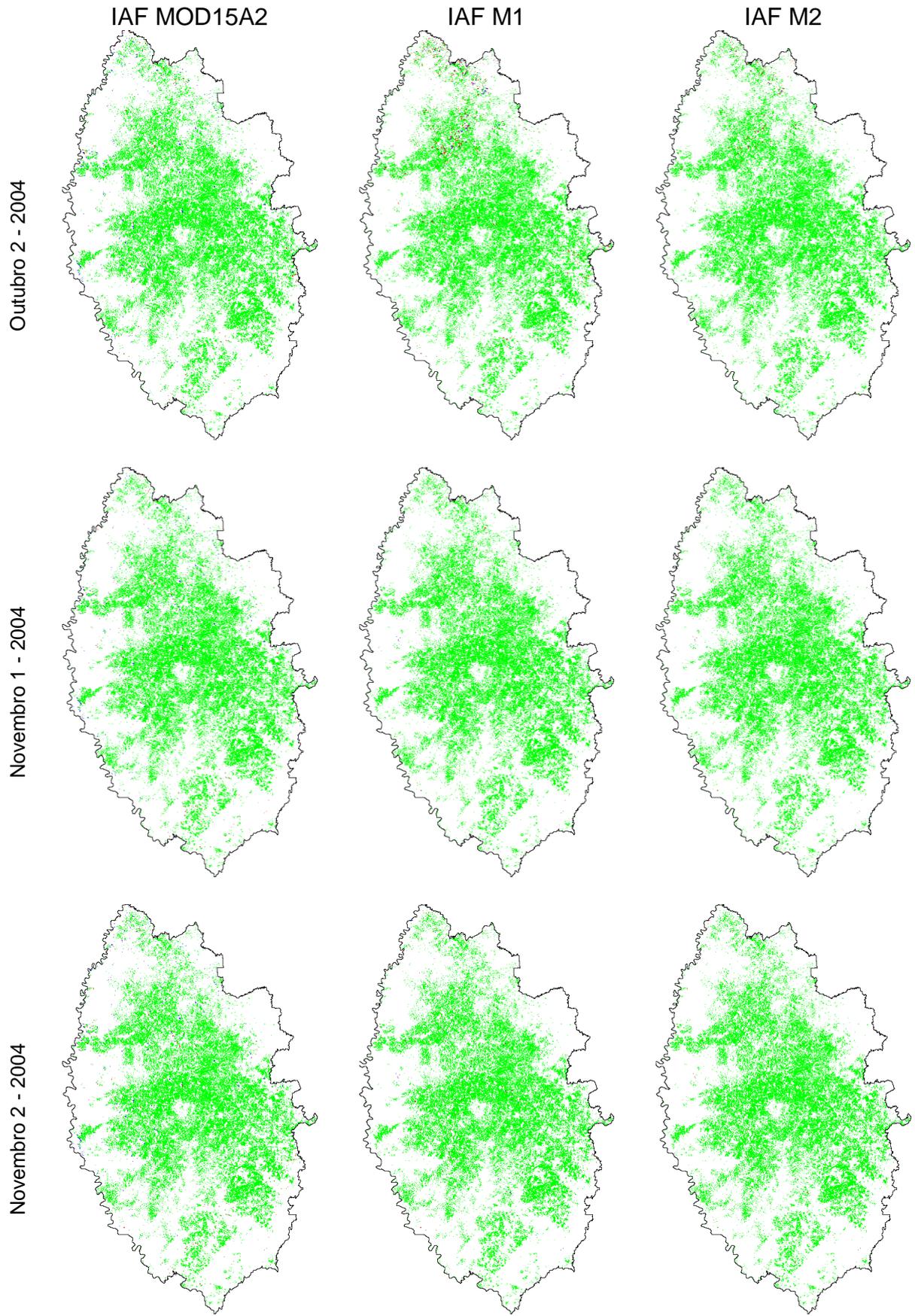
	Verde:	de zero a 2,5
	Vermelho:	de 2,5 a 3,5
	Azul:	de 3,5 a 9,0

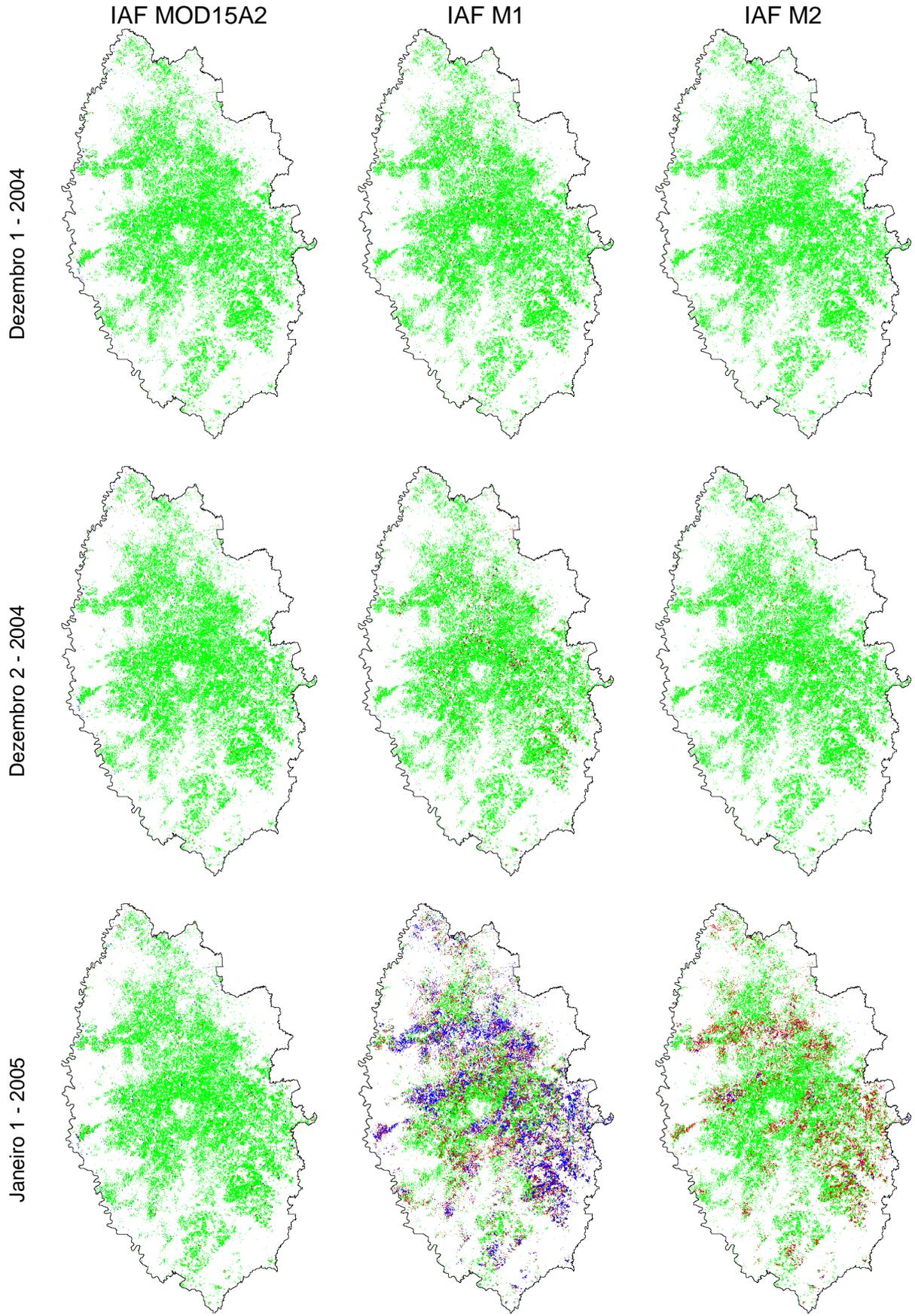
Nota: Devido à escala de representação das figuras não estar adequada para fins cartográficos, as mesmas não foram indicadas. Dessa forma, as figuras expostas neste apêndice têm finalidade ilustrativa.

