

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

**GEOPROCESSAMENTO PARA A AVALIAÇÃO DO
IMPACTO DE GEADAS NA REGIÃO CAFEEIRA
DE CORNÉLIO PROCÓPIO, PR**

DÉBORA ROSA RAFAELLI
Engenheira Agrícola

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU – SP
Dezembro – 2004

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

**GEOPROCESSAMENTO PARA A AVALIAÇÃO DO
IMPACTO DE GEADAS NA REGIÃO CAFEEIRA
DE CORNÉLIO PROCÓPIO, PR**

DÉBORA ROSA RAFAELLI

Orientador: Prof. Dr. Sergio Campos

Co-orientador: Prof. Dr. Maurício Alves Moreira

Co-orientador: Dr. Rogério Teixeira de Faria

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU – SP

Dezembro – 2004

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

**TÍTULO: “GEOPROCESSAMENTO PARA A AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE
GEADAS NA REGIÃO CAFEIEIRA DE CORNÉLIO PROCÓPIO, PR”**

ALUNA: DÉBORA ROSA RAFAELLI

ORIENTADOR: PROF. DR. SERGIO CAMPOS

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. MAURÍCIO ALVES MOREIRA

CO-ORIENTADOR: DR. ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA

Aprovada pela Comissão Examinadora:

PROF. DR. SERGIO CAMPOS

PROF^a. DR^a. CELIA REGINA LOPES ZIMBACK

PROF. DR. LINCOLN GEHRING CARDOSO

PROF. DR. PEDRO ROBERTO DE AZAMBUJA MADRUGA

DR^a. SÉRGIO PASCHOAL DE CAMPOS

Data da realização: 8 de dezembro de 2004.

*Não é preciso consenso
nem arte,
nem beleza ou idade:
a vida é sempre dentro
e agora.
(A vida é minha
para ser ousada)*

*A vida pode florescer
numa existência inteira.
Mas tem de ser buscada, tem de ser
conquistada.*

Lya Luft

Dedico e ofereço:

À Corina, minha mãe.

Ao Daniel, meu companheiro.

AGRADECIMENTOS

- Ao prof. Dr. Sergio Campos, pelas contribuições e por ter me recebido nesta instituição;
- À prof^a. Dr^a. Célia R.L. Zimback, pelo grande apoio, disponibilidade e confiança;
- Ao prof. Dr. Maurício A. Moreira, pelos ensinamentos, dedicação, paciência e principalmente pela amizade;
- Ao Dr. Rogério T. de Faria, pela idealização do trabalho, colaboração e sugestões;
- À CAPES, pela bolsa concedida no período de maio de 2001 a abril de 2004;
- Ao IAPAR, pelo auxílio recebido através do projeto Modelos Fisiológicos do Consórcio P&D Café;
- Ao DERAL, pelo apoio técnico durante o levantamento de campo;
- Ao Marcos Adami, Santos Pulcinelli e Devanir Ladeira, pela grande colaboração e paciência;
- Ao MS Carlos Alberto Oliveira de Matos, pela análise estatística dos dados e amizade;
- À Viviane, pela amizade e disponibilidade em ajudar;
- Ao Ramon e Ricardo, pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho;
- À Denise, pela amizade e convívio;
- À Eliete, por me ajudar a ter um olhar para a minha vida;
- À Juliana, pelo imprescindível apoio, incentivo, colaboração e amizade;
- À Mariana, grande amiga que compartilhou bons e maus momentos comigo;
- À Magnólia, minha amiga do coração, minha irmã de alma;
- Ao Guilherme e Jim pela amizade e agradáveis conversas;
- À Mima, pela fiel companhia;
- À Janete e Gonçalvez, por abrirem as portas de sua casa para mim;

- Aos meus irmãos Fábio e Kátia e a minha sobrinha Soninha que sempre traz muitas alegrias em nossas vidas;
- À minha mãe Corina, por me apoiar incondicionalmente e me ensinar que é sempre tempo de recomeçar;
- Ao Daniel, presente de Deus para a minha vida, que sempre acreditou em mim e me incentivou;
- A todos que de uma forma ou de outra contribuíram e me incentivaram nesta etapa de minha vida.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xii
1 RESUMO.....	1
2 SUMMARY.....	3
3 INTRODUÇÃO.....	5
3.1 Hipóteses.....	7
3.2 Objetivo geral.....	7
3.3 Objetivos específicos.....	7
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
4.1 Impactos das geadas no mercado econômico.....	9
4.2 Caracterização das geadas e os efeitos na vegetação.....	13
4.3 Cultura do café.....	16
4.3.1 Características da cultura do café.....	19
4.4 Geoprocessamento.....	20
4.5 Sensoriamento remoto.....	22
4.5.1 Imagem de satélite.....	24
4.5.2 Sistemas Landsat-5/TM e Landsat-7/ETM+.....	26
4.5.3 Sistema Terra/MODIS.....	26
4.6 Interação da radiação solar com a planta.....	28
4.7 Fatores que afetam as propriedades ópticas da folha.....	28
4.7.1 Estrutura anatômica.....	28
4.7.2 Idade.....	28
4.7.3 Nutrientes.....	30
4.7.4 Conteúdo de água.....	32
4.8 Dossel vegetativo.....	33
4.9 Interações da radiação solar com dosséis agrícolas.....	35

4.10 Índice de vegetação	37
5 MATERIAL E MÉTODOS	42
5.1 Área de estudo.....	42
5.2 Dados de sensoriamento remoto.....	45
5.3 Dados meteorológicos	46
5.4 Dados cartográficos	47
5.5 Aplicativos e equipamentos complementares.....	49
5.6 Metodologia	49
5.6.1 Levantamento de campo.....	49
5.6.2 Construção e manipulação do banco de dados geográfico (BDG).....	50
5.6.3 Processamento das imagens de satélites.....	51
5.6.3.1 Processamento das imagens do sensor MODIS	51
5.6.3.2 Processamento das imagens dos sensores TM e ETM+	54
5.6.4 Avaliação dos dados	56
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
6.1 Levantamento de campo	58
6.2 Modelo digital de elevação – MDE.....	60
6.3 Dados meteorológicos	61
6.4 Tipos de solos.....	62
6.5 Imagens NDVI do MODIS (8 dias)	62
6.6 Imagens NDVI do MODIS (diárias)	66
6.7 Imagens HCVI do MODIS (diárias)	70
6.8 Imagens Landsat 5/TM e Landsat 7/ETM+	74
6.9 Análises complementares	84
7 CONCLUSÕES.....	89
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
APÊNDICE	101

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Regiões do Brasil sujeitas a geadas (CLIMA BRASILEIRO, 2003).....	11
Figura 2. Zoneamento climático do café no Estado do Paraná (Caramori et al., 2001).....	13
Figura 3. Principais características da resposta espectral de uma folha verde (HOFFER, 1978).	29
Figura 4. Curvas de reflectância espectral de folhas de plantas obtidas durante a fase de crescimento vegetativo (folhas verdes) e durante a senescência (GUYOT, 1990).	30
Figura 5. Curvas da reflectância espectral obtidas em folhas de milho com diferentes conteúdos de água (HOFFER, 1978).....	32
Figura 6. Estado do Paraná e limites dos municípios selecionados para o estudo regional.	43
Figura 8. Produção de café no Paraná - participação dos Núcleos Regionais na produção Estadual – Safra 2003 (SEAB/DERAL, 2004).....	44
Figura 9. Municípios onde se localizam 47 estações meteorológicas do INMET, SIMEPAR e IAPAR.	47
Figura 11. Esquema de um banco de dados geográfico (Adaptado de MOREIRA, 2003).	50
Figura 12. Distribuição das 36 lavouras de café estudadas, localizadas em 5 municípios do noroeste do Paraná.....	59
Figura 13. Modelo digital de elevação dos 5 municípios estudados.	60
Figura 14. Valores médios de NDVI para 36 lavouras em três datas do MODIS de 8 dias.....	63
Figura 15. Imagem NDVI fatiada, obtida em 11/07/00, antes da geada.	64
Figura 16. Imagem NDVI fatiada, obtida em 19/07/00, depois da geada do dia 13/07/00.	65
Figura 17. Imagem NDVI fatiada, obtida em 27/07/00, depois da ocorrência das geadas.	65
Figura 18. Valores médios de NDVI para 36 lavouras em 5 datas do MODIS imagens diárias.	66
Figura 19. Imagem NDVI diária fatiada, obtida em 06/07/00, antes da ocorrência da geada do dia 13/07/00.	67

Figura 20. Imagem NDVI diária fatiada, obtida em 14/07/00, após a ocorrência da geada do dia 13/07/00.	68
Figura 21. Imagem NDVI diária fatiada, obtida em 17/07/00, no dia da geada.....	68
Figura 22. Imagem NDVI diária fatiada, obtida em 21/07/00, após as geadas.	69
Figura 23. Imagem NDVI diária fatiada, obtida na data de 24/07/00, após as geadas.....	69
Figura 24. Valores médios de HCVI das imagens MODIS (diárias) nas 36 lavouras para 5 datas.	70
Figura 25. Imagem HCVI diária fatiada do MODIS, obtida em 06/07/00.....	72
Figura 26. Imagem HCVI diária fatiada do MODIS, obtida em 14/07/00, após a primeira geada.	72
Figura 27. Imagem HCVI diária fatiada do MODIS, obtida em 17/07/00, dia da geada.....	73
Figura 28. Imagem HCVI diária fatiada do MODIS, obtida em 21/07/00, após as geadas.	73
Figura 29. Imagem HCVI diária fatiada do MODIS, obtidas em 24/07/00.	74
Figura 30. Gráficos de dispersão entre as imagens “greenness” e “brightness” da imagem de referência (rosa) e as imagens que foram retificadas (amarelo e azul), onde em (A) é apresentado o resultado da retificação entre as imagens de 16/07/00 e 30/01/00; e em (B) o resultado da retificação entre as imagens de 16/07/00 e 18/09/00.....	75
Figura 31. Valores médios de NDVI para as 36 lavouras nas 3 datas analisadas.	76
Figura 32. Comportamento espectral de cada uma das lavouras estudadas no dia 30/01/00.	77
Figura 33. Comportamento espectral de cada uma das lavouras estudadas no dia 18/09/00.	77
Figura 34. Precipitação mensal para o ano de 2000 (SEAB/DERAL, 2004).....	79
Figura 35. Imagem NDVI fatiada, obtida em 30/01/00.....	80
Figura 36. Imagem NDVI fatiada, obtida em 16/07/00.....	81
Figura 37. Imagem NDVI fatiada, obtida em 18/09/00.....	82
Figura 38. Área com algumas lavouras de café estudadas, onde (A) é a imagem antes da geada (30/01/00) e (B) é a última imagem após as geadas (18/09/00).	83
Figura 39. Valores médios de NDVI e HCVI, para as imagens MODIS diárias.	85
Figura 40. Valores médios do NDVI das imagens MODIS diárias e de 8 dias.....	86
Figura 41. Valores médios de NDVI e Temperatura de Superfície, obtidos das imagens MODIS.	87

Figura 42. Valores médios de HCVI e Temperatura de Superfície, obtidos das imagens MODIS.	88
--	----

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Informações sobre as imagens Terra/MODIS.	46
Tabela 2. Informações sobre as imagens Landsat.	46
Tabela 3. Resultados do teste t aplicado para valores médios de NDVI do MODIS (8 dias)..	63
Tabela 4. Resultados do teste t aplicado para valores médios de NDVI do MODIS (diária)..	66
Tabela 5. Resultados do teste t aplicado para valores médios de HCVI do MODIS diárias.....	71
Tabela 6. Resultados do teste t aplicado para valores médios de NDVI do Landsat.	79

1 RESUMO

A cultura do café é muito sensível a fenômenos climáticos, como geada e chuvas de granizo, que podem provocar grande redução de rendimento nas safras. Quando ocorre geada, acontece muita especulação no mercado econômico, porém, a falta de dados rigorosos sobre o impacto das geadas faz com que as especulações sejam ainda maiores, superestimando os danos nas lavouras cafeeiras em função dos interesses econômicos.

Procurar quantificar o impacto causado pelas geadas, com maior precisão e com menor trabalho de campo pode contribuir muito para evitar as especulações na área econômica. Existem várias maneiras para avaliar o impacto causado pelas geadas, desde o intensivo trabalho de levantamento no campo até o emprego de técnicas especializadas, como o uso do geoprocessamento.

A utilização do geoprocessamento através do uso de imagens de satélites apresenta algumas vantagens em relação aos métodos convencionais quando se trata de avaliar grandes extensões de áreas atingidas por fenômenos como a geada. As imagens de satélites, além do baixo custo, possuem como características, a repetitividade do satélite e a visão sinóptica.

Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia fundamentada no uso de imagens de satélites de média e baixa resolução temporal e técnicas de geoprocessamento para avaliar em tempo hábil o impacto de geadas em regiões cafeeiras no noroeste do estado do Paraná.

No desenvolvimento do trabalho foram utilizadas imagens do satélite TERRA, sensor MODIS e do satélite Landsat 5 e 7, sensores TM e ETM+. Sendo, todos os procedimentos realizados através do aplicativo SPRING.

Para analisar o potencial das imagens MODIS no monitoramento de lavouras cafeeiras atingidas pela geada utilizou-se os índices de vegetação Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e Hydric Condition Vegetation Index (HCVI). Para analisar as imagens Landsat utilizou-se o NDVI.

Os resultados mostraram que a resolução temporal do satélite TERRA permitiu acompanhar mudanças ambientais em tempo hábil.

Os índices de vegetação NDVI e HCVI, obtidos das imagens MODIS são eficientes para o monitoramento do efeito da geada em nível Estadual e localizado, logo após a ocorrência da mesma.

As imagens do satélite Landsat são úteis para o detalhamento do efeito do impacto da geada nas lavouras cafeeiras, porém, a resolução temporal é inadequada para este tipo de estudo, além das imagens apresentarem muitos problemas com nuvens.

GEOPROCESSING FOR THE EVALUATION OF FROSTS IMPACT IN COFFEE AREA OF CORNÉLIO PROCÓPIO'S, PARANÁ. Botucatu, 2004. 110 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: DÉBORA ROSA RAFAELLI

Adviser: PROF. DR. SERGIO CAMPOS

Co-Adviser: PROF. DR. MAURÍCIO ALVES MOREIRA

Co-Adviser: DR. ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA

2 SUMMARY

Coffee crop is very sensitive to climatic phenomena, such as frost and hailstorms which can reduce coffee crop yields. When frost happens, a lot of speculation happens in the economical market, however, the lack of rigorous data about the frost impact provoke more speculations, overestimating damages on coffee farming because of economical interests.

Trying to quantify the impact caused by frosts, with larger precision and with smaller field work can contribute a lot to avoid speculations in the economical area. There are several ways to evaluate the impact caused by frosts, from the intensive work on the field to the use of specialized techniques, such as the use of the geoprocessing.

The use of the geoprocessing through satellites images presents some advantages in relation to the conventional methods when great extensions of areas reached by phenomena are evaluated such as frosts. Satellites images, besides the low cost, have as characteristics, satellite repetitively and the synoptic vision.

Thus, the present research had the objective to develop a methodology based on the use of images of average satellites and low temporary resolution and geoprocessing techniques to evaluate in skilled time, the impact of frosts on coffee areas in the Northwest of the State of Paraná.

The results showed that the temporary resolution of the satellite TERRA allowed following environmental changes in skilled time.

The vegetation indexes NDVI and HCVI, obtained from the images MODIS are efficient for the evaluation of the effect of the frost in State and located level, soon after the frost occurrence.

Landsat satellites images are useful for the detailing of the impact effect of the frost on coffee farming, however, the temporary resolution is inadequate for this type of study, besides the images had presented many problems with clouds.

Keywords: TERRA/MODIS, Landsat 5/TM - 7/ETM+, remote sensing, vegetation indexes.

3 INTRODUÇÃO

A agricultura é uma atividade econômica que possui grande dependência das condições de tempo e clima, podendo sofrer conseqüências destes fenômenos em todas as etapas produtivas. Situações meteorológicas adversas, como as geadas, causam grandes impactos sociais e econômicos, provocando muita instabilidade e gerando especulações nos mercados. As vendas no exterior e no País são condicionadas pelas flutuações da oferta interna e, na medida em que estas dependem das condições climáticas, acaba resultando em interferência negativa direta do clima sobre as metas de exportações.

Em todo o mundo existe uma grande preocupação em determinar áreas de plantio de culturas agrícolas, realizar a estimativa da produtividade e determinar os impactos causados por fenômenos agrometeorológicos, como geadas, secas prolongadas, chuvas excessivas e granizos, pois o planejamento e o gerenciamento do setor agrícola necessitam de informações cada vez mais precisas e com antecedência em relação à época da safra. Essas informações são essenciais para o setor governamental planejar condições de transporte, processamento e armazenamento da produção, bem como para a tomada de decisões relacionadas à comercialização, fatores importantes ao planejamento estratégico do setor.

Para os agricultores e cooperativas, as informações possibilitam a decisão sobre a venda imediata ou retenção do produto ou de investimento na lavoura para

aumento da produtividade ou expansão da área cultivada. Além disso, sob o ponto de vista político e social, informações confiáveis e precisas sobre tendências da produção numa determinada safra agrícola podem possibilitar a obtenção de maiores lucros.

Uma das culturas de grande relevância para o País, geradora de divisas e que sofre com a ocorrência de geadas, é o café. Apesar do parque cafeeiro ter tido problemas nos últimos anos, em função de fortes geadas e queda dos preços, o que desestimulou os cafeicultores, o Brasil ainda é o maior exportador de café do mundo.

A cultura do café é muito sensível a fenômenos climáticos, como a geada e chuvas de granizo, que podem provocar pronunciada redução de rendimento nas safras. Essas situações meteorológicas adversas causam muita especulação no mercado. No entanto, a falta de dados confiáveis sobre os impactos de fenômenos de larga escala, como as geadas, faz com que as especulações sejam ainda maiores, superestimando os danos nas lavouras cafeeiras em função dos interesses econômicos.

A quantificação precisa do impacto causado pelas geadas realizada com baixo custo de levantamento de campo e divulgada em tempo hábil pode contribuir muito para evitar as especulações na área econômica.

O impacto causado pelas geadas pode ser avaliado por diferentes metodologias, desde a convencional, que consiste de intensivo trabalho de levantamento no campo, até as mais especializadas, como o uso de imagens de satélites de alta resolução temporal (1 a 2 dias) associado a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), para integrar dados coletados de diferentes fontes.

O uso de imagens de satélites e das técnicas de geoprocessamento apresentam algumas vantagens em relação aos métodos convencionais, quando se trata de avaliar áreas extensas atingidas por fenômenos como a geada. Pois, além do baixo custo, a repetitividade (resolução temporal) do satélite e a visão sinóptica (tamanho da área imageada contida em uma única cena) são duas características muito importantes para o monitoramento desse tipo de evento.