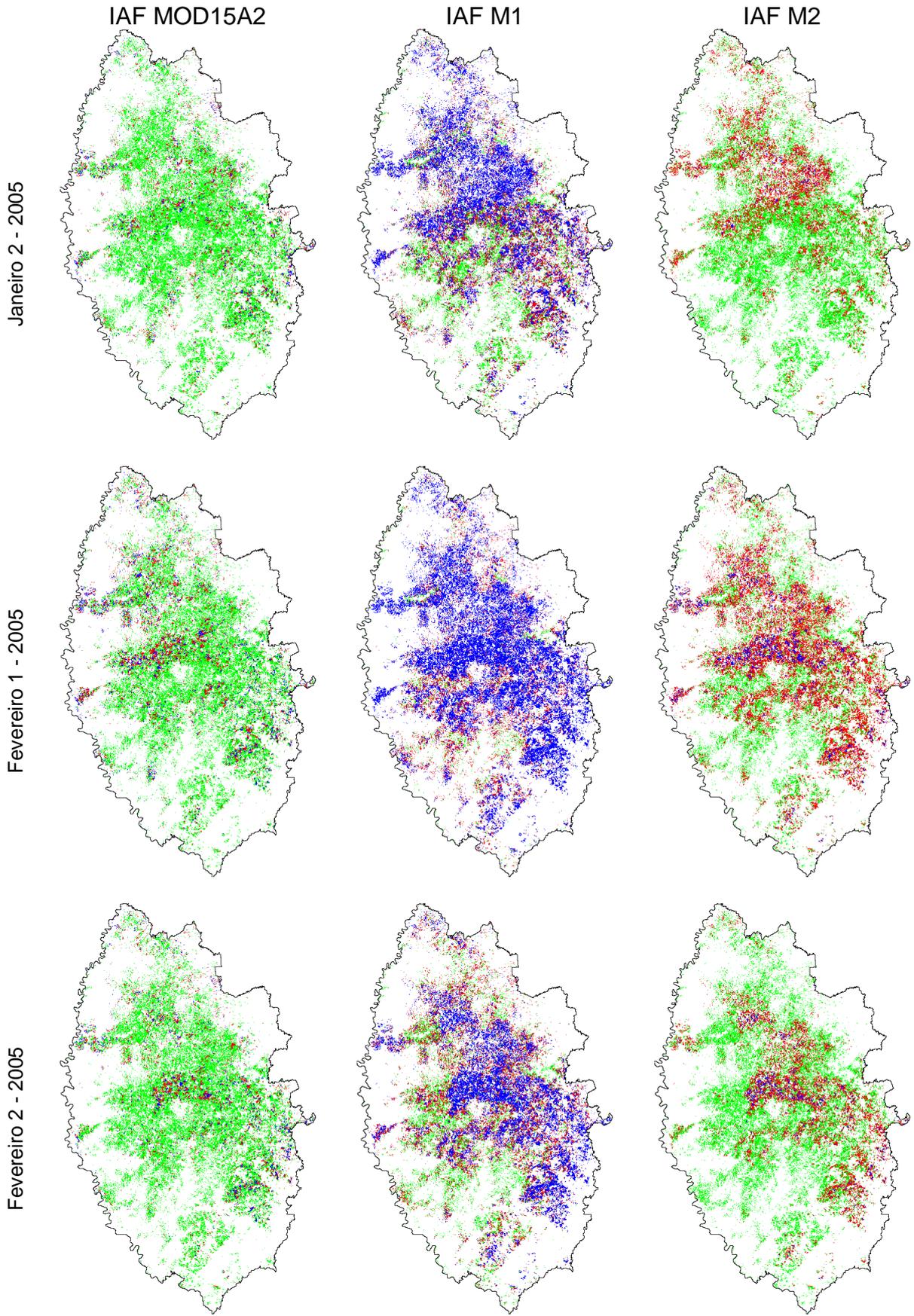


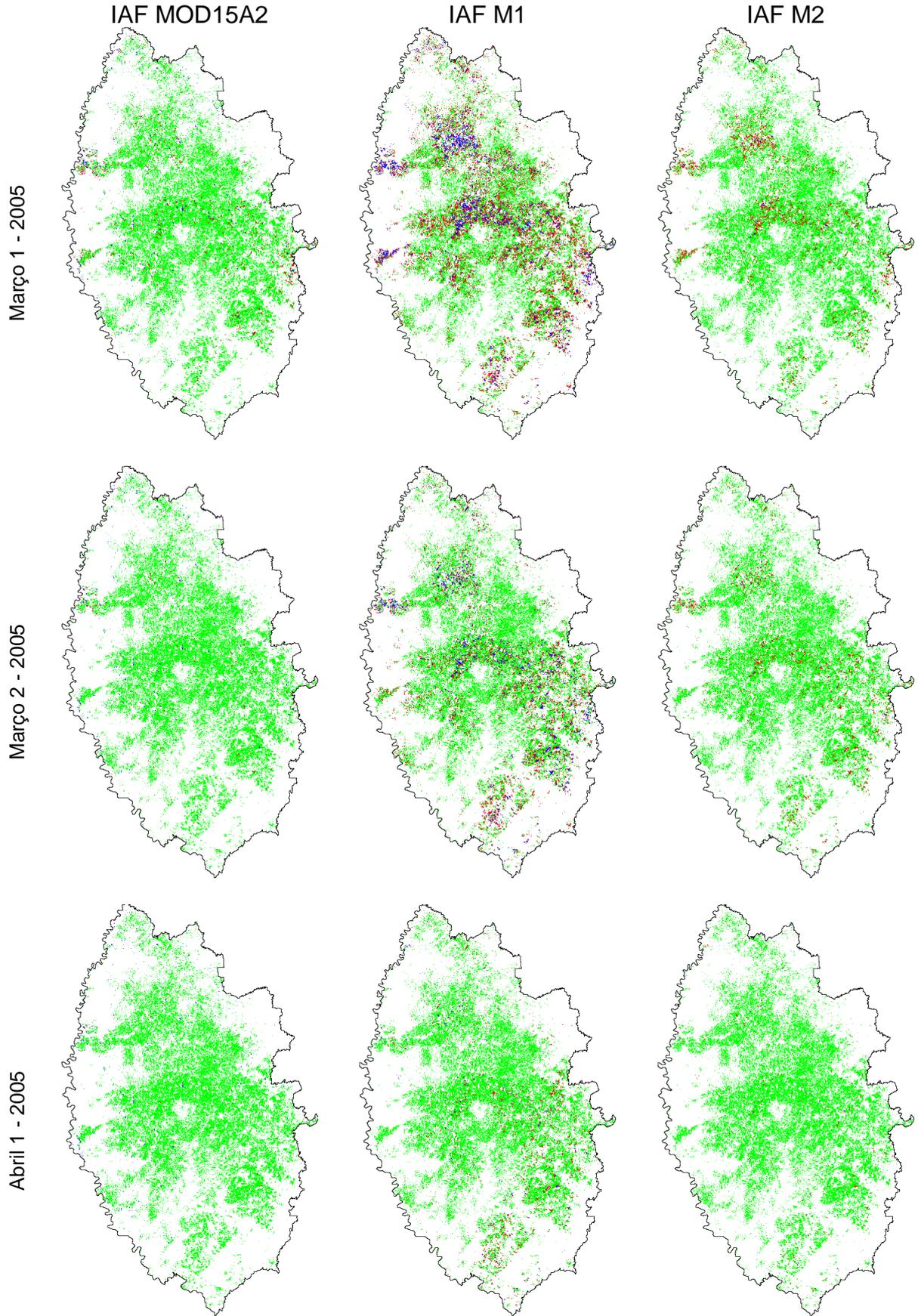
*Localização da área de estudo.*

**Apêndice B – Figuras temáticas do IAF para a safra 2004/05**



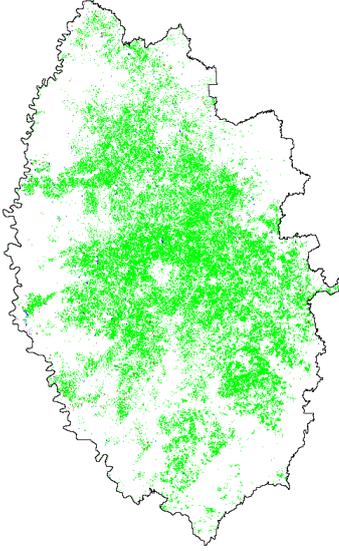




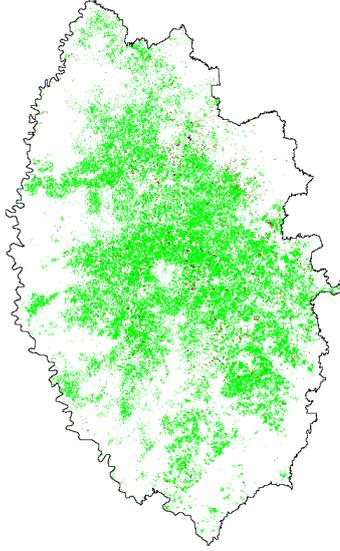


Abril 2 - 2005

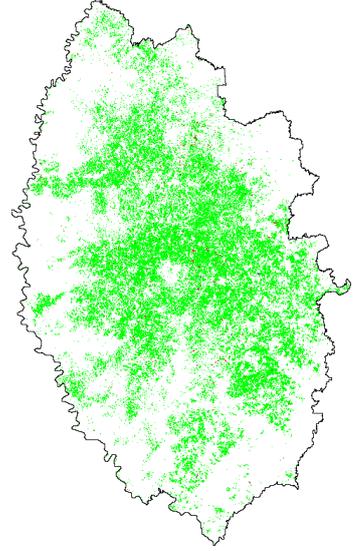
IAF MOD15A2



IAF M1



IAF M2



Escala do IAF nas imagens:

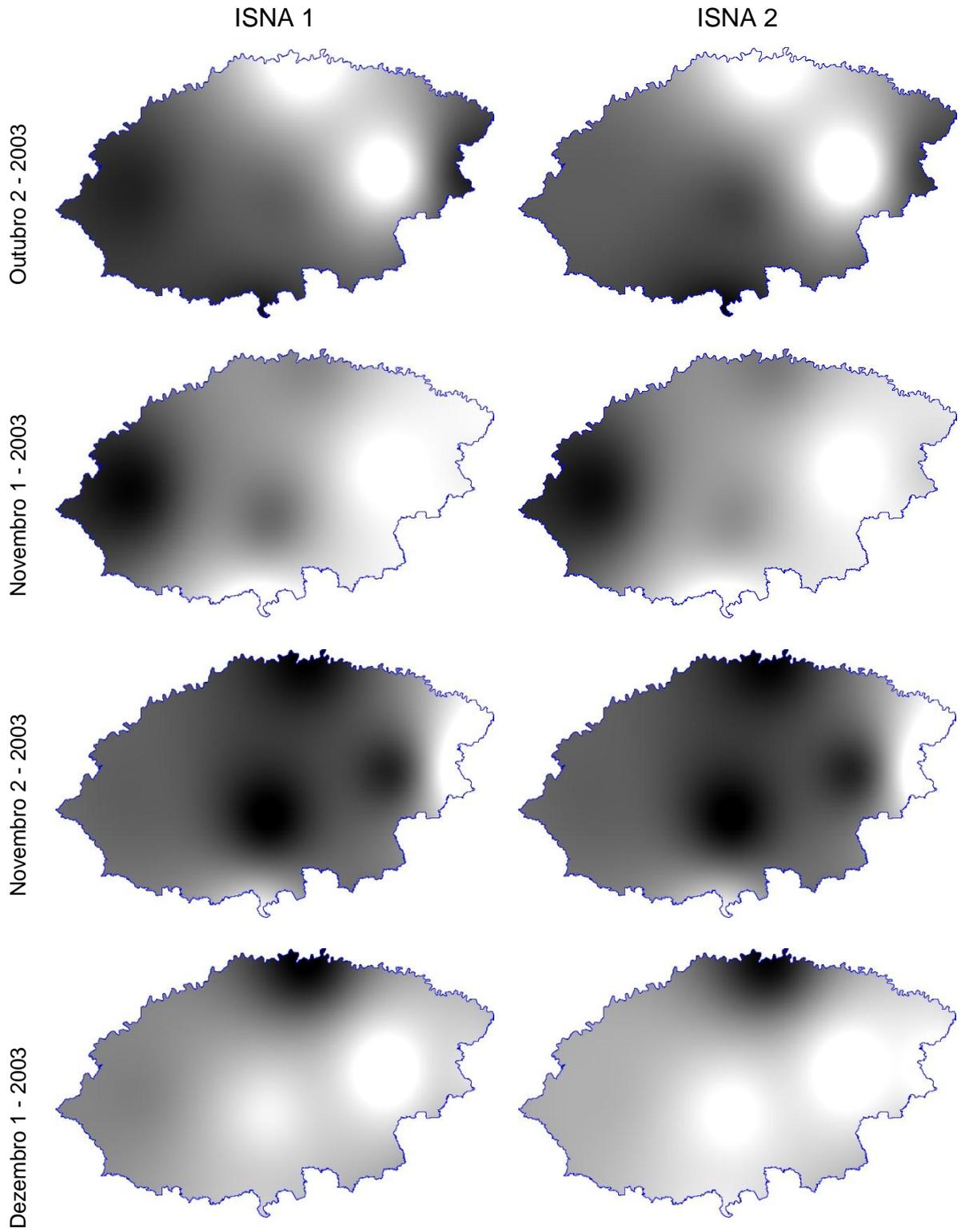
-  Verde: de zero a 2,5
-  Vermelho: de 2,5 a 3,5
-  Azul: de 3,5 a 9,0

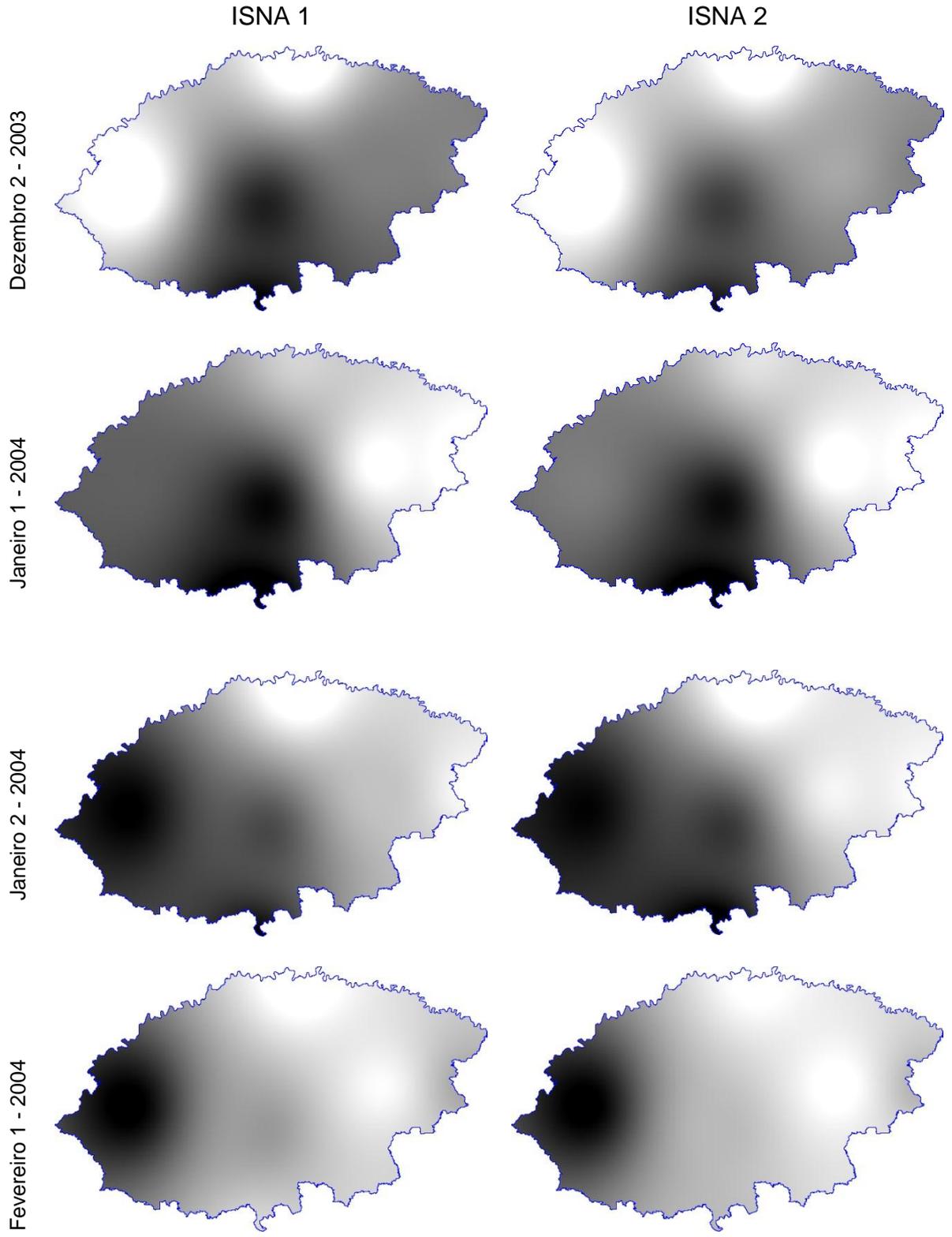
Nota: Devido à escala de representação das figuras não estar adequada para fins cartográficos, as mesmas não foram indicadas. Dessa forma, as figuras expostas neste apêndice têm finalidade ilustrativa.

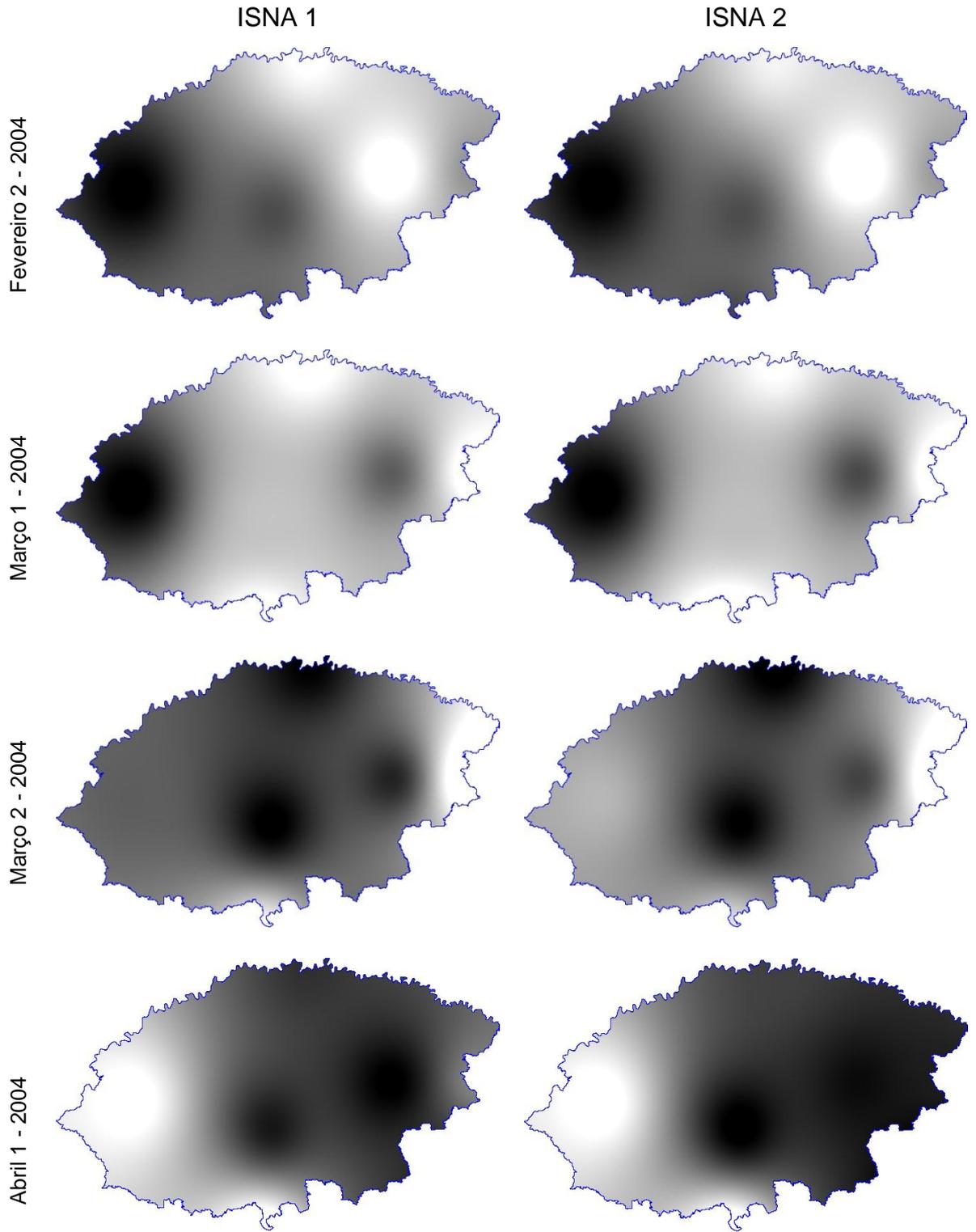


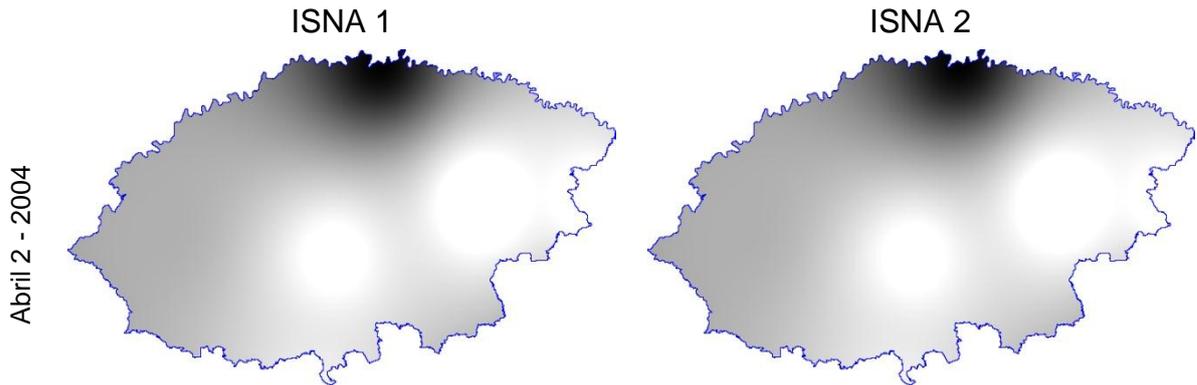
*Localização da área de estudo.*

**Apêndice C – Figuras temáticas do ISNA para a safra 2003/2004.**





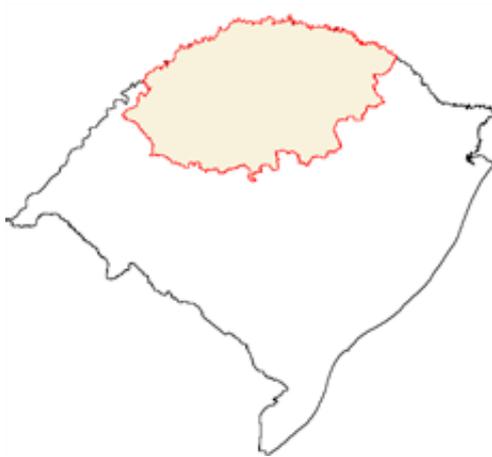




*Escala do ISNA nas imagens:*

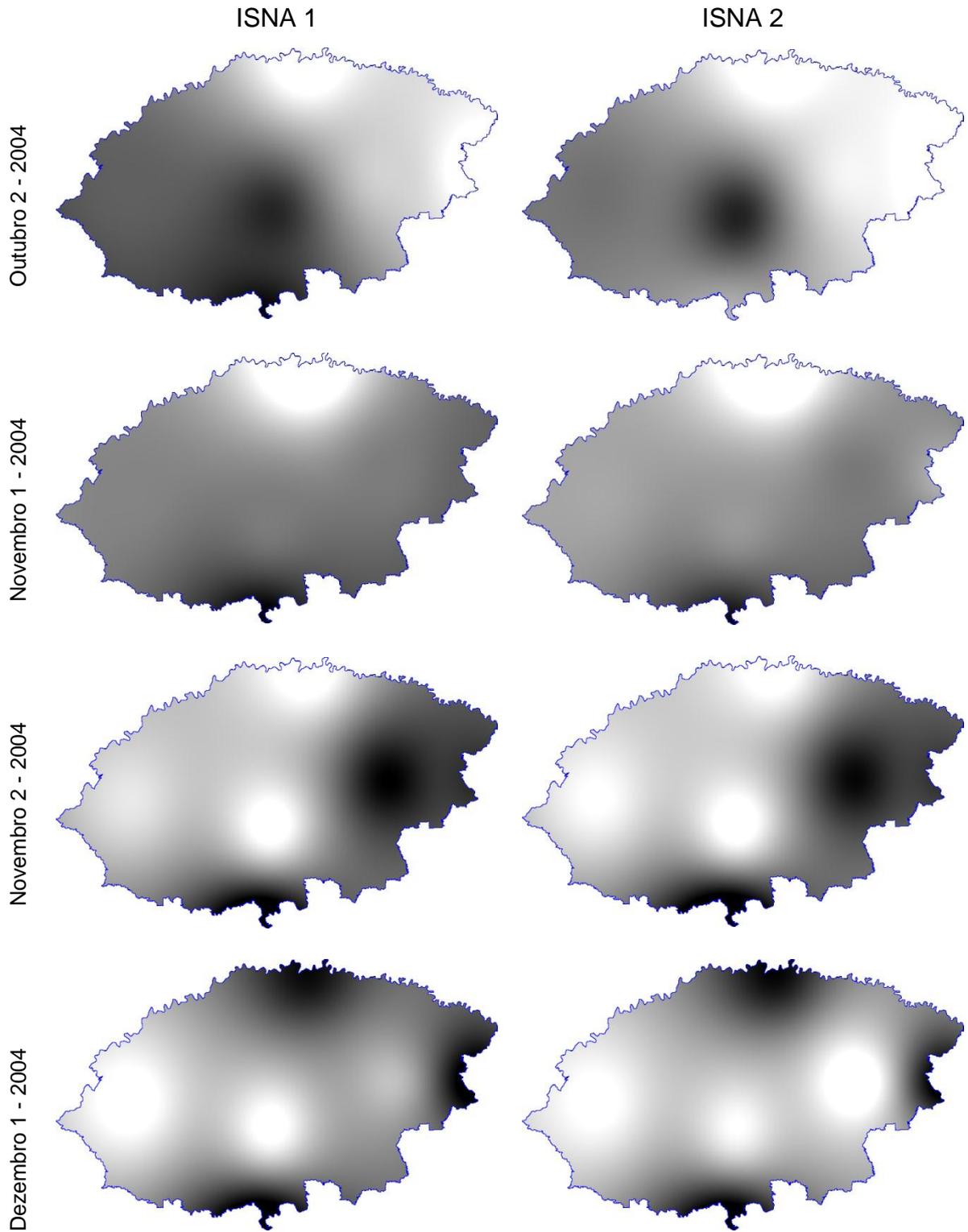


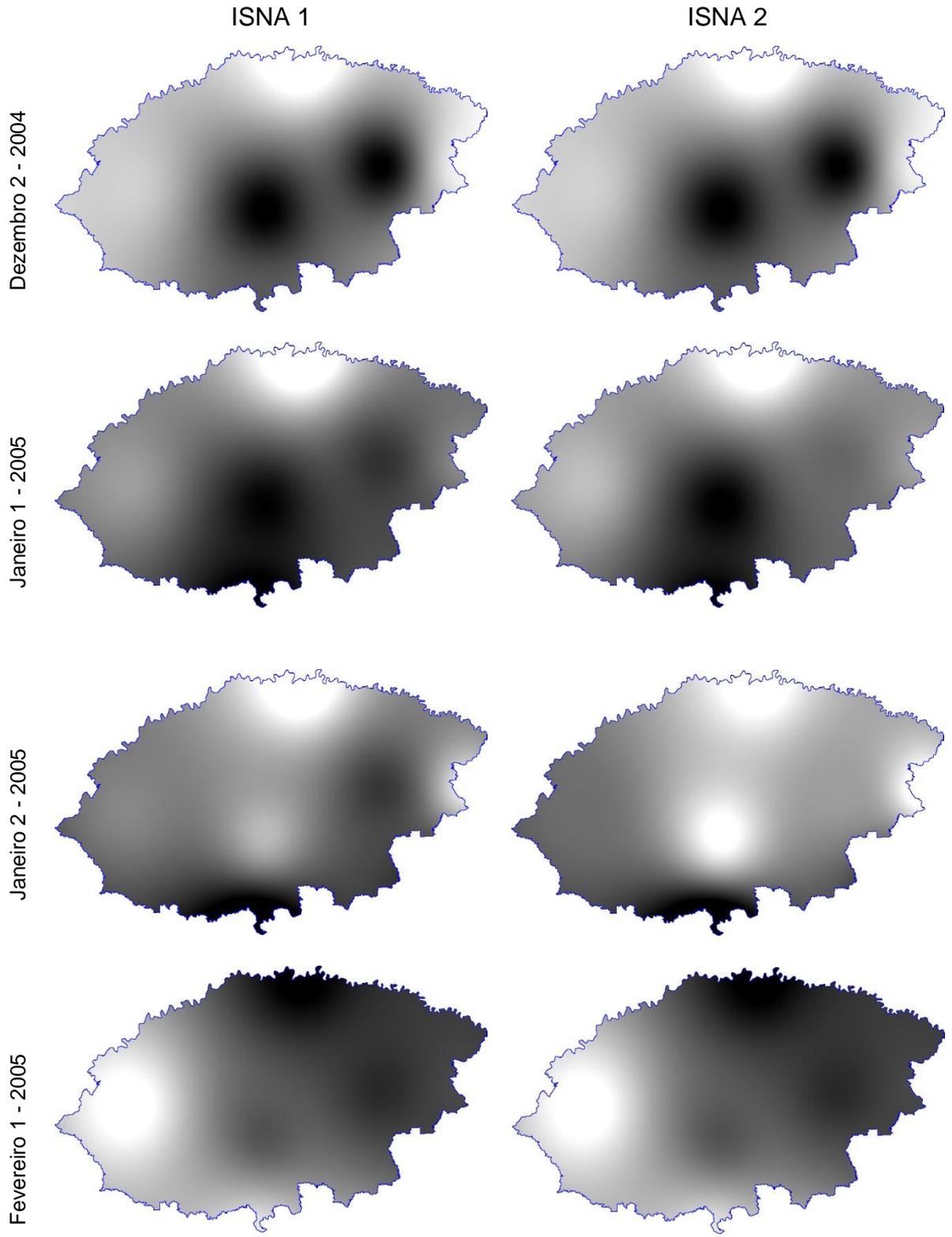
Nota: Devido à escala de representação das figuras não estar adequada para fins cartográficos, as mesmas não foram indicadas. Dessa forma, as figuras expostas neste apêndice têm finalidade ilustrativa.