A multitemporalidade dos satélites de recursos naturais permite que sistemas dinâmicos como ocorrência de seca, de inundações e de geada, possam ser acompanhados e tenham suas diversas fases monitoradas pelos sensores remotos, buscando

quantificar a área afetada e os reais danos causados. Esses satélites em órbitas são capazes de fornecer imagens diárias e com resolução espacial maior do que a do AVHRR/NOAA, como é o caso dos satélites TERRA e AQUA, que carregam a bordo, entre outros, o sensor MODIS capaz de fornecer imagens diárias em 36 bandas espectrais, permitindo o acompanhamento de fenômenos como danos causados pela geada de forma ágil e contínua.

3.1 Hipóteses

Sabendo-se que há carência de informações confiáveis e em tempo hábil do impacto da geada em lavouras cafeeiras e que o efeito da geada no café dá-se em nível de estrutura celular da folha, com mudanças no comportamento espectral das lavouras atingidas, o uso de imagens de satélites de alta resolução temporal (MODIS) e média resolução espacial (Landsat) e a utilização de técnicas de geoprocessamento possibilitam avaliar o efeito da geada em lavouras cafeeiras.

3.2 Objetivo geral

Desenvolver uma metodologia fundamentada no uso de imagens de satélites de alta e média resolução temporal e técnicas de geoprocessamento para avaliar em tempo hábil o impacto de geadas em regiões cafeeiras.

3.3 Objetivos específicos

Analisar o potencial das imagens MODIS e dos índices de vegetação Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e Hydric Condition Vegetation Index (HCVI), no monitoramento de lavouras cafeeiras atingidas pela geada;

Analisar a viabilidade do uso de imagens de média resolução temporal, na quantificação do impacto de geada em lavouras cafeeiras;

Avaliar o potencial do aplicativo SPRING, no monitoramento de áreas de café atingidas pela geada.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Impactos das geadas no mercado econômico

Das atividades econômicas, a agricultura é sem dúvida aquela com maior dependência das condições do tempo e do clima. As condições atmosféricas afetam todas as etapas das atividades agrícolas, desde o preparo do solo para semeadura até a colheita, o transporte, o preparo e o armazenamento dos produtos. As conseqüências de situações meteorológicas adversas levam constantemente a graves impactos sociais e a enormes prejuízos econômicos. Como as condições adversas do tempo são freqüentes e muitas vezes imprevisíveis a médio e longo prazo, a agricultura constitui-se numa atividade de grande risco. Dentre as principais adversidades meteorológicas, destacam-se as secas prolongadas, os “veranicos” (períodos secos dentro de uma estação úmida), as geadas, e os períodos de chuva excessiva, muitas vezes acompanhadas de granizo (SENTELHAS et al., 2000).

Segundo Sentelhas et al. (2000), a agricultura é um sistema tecnológico artificial desenvolvido pelo homem com o objetivo de se obter alimento, fibra, e energia em quantidade suficiente para garantir sua subsistência por um certo período. As plantas foram gradativamente sendo domesticadas até permitir que extensas áreas fossem cobertas com indivíduos de mesma composição genética. Nessa condição, a interação com o ambiente depende do estágio de desenvolvimento das plantas visto que, num dado instante,

todos os indivíduos daquela comunidade têm a mesma idade, com porte semelhante, e também com mesma suscetibilidade aos rigores impostos pelo meio. Quanto mais homogênea for a população de plantas, maior será sua suscetibilidade às condições ambientais.

Os fenômenos atmosféricos ocorrem de forma continuada, havendo influência de uma escala sobre outra. Para Sentelhas et al. (2000), no Brasil os fatores de formação de geadas estão ligados em três categorias: macro, meso e micro clima. A macro-escala trata dos fenômenos em escala regional ou geográfica que dependem das nuances climáticas impostas pelos fatores latitude, altitude, continentalidade e circulação global.

A meso escala se refere aos fenômenos em escala local, em que a topografia condiciona o clima pelas condições do relevo local. A exposição (N, S, E ou W), a configuração (vale, espigão, meio encosta), e o grau de inclinação do terreno determinam o clima local. Portanto, dentro do macroclima da região é possível que existam inúmeros topoclimas. A configuração e a exposição do terreno podem modificar bastante o clima regional, sendo de grande importância na agricultura, devendo ser levado em consideração no planejamento agrícola.

A micro escala é aquela que condiciona o clima em pequena escala (microclima). É função do tipo de cobertura do solo (solo nu, gramado, floresta, cultura rasteira, represa, etc.), que determina o balanço local de energia. O fator principal é a cobertura do terreno e cada tipo de cobertura tem influência própria sobre o microclima.

Existem também, alguns agravantes naturais, que são aspectos gerais da área, que facilitam a formação e o acúmulo de ar frio, como é o caso da mata em garganta à jusante, pois a existência de qualquer impedimento físico ao escoamento do ar frio numa microbacia facilita o acúmulo de ar com baixa temperatura, sendo danoso às plantas durante o inverno. Vegetação de porte baixo à montante na parte alta da encosta ou chapada funciona como fonte de ar frio, pois se resfria rapidamente.

Do ponto de vista microclimático, ou seja, ao nível da propriedade, as áreas em que a ocorrência de geada é menos frequente e de menor intensidade geralmente apresentam como características: encostas elevadas, com declividade superior a 2%; espigões de configuração convexa com boas condições de escoamento do ar frio; face protegida do vento frio de inverno. Regiões que apresentam uma maior incidência de geada apresentam as

seguintes características: baixadas e encostas baixas; espigões extensos e planos; terrenos de configuração côncava com pequeno declive; bacias com gargantas estreitas e longas, abaixo do cafezal; terrenos com exposição Sudoeste, Sul e Sudeste, que são assolados pelos ventos resultantes das entradas de frentes frias (CARAMORI et al., 2001).

Nos locais situados a médias e altas latitudes, a agricultura torna-se atividade de risco durante o inverno, quando a ocorrência de temperaturas baixas provoca o fenômeno das geadas. No Brasil, a geada é um fenômeno freqüente nas latitudes ao sul do paralelo 19°S, englobando os estados de Minas Gerais (Triângulo Mineiro e região sul), São Paulo, Mato Grosso do Sul, Paraná, Santa Catarina, e Rio Grande do Sul, onde sua ocorrência resulta em graves prejuízos econômicos, principalmente quando acontecem precocemente no outono ou tardiamente na primavera (SENTELHAS et al., 2000).

Em escala global, algumas regiões sofrem sérios danos na agricultura, como é o caso do sul do Brasil (Figura 1), Uruguai, centro-norte da Argentina, sudeste dos Estados Unidos, algumas regiões da Austrália, sudeste da China, entre outros. As culturas de climas tropicais e subtropicais, como o café e a laranja, são as mais afetadas, pois apresentam pouca resistência a baixas temperaturas (CLIMA BRASILEIRO, 2003).



Figura 1. Regiões do Brasil sujeitas a geadas (CLIMA BRASILEIRO, 2003).

A caracterização do regime de geadas é de grande aplicabilidade na orientação de extensionistas, agricultores e órgãos governamentais para subsidiar tomadas de decisões e o planejamento agropecuário.

O estado do Paraná localiza-se em uma região de transição climática, do norte ao sul do estado, apresentando variações regionais e locais devido à altitude e ao relevo. Ao longo dos anos, a cafeicultura se estabeleceu no norte do estado e avançou para o sul e oeste até os limites de risco em que era possível o cultivo econômico. No Paraná, a região Norte apresenta o menor risco de geada. Entretanto, ela pode ocorrer no período compreendido entre maio e setembro. Os meses de junho e julho apresentam a maior frequência de ocorrência de geadas para todos os locais do estado (GRODZKI et al., 1996).

Caramori et al. (2001), ao analisarem os riscos climáticos englobando geadas, deficiência hídrica e temperaturas elevadas, verificaram que as geadas constituem o único elemento climático limitante ao cultivo do café no Paraná. Nesse trabalho foi realizado um estudo detalhado do risco de geadas em todo o estado, com base em séries históricas de dados de temperatura mínima. O resultado foi um mapa de zoneamento climático para o estado, que mostra a região com menores riscos de geada, apta para o cultivo, uma região de transição, com riscos mais elevados, mas que pode conter alguns microclimas aptos, e uma região inapta, devido ao elevado risco de geadas ou por restrições de solos e de ambiente, conforme pode ser visto na Figura 2.

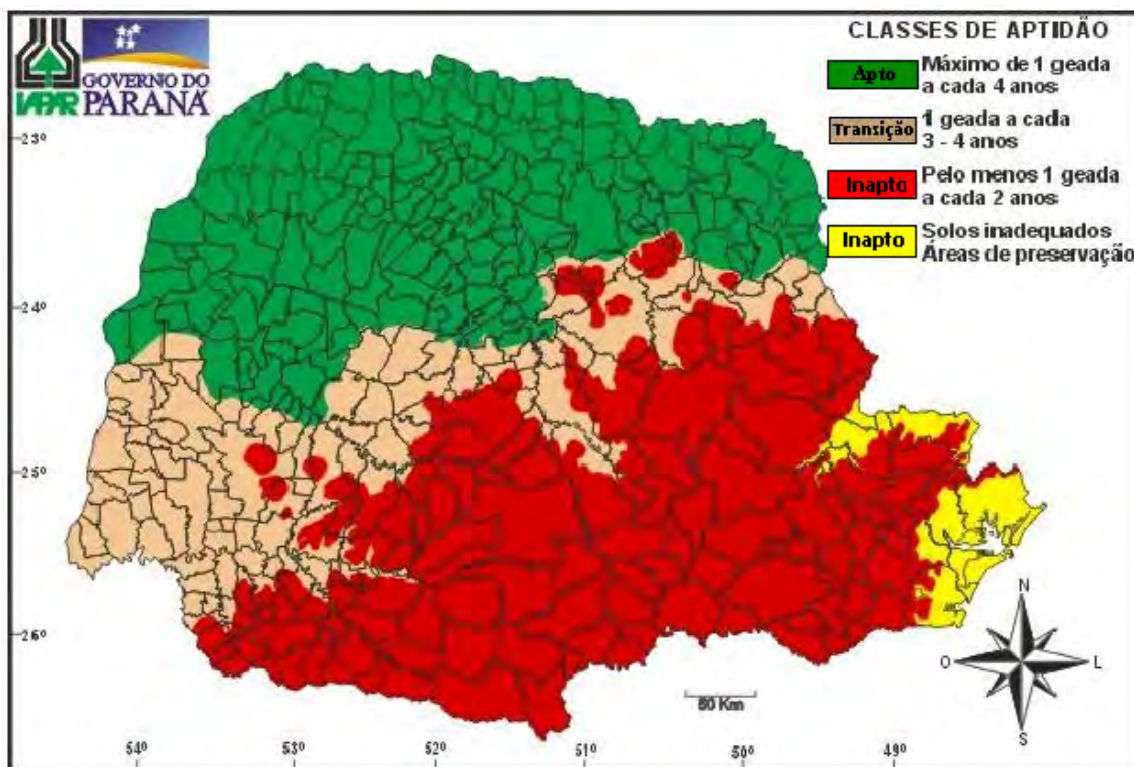


Figura 2. Zoneamento climático do café no Estado do Paraná (Caramori et al., 2001).

Segundo Grodzki et al. (1996), as geadas no Paraná ocorrem em função do deslocamento de massas de ar polar que alteram o balanço regional de energia, propiciando condições para que se verifique a queda da temperatura até o ponto de congelamento interno das plantas (abaixo de 0°C , medido próximo ao solo). Este processo se torna bastante freqüente no inverno, o que leva a ocorrência de geadas inclusive no noroeste do Estado, com conseqüências desastrosas para a agricultura paranaense.

4.2 Caracterização das geadas e os efeitos na vegetação

Para Caramori et al. (2001), a geada segundo o aspecto físico, é o processo de congelamento do orvalho depositado sobre uma determinada superfície exposta à perda de calor. No aspecto agrônômico, geada é qualquer abaixamento de temperatura que acarrete na planta efeitos prejudiciais ao seu crescimento ou desenvolvimento. Portanto, deve-

se ressaltar que nem sempre a presença de gelo sobre as superfícies expostas significa que ocorreu geada do ponto de vista agrônômico, pois a temperatura que provoca a morte das plantas pode não ter sido atingida.

Segundo Camargo (1972), há dois tipos de geada, quanto à sua gênese (origem) ou pelos efeitos visuais que elas produzem (aspecto das plantas). Quanto à gênese, as geadas podem ser de vento, de radiação ou mista. As geadas de vento são aquelas provocadas por ocorrência de ventos fortes, constantes, com temperaturas muito baixas, por muitas horas seguidas. O ar frio resseca a folhagem causando sua morte. Portanto, os ventos são os causadores do dano à planta. Esse tipo de geada fica bem caracterizado por haver dano apenas em um lado da planta (aquele voltado para os ventos predominantes).

A geada de radiação ocorre quando há resfriamento intenso da superfície, que perde energia durante as noites de céu limpo, sem vento, e sob domínio de um sistema de alta pressão (massa de ar polar) com baixa concentração de vapor d'água. A perda radiativa da superfície faz com que o ar adjacente a ela também se esfrie.

Na geada mista ocorrem os dois processos sucessivamente, ou seja, entrada de massa fria e seca e subsequente estagnação sobre a região com intensa perda radiativa.

No aspecto visual, Caramori et al. (2001) descreveu que a geada pode ser negra ou branca. A geada branca ocorre sempre que se dá a formação de orvalho sobre as superfícies expostas (planta, solo, etc.), com posterior congelamento quando a temperatura atinge zero grau. Essa denominação é usada devido ao manto branco de gelo que recobre as plantas quando da sua ocorrência. Após o nascer do sol, o gelo derrete e os danos se tornam visíveis. As folhas diretamente expostas à perda de calor noturno são as mais severamente afetadas.

A geada negra ocorre quando o ar se encontra com umidade muito baixa, a temperatura do ponto de orvalho pode se encontrar abaixo da temperatura que provoca a morte das plantas. Neste caso pode haver danos sem que se verifique a deposição de gelo sobre as folhas. Este tipo de geada ocorre frequentemente em regiões agrícolas da América do Norte, onde as massas de ar se deslocam com temperaturas abaixo de zero grau. Nas condições brasileiras, a geada de vento é chamada de geada negra, devido ao aspecto

enegrecido dos tecidos danificados. A geada negra implica invariavelmente em danos às plantas. Geralmente os danos ocorrem com maior intensidade na face exposta aos ventos frios.

Pode ocorrer também a geada de canela, em que as superfícies perdendo calor continuamente por radiação tornam-se mais frias que o ar e provocam resfriamento próximo à superfície por meio do processo de condução. O ar frio, por ser mais denso, tende a se acumular junto ao solo, deslocando-se para as partes mais baixas do terreno. Os danos da geada de canela não aparecem imediatamente. A morte da parte aérea ocorre lentamente, em função da morte dos tecidos do floema (casca), que impede a circulação descendente da seiva elaborada. Após 2 a 3 meses a planta inicia um processo de depauperamento, exibindo amarelecimento foliar intenso, queda de folhas e morte de ramos, ocorrendo geralmente a brotação abaixo da área lesionada.

As condições favoráveis à ocorrência de geadas, normalmente são vento calmo, céu limpo e ar seco. Essas condições favorecem a ocorrência de geadas de radiação, porque a perda radiativa (emissão de ondas longas) pela superfície terrestre é mais intensa. Esse resfriamento intenso faz com que a superfície atinja a temperatura do ponto de orvalho e, conseqüentemente, permite que a pequena concentração de umidade do ar adjacente à superfície se condense e congele (geada branca). Nesse processo há liberação de calor latente de condensação, diminuindo, assim, a velocidade de perda radiante. Quando não há presença de vapor d'água não ocorre condensação e congelamento, o que resulta assim na chamada geada negra de radiação, em que o resfriamento é mais intenso (SENTELHAS et al., 2000).

A geada provoca nos vegetais a morte do tecido vegetal por frio, que é um processo físico-químico. Segundo Heber e Santarius (1973), citados por Sentelhas et al. (2000), o processo se inicia assim que a temperatura letal da planta é atingida, havendo o congelamento da solução extracelular, que resulta em desequilíbrio do potencial químico da água da solução intracelular em relação ao potencial químico da solução extracelular, parcialmente congelada. Isso gera um processo contínuo de perda de água no sentido intra para extracelular, até que o equilíbrio seja reestabelecido, provocando a desidratação da célula ou o congelamento da solução intercelular. Os primeiros sinais resultantes desse processo são: desidratação da célula; perda do potencial de turgescência; aumento na concentração de solutos; redução do volume celular e ruptura da membrana plasmática.

As geadas ocorrem no período da noite, quando há forte queda de temperatura do ar, que pode chegar a -5°C ou inferiores. Este resfriamento se dá principalmente por meio da irradiação de calor proveniente do solo e das plantas para o espaço sideral. Esse processo faz com que o solo e as próprias plantas percam calor rapidamente. Principalmente as plantas, que funcionam como verdadeiros radiadores de calor durante as noites claras de geada, provocam, por contato (convecção), o resfriamento do ar, o que pode causar danos às lavouras (CAMARGO, 1985).

Conforme Pinto et al. (1999), as geadas fracas ocorrem em noites de céu claro e sem ventos, em baixadas, com temperatura do ar ao redor de $+4$ ou $+5^{\circ}\text{C}$. Geadas moderadas com temperatura entre $+2$ a $+3^{\circ}\text{C}$ e severas, entre 0 e 2°C . Nessas condições as folhas vegetais mais expostas atingem temperaturas cerca de 5°C mais baixas do que no ar. Segundo ainda o autor, folhas de café e de cana-de-açúcar morrem com temperatura de $-3,5^{\circ}\text{C}$, citrus -6 a -7°C , tomate e verduras $+2^{\circ}\text{C}$ e banana e mamão $+5^{\circ}\text{C}$.

No Paraná, as geadas mais frequentes são as de radiação, que ocorrem regionalmente, nos meses de junho e julho, logo após a passagem de frentes frias e sob condições de céu claro e ausência de ventos (SANGIOLO e NERY, 2000).

4.3 Cultura do café

Segundo Passos et al. (1973), a espécie *Coffea arabica* L. é oriunda da Etiópia, que no início do século XVII foi para a Arábia e posteriormente para a Holanda. No Brasil o café data da época do império, trazido das Guianas para Belém do Pará, de onde foi levado para o Rio de Janeiro e se espalhou pelos estados de São Paulo, Minas Gerais e Espírito Santo (GRANER & GODOY JUNIOR, 1967).