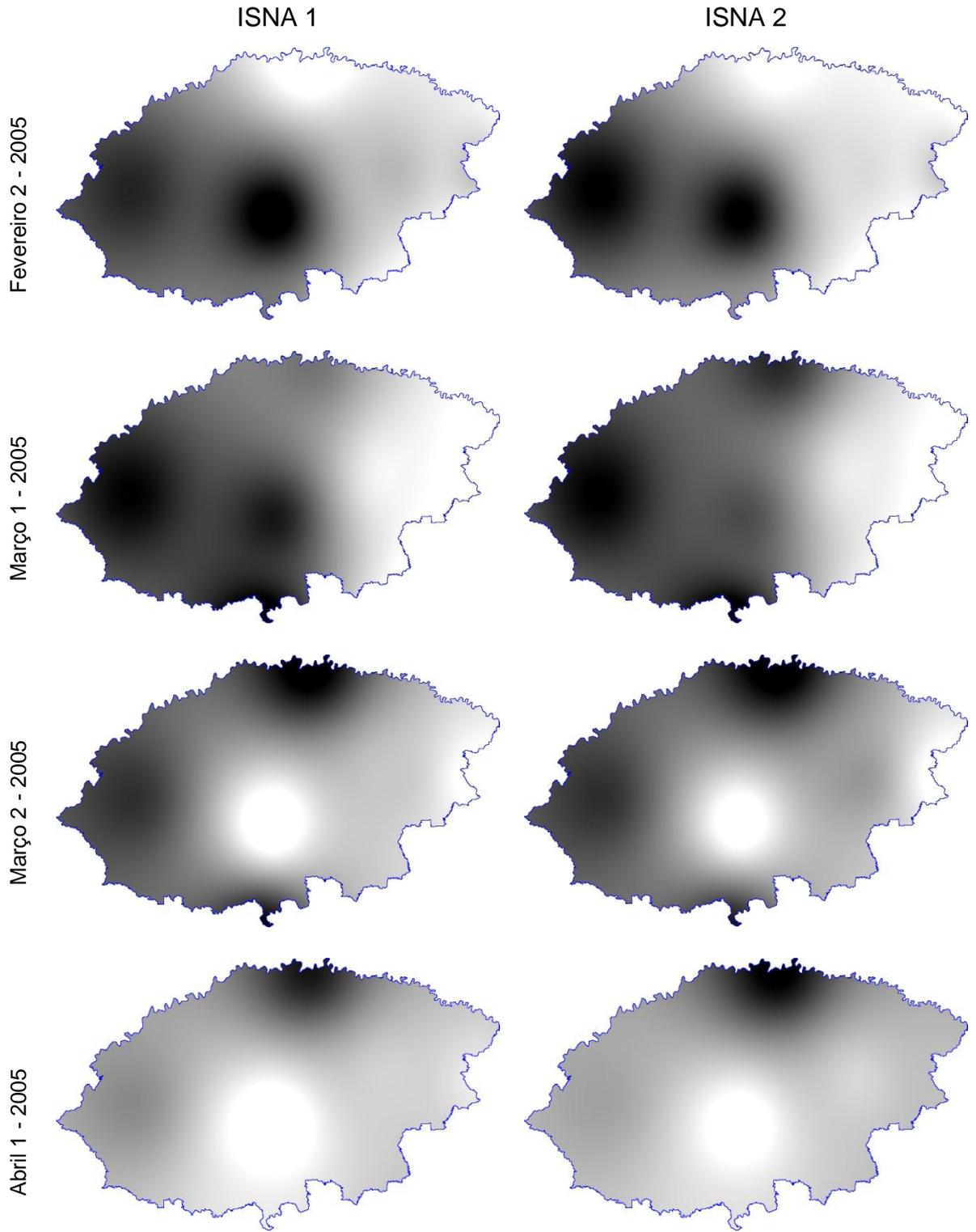


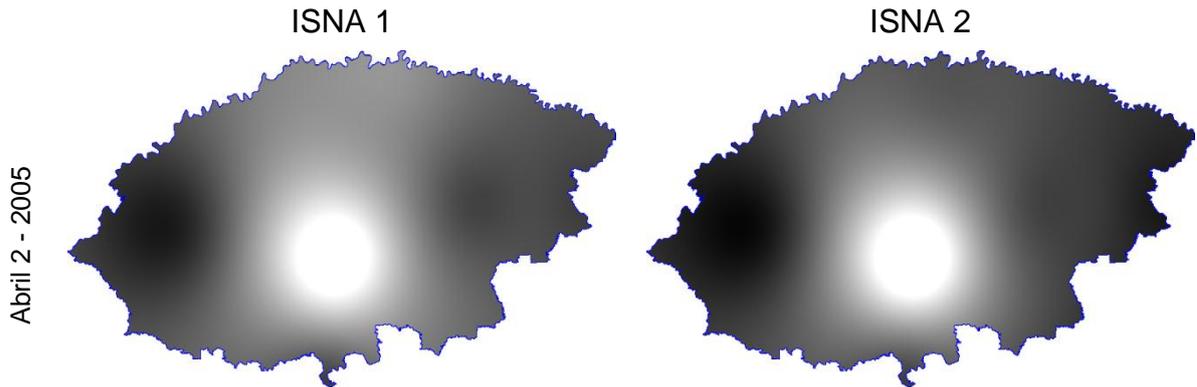
*Localização da área de estudo.*

**Apêndice D – Figuras temáticas do ISNA para a safra 2004/2005.**







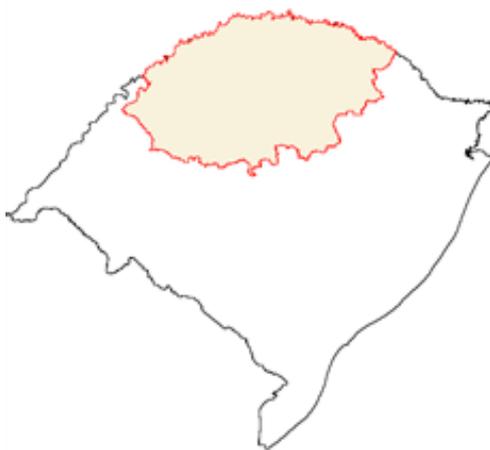


*Escala do ISNA nas imagens:*

0                      0,5                      1,0



Nota: Devido à escala de representação das figuras não estar adequada para fins cartográficos, as mesmas não foram indicadas. Dessa forma, as figuras expostas neste apêndice têm finalidade ilustrativa.



*Localização da área de estudo.*

## Apêndice E – Balanço hídrico meteorológico da soja em Cruz Alta nas safras 2003/04 e 2004/05, utilizando os Kc\_1 e Kc\_2.

### Safra 2003/04 – Kc\_1

Período	ETo	Kc_1	ETc_1	P (mm)	P-ETc_1	NEG	ARM	ΔA	ETr_1	DEF	EXC	ETr/ETc
Out 2	78	0,88	69	147	78	0	75	23	59	0	55	0,85
Nov 1	75	0,84	63	49	-14	-14	62	-13	50	1	0	0,80
Nov 2	85	0,83	71	184	113	0	75	13	65	0	100	0,92
Dez 1	79	0,86	68	261	193	0	75	0	63	0	193	0,92
Dez 2	66	0,87	58	67	9	0	75	0	51	0	9	0,89
Jan 1	103	0,95	98	18	-80	-80	26	-49	48	31	0	0,49
Jan 2	89	1,06	94	52	-42	-122	15	-11	45	31	0	0,48
Fev 1	88	1,14	100	60	-40	-162	9	-6	60	34	0	0,61
Fev 2	104	1,11	115	12	-103	-265	2	-6	27	97	0	0,24
Mar 1	73	1,01	74	44	-30	-295	1	-1	34	29	0	0,46
Mar 2	75	0,94	70	19	-51	-346	1	-1	20	50	0	0,29
Abr 1	60	0,81	48	48	0	0	75	74	26	0	-74	0,55
Abr 2	37	0,78	29	126	97	0	75	0	28	0	97	0,97
<b>TOTAIS</b>			<b>956</b>	<b>1.087</b>					<b>576</b>	<b>273</b>	<b>380</b>	

### Safra 2004/05 – Kc\_1

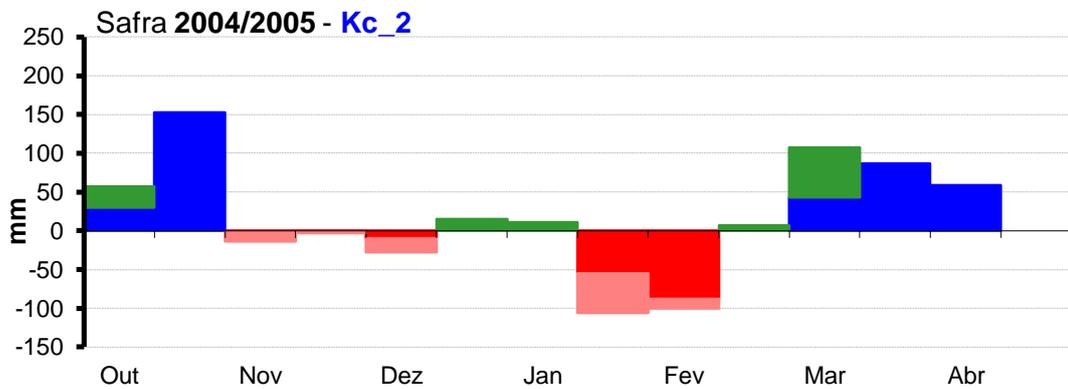
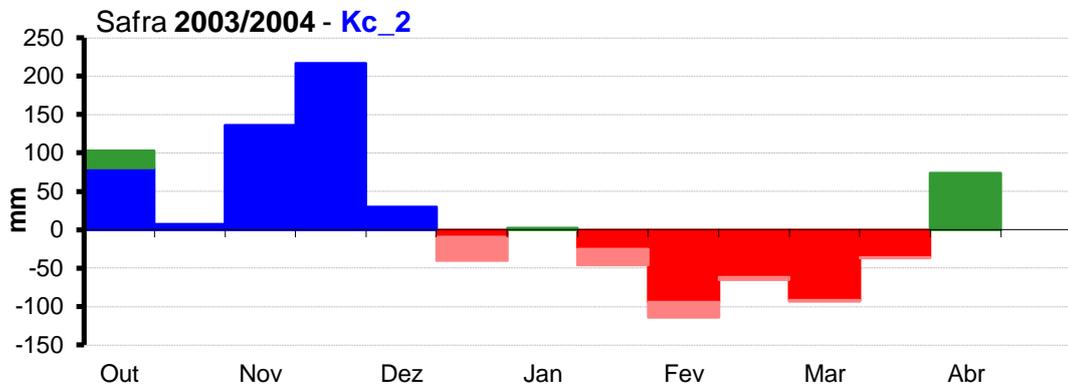
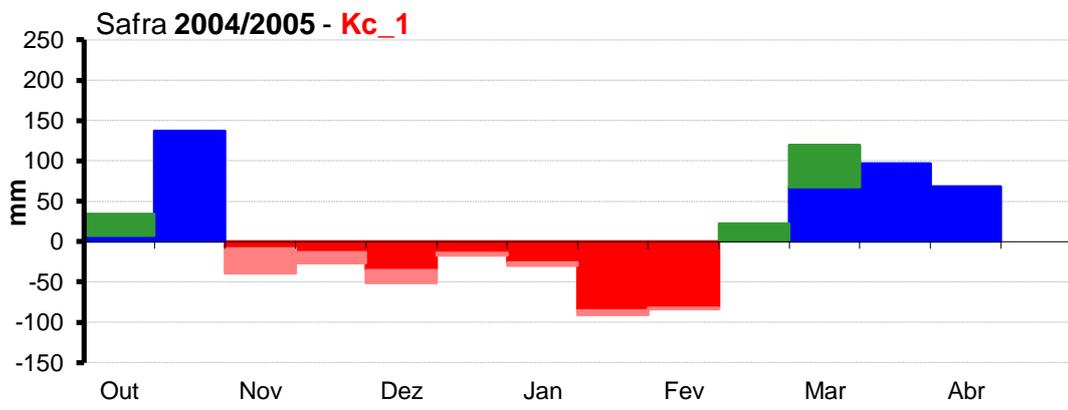
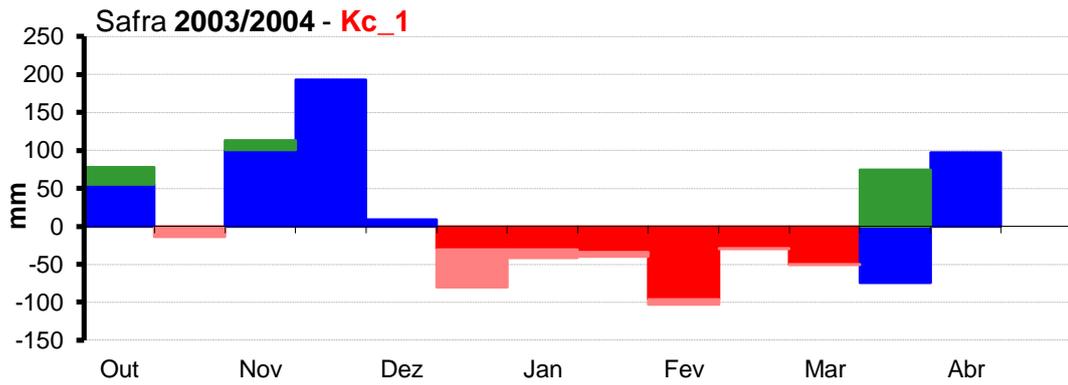
Período	ETo	Kc_1	ETc_1	P (mm)	P-ETc_1	NEG	ARM	ΔA	ETr_1	DEF	EXC	ETr/ETc
Out 2	79	0,85	67	101	34	0	75	27	60	0	7	0,90
Nov 1	62	0,82	51	188	137	0	75	0	48	0	137	0,93
Nov 2	96	0,82	79	40	-39	-39	45	-30	63	9	0	0,80
Dez 1	91	0,82	75	48	-27	-66	31	-13	57	14	0	0,76
Dez 2	80	0,85	68	17	-51	-117	16	-15	32	36	0	0,47
Jan 1	96	0,90	86	69	-17	-134	13	-3	41	14	0	0,48
Jan 2	91	1,01	92	62	-30	-164	8	-4	63	26	0	0,69
Fev 1	90	1,05	94	3	-91	-255	3	-6	44	85	0	0,47
Fev 2	82	1,02	84	0	-84	-339	1	-2	10	82	0	0,12
Mar 1	25	0,93	23	45	22	-89	23	22	10	0	0	0,43
Mar 2	21	0,88	18	138	120	0	75	52	17	0	68	0,94
Abr 1	18	0,85	15	112	97	0	75	0	15	0	97	0,98
Abr 2	14	0,80	11	79	68	0	75	0	11	0	68	0,96
<b>TOTAIS</b>			<b>764</b>	<b>902</b>					<b>471</b>	<b>265</b>	<b>377</b>	

### Safra 2003/04 – Kc\_2

Período	ETo	Kc_2	ETc_2	P (mm)	P-ETc_2	NEG	ARM	ΔA	ETr_2	DEF	EXC	ETr/ETc
Out 2	78	0,56	44	147	103	0	75	23	39	0	80	0,88
Nov 1	75	0,56	42	49	7	0	75	0	38	0	7	0,90
Nov 2	85	0,56	48	184	136	0	75	0	45	0	136	0,95
Dez 1	79	0,56	44	261	217	0	75	0	42	0	217	0,96
Dez 2	66	0,56	37	67	30	0	75	0	35	0	30	0,93
Jan 1	103	0,56	58	18	-40	-40	44	-31	38	9	0	0,67
Jan 2	89	0,56	50	52	2	-37	46	2	35	0	0	0,71
Fev 1	88	1,21	106	60	-46	-83	25	-21	76	25	0	0,72
Fev 2	104	1,21	126	12	-114	-197	5	-19	32	95	0	0,25
Mar 1	73	1,50	109	44	-65	-262	2	-3	42	62	0	0,39
Mar 2	75	1,50	112	19	-93	-355	1	-2	21	91	0	0,19
Abr 1	60	1,41	84	48	-36	-391	0	0	34	36	0	0,41
Abr 2	37	1,41	52	126	74	-1	74	74	43	0	0	0,83
<b>TOTAIS</b>			<b>911</b>	<b>1.087</b>					<b>521</b>	<b>317</b>	<b>470</b>	

### Safra 2004/05 – Kc\_2

Período	ETo	Kc_2	ETc_2	P (mm)	P-ETc_2	NEG	ARM	ΔA	ETr_2	DEF	EXC	ETr/ETc
Out 2	79	0,56	44	101	57	0	75	27	42	0	30	0,94
Nov 1	62	0,56	35	188	153	0	75	0	34	0	153	0,97
Nov 2	96	0,56	54	40	-14	-14	62	-13	47	1	0	0,87
Dez 1	91	0,56	51	48	-3	-17	60	-2	43	1	0	0,84
Dez 2	80	0,56	45	17	-28	-45	41	-19	28	9	0	0,63
Jan 1	96	0,56	54	69	15	-22	56	15	34	0	0	0,63
Jan 2	91	0,56	51	62	11	-8	67	11	45	0	0	0,89
Fev 1	90	1,21	109	3	-106	-114	16	-51	64	55	0	0,59
Fev 2	82	1,21	100	0	-100	-214	4	-12	13	88	0	0,13
Mar 1	25	1,50	38	45	7	-142	11	7	15	0	0	0,41
Mar 2	21	1,50	31	138	107	0	75	64	28	0	43	0,89
Abr 1	18	1,41	25	112	87	0	75	0	25	0	87	0,99
Abr 2	14	1,41	20	79	59	0	75	0	20	0	59	0,98
<b>TOTAIS</b>			<b>657</b>	<b>902</b>					<b>437</b>	<b>154</b>	<b>372</b>	



■ Deficiência ■ Excedente ■ Retirada ■ Reposição

## Apêndice F – Balanço hídrico meteorológico da soja em Iraí nas safras 2003/04 e 2004/05, utilizando os Kc\_1 e Kc\_2.

### Safra 2003/04 – Kc\_1

Período	ETo	Kc_1	ETc_1	P (mm)	P-ETc_1	NEG	ARM	ΔA	ETr_1	DEF	EXC	ETr/ETc
Out 2	68	0,88	60	146	86	0	75	19	54	0	67	0,90
Nov 1	73	0,84	61	101	40	0	75	0	49	0	40	0,81
Nov 2	70	0,83	58	47	-11	-11	65	-10	51	1	0	0,88
Dez 1	70	0,86	60	191	131	0	75	10	51	0	121	0,84
Dez 2	50	0,87	44	149	105	0	75	0	42	0	105	0,96
Jan 1	93	0,95	89	34	-55	-55	36	-39	68	16	0	0,77
Jan 2	78	1,06	82	143	61	0	75	39	65	0	22	0,79
Fev 1	76	1,14	86	90	4	0	75	0	73	0	4	0,86
Fev 2	87	1,11	97	12	-85	-85	24	-51	49	34	0	0,51
Mar 1	66	1,01	67	39	-28	-113	17	-8	36	20	0	0,55
Mar 2	65	0,94	61	16	-45	-158	9	-8	18	37	0	0,29
Abr 1	52	0,81	42	75	33	-43	42	33	24	0	0	0,57
Abr 2	34	0,78	27	97	70	0	75	33	26	0	37	0,98
<b>TOTAIS</b>			<b>833</b>	<b>1.140</b>					<b>607</b>	<b>109</b>	<b>396</b>	

### Safra 2004/05 – Kc\_1

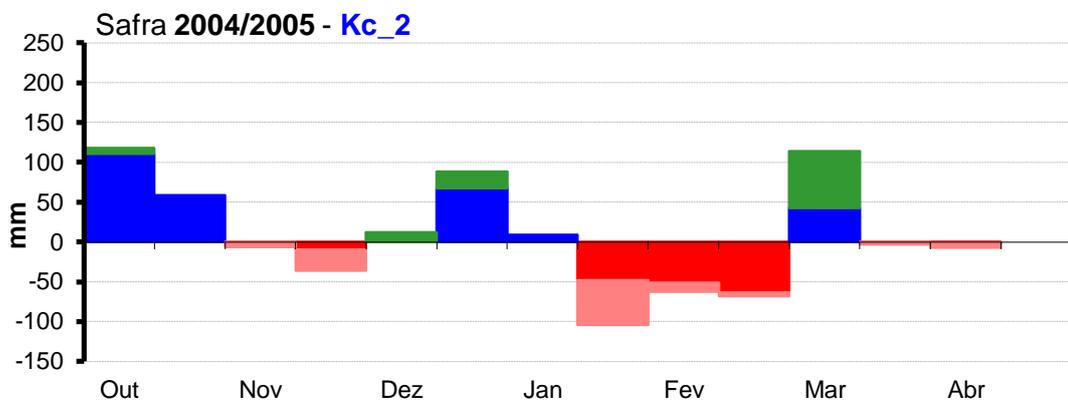
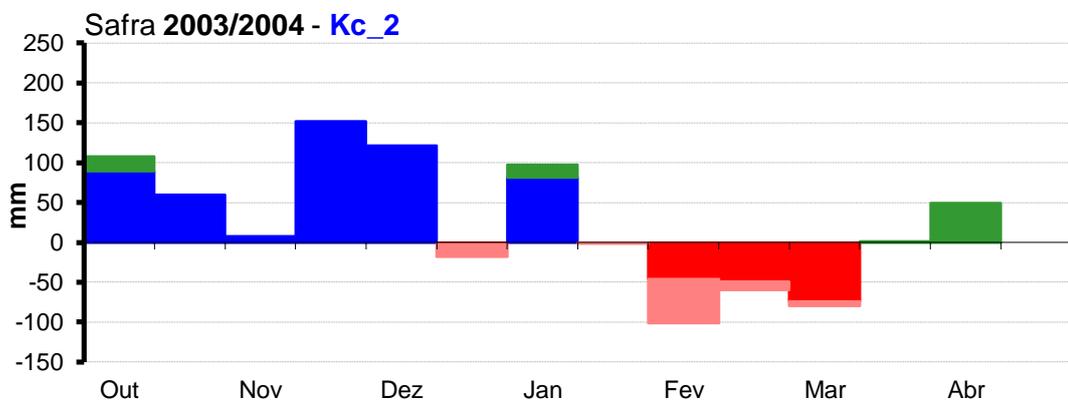
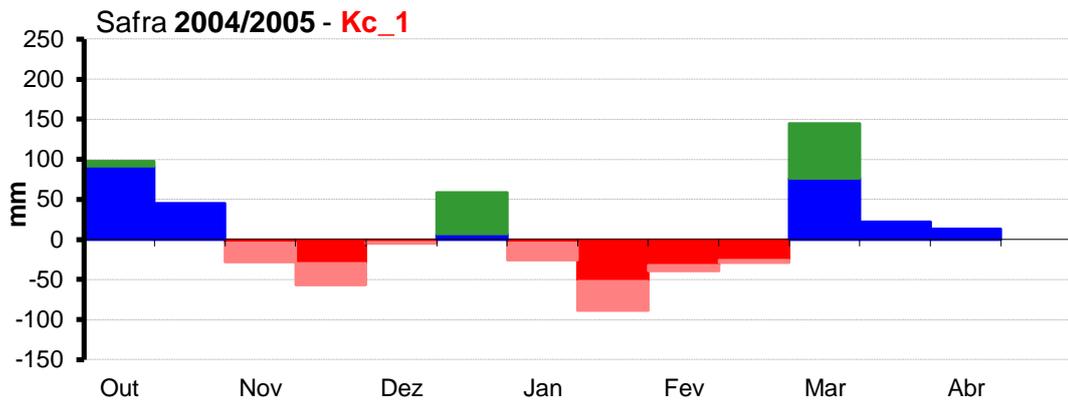
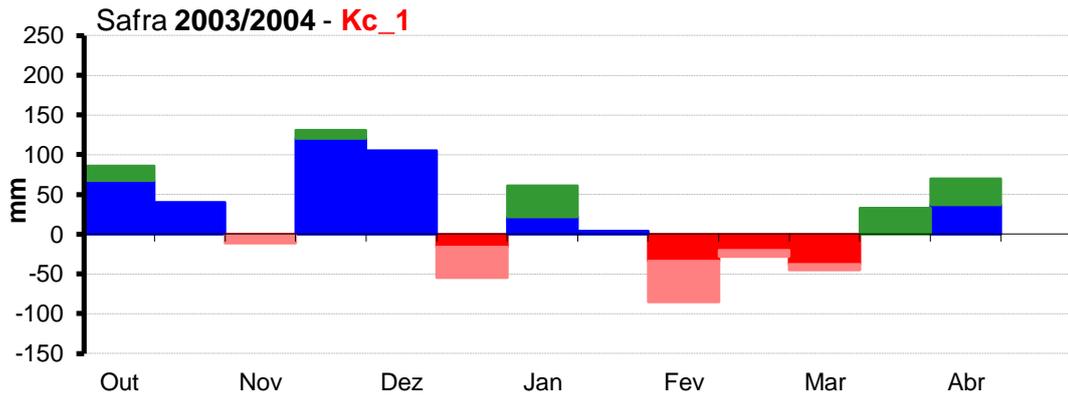
Período	ETo	Kc_1	ETc_1	P (mm)	P-ETc_1	NEG	ARM	ΔA	ETr_1	DEF	EXC	ETr/ETc
Out 2	69	0,85	59	157	98	0	75	7	56	0	91	0,96
Nov 1	54	0,82	44	89	45	0	75	0	43	0	45	0,97
Nov 2	86	0,82	70	42	-28	-28	52	-23	56	5	0	0,79
Dez 1	80	0,82	66	9	-57	-85	24	-27	40	30	0	0,61
Dez 2	62	0,85	52	47	-5	-90	23	-2	31	3	0	0,60
Jan 1	87	0,90	78	137	59	0	75	52	64	0	7	0,81
Jan 2	85	1,01	86	60	-26	-26	53	-22	70	4	0	0,82
Fev 1	87	1,05	91	2	-89	-115	16	-37	35	52	0	0,38
Fev 2	80	1,02	82	43	-39	-154	10	-7	31	32	0	0,38
Mar 1	68	0,93	63	34	-29	-183	7	-3	31	26	0	0,49
Mar 2	52	0,88	46	191	145	0	75	68	34	0	77	0,75
Abr 1	44	0,85	38	60	22	0	75	0	36	0	22	0,97
Abr 2	33	0,80	27	40	13	0	75	0	26	0	13	0,96
<b>TOTAIS</b>			<b>802</b>	<b>911</b>					<b>553</b>	<b>152</b>	<b>254</b>	