Segundo EMBRAPA (2002), em 1731/32 ocorreram as primeiras exportações de café e em 1849/50 a produção brasileira atingiu 40% da produção mundial, contribuindo isoladamente com 70% do valor das exportações do País no período de 1925 a 1929 e, apesar de ao longo dos anos ter diminuído essa participação, o produto constitui-se, ainda hoje, num expressivo gerador de divisas.

A cultura do café foi introduzida no Paraná no início do século XX, porém, até 1945 seu crescimento foi lento, devido à situação internacional, sobretudo em função da quebra da Bolsa de Nova York e da Segunda Guerra Mundial. A lavoura cafeeira teve sua fase de maior expansão no estado do Paraná na década de 50, dadas as condições favoráveis da economia mundial que vivia o desenvolvimento do “pós-guerra”, tendo, em consequência, os preços do café tornado-se satisfatórios. Essa expansão foi tão intensa em 1959 que o Paraná contava com 1,15 bilhão de pés e produziu 20,6 milhões de sacas de café. Em 1961, a cafeicultura paranaense atingiu seu apogeu, com uma produção de 21,4 milhões de sacas e uma população cafeeira de 1,28 bilhão de pés. Nessa época, o Brasil contava com 4,3 bilhões de pés de café (LIMA, 1989).

A cafeicultura sofreu uma grande expansão e por um longo período de tempo, o café foi o principal gerador de riquezas para o Estado, propiciando a fixação do trabalhador no meio rural, tornando as pequenas e médias propriedades economicamente viáveis, numa época de poucas alternativas agrícolas (IAPAR, 2002).

Segundo Lima (1989), a severíssima geada de 1975 foi, sem dúvida, um efeito catastrófico na cafeicultura paranaense, um fator preponderante na redução da área ocupada com café no Estado. Por esse motivo, em apenas um ano, foram erradicados 211 milhões de pés de café. Esse fato além de ter reduzido a safra de 1976 a zero, atingiu todo o parque cafeeiro ao nível de tronco, transformando as lavouras de café em lavouras de soja em formação.

A ocorrência de geadas e os baixos preços, levaram os agricultores paranaenses a substituir a cultura do café pelas culturas de soja e trigo, acarretando o abandono ou à má condução dos cafezais, o que ocasionou a baixa produtividade, queda da qualidade do produto, maior custo de produção e, conseqüentemente, agravou o processo de descapitalização dos cafeicultores. Depois deste período difícil, a atividade cafeeira no Paraná iniciou sua retomada, através de um novo modelo tecnológico, que tinha como objetivo o aumento da produtividade, por meio do uso intensivo de insumos, erradicação dos cafezais improdutivos e variedades mais produtivas (IAPAR, 2002).

No Brasil uma boa porcentagem de lavouras de cafezais foi abandonada, devido às produções não economicamente viáveis, causadas por fatores como solos inadequados e condições climáticas não favoráveis ao cultivo do café arábica.

Apesar das grandes dificuldades enfrentadas pelos cafeicultores, o café ainda é uma importante fonte de renda para a economia brasileira, pela sua participação na receita cambial, pela transferência de renda aos outros setores da economia, pela contribuição à formação de capital no setor agrícola, além da expressiva capacidade de absorção de mão-de-obra (EMBRAPA, 2002).

Segundo a Coordenação do Programa Integrado de Apoio à Cafeicultura – Pró-Café (2002), no Brasil a produção média é de 28 milhões de sacas de 60 kg, o que o coloca como o maior produtor mundial. Consome 25% de sua produção e exporta os 75 % restantes, os quais geraram uma média de 1,7 bilhão de dólares anuais em divisas nos últimos 10 anos.

Conforme Silva e Leite (2000), a América do Sul é a região do mundo que produz mais café, o Brasil e a Colômbia, sozinhos, produziram em torno de 40 % do total mundial, nas últimas duas décadas.

Do ponto de vista da alocação racional de recursos produtivos, o café poderá trazer ainda mais benefícios para o País, pois é uma atividade que tem condições de se sustentar por si própria, dependendo apenas do nível tecnológico e da forma de gerenciamento empregado no agronegócio (VEGRO et al., 2000).

Na safra 2003/2004 o Brasil produziu 28,8 milhões de sacas de 60 kg beneficiadas e para a safra de 2004/2005 a previsão realizada em agosto de 2004 foi de 38,2 milhões de sacas. Esta previsão reflete um ano de alta produtividade e outro de baixa produtividade, a chamada bianualidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO CAFÉ, 2004).

Quanto à distribuição da produção no País, conforme a Associação Brasileira da Indústria do Café (2004), no ano de 2003 os maiores estados produtores de café no Brasil foram os estados de Minas Gerais com 41,8 % da produção, seguido do Espírito Santo com 22,9 %, de São Paulo com 9,7 %, Rondônia com 8,7 % e Paraná com 6,8 %.

4.3.1 Características da cultura do café

Segundo Toledo Filho et al. (2002), a planta é um arbusto com altura que varia de 2 a 4 metros, tronco cilíndrico, raiz pivotante, profunda e muito ramificada, principalmente nas proximidades da superfície do solo. Apresenta ramos laterais primários longos e flexíveis, contendo também ramificações secundárias e terciárias. A espécie *Coffea arabica* L. parece ser a única no gênero *Coffea* que além de tetraplóide (44 cromossomos somáticos) é auto-fértil e se multiplica praticamente por autofecundação (PASSOS et al., 1973).

O *Coffea arabica* L. é uma planta de clima tropical úmido, de temperaturas amenas, encontrando no Brasil extensas áreas apropriadas para o seu cultivo. Para estabelecer qual seria a precipitação anual ótima, é um pouco difícil, segundo o mesmo autor, pois depende de outros fatores, como a distribuição das chuvas nos diferentes meses do ano. Porém, precipitações acima de 1.200 mm anuais são suficientes para o cultivo do café.

Para a instalação de uma cultura de café, o solo deve apresentar algumas características como profundidade mínima de 1 m, não devendo existir até essa profundidade nada que dificulte a penetração das raízes. Além disso, deve apresentar boa drenagem, não se encharcar com facilidade, não ser pedregoso, nem excessivamente arenoso; quanto à fertilidade, deve-se dar preferência aos mais férteis ou realizar a correção do solo (TOLEDO FILHO et al., 2002).

A espécie *Coffea arabica* L. possui um número bastante grande de variedades, porém nem todas de valor econômico. Os cultivares de maior evidência e mais cultivadas no Brasil, são Mundo Novo, Catuaí Amarelo e Catuaí Vermelho (THOMAZIELLO et al., 1987).

O *Coffea arabica* L. é uma planta com características especiais, pois leva dois anos para completar o ciclo fenológico. Conforme Matielo (1986), o ciclo bienal de produção do cafeeiro no Brasil é um fenômeno muito importante que atua sobre a produtividade em determinados anos, ocorrendo altas produtividades num ano, com conseqüente esgotamento da planta, que assim não tem boa vegetação para voltar a produzir bem no ano seguinte.

Segundo Camargo et al. (2001), a vegetação e a frutificação dos cafeeiros abrangem seis fases fenológicas distintas em dois anos seguidos. Na primeira fase ocorre a vegetação e formação de gemas foliares (setembro a março); na segunda fase ocorre a indução, desenvolvimento, maturação e dormência das gemas foliares (abril a agosto); a terceira fase, já no segundo ano fenológico (setembro a dezembro) é caracterizada pela florada e expansão dos frutos; na quarta fase acontece a granação dos frutos (janeiro a março, do próximo ano civil); na quinta fase ocorre a maturação dos frutos (abril a junho) e por último, a sexta fase em que, acontece a senescência (julho a agosto). O conhecimento das diferentes fases fenológicas do cafeeiro arábica é importante para facilitar e racionalizar as pesquisas e observações na cafeicultura (CAMARGO e CAMARGO, 2001).

Segundo Vegro et al. (2000), na caracterização dos sistemas de produção de café são levados em consideração o critério agrônomico e o critério regional. No critério agrônomico um dos mais importantes aspectos é o número de plantas por hectare. Essa importância decorre das implicações tecnológicas e da eficiência econômica de cada faixa de adensamento. As faixas de adensamento são as seguintes:

- a) Cultivos tradicionais (até 3000 plantas/ha), são lavouras formadas em espaçamento de até 4 m na entrelinha por 2 m entre covas, com duas plantas por cova;
- b) Cultivos adensados (de 3000 a 7000 plantas/ha), a formação de cafezais mais adensados visa à redução de custos através do aumento da produção por área, ao contrário da visão anterior que visa a produção por cova;
- c) Cultivos superadensados (acima de 7000 plantas/ha), sistema ainda de adoção restrita. Possui custos mais elevados na formação da lavoura e dificuldades de mecanização e controle fitossanitário.

4.4 Geoprocessamento

Segundo Câmara e Davis (1999), o geoprocessamento trata as informações geográficas com técnicas matemáticas e computacionais, ou seja, é o uso automatizado de informações que de alguma forma estão ligadas a um determinado lugar no espaço através de coordenadas geográficas. Sua utilização vem crescendo significativamente,

com aplicações em diversas áreas tais como: agricultura, educação, saúde, comunicação, planejamento urbano, transportes, recursos naturais, entre outros.

No Brasil o desenvolvimento do geoprocessamento aconteceu na década de 80, em que surgiram vários grupos de estudo, bem como, o desenvolvimento de vários softwares, como MaxiDATA, SAGRE, SITIM e SPRING (CÂMARA e DAVIS, 1999). Hoje, as geotecnologias estão cada vez mais presentes nos diversos órgãos, sejam eles públicos ou privados, com o objetivo de auxiliarem na tarefa de planejamento e gerenciamento rural e ambiental.

O manuseio e interpretação de grandes conjuntos de dados obtidos de forma diversificada têm levado os pesquisadores a utilizarem sistemas computacionais, não somente para armazenamento dos dados, mas que possibilitem a sua análise conjunta ou integrada. Esta necessidade conduziu ao desenvolvimento e operacionalização de aplicativos computacionais denominados de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) ou Geographical Information Systems (GIS). Segundo Rocha (2000), SIG é um sistema com capacidade para aquisição, armazenamento, tratamento, integração, processamento, recuperação, transformação, manipulação, modelagem, atualização, análise e exibição de informações digitais georreferenciadas, topologicamente estruturadas, associadas ou não a um banco de dados alfanuméricos.

No desenvolvimento destes trabalhos é importante a escolha do SIG que será utilizado para estudar todos os dados necessários. Segundo Câmara e Freitas (1995), citado por Santos et al. (1997), na escolha do SIG é importante avaliar a sua capacidade de construir e manter grandes bases de dados espaciais, trabalhar diferentes informações, integrar os dados e promover a projeção temporal e espacial dos dados acumulados.

O Sistema para Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING) é um banco de dados geográfico de 2º geração, desenvolvido pelo INPE, para ambientes UNIX e Windows (CÂMARA et al., 1996).

O SPRING é baseado num modelo de dados orientado a objetos, do qual são derivadas sua interface de menus e a linguagem espacial LEGAL. Algoritmos, como os utilizados para indexação espacial, segmentação de imagens e geração de grades triangulares, garantem o desempenho adequado para as mais variadas aplicações.

4.5 Sensoriamento remoto

Sensoriamento remoto é a ciência e a arte de se obter informações sobre um objeto, área ou fenômeno através da análise de dados coletados por dispositivos denominados sensores, que não entram em contato direto com os alvos em estudo (CREPANI, 1983).

A energia refletida ou emitida por um determinado objeto na superfície é registrada pelos sensores que operam em certas faixas espectrais do espectro eletromagnético, como a região do visível, do infravermelho próximo, médio e distante. Estes sensores podem registrar as informações em condições de campo, aerotransportados ou colocados em plataformas orbitais. Os sensores permitem realizar um imageamento sinóptico (visão ampla da área imageada) e periódico. Além disso, a energia refletida ou emitida pelo alvo, pode ser gravada em diferentes faixas espectrais, permitindo assim, fazer uma análise do comportamento espectral em diferentes bandas do espectro eletromagnético.

Segundo Novo (1988), o sensoriamento remoto é um sistema de aquisição de informações, que pode ser subdividido em dois subsistemas: de coleta de dados e de análise de dados. Para que o subsistema de coleta de dados ocorra é necessário a existência de uma fonte de radiação, a incidência da radiação sobre a superfície terrestre, a ocorrência de interações entre a radiação e os objetos da superfície e a produção de radiação que retorna ao sensor após propagar-se pela atmosfera. O segundo subsistema é o de análise de dados, a energia que chega ao sensor se transforma em um sinal passível de interpretação.

Para Crósta (1992), o início do sensoriamento remoto se deu antes de 1925 com a manipulação de fotos aéreas, obtidas através de balões. As técnicas de processamento evoluíram rapidamente através de sua migração para sistemas de computação digital. A explosão tecnológica dos processadores digitais e uma queda acentuada nos custos envolvidos ocorreu na década de 80. Em consequência, os sistemas especializados no processamento de imagens de sensoriamento remoto ficaram mais acessíveis, atingindo uma comunidade maior de usuários. A partir desta década, muitos esforços foram dedicados no emprego de dados coletados através de técnicas de sensoriamento remoto para utilização na

agricultura. Assim, os dados de sensoriamento remoto orbital têm sido utilizados nos mais diferentes campos da geociência e, principalmente, na agricultura.

Para Lamparelli et al. (2001), na área agrícola o acompanhamento de uma cultura pode ser realizado por meio do estudo da radiação eletromagnética por ela refletida e emitida. Essa energia é coletada por sensores especiais, sensíveis a energia de determinados comprimentos de onda. A energia captada pelos sensores carrega informações das condições fisiológicas e do estado fitossanitário das mesmas, tais como: vigor, quantidade de matéria verde, quantidade de água, ataques de pragas, dentre outras.

Na literatura é crescente o número de trabalhos procurando explorar o uso do sensoriamento remoto em áreas cafeeiras. Dentre eles, pode-se citar os estudos realizados por Tardin et al. (1975), em que, procuraram avaliar os danos causados pela geada de 1975 no noroeste do Paraná através da utilização de filme infravermelho falsa cor, os resultados mostraram que o uso de imagens infravermelho mostrou ser bastante eficiente em tempo e precisão. Dando continuidade ao trabalho Tardin et al. (1976) utilizaram imagem do Landsat, sensor MSS, para levantar áreas de café e trigo e o impacto da geada nestas culturas. Os autores verificaram que o uso da imagem permitiu levantar uma grande área num curto intervalo de tempo.

Epiphanyo e Formaggio (1989), usando um método de avaliação das bandas refletidas do TM/Landsat-5, procuraram avaliar o potencial desses dados para separar áreas ocupadas com trigo e feijão em condições normais de cultivo. Os autores concluíram que a banda TM7 no infravermelho e a TM2 no visível foram as que melhor se prestaram à discriminação entre as duas culturas, bem como o período vegetativo das culturas mostrou-se mais propício que o reprodutivo para tal discriminação.

De acordo com Pinto et al. (2000), a utilização de métodos que permitam estimar rapidamente prejuízos causados por geadas à cultura cafeeira, pode ser útil na elaboração de pareceres econômicos, financeiros e sociais. Assim, desenvolveram um modelo para estimativa de danos causados por geadas em cafezais através do uso de imagens de alta resolução e do mapeamento das temperaturas mínimas absolutas durante o período de ocorrência das geadas, observadas em estações meteorológicas de superfície. Conforme os

autores, o método proposto pode ser utilizado dentro de uma faixa de erro de 5 a 10 % e é indicado para avaliações ao nível estadual.

Moreira et al. (2004) avaliando o potencial das imagens adquiridas pelos satélites da série Landsat para realizar o mapeamento da cultura do café visando a realização de previsão de safra, verificaram através de análise temporal do comportamento espectral de café-formação e café-produção, que as imagens no período seco foram mais eficientes no mapeamento das lavouras de café e as imagens da banda 4 dos dois sensores apresentaram melhor diferenciação espectral entre café e os demais alvos da cena.

Para Chuvieco (2001), outra alternativa para o emprego dos canais ópticos é a análise da dinâmica térmica das plantas. Quando a vegetação está bem irrigada, o aumento da radiação incidente implica também em incremento da evapotranspiração (calor latente), o que leva a reduzir o calor sensível (temperatura do ar) frente a zonas imediatas. Em consequência, a diferença entre a temperatura do ar e a de superfície pode ser um bom indicador do estado hídrico das plantas.

4.5.1 Imagem de satélite

Segundo Crósta (1992), as imagens de sensoriamento remoto servem de fontes de dados para estudos e levantamentos geológicos, ambientais, agrícolas, cartográficos, florestais, urbanos, oceanográficos, entre outros, representando uma das únicas formas viáveis de monitoramento ambiental em escalas locais e globais, devido à rapidez, eficiência, periodicidade e visão sinóptica que as caracterizam.

Segundo ainda Crósta (1992), as imagens são constituídas por um arranjo de elementos sob a forma de uma malha ou grid. Cada “cela” desse grid tem sua localização definida em um sistema de coordenadas do tipo “linha e coluna”, representadas por x e y, respectivamente. O nome dado a essas celas é pixel, “picture element”. O pixel é a unidade mínima da imagem que representa a reflectância média de uma área da superfície, dentro do campo de visada instantânea (IFOV) do sensor colocado a bordo do satélite. As características de cada pixel variam em função das diferentes plataformas orbitais. Os valores

médios da reflectância, coletados em diferentes comprimentos de onda, dependem do alvo e dos detectores de cada sensor. Nas imagens de satélites, esses valores são representados por níveis de cinza, os quais variam do preto ao branco.

Assim, com o exposto no parágrafo acima, pode-se dizer que a resolução das imagens em sensoriamento remoto é dividida em: resolução espacial, definida em função do IFOV de cada sistema sensor; resolução espectral que, segundo Novo (1988), é uma medida da amplitude das faixas espectrais às quais o sensor é sensível; resolução radiométrica que se refere à sensibilidade do sistema sensor em detectar diferentes níveis de intensidade do sinal de retorno, ou seja, diferentes níveis de cinza que irão compor uma imagem; e resolução temporal, imagens de diversas épocas do ano.

O processamento digital de imagens consiste em aplicar ferramentas computacionais, que facilitam a identificação e a extração de informações contidas nas imagens, para posteriores interpretações (CRÓSTA, 1992). Assim, tem como principal objetivo remover as barreiras inerentes ao sistema visual humano, facilitando a extração de informações a partir de imagens. Apesar de o olho humano ter uma boa capacidade de reconhecer padrões, o enorme volume de informações dificulta esse trabalho, sendo facilitado com o processamento digital de imagens.