### Safra 2003/04 – Kc\_2

Período	ETo	Kc_2	ETc_2	P (mm)	P-ETc_2	NEG	ARM	ΔA	ETr_2	DEF	EXC	ETr/ETc
Out 2	68	0,56	38	146	108	0	75	19	35	0	89	0,92
Nov 1	73	0,56	41	101	60	0	75	0	36	0	60	0,89
Nov 2	70	0,56	39	47	8	0	75	0	37	0	8	0,94
Dez 1	70	0,56	39	191	152	0	75	0	35	0	152	0,91
Dez 2	50	0,56	28	149	121	0	75	0	27	0	121	0,97
Jan 1	93	0,56	52	34	-18	-18	59	-16	47	2	0	0,90
Jan 2	78	0,56	43	143	100	0	75	16	41	0	81	0,94
Fev 1	76	1,21	91	90	-1	-1	74	-1	77	0	0	0,84
Fev 2	87	1,21	106	12	-94	-102	19	-55	49	46	0	0,46
Mar 1	66	1,50	99	39	-60	-162	9	-11	45	49	0	0,45
Mar 2	65	1,50	98	16	-82	-242	3	-6	18	74	0	0,18
Abr 1	52	1,41	74	75	1	-220	4	1	34	0	0	0,46
Abr 2	34	1,41	48	97	49	-26	53	49	46	0	0	0,95
<b>TOTAIS</b>			<b>796</b>	<b>1.140</b>					<b>526</b>	<b>172</b>	<b>511</b>	

### Safra 2004/05 – Kc\_2

Período	ETo	Kc_2	ETc_2	P (mm)	P-ETc_2	NEG	ARM	ΔA	ETr_2	DEF	EXC	ETr/ETc
Out 2	69	0,56	39	157	118	0	75	7	38	0	111	0,97
Nov 1	54	0,56	30	89	59	0	75	0	30	0	59	0,99
Nov 2	86	0,56	48	42	-6	-6	69	-6	42	0	0	0,87
Dez 1	80	0,56	45	9	-36	-42	43	-26	33	10	0	0,73
Dez 2	62	0,56	35	47	12	-23	55	12	26	0	0	0,74
Jan 1	87	0,56	49	137	88	0	75	20	46	0	68	0,94
Jan 2	85	0,56	48	60	12	0	75	0	43	0	9	0,90
Fev 1	87	1,21	106	2	-104	-104	19	-56	45	48	0	0,43
Fev 2	80	1,21	97	43	-54	-166	8	-11	33	51	0	0,34
Mar 1	68	1,50	102	34	-68	-234	3	-5	39	63	0	0,39
Mar 2	52	1,50	78	191	113	0	75	72	47	0	42	0,61
Abr 1	44	1,41	63	60	-3	-3	72	-3	55	0	0	0,88
Abr 2	33	1,41	47	40	-7	-10	66	-6	41	1	0	0,87
<b>TOTAIS</b>			<b>785</b>	<b>911</b>					<b>517</b>	<b>173</b>	<b>289</b>	



■ Deficiência ■ Excedente ■ Retirada ■ Reposição

## Apêndice G – Balanço hídrico meteorológico da soja em Lagoa Vermelha nas safras 2003/04 e 2004/05, utilizando os Kc\_1 e Kc\_2.

### Safra 2003/04 – Kc\_1

Período	ETo	Kc_1	ETc_1	P (mm)	P-ETc_1	NEG	ARM	ΔA	ETr_1	DEF	EXC	ETr/ETc
Out 2	71	0,88	63	113	50	0	75	20	52	0	30	0,84
Nov 1	69	0,84	58	76	18	0	75	0	50	0	18	0,86
Nov 2	77	0,83	64	87	23	0	75	0	59	0	23	0,93
Dez 1	71	0,86	61	164	103	0	75	0	56	0	103	0,91
Dez 2	57	0,87	49	80	31	0	75	0	44	0	31	0,90
Jan 1	86	0,95	82	63	-19	-19	58	-17	71	2	0	0,86
Jan 2	80	1,06	85	67	-18	-37	46	-12	62	6	0	0,74
Fev 1	78	1,14	89	49	-40	-77	27	-19	56	21	0	0,62
Fev 2	89	1,11	98	1	-97	-174	7	-19	33	78	0	0,33
Mar 1	67	1,01	68	58	-10	-184	6	-1	38	9	0	0,57
Mar 2	60	0,94	57	43	-14	-198	5	-1	34	13	0	0,60
Abr 1	52	0,81	42	54	12	-110	17	12	27	0	0	0,64
Abr 2	37	0,78	29	102	73	0	75	58	28	0	15	0,97
<b>TOTAIS</b>			<b>845</b>	<b>957</b>					<b>611</b>	<b>128</b>	<b>221</b>	

### Safra 2004/05 – Kc\_1

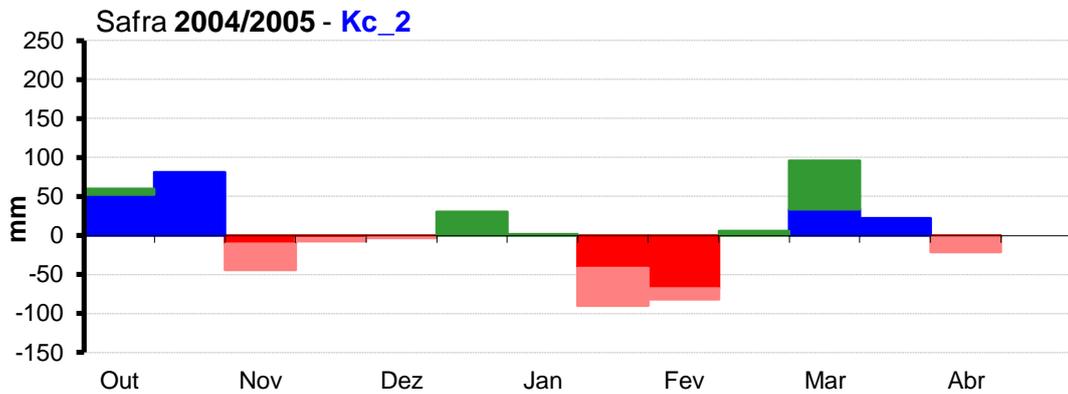
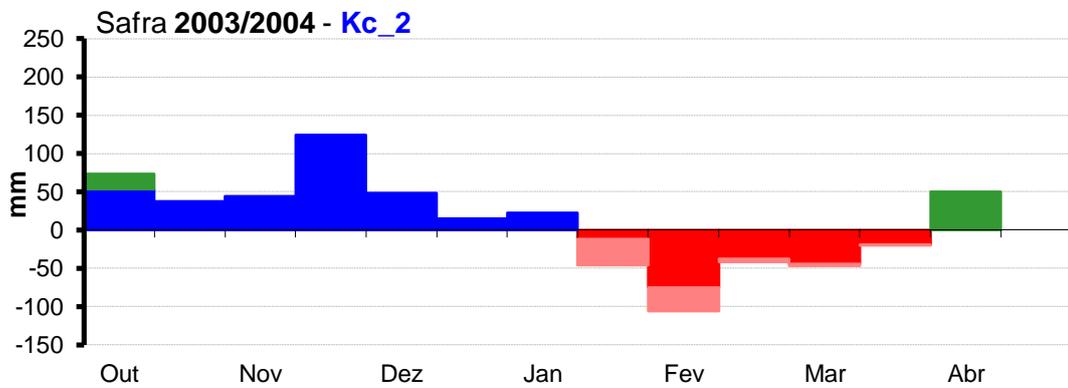
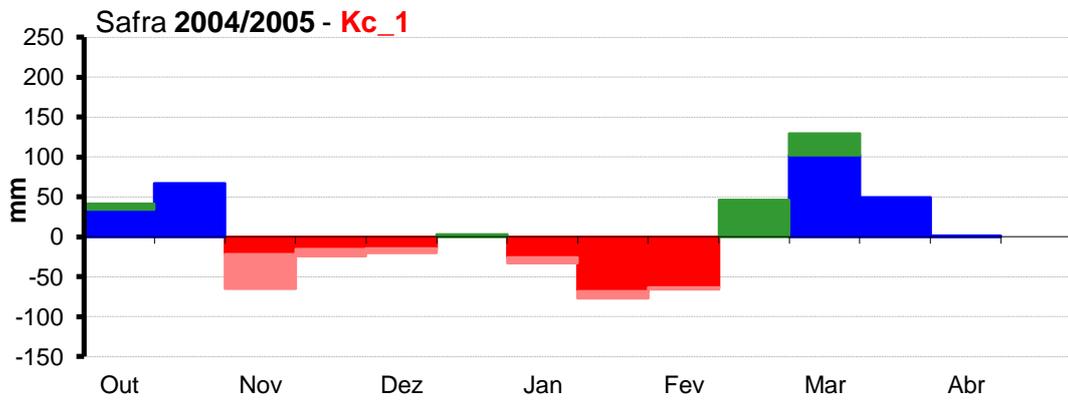
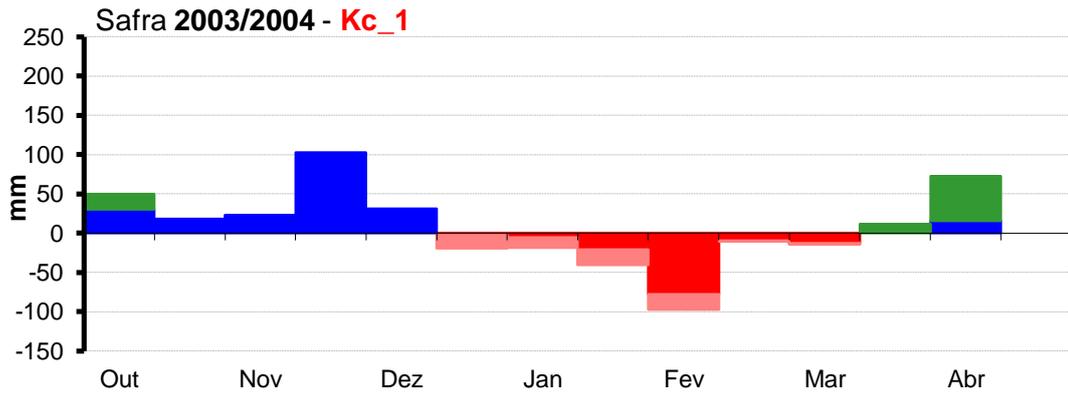
Período	ETo	Kc_1	ETc_1	P (mm)	P-ETc_1	NEG	ARM	ΔA	ETr_1	DEF	EXC	ETr/ETc
Out 2	68	0,85	57	98	41	0	75	7	54	0	34	0,95
Nov 1	55	0,82	45	112	67	0	75	0	42	0	67	0,93
Nov 2	82	0,82	67	2	-65	-65	32	-43	43	22	0	0,64
Dez 1	66	0,82	54	30	-24	-89	23	-9	31	15	0	0,58
Dez 2	58	0,85	50	30	-20	-109	18	-5	29	15	0	0,58
Jan 1	79	0,90	71	74	3	-97	21	3	45	0	0	0,63
Jan 2	77	1,01	78	45	-33	-130	13	-7	58	26	0	0,74
Fev 1	81	1,05	85	8	-77	-207	5	-8	39	69	0	0,46
Fev 2	78	1,02	79	13	-66	-273	2	-3	23	63	0	0,29
Mar 1	70	0,93	65	111	46	-34	48	46	37	0	0	0,56
Mar 2	53	0,88	46	175	129	0	75	27	43	0	102	0,93
Abr 1	46	0,85	39	88	49	0	75	0	39	0	49	0,98
Abr 2	36	0,80	29	30	1	0	75	0	27	0	1	0,91
<b>TOTAIS</b>			<b>766</b>	<b>816</b>					<b>510</b>	<b>209</b>	<b>253</b>	

### Safra 2003/04 – Kc\_2

Período	ETo	Kc_2	ETc_2	P (mm)	P-ETc_2	NEG	ARM	ΔA	ETr_2	DEF	EXC	ETr/ETc
Out 2	71	0,56	40	113	73	0	75	20	35	0	53	0,88
Nov 1	69	0,56	39	76	37	0	75	0	35	0	37	0,92
Nov 2	77	0,56	43	87	44	0	75	0	41	0	44	0,95
Dez 1	71	0,56	40	164	124	0	75	0	38	0	124	0,96
Dez 2	57	0,56	32	80	48	0	75	0	30	0	48	0,94
Jan 1	86	0,56	48	63	15	0	75	0	46	0	15	0,95
Jan 2	80	0,56	45	67	22	0	75	0	40	0	22	0,90
Fev 1	78	1,21	95	49	-46	-46	41	-34	67	12	0	0,70
Fev 2	89	1,21	107	1	-106	-152	10	-31	37	75	0	0,34
Mar 1	67	1,50	100	58	-42	-194	6	-4	50	38	0	0,50
Mar 2	60	1,50	90	43	-47	-241	3	-3	41	44	0	0,45
Abr 1	52	1,41	74	54	-20	-261	2	-1	32	19	0	0,44
Abr 2	37	1,41	52	102	50	-27	52	50	48	0	0	0,93
<b>TOTAIS</b>			<b>805</b>	<b>957</b>					<b>541</b>	<b>188</b>	<b>343</b>	

### Safra 2004/05 – Kc\_2

Período	ETo	Kc_2	ETc_2	P (mm)	P-ETc_2	NEG	ARM	ΔA	ETr_2	DEF	EXC	ETr/ETc
Out 2	68	0,56	38	98	60	0	75	7	37	0	53	0,97
Nov 1	55	0,56	31	112	81	0	75	0	30	0	81	0,97
Nov 2	82	0,56	46	2	-44	-44	42	-33	35	11	0	0,76
Dez 1	66	0,56	37	30	-7	-51	38	-4	26	3	0	0,72
Dez 2	58	0,56	33	30	-3	-54	37	-1	25	2	0	0,77
Jan 1	79	0,56	44	74	30	-9	67	30	35	0	0	0,80
Jan 2	77	0,56	43	45	2	-7	69	2	39	0	0	0,90
Fev 1	81	1,21	98	8	-90	-97	21	-48	52	42	0	0,53
Fev 2	78	1,21	95	13	-82	-179	7	-14	26	68	0	0,28
Mar 1	70	1,50	105	111	6	-132	13	6	55	0	0	0,52
Mar 2	53	1,50	79	175	96	0	75	62	70	0	34	0,89
Abr 1	46	1,41	66	88	22	0	75	0	63	0	22	0,96
Abr 2	36	1,41	51	30	-21	-21	57	-18	43	3	0	0,84
<b>TOTAIS</b>			<b>765</b>	<b>816</b>					<b>536</b>	<b>129</b>	<b>190</b>	



■ Deficiência ■ Excedente ■ Retirada ■ Reposição

## Apêndice H – Balanço hídrico meteorológico da soja em Passo Fundo nas safras 2003/04 e 2004/05, utilizando os Kc\_1 e Kc\_2.

### Safra 2003/04 – Kc\_1

Período	ETo	Kc_1	ETc_1	P (mm)	P-ETc_1	NEG	ARM	ΔA	ETr_1	DEF	EXC	ETr/ETc
Out 2	67	0,88	59	120	61	0	75	17	53	0	44	0,89
Nov 1	66	0,84	56	59	3	0	75	0	49	0	3	0,88
Nov 2	74	0,83	62	109	47	0	75	0	57	0	47	0,93
Dez 1	69	0,86	59	300	241	0	75	0	55	0	241	0,94
Dez 2	56	0,87	49	92	43	0	75	0	44	0	43	0,90
Jan 1	90	0,95	86	40	-46	-46	41	-34	72	12	0	0,84
Jan 2	80	1,06	84	57	-27	-73	28	-12	55	15	0	0,65
Fev 1	79	1,14	90	120	30	-19	58	30	72	0	0	0,79
Fev 2	91	1,11	101	8	-93	-112	17	-41	55	52	0	0,54
Mar 1	61	1,01	62	17	-45	-157	9	-8	21	37	0	0,34
Mar 2	63	0,94	59	14	-45	-202	5	-4	19	41	0	0,33
Abr 1	51	0,81	41	69	28	-61	33	28	22	0	0	0,52
Abr 2	32	0,78	25	183	158	0	75	42	24	0	116	0,97
<b>TOTAIS:</b>			<b>833</b>	<b>1.188</b>					<b>598</b>	<b>156</b>	<b>494</b>	

### Safra 2004/05 – Kc\_1

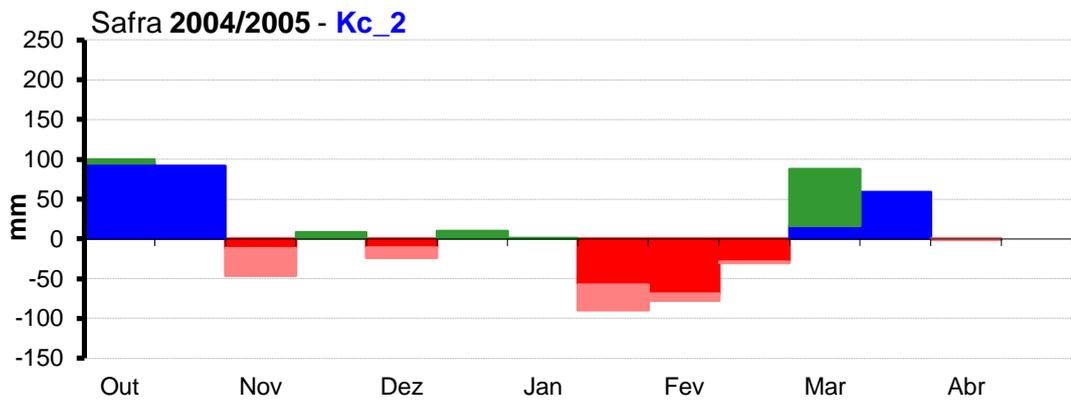
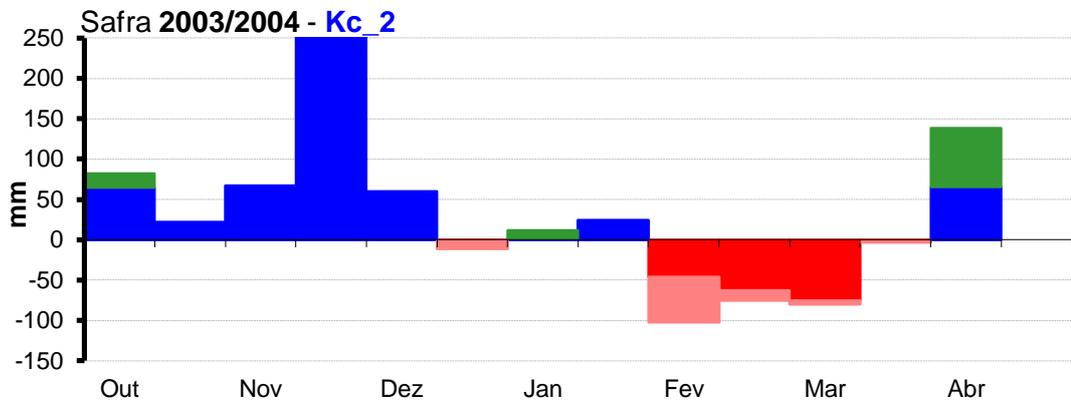
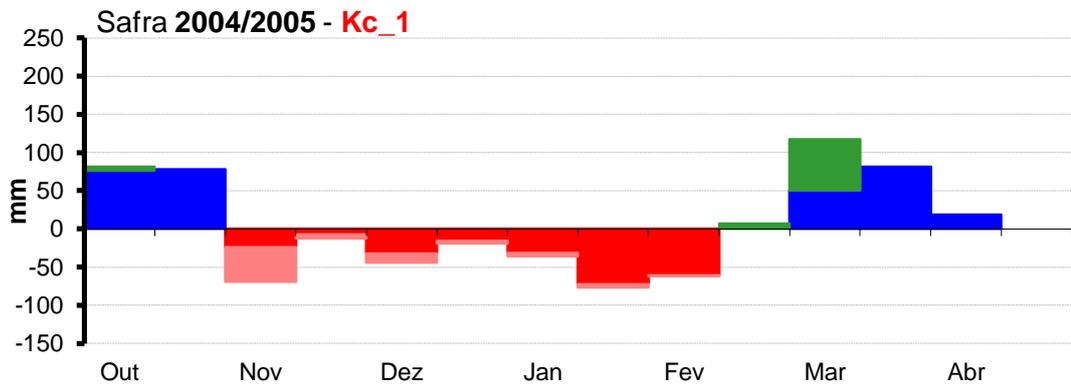
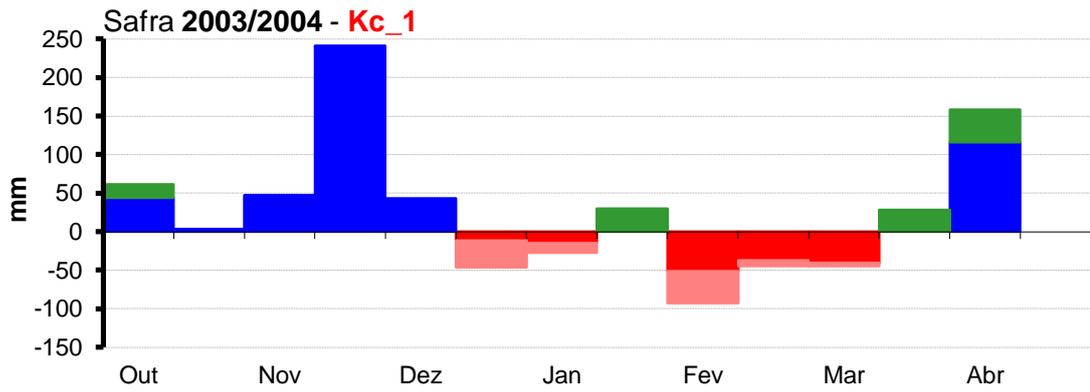
Período	ETo	Kc_1	ETc_1	P (mm)	P-ETc_1	NEG	ARM	ΔA	ETr_1	DEF	EXC	ETr/ETc
Out 2	68	0,85	57	138	81	0	75	5	53	0	76	0,93
Nov 1	53	0,82	43	121	78	0	75	0	40	0	78	0,93
Nov 2	89	0,82	73	4	-69	-69	30	-45	45	24	0	0,62
Dez 1	77	0,82	63	51	-12	-81	25	-4	45	8	0	0,71
Dez 2	69	0,85	58	14	-44	-125	14	-11	27	33	0	0,47
Jan 1	86	0,90	77	58	-19	-144	11	-3	41	16	0	0,53
Jan 2	82	1,01	83	47	-36	-180	7	-4	46	32	0	0,55
Fev 1	80	1,05	84	7	-77	-257	2	-4	36	73	0	0,43
Fev 2	80	1,02	81	19	-62	-319	1	-1	24	61	0	0,29
Mar 1	65	0,93	61	68	7	-167	8	7	34	0	0	0,56
Mar 2	47	0,88	41	158	117	0	75	67	36	0	50	0,89
Abr 1	40	0,85	34	115	81	0	75	0	33	0	81	0,99
Abr 2	33,9	0,80	27	46	19	0	75	0	25	0	19	0,91
<b>TOTAIS:</b>			<b>784</b>	<b>846</b>					<b>487</b>	<b>245</b>	<b>304</b>	

### Safra 2003/04 – Kc\_2

Período	ETo	Kc_2	ETc_2	P (mm)	P-ETc_2	NEG	ARM	ΔA	ETr_2	DEF	EXC	ETr/ETc
Out 2	67	0,56	38	120	82	0	75	17	35	0	65	0,92
Nov 1	66	0,56	37	59	22	0	75	0	35	0	22	0,94
Nov 2	74	0,56	42	109	67	0	75	0	39	0	67	0,95
Dez 1	69	0,56	39	300	261	0	75	0	37	0	261	0,96
Dez 2	56	0,56	32	92	60	0	75	0	30	0	60	0,95
Jan 1	90	0,56	51	40	-11	-11	65	-10	48	1	0	0,95
Jan 2	80	0,56	45	57	12	0	75	10	40	0	2	0,89
Fev 1	79	1,21	96	120	24	0	75	0	81	0	24	0,84
Fev 2	91	1,21	110	8	-102	-102	19	-56	56	46	0	0,51
Mar 1	61	1,50	92	17	-75	-177	7	-12	26	63	0	0,28
Mar 2	63	1,50	94	14	-80	-257	2	-5	23	75	0	0,24
Abr 1	51	1,41	72	69	-3	-260	2	0	30	3	0	0,42
Abr 2	32	1,41	45	183	138	0	75	73	43	0	65	0,95
<b>TOTAIS</b>			<b>791</b>	<b>1.188</b>					<b>523</b>	<b>188</b>	<b>566</b>	

### Safra 2004/05 – Kc\_2

Período	ETo	Kc_2	ETc_2	P (mm)	P-ETc_2	NEG	ARM	ΔA	ETr_2	DEF	EXC	ETr/ETc
Out 2	68	0,56	38	138	100	0	75	5	37	0	95	0,96
Nov 1	53	0,56	29	121	92	0	75	0	28	0	92	0,97
Nov 2	89	0,56	50	4	-46	-46	41	-34	37	12	0	0,74
Dez 1	77	0,56	43	51	8	-33	49	8	37	0	0	0,86
Dez 2	82	0,56	46	14	-32	-57	35	-13	32	11	0	0,70
Jan 1	86	0,56	48	58	10	-38	45	10	35	0	0	0,73
Jan 2	82	0,56	46	47	1	-36	46	1	38	0	0	0,82
Fev 1	80	1,21	97	7	-90	-126	14	-32	58	58	0	0,60
Fev 2	80	1,21	97	19	-78	-204	5	-9	29	69	0	0,30
Mar 1	65	1,50	98	68	-30	-234	3	-2	49	28	0	0,50
Mar 2	47	1,50	70	158	88	0	75	72	54	0	16	0,77
Abr 1	40	1,41	56	115	59	0	75	0	54	0	59	0,96
Abr 2	33	1,41	47	46	-1	-1	74	-1	40	0	0	0,86
<b>TOTAIS</b>			<b>766</b>	<b>846</b>					<b>529</b>	<b>177</b>	<b>262</b>	



■ Deficiência ■ Excedente ■ Retirada ■ Reposição

## Apêndice I – Balanço hídrico meteorológico da soja em São Luiz Gonzaga nas safras 2003/04 e 2004/05, utilizando os Kc\_1 e Kc\_2.