No caso de trabalhos desenvolvidos com imagens multitemporais, ou seja, de épocas diferentes, torna-se necessário a realização de algumas técnicas de processamento para corrigir variações que ocorrem na atmosfera, no ângulo de visada, no desgaste e instabilidade do sensor. Entre as técnicas de processamento estão o georreferenciamento ou registro e a correção radiométrica. O registro estabelece uma relação entre coordenadas de imagem e coordenadas geográficas (INPE, 2004). A retificação radiométrica segundo Hall et al. (1991), serve para compensar as diferenças de calibração dos sensores, a atmosfera e os diferentes ângulos de iluminação entre as imagens.

4.5.2 Sistemas Landsat-5/TM e Landsat-7/ETM+

O programa Landsat foi desenvolvido pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) no início da década de 70, sendo colocados em órbita 7 satélites (NOVO, 1988). Hoje está em operação o Landsat 5, já com 20 anos de operação.

O sensor TM (Thematic Mapper) opera em 7 bandas espectrais do espectro eletromagnético e foi colocado em órbita no ano de 1984, a bordo do Landsat 4. Opera em 3 bandas na região do visível, 3 bandas na região do infravermelho refletido e 1 banda na região do termal. Sua resolução espacial é de 30 m x 30 m, apenas a banda da região do termal é de 120 m x 120 m. A partir do sensor TM a resolução radiométrica passou para 256 níveis de cinza, contra 64 níveis do MSS e sua resolução temporal também melhorou, ficando em 16 dias (MOREIRA, 2001).

O sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) foi concebido para operar em 8 bandas espectrais: três bandas no visível, uma banda no infravermelho próximo, duas bandas no infravermelho médio, uma banda no infravermelho termal e uma banda pancromática, a qual abrange parte da região do visível e infravermelho próximo. Foi colocado em órbita em abril de 1999 e operou até maio de 2003. A partir dessa data, o sistema sensor apresentou problemas em um de seus instrumentos, o que prejudicou a disponibilização de imagens aos usuários.

Quanto a resolução espacial esse sensor foi melhorado em relação ao TM porque a banda pancromática tem uma resolução espacial de 15 m x 15 m e a banda 6 (termal) tem resolução de 60 m x 60 m, as resoluções radiométrica e temporal são as mesmas do TM (ENGESAT, 2003).

4.5.3 Sistema Terra/MODIS

O sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) é o principal instrumento a bordo do satélite Terra (EOS AM-1), um dos sistemas de observação da terra da NASA. O MODIS é um instrumento designado para mensurar os processos

biológicos e físicos globais com observações de toda superfície terrestre a cada 1 ou 2 dias, adquirindo dados em 36 bandas espectrais que se situam entre 0,4 μm e 14,4 μm e se distribuindo em diferentes grupos de resolução espacial.

O tamanho do pixel da imagem varia de 250 a 1000 m. A largura da área observada é de 2.330 km e a quantidade de pixels na imagem varia para as distintas bandas. O satélite se encontra em uma órbita circular, quase polar, hélio-sincrônica, a 705 km de altura (ENGESAT, 2003).

A grande variedade de instrumentos no MODIS permite a obtenção de diferentes produtos possibilitando o entendimento da dinâmica global e os processos que ocorrem na terra, nos oceanos e na atmosfera mais baixa (NASA, 2003). O formato de distribuição destes produtos é o Hierarchical Data Format (hdf), sendo que, os dados são disponibilizados com alguns processamentos já realizados como, georreferenciamento, correção dos gases atmosféricos, aerossol e atenuação de nuvens.

Um exemplo destes produtos é o MOD09, que fornece a reflectância espectral da superfície para cada banda possibilitando a obtenção de informações da dinâmica da vegetação, cobertura da terra e dinâmica da cobertura da terra. Também para o MOD09 são geradas imagens de 8 dias, baseadas em estatísticas diárias com a suposição de que as amostras restauradas de pixels podem representar a população de todos os pixels dentro de cada *grid* de célula. A contagem da imagem de 8 dias inicia em primeiro de janeiro de cada ano.

Outro exemplo dos produtos MODIS é o MOD11, que fornece a temperatura de superfície da terra e oceanos, a ocorrência de fogo e efeitos vulcânicos. A temperatura de superfície é um bom indicador entre o balanço de energia da superfície da terra e o efeito estufa porque ela é um dos parâmetros chave nos processos físicos da superfície terrestre. Ela é requerida para uma ampla variedade de estudos como clima, hidrologia, ecologia e também é usado na geração de outros produtos MODIS (NASA, 2003).

4.6 Interação da radiação solar com a planta

Quando a radiação solar atinge uma planta na superfície terrestre, interage com a mesma, sendo que, parte dessa radiação é absorvida pelos pigmentos contidos na folha, parte é refletida pelas folhas e, por último, a radiação é transmitida. A quantidade de energia absorvida, refletida ou transmitida diferem de uma planta para outra porque além das propriedades ópticas da planta, existem os fatores ambientais que influenciam direta ou indiretamente na interação (MOREIRA, 2001).

Quando se tem por meta a estimação de variáveis agronômicas a partir de parâmetros espectrais, é necessário entender os fundamentos físicos e fisiológicos destas relações, para um melhor entendimento do que está acontecendo (FORMAGGIO e EIPHANIO, 1990).

4.7 Fatores que afetam as propriedades ópticas da folha

4.7.1 Estrutura anatômica

De acordo com Guyot (1990), a reflectância no infravermelho próximo é, geralmente, afetada pela estrutura anatômica das folhas, pois depende dos estratos celulares, do tamanho das células e da espessura do mesófilo esponjoso. Assim, as folhas de dicotiledôneas possuem reflectância maior do que as de monocotiledôneas, para uma mesma espessura, porque as primeiras têm um mesófilo esponjoso mais desenvolvido.

4.7.2 Idade

As propriedades ópticas de uma folha mudam significativamente ao longo do ciclo de desenvolvimento e crescimento da planta, ou seja, durante a fase juvenil a

folha apresenta uma reflectância, conforme é mostrado na Figura 3. Quando a folha atinge o estágio de maturação, ela apresenta um decréscimo da reflectância na região do visível e um aumento na região do infravermelho próximo (BAUER, 1975). Este efeito está associado ao maior número de espaços aéreos intercelulares no mesófilo das folhas maduras (GAUSMAN et al., 1978).

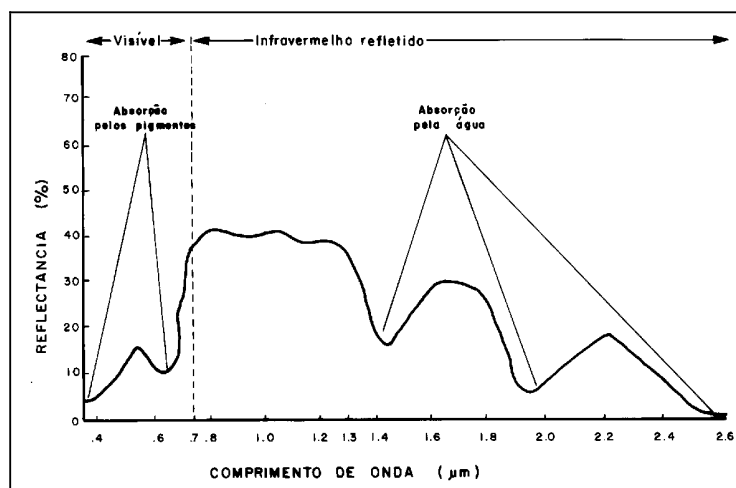


Figura 3. Principais características da resposta espectral de uma folha verde (HOFFER, 1978).

Knipling (1967), citado por Bauer (1975), afirmou que folhas senescentes produzem efeito oposto ao das folhas maduras, ou seja, a reflectância no visível decresce. Entretanto, Guyot (1990) contradiz às afirmações de Knipling (1967), citado por Bauer (1975), mostrou que nas folhas senescentes a reflectância apresenta uma relação linear positiva até 1300 nm (Figura 4).

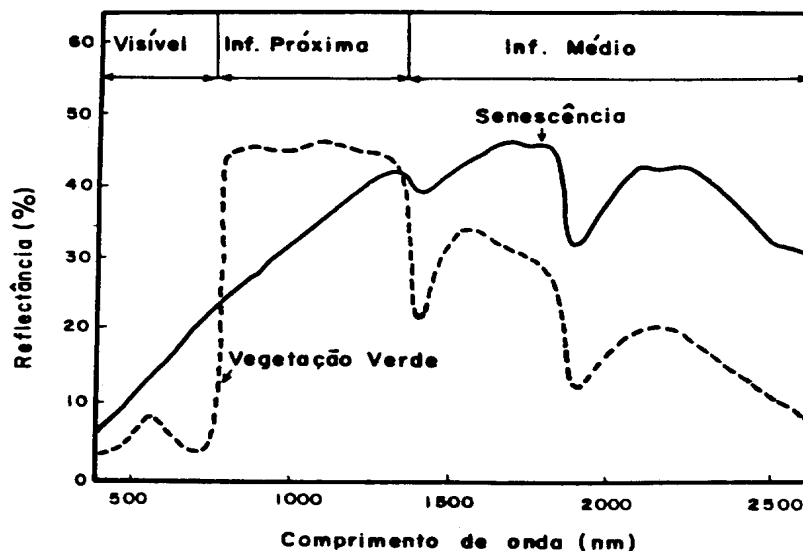


Figura 4. Curvas de reflectância espectral de folhas de plantas obtidas durante a fase de crescimento vegetativo (folhas verdes) e durante a senescência (GUYOT, 1990).

As mudanças ocorridas na curva de reflectância da folha senescente (Figura 4) podem ser explicadas ao nível de pigmentos fotossintetizantes. De acordo com Taiz e Zeiger (1991), no início da senescência ocorre o amarelecimento da folha em consequência da degradação das clorofilas *a* e *b*. Ocorrendo a degradação das clorofilas há menor absorção da radiação solar e, conseqüentemente, a resposta espectral na região do visível aumenta.

Finalmente, nos estádios mais avançados da senescência ocorre também a degradação dos carotenos, o que leva à morte das células. Esse fato acarreta um desarranjo das estruturas internas da folha, com aumento dos espaços aéreos intercelulares. O aumento dos espaços aéreos aumenta a reflectância no infravermelho próximo. Com a morte das células há uma diminuição do conteúdo de água nas folhas, alterando assim a reflectância na região do infravermelho médio.

4.7.3 Nutrientes

A deficiência de nutrientes na planta, em geral, é provocada pela pobreza do solo em elementos essenciais requeridos para um bom desenvolvimento da mesma.

Entretanto, quando há excesso de água em solos com boa drenagem, alguns elementos (por exemplo, o nitrogênio) podem ser arrastados para as camadas mais profundas do perfil do solo, fora do sistema radicular, induzindo uma deficiência nutricional à planta para aqueles elementos (MOREIRA, 2001).

Por outro lado, uma das funções da água no sistema solo/planta é servir de meio de transporte de nutrientes do solo para a planta através da absorção do soluto (água mais nutrientes) pelas raízes. Se há déficit de água no solo, a absorção do soluto é reduzida, conseqüentemente, a planta poderá sofrer uma deficiência nutricional, mesmo estando disponível os elementos essenciais no solo.

Em termos de propriedades ópticas das folhas, a deficiência de nutrientes é outro fator que afeta de forma significativa. Al-Abbas et al. (1974) compararam as características espectrais de folhas saudáveis de milho com folhas deficientes em nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre, magnésio e cálcio e concluíram que, a deficiência desses nutrientes causou uma redução na concentração de clorofila e na absorção da radiação nos comprimentos de onda de 530 e 640 nm. Uma explicação em termos bioquímicos, para a redução na concentração de clorofila e na mudança do comportamento espectral, é que esses elementos ou fazem parte da estrutura da clorofila, como é o caso do nitrogênio e magnésio ou participam na síntese de enzimas e/ou transporte de energia durante a fotossíntese (HORLER et al., 1980 e 1983).

Por outro lado, em plantas cujas folhas apresentaram deficiência de fósforo e cálcio, a absorção da energia, na região do infravermelho próximo, foi menor do que a de folhas sem deficiência. Porém, em folhas deficientes em enxofre, magnésio, potássio e nitrogênio a absorção foi maior do que em folhas normais (BAUER, 1975).

Em trabalho realizado por Fonseca et al. (2002) para caracterizar a reflectância do *Paspalum notatum* em diferentes níveis de adubação nitrogenada, os autores verificaram que os aumentos na quantidade de biomassa provocaram diminuição da reflectância na porção visível do espectro e aumento na porção infravermelho, o que mostra que a análise da reflectância é um bom indicador das mudanças em um dossel.

4.7.4 Conteúdo de água

A influência da água na reflectância da folha, em comprimentos de ondas abaixo de 1300 nm, tem recebido pouca atenção (BOWMAN, 1989; HUNT e ROCK, 1989; CARTER, 1991). A absorção da radiação solar pela água é pouco pronunciada entre 700 nm a 1300 nm e, menos ainda, entre 400 nm a 700 nm. Carter (1991) denominou isto de efeito secundário, porque não pode ser explicado somente pela propriedade absorptiva da água e devem ser incluídas influências de outros componentes das folhas como os pigmentos.

Bauer et al. (1980) e Ripple (1985) atribuíram o efeito secundário do conteúdo de água nas folhas às variações na concentração de clorofila e desarranjo nas estruturas internas da folha. A redução do conteúdo de clorofila nas folhas propicia uma menor absorção de energia na região do visível, conseqüentemente, aumentando a reflectância nesta faixa espectral. Por outro lado, na região do infravermelho próximo, a reflectância aumenta em conseqüência de mudanças nas estruturas internas da folha.

Segundo ainda os autores, as mudanças na reflectância não são substanciais enquanto o turgor das folhas apresentar um conteúdo de água superior a 75%. Afirmarções semelhantes são encontradas em Horler et al. (1983). A Figura 5 ilustra curvas da reflectância espectral obtidas em folhas de milho com diferentes conteúdos de água.

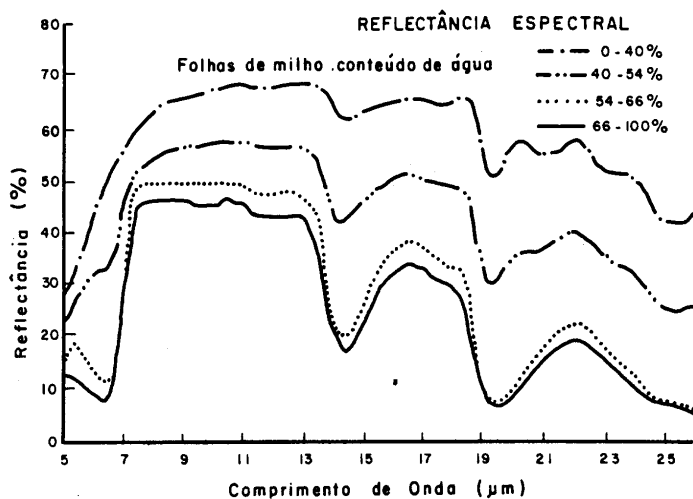


Figura 5. Curvas da reflectância espectral obtidas em folhas de milho com diferentes conteúdos de água (HOFFER, 1978).

Ripple (1985) comentou que as relações entre o teor de água na folha e a reflectância nas regiões do visível e do infravermelho próximo não são diretas. Geralmente, em plantas sob estresse hídrico ocorre uma diminuição na concentração de clorofila provocando um desarranjo nas estruturas internas. Com isto, folhas sob estresse hídrico têm maior reflectância (menor absorção) no vermelho e no infravermelho próximo.

Segundo Guyot (1990), a maioria dos resultados que descreve este fenômeno foram obtidos em condições de laboratório. Nas condições de campo, Thomas et al. (1971) e Guyot et al. (1985) observaram que é necessário ocorrer um estresse de água extremamente severo para afetar as propriedades ópticas das folhas. Além disso, o estresse de água, dificilmente, é detectado quando somente as propriedades ópticas das folhas são medidas nas regiões do visível e do infravermelho próximo.

4.8 Dossel vegetativo

Tudo aquilo que compõe a parte aérea de uma comunidade de plantas e que, portanto, está envolvido diretamente com as interações da energia solar foi definido por Assunção (1989), como dossel vegetativo ou simplesmente dossel. Um dossel é caracterizado pelos seus componentes, sua organização e sua estrutura.

As folhas são as constituintes do dossel que têm maior importância no processo de interação da radiação solar com a vegetação, pois é nelas que se realiza quase toda a fotossíntese, responsável pela conversão da energia solar em energia química para a produção de carboidratos. Tanto a arquitetura da folha quanto da planta está adaptada para um melhor aproveitamento da radiação solar no processo da fotossíntese. Como a folha é o principal elemento de captação da radiação solar, observa-se uma predominância da área foliar quando comparada à área de outros componentes da planta. Esta predominância é tão marcante que normalmente outros órgãos que também podem realizar fotossíntese, são desprezados em estudos sobre produção de fotoassimilados.

As culturas agrícolas, bem como qualquer vegetação, apresentam, ao longo de seus ciclos de desenvolvimento, variadas condições de dosséis. Em termos

espectrais, o dossel é dito incompleto, pois apresenta uma mistura de resposta espectral da parte aérea da planta e do solo onde a cultura foi implantada. À medida que a vegetação ou a cultura atinge o seu desenvolvimento máximo, o dossel é definido como sendo completo, correspondendo a uma cobertura vegetal muito próximo a 100%. Entretanto, os dosséis de certas culturas tais como: citrus e café (com espaçamento convencional), por exemplo, apresentam dosséis incompletos mesmo em condições de máximo desenvolvimento, pois a contribuição do solo na reflectância desses dosséis é muito grande, devido ao espaçamento entre plantas (ASSUNÇÃO, 1989).

As variações espectrais entre os diferentes tipos de solos estão normalmente associadas a processos de absorção da radiação eletromagnética atribuídos aos seus componentes, ao tamanho das partículas elementares e a sua organização (PONZONI, 2001).

Assim, a quantidade de energia absorvida ou refletida por um determinado tipo de solo é função de todos os fatores que, conjuntamente, se encontram no solo. Porém, cada constituinte do solo interage com a radiação eletromagnética diferentemente do outro. Desta forma, fica evidente que a energia absorvida ou refletida por um solo é a soma integrada de todas as energias absorvidas ou refletidas pelos seus diferentes componentes (MOREIRA, 2001).

Quando o IAF assume valores maiores do que 3, pouca radiação irá atingir o solo, conseqüentemente o dossel terá pouco influência da sua reflectância. Contudo, no caso de dosséis esparsos, a reflectância do solo atinge maior importância, tendo maior influência na resposta espectral do dossel (Ponzoni, 2001).

Segundo Ponzoni (2001), um dossel vegetal apresenta em uma imagem, valores de reflectância relativamente baixos na região do visível, devido à ação dos pigmentos fotossintetizantes que absorvem a radiação eletromagnética (REM) para a realização da fotossíntese. Na região do infravermelho próximo esses valores apresentam-se elevados, por causa do espalhamento interno sofrido pela REM em função da disposição da estrutura morfológica da folha, aliado ao espalhamento múltiplo entre as diferentes camadas de folhas. Assim, além dos parâmetros que influenciam a reflectância espectral das folhas, para os dosséis, existem outros, sendo esses de natureza geométrica (iluminação e visada),

espectral (propriedades espectrais dos elementos vegetação, principalmente das folhas e do solo) e biofísica (índice de área foliar).

4.9 Interações da radiação solar com dosséis agrícolas

Segundo Epiphanyo e Formaggio (1989), o comportamento espectral de um alvo pode ser considerado como o retrato radiométrico de suas propriedades num determinado momento. Isso significa que, na medida em que há alterações na constituição do alvo, pode haver alterações nas suas respostas espectrais detectadas pelo sensor. Essas alterações podem ser rápidas ou lentas (dimensão temporal) e suaves ou acentuadas (dimensão radiométrica-espectral).

A interação da radiação solar com dosséis agrícolas se dá, principalmente, através dos pigmentos contidos nas folhas. Logo, tudo aquilo que foi discutido sobre as propriedades ópticas da folha é válido, até certo ponto, para dossel de vegetação, uma vez que a folha é o principal componente do mesmo. Entretanto, conforme afirmou Bauer (1975), nos estudos das características espectrais de dosséis agrícolas deve-se ter em mente que, além dos princípios que regem as propriedades ópticas das folhas, há também a influência do solo de fundo, que pode ser significativo dependendo do estágio de desenvolvimento e do tipo de cultura.

Reichardson et al. (1975) e Kollenkark et al. (1982) comentaram que os dosséis de culturas agrícolas exibem no campo de visada do sensor, quatro componentes com diferentes propriedades de reflectância óptica: vegetação iluminada, solo iluminado, vegetação sombreada e solo sombreado. A magnitude de cada um destes componentes varia com a cobertura vegetal, orientação e espaçamento das fileiras, morfologia do dossel, estrutura interna dos elementos que compõem o dossel, diâmetro da copa da planta, altura da planta, teor de água na planta e no solo, condição fitossanitária, ângulo zenital e azimutal do sol, latitude e tamanho do elemento de resolução do equipamento utilizado (KOLLENKARK et al., 1982).

Em cultura de trigo com 70% de cobertura vegetal, Jackson et al. (1979) estudaram as influências do ângulo zenital e da orientação das fileiras de plantio no comportamento espectral da cultura e verificaram que, no decorrer do dia, os alinhamentos norte-sul apresentaram variações na reflectância de até 230% na faixa espectral correspondente ao vermelho.

Kollenkark et al. (1982), trabalhando com a cultura de soja, plantada em nove diferentes orientações de fileiras, obtiveram grandes variações na reflectância na região do vermelho (até 140%), para as parcelas com orientação norte-sul, quando a cobertura do solo foi de 64%.

Na região do infravermelho próximo, o sombreamento não é tão pronunciado como na região do visível, devido ao múltiplo espalhamento e a baixa absorção por pigmentos nesta faixa do espectro (COLWELL, 1974; DAUGHTRY et al., 1982).

A morfologia das folhas que compõem o dossel vegetativo exerce forte influência na reflectância. Pinter Jr. et al. (1985) mediram a reflectância em dosséis e em folhas isoladas de diferentes cultivares de trigo que tinham a mesma fitomassa e índice de área foliar verde. Os autores verificaram que, independentemente do cultivar, não houve diferença na reflectância quando medida em folhas isoladas. Entretanto, para esses mesmos cultivares as reflectâncias foram diferentes quando medidas sobre os diferentes dosséis.

A reflectância de dosséis agrícolas, nas regiões do visível e infravermelho próximo, é indiretamente afetada pelo turgor celular (MYERS, 1970). Quando uma cultura sofre um estresse de água (reduzindo seu turgor celular), as mudanças iniciais da reflectância são mais pronunciadas na região do visível do que no infravermelho próximo, devido à sensibilidade da clorofila a distúrbios fisiológicos. Porém, a detecção das condições de estresse se baseia, não na mudança da reflectância de folhas individuais, mas na redução da área foliar total exposta ao sensor, por perda direta de folhas, mudança de sua orientação, ou ainda da supressão do crescimento da planta. Nesses casos, a reflectância do infravermelho próximo tende a ser reduzida relativamente mais do que a do visível, por causa da redução do realce do infravermelho próximo ou por aumento da exposição do solo (KNIPLING, 1970).

Hoffer e Johannsen (1969), ao estudarem a resposta espectral em dosséis de milho, cujas folhas apresentaram diferentes teores de água, comentaram que o

decréscimo da umidade não causou diferença significativa na resposta espectral em dosséis, cuja umidade das folhas encontrava-se acima de 54%. Abaixo deste nível de umidade, o aumento na reflectância foi substancial em todos os comprimentos de onda observados.

Nas condições de máxima absorção da energia solar, Taiz e Zeiger (1991) relataram que somente 5% da energia solar incidente sobre um dossel vegetativo é efetivamente absorvida pelos pigmentos e utilizada pelas plantas na produção de carboidrato. Isto ocorre porque a maior parte da radiação incidente (50 a 56%) possui energia que não é suficiente para alterar o estado energético dos pigmentos fotossintetizantes, portanto não é absorvida. Além disso, boa parte da energia absorvida é convertida em calor e outra parte é usada em processos de metabolismo e respiração.

4.10 Índice de vegetação

A utilização de informações multiespectrais da radiância, provenientes de alvos agrícolas, coletadas por sensores a bordo de satélites orbitais, tem sido muito empregadas para quantificar e acompanhar as condições de culturas agrícolas, principalmente pelas características de repetitividade do satélite e da visão sinóptica dos sensores (MOREIRA et al., 1998).

Segundo os mesmos autores, a radiância inerente de um determinado alvo agrícola, contida dentro do elemento de resolução do sensor, é uma soma integrada dos componentes da cena dentro do campo de visada do sensor, ou seja, do solo, da vegetação e da sombra que é projetada sobre o solo. O sucesso na identificação e mapeamento deste alvo agrícola dependerá da contribuição proporcional de cada um desses componentes.

A idéia de utilizar medidas de reflectância, obtidas por sensores orbitais, para estimar parâmetros da vegetação é bastante antiga. Person e Miller (1972) foram os pioneiros nos estudos de índices de vegetação. No início dos anos 70, os autores realizaram estudos intensivamente para medir o fator de reflectância de gramíneas e constataram que os fatores de reflectância, obtidos nos comprimentos de onda de 680 nm e 780 nm, foram os melhores para separar vegetação verde de solo e de vegetação morta. Verificaram ainda a

existência de uma correlação linear negativa, entre o fator de reflectância e a vegetação verde, no comprimento de onda de 680 nm e uma correlação linear positiva em 780 nm.

A partir desses estudos, numerosos índices de vegetação foram desenvolvidos para caracterizar parâmetros biofísicos da vegetação, tais como: índice de área foliar verde (HOLBEN et al., 1980; ASRAR et al., 1984; HATFIELD et al., 1985; CLEVERS, 1989), fitomassa (TUCKER, 1979; GREEN, 1987; GALLO et al., 1985; PRINCE, 1991), radiação fotossinteticamente ativa absorvida (WIEGAND et al., 1974; ASRAR et al., 1984; HATFIELD et al., 1984; SELLER, 1985) e produtividade (ASRAR et al., 1985).

Para Wiegand et al. (1991), o índice de vegetação resulta de transformações lineares do fator de reflectância, obtido em duas ou mais bandas espectrais, envolvendo soma, razão, diferença ou qualquer outra combinação.

De acordo com Baret e Guyot (1991), os índices de vegetação existentes podem ser agrupados em duas grandes classes: índices na forma de razão, como exemplo, “Simple Ratio” (SR), “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI), “Soil Adjusted Vegetation Index” (SAVI); e aqueles caracterizados pela distância ortogonal, exemplo, “Perpendicular Vegetation Index” (PVI), “Weighted Difference Vegetation Index” (WDVI) e “Greenness Vegetation Index” (GVI).

Para Moreira (2001), os índices de vegetação proporcionam uma maximização de informações espectrais da vegetação em um menor número de bandas de operação dos sensores, objetivando ressaltar o comportamento espectral da vegetação em relação ao solo e a outros alvos da superfície terrestre. A utilização de índices de vegetação possibilita o controle de erros introduzidos nas estimativas da radiância pela resposta lambertiana dos alvos agrícolas.

Os índices de vegetação possuem como princípio a combinação de informações espectrais nas bandas do vermelho (V) da região do visível e do infravermelho próximo (IVP), pois estas bandas apresentam grande contraste na assinatura espectral de uma vegetação verde e sadia. Pode-se considerar que quanto maior for o contraste entre as assinaturas espectrais na região do vermelho e infravermelho próximo, maior vigor vegetativo da vegetação na área imageada (MOREIRA, 2001).

Normalmente a vegetação possui uma baixa reflectância na região do vermelho (600 a 700 nm) e alta reflectância no infravermelho próximo do espectro eletromagnético. No primeiro caso, a absorção da radiação se dá pelos elementos fotossintéticos como a clorofila e os carotenos, enquanto que no IVP a radiação é refletida através da parede dos tecidos esponjosos das folhas.

O índice de vegetação além de ressaltar o sinal da vegetação, minimiza os efeitos da variação na irradiância solar e do solo, para que as avaliações de biomassa, estresse hídrico, sanidade e produtividade de uma cultura agrícola possam ser realizadas (JACKSON e HUETE, 1991).

Como os índices de vegetação são obtidos a partir de medidas do fator de reflectância, eles estão sujeitos à influência dos mesmos fatores que atuam nas propriedades ópticas dos elementos do dossel agrícola. Baret e Guyot (1991) citam como fatores intrínsecos ao dossel as propriedades ópticas da folha, a geometria do dossel e a influência do solo e, como fatores externos, posição do sol e nebulosidade.

Segundo Choudhury (1987), os dois índices de vegetação mais comumente usados são: razão simples (RS) e o índice de vegetação diferença normalizada (NDVI). Do ponto de vista matemático, esses dois índices apresentam equivalência funcionais, ou seja, contêm o mesmo tipo de informações sobre parâmetros biofísicos das culturas (JACKSON e HUETE, 1991). Entretanto, conforme comentam os autores, o NDVI é mais sensível a vegetação esparsa do que o RS.

O índice NDVI permite determinar a densidade de fitomassa foliar fotossinteticamente ativa por unidade de área (quanto maior for este índice, mais densa é a fitomassa verde). A medida que aumenta a quantidade de vegetação, aumenta a reflexão na banda do infravermelho próximo e diminui a reflexão na banda do vermelho fazendo com que o aumento da razão seja potencializado, realçando a vegetação (KAZMIERCZAK, 1999 citado por ARAI et al., 2001).

O NDVI permite identificar a presença de vegetação verde na superfície e caracterizar sua distribuição espacial, bem como a evolução de seu estado ao longo do tempo. Os valores do índice variam entre -1 e +1 e sua interpretação deve levar em consideração os ciclos fenológicos anuais a fim de se distinguir as oscilações naturais do

estado da vegetação, das mudanças na distribuição espacial resultantes de desmatamento ou demais formas de intervenção sobre a vegetação (CEBALLOS e SCHROEDER, 1999).

Segundo Epiphany et al. (1996), quando a vegetação estiver densa, úmida e bem desenvolvida os valores do NDVI serão próximos a 1. O solo nu ou com vegetação rala apresentará valores positivos de NDVI, porém pouco elevados.

Tucker e Garratt (1977) e Ripple (1985) investigando as características assintóticas da reflectância de duas espécies de gramíneas verificaram que o NDVI foi o melhor índice para estimar baixa quantidade de fitomassa.

Em trabalho realizado por Marchiorato et al. (2001), cujo objetivo foi conhecer o comportamento espectral de plantas de algodão em áreas infestadas com *Meloidogyne incognita*, os autores fizeram leituras de um espectrorradiômetro de campo. Nesta pesquisa foi verificado que existia uma clara relação entre os diferentes níveis de infestação da cultura do algodão por *M. incognita* e a resposta espectral da cultura, expressa através do NDVI. Pelo estabelecimento de relações físicas entre parâmetros de sensoriamento remoto e parâmetros biofísicos de alvos naturais, os autores entendem que se torna mais proveitoso o uso quantitativo dos dados gerados pelos sensores remotos.

Ponzoni (1998) utilizou imagens TM/Landsat referente a duas passagens para o estudo de áreas de plantios de *Eucalyptus* spp. afetadas por geadas no município de Lençóis Paulista – SP. Na seleção do par de imagens o autor levou em consideração a data anterior e posterior à geada ocorrida em 26/06/94, tendo a imagem da primeira data como referência. Assim, através do uso dos índices NDVI e Imagem-Proporção (VEG) procurou identificar as áreas afetadas com geada. Os resultados indicaram tendência de diminuição, tanto de NDVI quanto de VEG, na passagem posterior à ocorrência da geada, porém as diferenças entre os valores médios destes parâmetros não foram significativas ao nível de 5 % de significância.

Bons resultados têm sido conseguidos através da utilização da temperatura de superfície nos índices de vegetação. Segundo Vidal et al. (1994) e Vidal e Devaux-Ros (1995), citados por Chuvieco et al. (2001), a relação entre os índices de vegetação e a temperatura de superfície tem se mostrado de grande utilidade para avaliar o estresse hídrico das plantas.

Alguns trabalhos também estão sendo realizados em outras regiões espectrais, procurando caracterizar melhor a vegetação. Chuvieco et al. (2001) desenvolveram trabalho para estimar o estado hídrico da vegetação a partir de sensores de alta e baixa resolução (Landsat, NOAA-AVHRR e Spot-vegetação). Através das imagens de reflectância e temperatura de superfície, geraram índices como o NDVI, o NDII (Normalized Difference Infrared Index) e o cociente entre o NDVI e a Temperatura de Superfície. Os resultados mostraram relações bastante consistentes entre as espécies estudadas e a reflectividade das bandas do infra vermelho médio de ondas curtas. Segundo os autores, o infravermelho médio é a região espectral mais idônea para análise do estado hídrico, pois é uma região espectral muito sensível a absorção de água nas folhas.

Com a intenção de avaliar o uso efetivo e operacional dos índices de vegetação MODIS para o monitoramento sistemático e contínuo do bioma Cerrado, Ferreira et al. (2003) verificaram que os resultados demonstram plenamente o potencial do produto MOD13 para o monitoramento sistemático e contínuo da cobertura vegetal no bioma Cerrado, os autores destacam também, a plena operacionalidade no uso dos dados MODIS.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Área de estudo

O estudo foi realizado primeiramente em todo o estado do Paraná, para avaliar a extensão do impacto da geada e posteriormente em 5 municípios localizados na região de Cornélio Procópio (Figuras 6 e 7).

O estado do Paraná está localizado entre as latitudes 22° 29' 30" e 26° 42' 59" S e as longitudes 48° 02' 24" e 54° 37' 38" W

Em nível regional, foram selecionadas lavouras de café situadas em 12 propriedades de 5 municípios no noroeste do estado do Paraná, pertencentes à região de Cornélio Procópio, localizados entre as latitudes 22° 53' 40" e 23° 36' 23" S e as longitudes 50° 17' 31" e 50° 49' 01" W. Os municípios foram Cornélio Procópio, Nova Fátima, Ribeirão do Pinhal, Santa Mariana e São Sebastião da Amoreira.

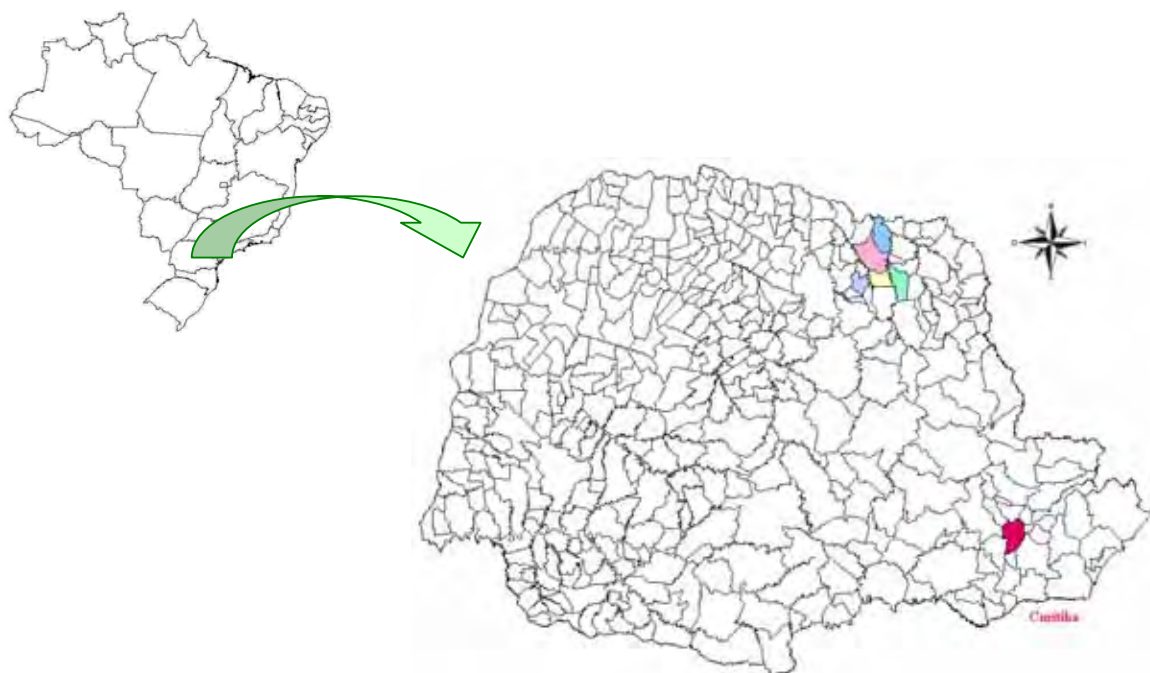


Figura 6. Estado do Paraná e limites dos municípios selecionados para o estudo regional.