### Safra 2003/04 – Kc\_1

Período	ETo	Kc_1	ETc_1	P (mm)	P-ETc_1	NEG	ARM	ΔA	ETr_1	DEF	EXC	ETr/ETc
Out 2	80	0,88	71	74	3	-26	53	3	59	0	0	0,83
Nov 1	74	0,84	62	60	-2	-28	52	-1	46	1	0	0,74
Nov 2	87	0,83	72	151	79	0	75	23	67	0	56	0,93
Dez 1	81	0,86	70	241	171	0	75	0	62	0	171	0,89
Dez 2	63	0,87	55	124	69	0	75	0	52	0	69	0,95
Jan 1	105	0,95	100	18	-82	-82	25	-50	61	32	0	0,61
Jan 2	98	1,06	103	27	-76	-158	9	-16	39	60	0	0,38
Fev 1	86	1,14	98	21	-77	-235	3	-6	29	71	0	0,29
Fev 2	101	1,11	111	18	-93	-328	1	-2	13	91	0	0,12
Mar 1	71	1,01	72	16	-56	-384	0	0	17	56	0	0,23
Mar 2	75	0,94	71	107	36	-54	36	36	27	0	0	0,38
Abr 1	60	0,81	49	28	-21	-75	28	-9	37	12	0	0,76
Abr 2	36	0,78	28	82	54	0	75	47	27	0	7	0,96
<b>TOTAIS</b>			<b>962</b>	<b>967</b>					<b>535</b>	<b>322</b>	<b>302</b>	

### Safra 2004/05 – Kc\_1

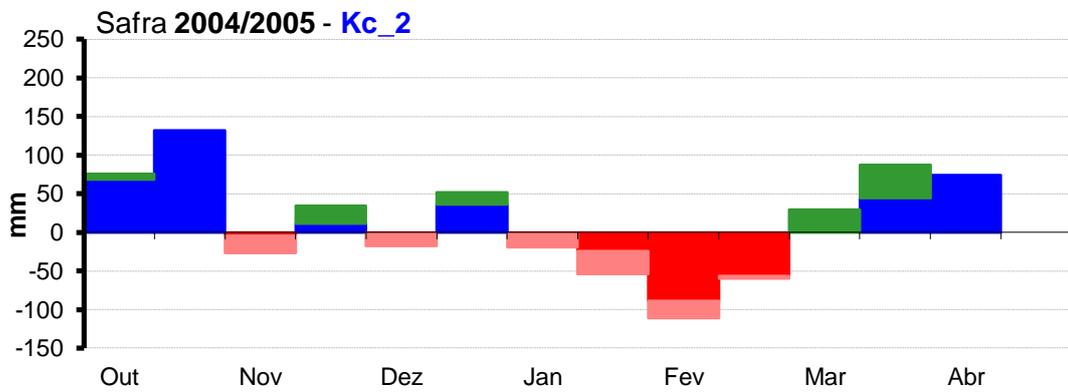
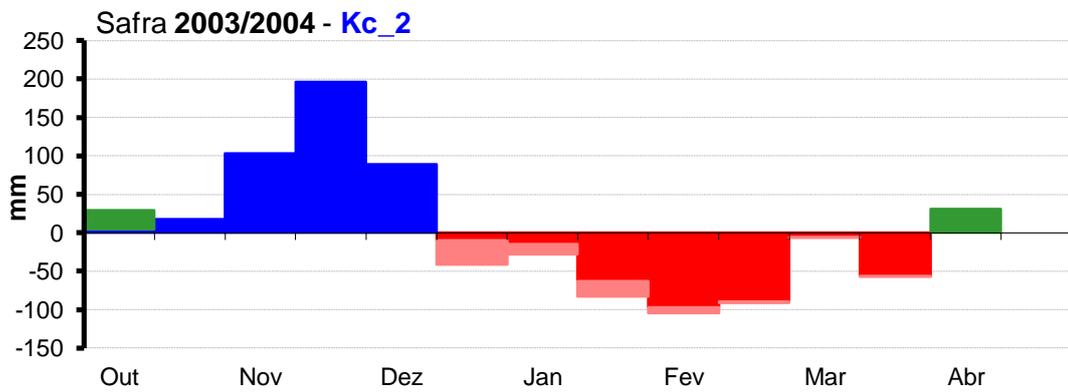
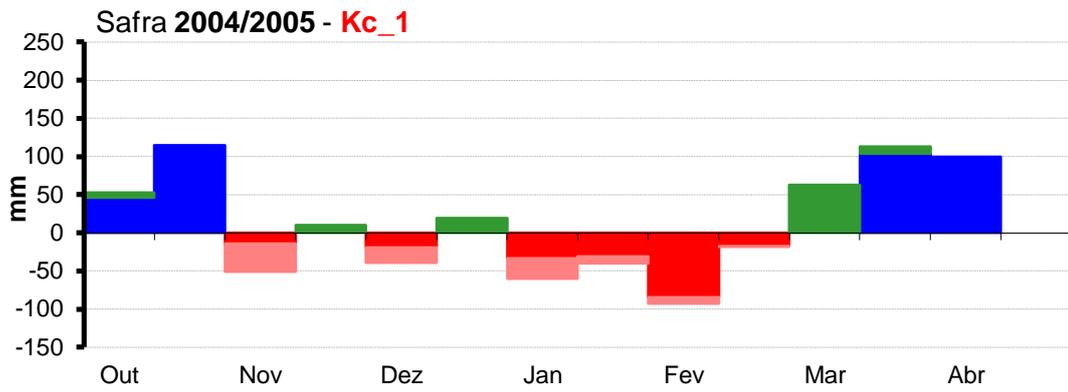
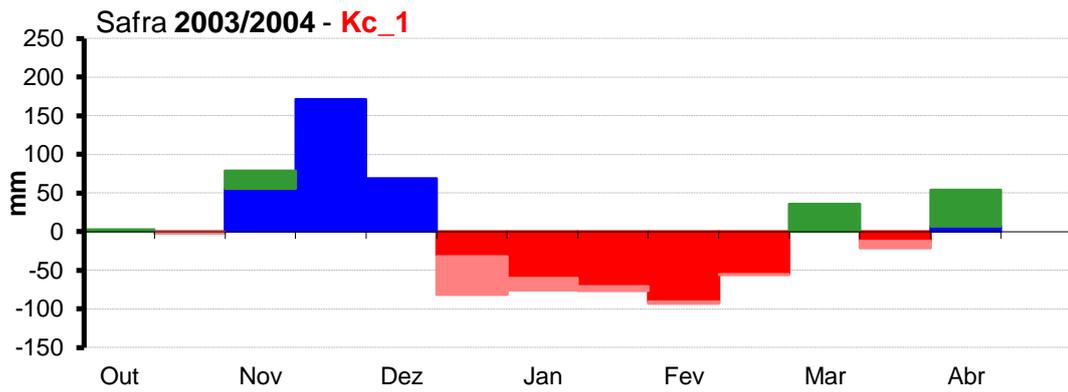
Período	ETo	Kc_1	ETc_1	P (mm)	P-ETc_1	NEG	ARM	ΔA	ETr_1	DEF	EXC	ETr/ETc
Out 2	80	0,85	68	121	53	0	75	7	62	0	46	0,91
Nov 1	64	0,82	53	168	115	0	75	0	50	0	115	0,95
Nov 2	95	0,82	77	26	-51	-51	38	-37	59	14	0	0,76
Dez 1	92	0,82	75	85	10	-33	48	10	57	0	0	0,76
Dez 2	73	0,85	62	23	-39	-72	29	-19	35	20	0	0,57
Jan 1	97	0,90	87	106	19	-34	48	19	56	0	0	0,64
Jan 2	91	1,01	92	32	-60	-94	21	-26	58	34	0	0,63
Fev 1	88	1,05	92	52	-40	-134	13	-9	59	31	0	0,64
Fev 2	92	1,02	93	0	-93	-227	4	-9	16	84	0	0,17
Mar 1	74	0,93	69	51	-18	-245	3	-1	29	17	0	0,42
Mar 2	55	0,88	48	111	63	-10	66	63	38	0	0	0,79
Abr 1	47	0,85	40	153	113	0	75	9	39	0	104	0,98
Abr 2	44	0,80	35	135	100	0	75	0	32	0	100	0,91
<b>TOTAIS</b>			<b>891</b>	<b>1.063</b>					<b>589</b>	<b>200</b>	<b>365</b>	

### Safra 2003/04 – Kc\_2

Período	ETo	Kc_2	ETc_2	P (mm)	P-ETc_2	NEG	ARM	ΔA	ETr_2	DEF	EXC	ETr/ETc
Out 2	80	0,56	45	74	29	0	75	25	40	0	4	0,89
Nov 1	74	0,56	42	60	18	0	75	0	36	0	18	0,86
Nov 2	87	0,56	48	151	103	0	75	0	46	0	103	0,96
Dez 1	81	0,56	45	241	196	0	75	0	43	0	196	0,94
Dez 2	63	0,56	35	124	89	0	75	0	34	0	89	0,97
Jan 1	105	0,56	59	18	-41	-41	43	-32	46	9	0	0,79
Jan 2	98	0,56	55	27	-28	-69	30	-14	36	14	0	0,66
Fev 1	86	1,21	104	21	-83	-152	10	-20	44	63	0	0,42
Fev 2	101	1,21	122	18	-104	-256	2	-7	18	97	0	0,15
Mar 1	71	1,50	107	16	-91	-347	1	-2	22	89	0	0,20
Mar 2	75	1,50	113	107	-6	-353	1	0	38	6	0	0,33
Abr 1	60	1,41	85	28	-57	-410	0	0	51	57	0	0,60
Abr 2	36	1,41	51	82	31	-65	31	31	47	0	0	0,92
<b>TOTAIS</b>			<b>911</b>	<b>967</b>					<b>500</b>	<b>335</b>	<b>410</b>	

### Safra 2004/05 – Kc\_2

Período	ETo	Kc_2	ETc_2	P (mm)	P-ETc_2	NEG	ARM	ΔA	ETr_2	DEF	EXC	ETr/ETc
Out 2	80	0,56	45	121	76	0	75	7	43	0	69	0,95
Nov 1	64	0,56	36	168	132	0	75	0	35	0	132	0,97
Nov 2	95	0,56	53	26	-27	-27	52	-23	46	4	0	0,86
Dez 1	92	0,56	51	85	34	0	75	23	43	0	11	0,84
Dez 2	73	0,56	41	23	-18	-18	59	-16	30	2	0	0,73
Jan 1	97	0,56	54	106	52	0	75	16	44	0	36	0,82
Jan 2	91	0,56	51	32	-19	-19	58	-17	40	2	0	0,79
Fev 1	88	1,21	106	52	-54	-73	28	-30	63	24	0	0,60
Fev 2	92	1,21	111	0	-111	-184	6	-22	14	89	0	0,13
Mar 1	74	1,50	111	51	-60	-244	3	-4	40	56	0	0,36
Mar 2	55	1,50	82	111	29	-64	32	29	56	0	0	0,67
Abr 1	47	1,41	66	153	87	0	75	43	63	0	44	0,94
Abr 2	44	1,41	61	135	74	0	75	0	51	0	74	0,83
<b>TOTAIS</b>			<b>869</b>	<b>1.063</b>					<b>568</b>	<b>178</b>	<b>366</b>	



■ Deficiência ■ Excedente ■ Retirada ■ Reposição