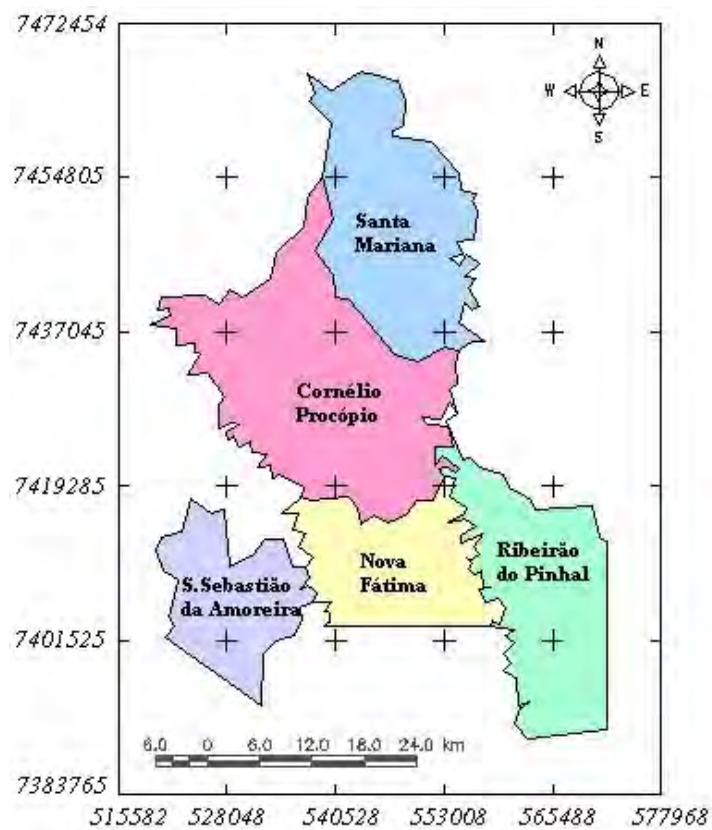


Figura 7. Localização dos municípios selecionados para o estudo.

A região de Cornélio Procópio compreende 23 municípios pertencentes ao núcleo regional da Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento do Paraná (SEAB). Esses municípios localizam-se no segundo e terceiro planalto paranaense (BRASIL, 1981). As propriedades estudadas estão dentro da amostragem utilizada pela SEAB, para a realização da previsão de produtividade de café da região.

A área plantada de café no estado é de aproximadamente 133.000 ha, dos quais 123.201 ha, ou seja, 92,2% estão em produção. O plantio está concentrado nas regiões norte e noroeste, com destaque para os Núcleos Regionais de Jacarezinho, Londrina e Cornélio Procópio, que responderam por cerca de 52% da produção estadual em 2003. Conforme Figura 8, Cornélio Procópio aparece na terceira colocação, com 14 % da produção do estado (SEAB/DERAL, 2004).

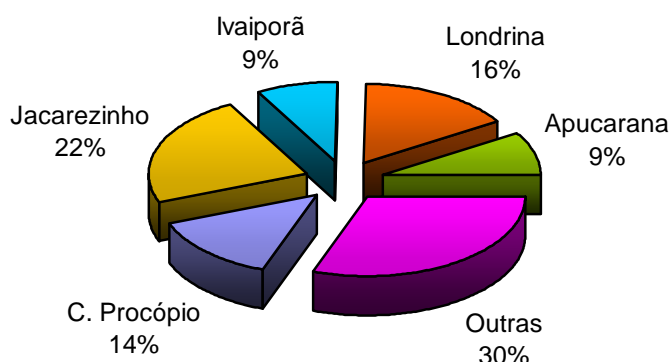


Figura 8. Produção de café no Paraná - participação dos Núcleos Regionais na produção Estadual – Safra 2003 (SEAB/DERAL, 2004).

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cfa, caracterizado por clima subtropical, com temperaturas médias inferiores a 18°C no inverno e no verão quentes com temperaturas médias acima de 22 °C, possuindo verões quentes e geadas pouco frequentes. Há concentração de chuvas no verão sem, contudo, ter estação seca no inverno. Possui precipitação média anual em torno de 1300 a 1500 mm. Durante o mês mais chuvoso (janeiro), a precipitação média mensal é de 170 mm e, nos meses menos chuvosos (julho/agosto), a precipitação média mensal é de 40 mm (IAPAR, 1978).

Quanto ao relevo da região há uma grande diversidade, em geral, pode-se afirmar que os municípios possuem uma topografia mais plana, pouco suscetível à erosão e mecanizável em grande parte de sua área (BRASIL, 1981).

Conforme EMBRAPA (1984) e Prado (2001), os solos que compõem essa região são principalmente Latossolos, Alissolos, Argissolos e Neossolos.

5.2 Dados de sensoriamento remoto

Utilizaram-se dados de radar e imagens orbitais coletadas por quatro sistemas sensores, ou seja:

a) Modelo Digital de Elevação (MDE), obtido do projeto Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) da NASA e distribuído pela United States Geological Survey (USGS) através do endereço <http://srtm.usgs.gov/data/obtainingdata.html>.

b) Imagens do sensor MODIS do satélite Terra, com órbita ponto h13v11, conforme Tabela 1. Estas imagens são disponibilizadas gratuitamente pela NASA, através do endereço eletrônico: <http://modland.nascom.nasa.gov/browse/>.

Tabela 1. Informações sobre as imagens Terra/MODIS.

PRODUTO	DADOS DISPONÍVEIS	CARACTERÍSTICA	DATA	CALENDÁRIO JULIANO	BANDAS
MOD 09	Reflectância de superfície	Imagens diárias	06/07/00	188	1, 2, 6 e 7
			14/07/00	196	
			17/07/00	199	
			21/07/00	203	
			24/07/00	206	
MOD 09	Reflectância de superfície	Imagens de 8 dias	11/07/00	193	1, 2, 6 e 7
			19/07/00	201	
			27/07/00	209	
MOD 11	Temperatura de superfície da terra e emissividade	Imagens temperatura (dia)	06/07/00	188	21
			14/07/00	196	
			17/07/00	199	
			21/07/00	203	
			24/07/00	206	

c) Imagens dos satélites Landsat-5 e Landsat-7, com órbita ponto 222/76, da Divisão de Sensoriamento Remoto do INPE (Tabela 2).

Tabela 2. Informações sobre as imagens Landsat.

PRODUTO	DADOS DISPONÍVEIS	DATA	BANDAS
ETM+	Reflectância de superfície	30/01/00	1, 2, 3, 4, 5 e 7
TM	Reflectância de superfície	16/07/00	1, 2, 3, 4, 5 e 7
		18/09/00	

5.3 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados estão apresentados no Apêndice 1, correspondentes às temperaturas mínimas ocorridas nos dias 13 e 17 de julho de 2000, nas estações meteorológicas localizadas nos municípios apresentados no mapa da Figura 9. Estes dados foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) e Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR).

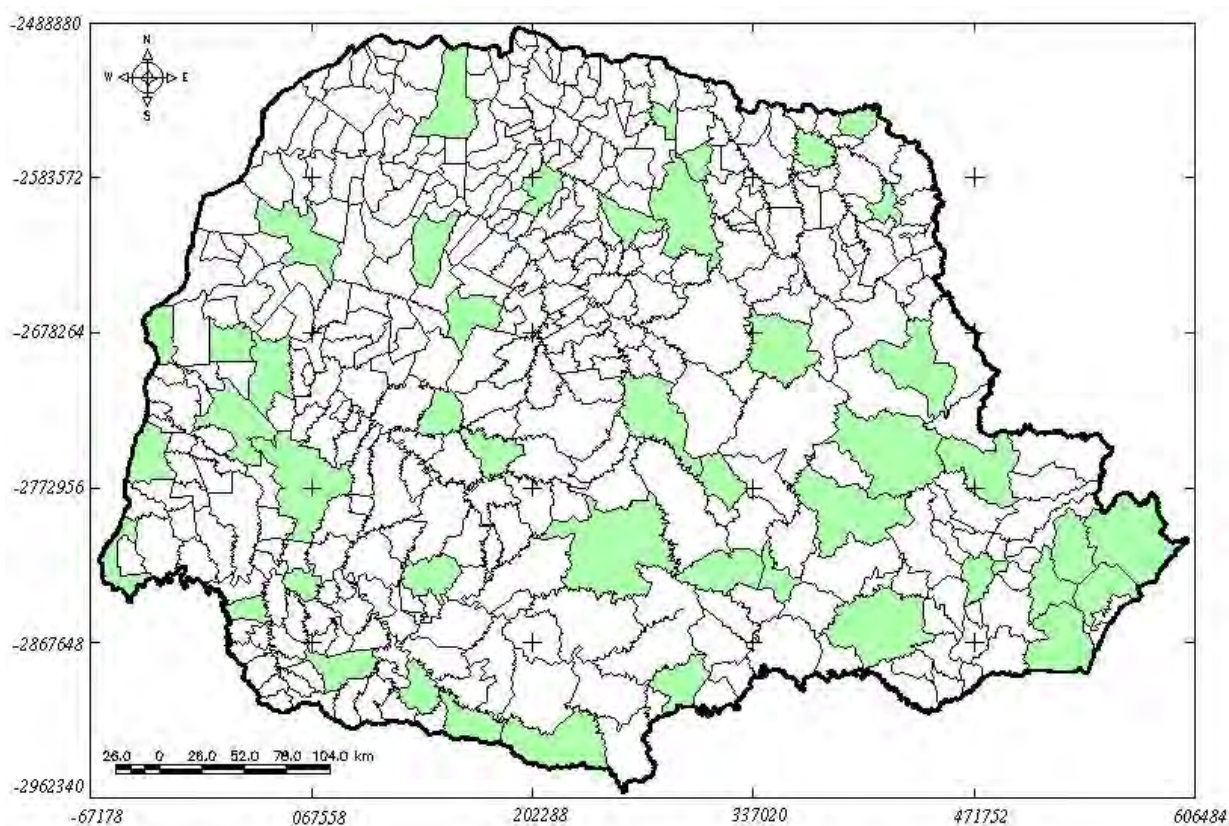


Figura 9. Municípios onde se localizam 47 estações meteorológicas do INMET, SIMEPAR e IAPAR.

5.4 Dados cartográficos

Como suporte para as análises das imagens de satélites, utilizou-se o seguinte material cartográfico:

- Malha estadual e municipal fornecida pelo IBGE e disponibilizada no banco de dados do SPRING;
- Mapa de solos (EMBRAPA, 1984), na escala 1:600000, conforme Figura 10.

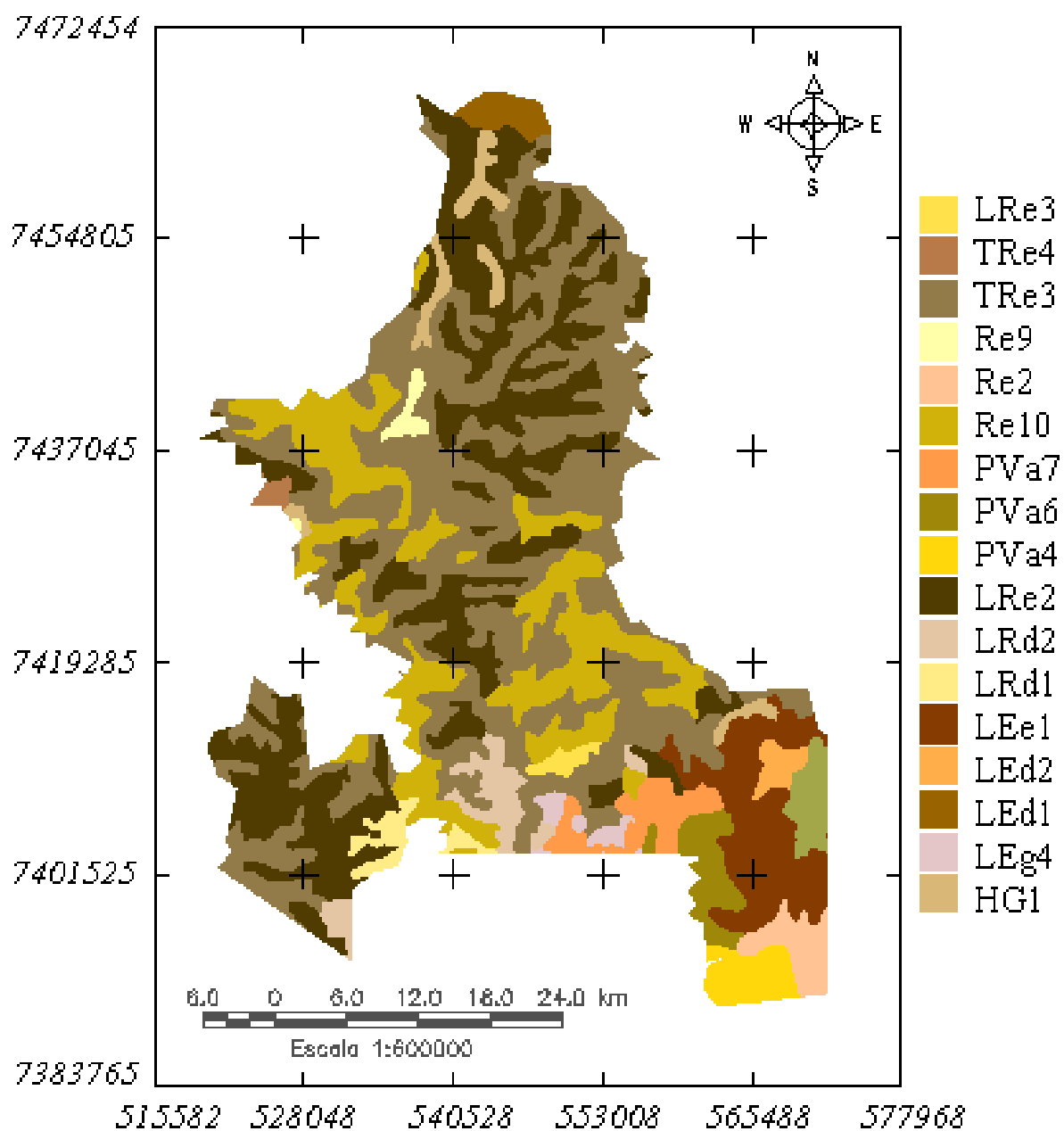


Figura 10. Mapa de solos dos 5 municípios estudados (EMBRAPA, 1984).

5.5 Aplicativos e equipamentos complementares

- SPRING 4.1 (CÂMARA et al., 1996), para criação do banco de dados;
- PCI Image 8.0 (ESA, 1994), para o tratamento das imagens Landsat;
- MRT (NASA, 2004), para processamento das imagens MODIS;
- SAS 8.0 (SAS Institute Inc., 1999), para análise estatística;
- GPS de navegação Garmin modelo Emap, para localização das lavouras de café.

5.6 Metodologia

A metodologia adotada nesta pesquisa foi dividida nas seguintes etapas:

- Levantamento de campo para coleta de informações sobre a geada ocorrida em 13 e 17 de julho de 2000 e identificação de algumas lavouras de café monitoradas pelo Departamento de Economia Rural (DERAL) da Secretaria da Agricultura do e do Abastecimento do Paraná (SEAB);
- Construção e manipulação do banco de dados no SPRING;
- Processamento dos dados Terra/MODIS, dos dados Landsat-5/TM e Landsat-7/ETM+;
- Avaliação dos dados.

5.6.1 Levantamento de campo

O levantamento de campo teve a finalidade de identificar geograficamente lavouras de café que foram afetadas pela geada e coletar dados sobre as mesmas. Na coleta dos dados em campo foram obtidas informações da propriedade, características dos talhões e sistema de cultivo. Por meio de entrevistas dos proprietários, foram obtidas também informações do impacto das geadas ocorridas em julho de 2000,

conforme questionário no Apêndice 2. Para a localização das lavouras utilizou-se um GPS de navegação.

5.6.2 Construção e manipulação do banco de dados geográfico (BDG)

O BDG foi estruturado em planos de informações (PIs), em que cada PI possuía um tipo de dado. Assim, criou-se tantos PI's conforme foram os dados disponíveis, conforme é exemplificado na Figura 11.

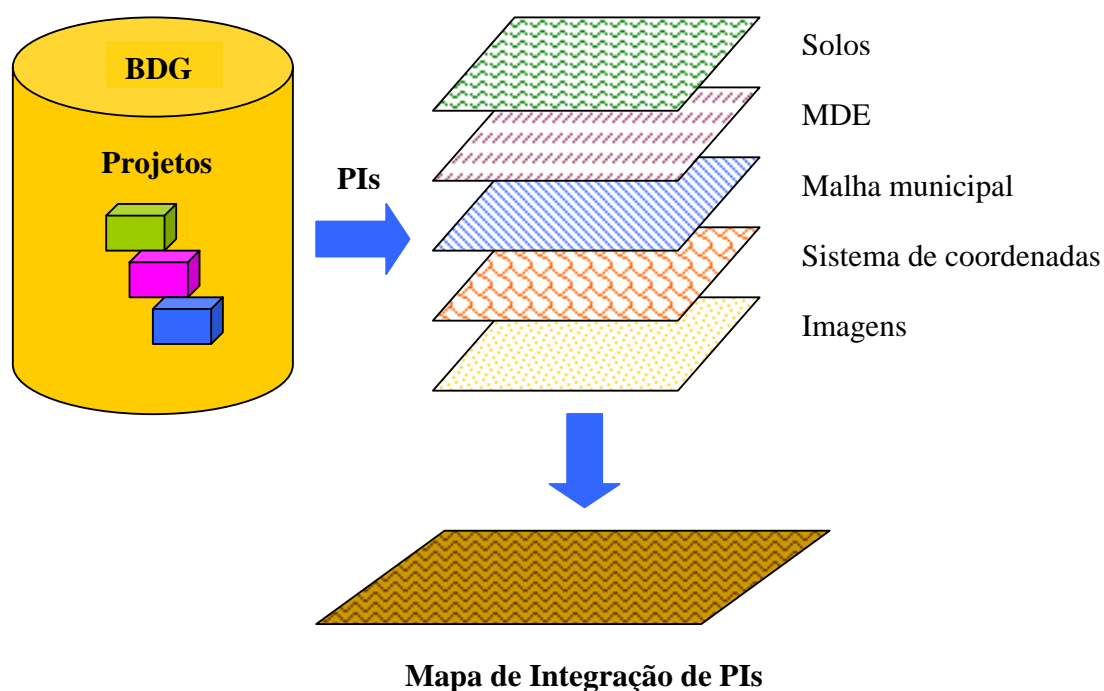


Figura 11. Esquema de um banco de dados geográfico (Adaptado de MOREIRA, 2003).

O banco de dados foi criado no aplicativo SPRING, no qual foram armazenados o mapa de solos, modelo digital de elevação, informações geográficas das lavouras, imagens dos três sistemas sensores, dados coletados no campo e a malha municipal no formato digital.

5.6.3 Processamento das imagens de satélites

Inicialmente, todas as imagens de satélites inseridas no banco de dados do SPRING, passaram por uma etapa denominada de pré-processamento, que consistiu em preparar as imagens para extrair delas as informações desejadas. Como a forma de processamento das imagens MODIS, TM e ETM+ são distintas, nos itens a seguir são descritas cada uma das etapas para cada tipo de imagem.

Posteriormente, com as imagens no banco de dados do SPRING, realizou-se uma avaliação preliminar dos dados, por meio da curva espectral de cada um dos pontos coletados em campo com GPS, para cada banda e cada dia, bem como, realizou-se uma avaliação visual nas imagens Landsat.

Com estas avaliações foram selecionadas as lavouras de café representativas e delimitados os polígonos que passaram a representar essas lavouras.

5.6.3.1 Processamento das imagens do sensor MODIS

As imagens MODIS foram obtidas do Eros Datacenter Gateway (<http://edcdaac.usgs.gov.gov.main.html>) sendo distribuídas gratuitamente na forma de diferentes produtos. Para este trabalho foram obtidos os produtos MOD09 (diárias e 8 dias) e MOD11 (temperatura de superfície), conforme já foi especificado no item 5.2.

Um fator importante em relação aos produtos MODIS é o de que os dados já vêm corrigidos para efeitos atmosféricos (nuvens, aerossóis, etc.) e georreferenciados, facilitando o trabalho de processamento das imagens.

Após a obtenção das imagens MODIS utilizou-se o Modis Reprojection Tool (MRT), programa fornecido pela NASA através do endereço eletrônico (<http://edc.usgs.gov/programs/sddm/modisdist/index.shtml>). Como o programa importa os arquivos no formato *hdf* e possibilita a saída dos arquivos no formato *geotiff* com 16 bits e o SPRING só trabalha em 8 bits realizou-se a conversão das imagens de 16 para 8 bits. O MRT também possibilitou a conversão de projeção, de sinusoidal para geográfica.

No caso das bandas 6 e 7 que possuem resolução espacial de 500 m e a banda 21 com resolução de 1 km, no próprio MRT realizou-se a reamostragem para 250 m através do interpolador vizinho mais próximo, pois para Novo (1982) este interpolador não altera os valores radiométricos da imagem original.

Na seqüência as imagens foram recortadas no MRT, para diminuir o tamanho dos arquivos e assim facilitar o processamento, sendo importadas posteriormente como *geotiff* para o banco de dados do SPRING e recortadas segundo o limite do estado do Paraná.

O sensor MODIS, embora seja considerado hiperespectral, isto é, opera em 36 bandas, não possui uma boa resolução espacial. Desta forma, a maneira mais eficiente para tratar essas imagens foi transformá-las em índices de vegetação, pois esses índices, em geral, são obtidos a partir das informações espectrais de apenas duas ou três bandas.

Assim, utilizaram-se para o tratamento das imagens MODIS, os índices NDVI e HCVI, realizando-se a implementação destes índices através de programas em Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL).

Para o cálculo do NDVI utilizou-se a Equação 1, proposta por Rouse et al. (1973).

$$NDVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V)} \quad (1)$$

em que,

NDVI = Normalized Difference Vegetation Index;

V = banda do vermelho (620 – 670 nm);

IVP = banda do infravermelho próximo (841 – 876 nm).

No cálculo do HCVI utilizou-se a Equação 2, proposta por Yi (2004) em comunicação pessoal.

$$HCVI = \frac{B2 - \left(\frac{B6 + B7}{2} \right)}{T_{sup}} \quad (2)$$

em que,

HCVI = Hydric Condition Vegetation Index;

B2 = banda do infravermelho próximo (841 – 876 nm);

B6 = banda do infravermelho médio (1628 – 1652 nm);

B7 = banda do infravermelho médio (2105 – 2155 nm);

T_{sup} = temperatura de superfície, dia, °K (3660 – 3840 nm).

O resultado da aplicação das Equações 1 e 2 são as imagens índices, que são geradas em número digital em uma categoria modelo numérico do terreno (MNT), ou seja, elas possuem uma grade numérica com variação de 0 a 255. Em função disto foi necessário normalizar estas imagens.

O processo de normalização também foi realizado na linguagem LEGAL, em que o resultado foi um MNT variando de -1 a 1. Para finalizar fatiou-se o NDVI (8 dias e diárias) e HCVI (diárias), gerando-se uma categoria temática para possibilitar a visualização do impacto das geadas.

Segundo o INPE (2004), o fatiamento consiste em gerar uma imagem temática a partir de uma grade retangular. Os temas da imagem temática resultante correspondem a intervalos de valores de cotas, chamados no SPRING de fatias. Desta forma, um Plano de Informação da categoria *numérica* originará um Plano de Informação de categoria temática representando um aspecto particular do modelo numérico de terreno, conseqüentemente, cada fatia deve ser associada a uma classe *temática* previamente definida no esquema conceitual do Banco de Dados ativo.

No final do processamento foram geradas as tabelas para as análises estatísticas. Este processo foi realizado através do módulo do SPRING denominado de *estatística de imagem*. Esta ferramenta faz análise estatística a partir de polígonos ou classes temáticas, sendo realizada neste caso a análise estatística dos polígonos das lavouras. Assim, o

programa gerou um arquivo com os resultados da análise estatística das imagens para ser aberto em planilha eletrônica.

5.6.3.2 Processamento das imagens dos sensores TM e ETM+

As imagens dos sensores TM e ETM+, por possuírem uma resolução espacial maior do que a do MODIS, foram empregadas para um estudo mais detalhado do efeito da geada nas lavouras de café identificadas no campo.

Na realização deste estudo foram utilizadas apenas três datas de imagens que estavam parcialmente livres de cobertura de nuvens, isto é, uma antes (30/01/00), uma entre as geadas (16/07/00) e outra depois da ocorrência das geadas (18/09/00). Foram também avaliadas, nas três datas, a contribuição de cada uma das imagens das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, no comportamento espectral de lavouras de café atingidas pela geada.

Como foi necessário utilizar imagens de diferentes datas realizando-se um estudo multitemporal, sendo cada imagem influenciada por fatores como diferenças de calibração dos sensores, sensibilidade dos detectores do sensor e condições atmosféricas diferentes, realizou-se uma correção destes fatores.

Desta forma, aplicou-se o procedimento de retificação, que consiste na utilização de uma imagem com boa qualidade radiométrica, adquirida sob condições de atmosfera limpa, para corrigir os efeitos atmosféricos das demais imagens (HALL et al., 1991).

O procedimento de retificação foi realizado no aplicativo PCI Imagine 8.0 (ESA, 1994) e a imagem que apresentou, visualmente, melhor qualidade radiométrica foi a de 16 de julho de 2000. Assim, a seqüência de retificação é descrita a seguir: a) *criação dos canais*: são planos de informações criados no PCI para armazenar as imagens de cada data de passagem do satélite; b) *imagem reflectância*: é a transformação das imagens de nível de cinza para reflectância, usando o programa *Reflet.mod* do aplicativo PCI; c) *imagens greenness e brightness*: são geradas por meio do programa *Grbr.mod* do aplicativo PCI a partir das

imagens reflectância das bandas 3, 4 e 5 (KAUTH e THOMAS, 1976; HALL et al., 1991); d) *criação de máscaras*: são adotados sobre as imagens *greenness* e *brightness* para extrair informações espectrais de amostras que representam as classes água (escuro) e solo exposto (claro), onde o gráfico de dispersão (eixo Y - valores de *greenness* e eixo X - valores de *brightness*) facilita a escolha das amostras tanto na imagem base quanto na imagem a ser retificada; e) *médias de reflectância*: procedimento adotado para determinar as médias dos pontos escuros e claros para todas as datas, nas imagens *greenness* e *brightness*; f) *correção das médias*: consiste em corrigir as médias das imagens (*greenness* e *brightness*) a serem retificadas, obtidas na etapa anterior, em função da média da imagem base obtida em 16/07/00; g) *análise dos resultados*: consiste em sobrepor os resultados da retificação sobre o diagrama de dispersão da imagem base para verificar a qualidade da retificação sendo realizado por meio do *Scater Plotter*, disponível no PCI.

O diagrama de dispersão facilitou a definição da faixa dos valores de reflectância e a confirmação do êxito da retificação, pois ele possibilitou visualizar a sobreposição dos dados da imagem base com a imagem retificada.

Com a retificação radiométrica pronta, realizou-se o georreferenciamento ou registro das imagens. Segundo INPE (2004), o georreferenciamento ou registro de uma imagem compreende uma transformação geométrica que relaciona coordenadas de imagem (linha, coluna) com coordenadas de um sistema de referência. O processo é fundamental em vários problemas práticos na área de sensoriamento remoto tais como: integração de uma imagem à base de dados existente num SIG, fusão de imagens adquiridas por sensores diferentes e na análise de dados multitemporais.

O registro das imagens no SPRING foi realizado através da obtenção dos pontos em um mosaico do ano de 2000, fornecido pela NASA (<https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/mrsid.pl>). Este mosaico utiliza 3 bandas do Landsat ETM+ (7 *red*, 4 *green* e 2 *blue*). O mosaico utilizado possui a referência S-22-20_2000 e é fornecido em UTM/WGS84, o que facilitou o georreferenciamento imagem-imagem.

Após o registro realizou-se a importação das três imagens com extensão *grib* para o banco de dados e o recorte utilizando o limite dos 5 municípios. Com as imagens recortadas fez-se um realce das imagens, conforme Queiroz e Barros (1995) o realce

de imagem proporciona o melhoramento da qualidade visual da imagem ou a sua conversão em uma forma mais adequada para análise visual humana.

Com as imagens uniformizadas quanto aos aspectos radiométricos, recortadas e realçadas, procedeu-se à determinação do NDVI das imagens TM e ETM+, sendo utilizada a Equação 1. Assim como nas imagens MODIS, realizou-se a normalização dos índices, com intervalo de -1 a 1 e posteriormente o seu fatiamento.

5.6.4 Avaliação dos dados

Por possuírem melhor resolução espacial, a primeira avaliação foi realizada nas imagens Landsat, com a intenção de conhecer melhor as lavouras de café selecionadas, gerando-se no SPRING, uma base temática e, sobrepondo nesta base as imagens digitais. O polígono resultante da delimitação de cada uma das lavouras de café foi menor do que a área de café nas imagens do Landsat. Esse fato permitiu que fossem eliminados os pixels de borda, os quais são considerados impuros, ou seja, pixels contaminados com reflectância de alvos vizinhos as lavouras de café.

Após demarcar as lavouras, a primeira avaliação foi realizada nas imagens MODIS utilizando-se o NDVI fatiado (8 dias e diárias) e HCVI fatiado. Este estudo foi realizado em nível estadual, cujo objetivo foi quantificar visualmente a abrangência do efeito da geada. Em outras palavras, analisar o potencial dessas imagens para o monitoramento do efeito de geada em grande escala.

Esta avaliação foi também realizada para as imagens TM e ETM+ com o NDVI fatiado, para os cinco municípios estudados.

A estatística de imagem foi realizada por polígonos nas imagens NDVI normalizadas (diária e 8 dias) e HCVI normalizadas, do MODIS e imagens NDVI normalizado do TM e ETM+.

Em seguida, utilizou-se o *teste t* para pares de observação, ou seja, para comparar n pares diferentes para um valor m , conforme Equação 3. Nesse procedimento,

procurou-se avaliar se houve diferença significativa entre a imagem antes da geada e as posteriores.

$$t = \frac{\bar{d} - m}{S_d / \sqrt{n}} \quad (3)$$

em que,

d = média da amostra de pares diferentes;

S_d = variância da amostra de pares diferentes;

n = número de pares.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente são apresentados os resultados obtidos no levantamento de campo. A seguir, são mostrados o mapa do modelo digital de elevação, dados de solos e os dados meteorológicos da região. Posteriormente são apresentados os resultados da avaliação estatística, as imagens fatiadas e avaliações complementares.

6.1 Levantamento de campo

O trabalho de campo permitiu selecionar as lavouras cafeeiras cujos tamanhos eram compatíveis com os dados MODIS, sendo possível selecionar e coletar informações de 36 lavouras, que foram perceptíveis nos dados orbitais.

Nestas lavouras foram traçados polígonos de forma a representar a maior área possível de cada uma e, ao mesmo tempo, tendo o cuidado de evitar pixels de borda, para não obter valores espectrais contaminados com outros alvos limítrofes (Figura 12 e Apêndice 4). A análise dos dados (Apêndice 5) permitiu verificar que o maior polígono correspondeu a uma área de 154,25 ha, enquanto que o menor possui 9,62 ha.

Os dados de campo (Apêndice 5) mostram que boa parte das lavouras naquela época eram constituídas de cafezais mais antigos, com idade entre 22 a 25 anos, com

espaçamento convencional de 4 x 2 m, sendo as variedades mais utilizadas: Catuaí e Mundo Novo.

Embora não exista uma comprovação técnica, os agricultores entrevistados relataram que a maior parte das áreas foram atingidas pela geada do tipo radiação, sendo o aspecto visual de geada branca e a intensidade severa. Posteriormente à geada, diversas áreas de café perceptíveis nas imagens da época e utilizadas nessa pesquisa foram erradicadas em função da severidade das geadas. A descrição realizada pelos agricultores sobre a severidade da geada vem de encontro com os resultados obtidos.

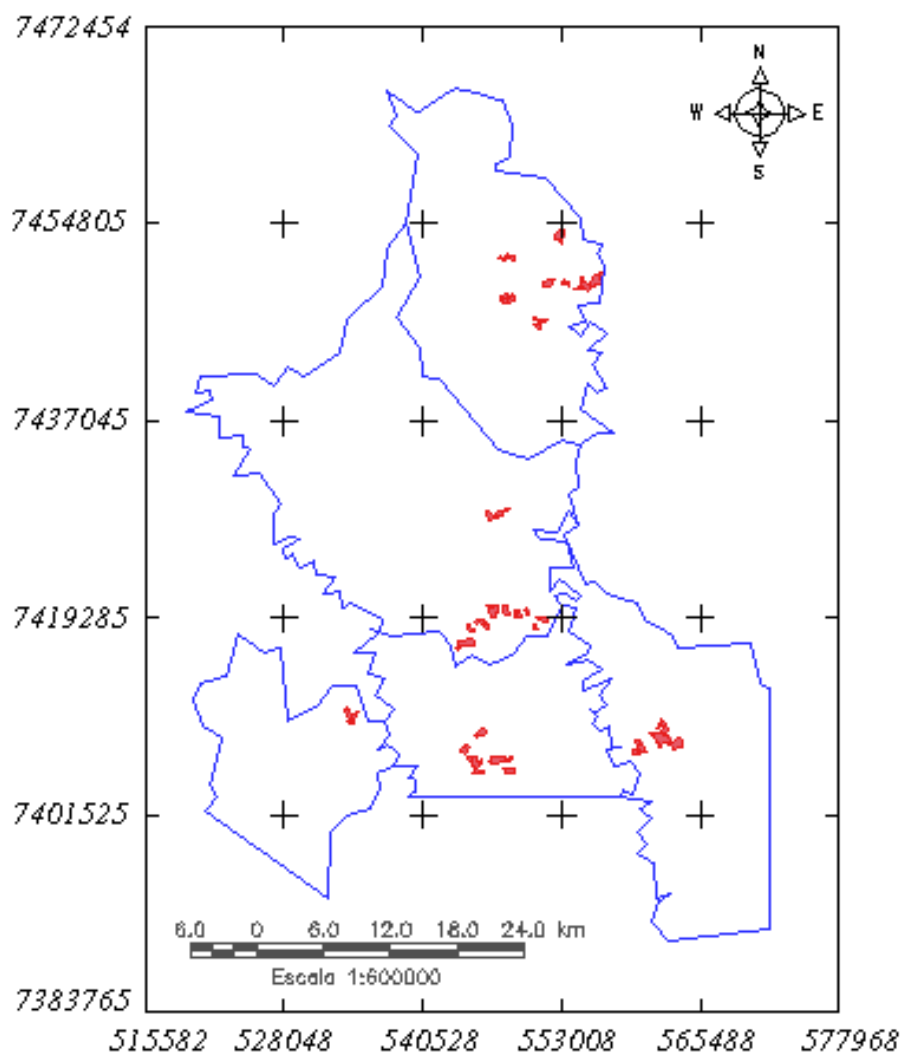


Figura 12. Distribuição das 36 lavouras de café estudadas, localizadas em 5 municípios do noroeste do Paraná.

6.2 Modelo digital de elevação – MDE

No fatiamento realizado no MDE considerou-se um espaçamento entre as isolinhas de 20 metros (Figura 13).

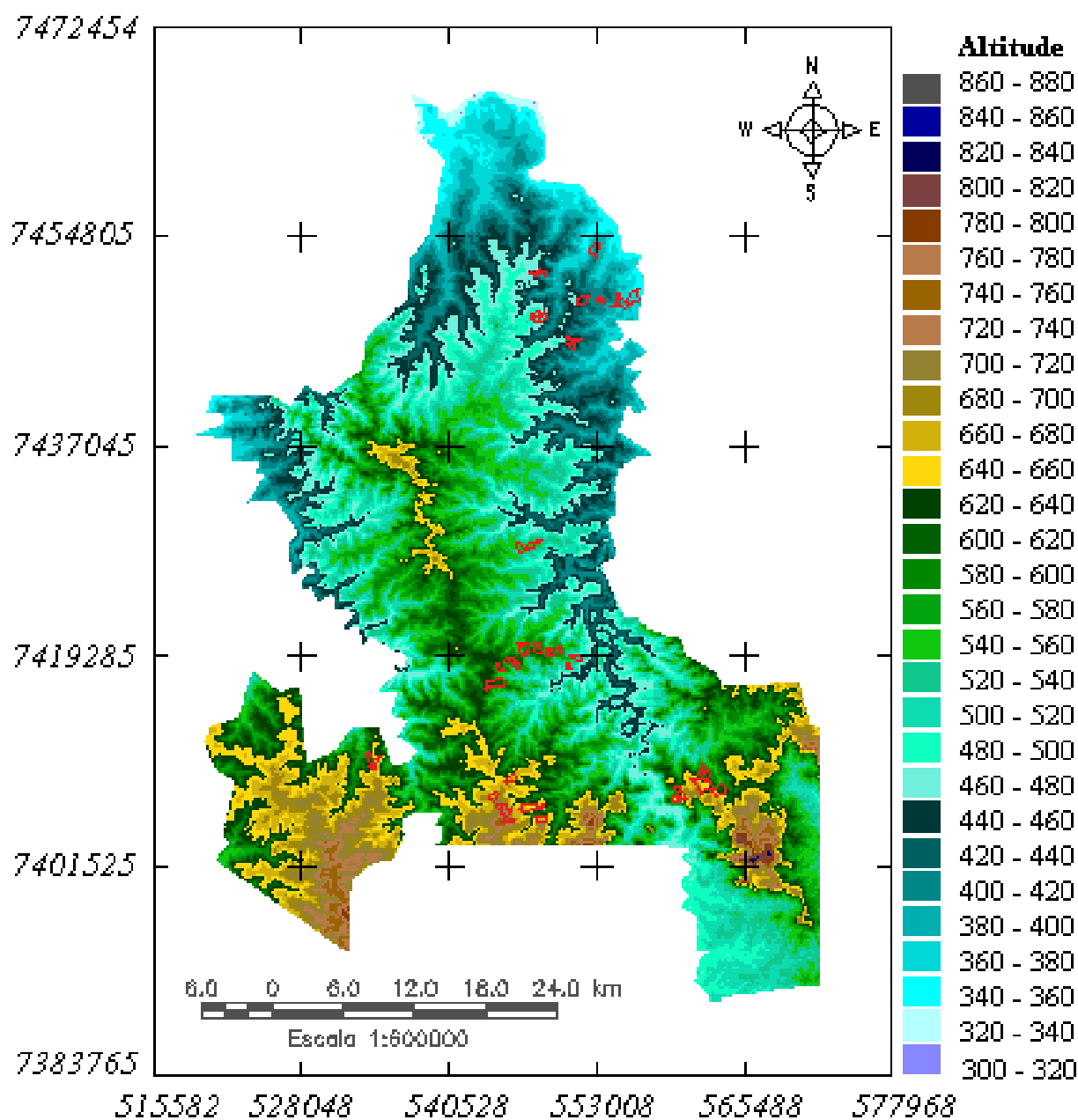


Figura 13. Modelo digital de elevação dos 5 municípios estudados.

A altitude das lavouras estudadas varia de 340 a 760 metros (Apêndice 2). Segundo Camargo (1972), quanto maior a altitude, menor a temperatura e maior a ocorrência de geadas. Assim, a análise da Figura 13 mostra que as lavouras mais ao sul, situadas nas maiores altitudes são as mais propensas à ocorrência de geadas, onde a altitude atinge suas cotas máximas.

6.3 Dados meteorológicos

Os dados obtidos de estações meteorológicas mais próximas da área estudada (Figura 9 e Apêndice 1) indicaram a ocorrência de geadas em vários municípios do estado, boa parte destas estações meteorológicas registraram temperaturas mínimas negativas ou próximas a zero nos dias 13 e 17 de julho de 2000, chegando a valores de $-4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ no dia 13 de julho na estação meteorológica de Irati e $-6,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ no dia 17 de julho na estação de Palmas (Apêndice 3).

As estações meteorológicas mais próximas da área do estudo registraram, nos dias 13 e 17 de julho, temperaturas mínimas de $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0,20\text{ }^{\circ}\text{C}$ em Bandeirantes; $-0,20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-1,30\text{ }^{\circ}\text{C}$ em Londrina; e $2,40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ em Irati. Para Sentelhas (2000), a temperatura do ar é medida sob uma condição de referência, para que haja comparação entre diferentes locais. A condição padrão para a medida de temperatura do ar é sobre área plana e gramada, a uma altura de 1,5 a 2,0 m acima da superfície e dentro de um abrigo meteorológico que permita a livre passagem do ar e impeça a incidência de radiação solar nos equipamentos.

Pinto et al. (1983) citados por Pinto et al. (2000), verificaram que, estatisticamente, ocorre uma diferença de $5,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ em média, entre as medidas no abrigo e na relva a 5 cm do terreno gramado e que essa diferença representa de forma significativa a variação térmica das folhas em noites de geadas.

Estudos de Camargo et al. (1993), Grodzki et al. (1996) e Oliveira et al. (1997) citados por Sangiolo e Nery (2000), relacionaram as temperaturas mínimas do ar, medida a 1,5 m de altura, com as da relva, a 0,05 m, nos estados de São Paulo, Paraná e Rio

Grande do Sul, respectivamente, mostraram que valores abaixo de 3 °C no abrigo, já podem levar à ocorrência de geadas.

6.4 Tipos de solos

Conforme o mapa de solos (Figura 10 e Apêndice 2) pode-se verificar que as lavouras estavam localizadas nos seguintes tipos de solos (EMBRAPA, 1999):

- LRe2 = Latossolo Vermelho Eutroférico;
- TRe3 = Nitossolo Eutroférico;
- RE10 = associação de Neossolo Litólico + Chernossolo + Nitossolo;
- LRd2 = Latossolo Vermelho Distroférico;
- LEa4 = Latossolo Vermelho Distroférico Alissolo;
- PVa7 = Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico;
- LLe1 = Latossolo Vermelho Eutrófico.

Os solos onde estão localizadas as lavouras de café (Figura 10 e Apêndice 2) possuem como características alto teor de óxidos de ferro e textura argilosa, com exceção do solo PVa7, que possui uma menor quantidade de óxido de ferro e textura arenosa/média. Conforme Madeira Netto (2001), em solos com estas características, o espectro é dominado pelos óxidos de ferro, apresentando albedos muito baixos e valores de reflectância decrescentes para os comprimentos de onda superiores a 750 nm. No infravermelho de ondas curtas, as absorções são tão intensas que as bandas em 1400 e 1900 nm atribuídas à água nestes espectros, são apenas vagamente perceptíveis.

6.5 Imagens NDVI do MODIS (8 dias)

A análise da Figura 14 permite verificar que o valor do NDVI decresceu da primeira para a última data das imagens. O índice que possuía o valor de 0,58 na

imagem de 11/07/00 passou para 0,48 na imagem da data de 27/07/00. Esse resultado indica perda do vigor vegetativo, ocorrendo diminuição da reflectância, provocada pela danificação do sistema de absorção da radiação eletromagnética, ou seja, redução das atividades fotossintéticas do café, concordando com Ponzoni (1998).

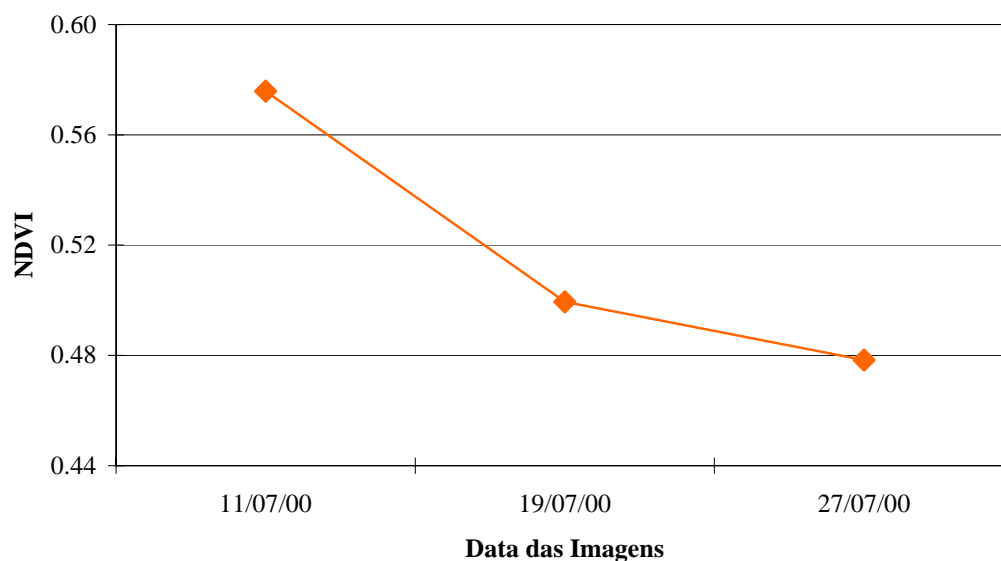


Figura 14. Valores médios de NDVI para 36 lavouras em três datas do MODIS de 8 dias.

Com o objetivo de verificar se as diferenças observadas eram estatisticamente significativas, aplicou-se o teste t para pares de observações entre valores médios de NDVI nas 36 lavouras estudadas, obtidos nas imagens MODIS de 8 dias, para as três datas (Tabela 3).

Tabela 3. Resultados do teste t aplicado para valores médios de NDVI do MODIS (8 dias).

Diferença entre as datas	Média	Desvio padrão	Valor de t	Pr > t
11/07/00 – 19/07/00	0,0764	0,0649	7,06**	< 0,0001
11/07/00 – 27/07/00	0,0975	0,0675	8,67**	< 0,0001

Os resultados do teste t (Tabela 1) mostram que os valores do NDVI obtidos na imagem de 11/07/2000 diferem-se significativamente ($p < 0,05$) daqueles obtidos nas imagens posteriores.

A análise visual das Figuras 15, 16 e 17 permite verificar uma diminuição nos valores de NDVI entre a primeira e as demais imagens (Figuras 15 e 17). Esta alteração dos valores ocorre não só nas lavouras estudadas como em todo o Estado, indicando que a ocorrência de geada foi generalizada.

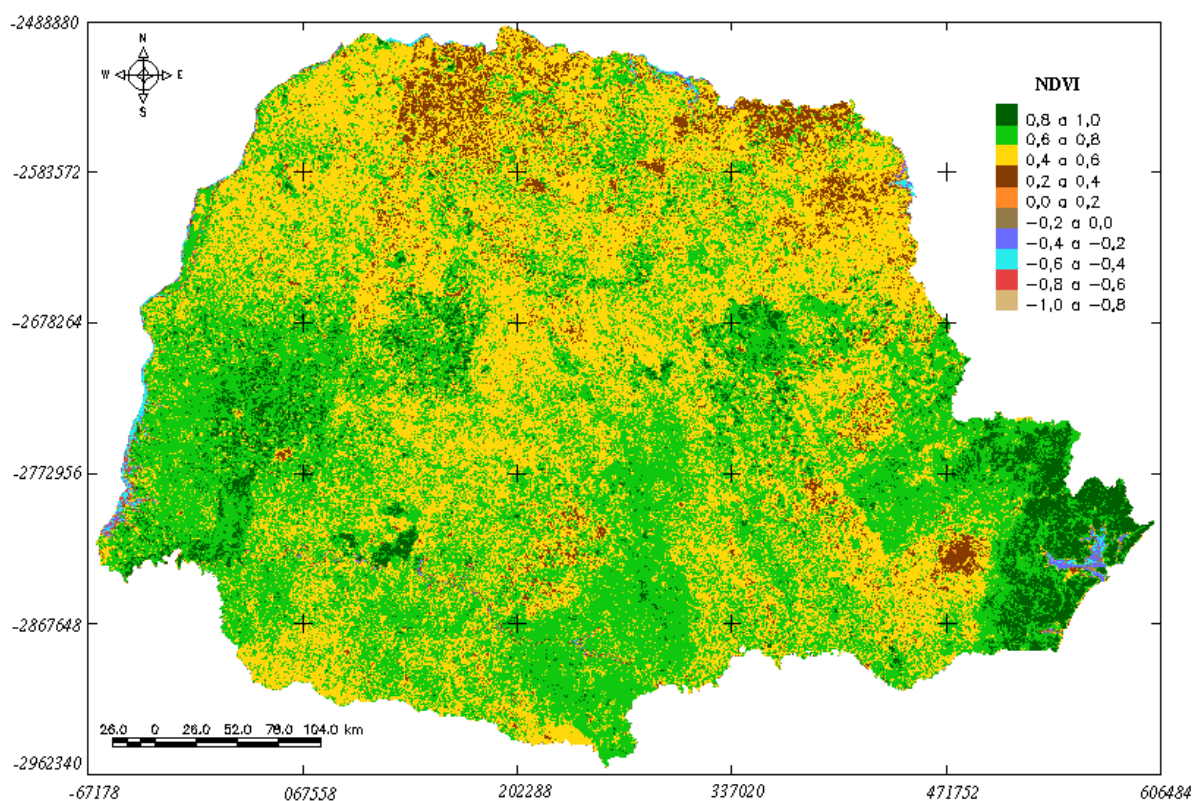


Figura 15. Imagem NDVI fatiada, obtida em 11/07/00, antes da geada.

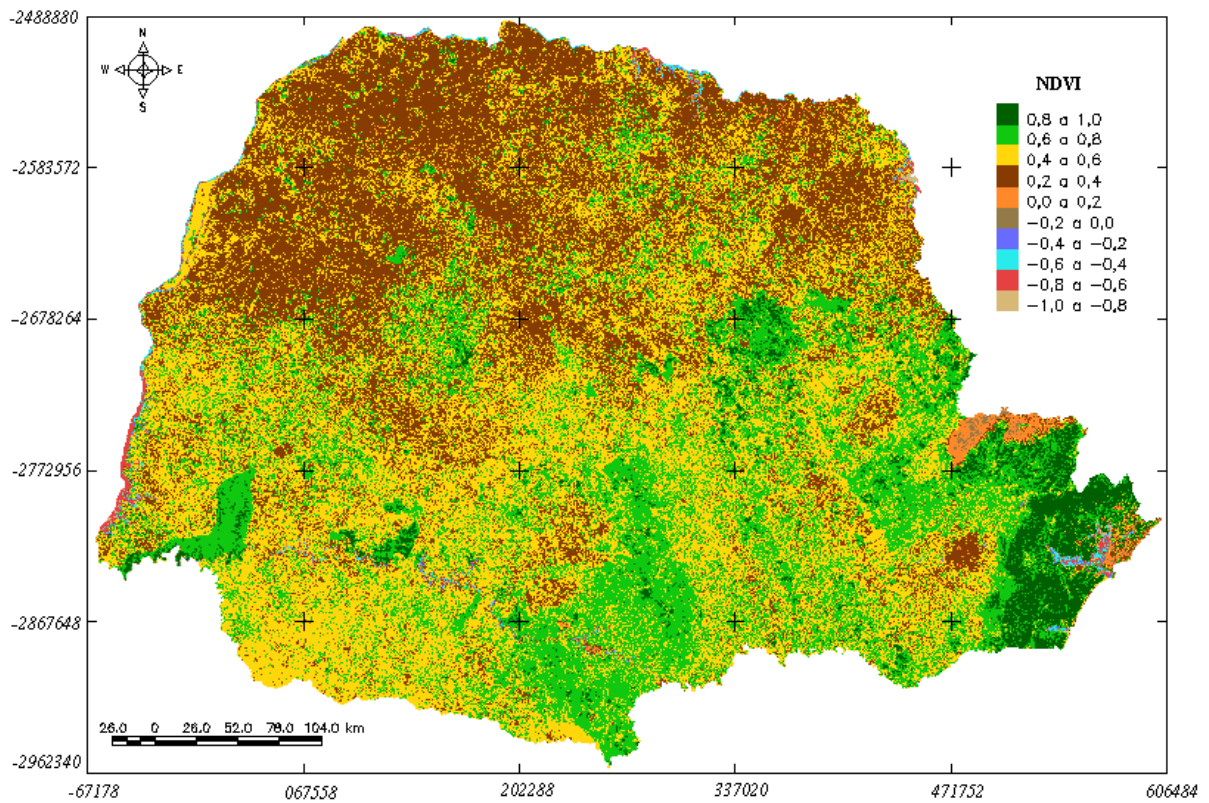


Figura 16. Imagem NDVI fatiada, obtida em 19/07/00, depois da geada do dia 13/07/00.

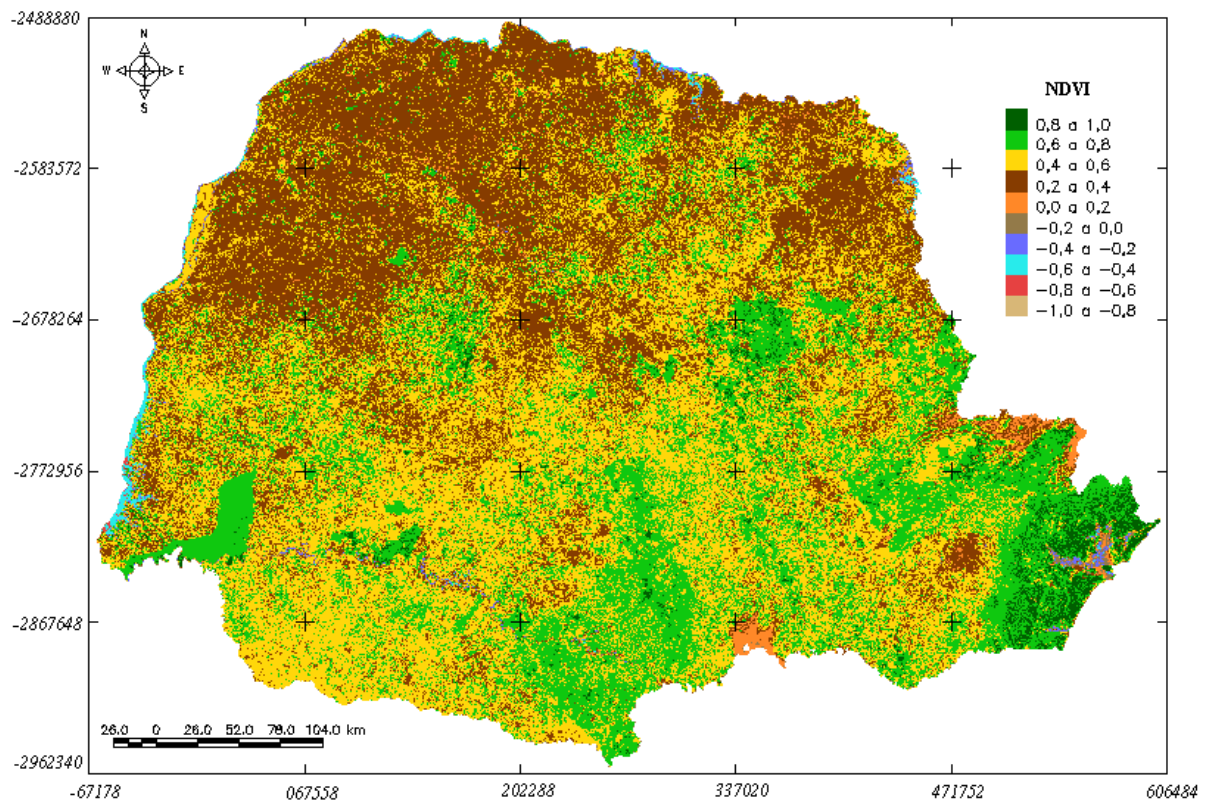


Figura 17. Imagem NDVI fatiada, obtida em 27/07/00, depois da ocorrência das geadas.

6.6 Imagens NDVI do MODIS (diárias)

Analisando os valores médios de NDVI (Figura 18) é visível a ocorrência de um decréscimo destes valores entre a imagem referência (06/07/00) e as demais imagens. Este resultado leva a crer que essa diminuição da fitomassa está associada com a ocorrência da geada, já que a diferença de dias entre uma imagem e outra é muito pequena, para atribuir essas mudanças a outras causas a não ser a geada.

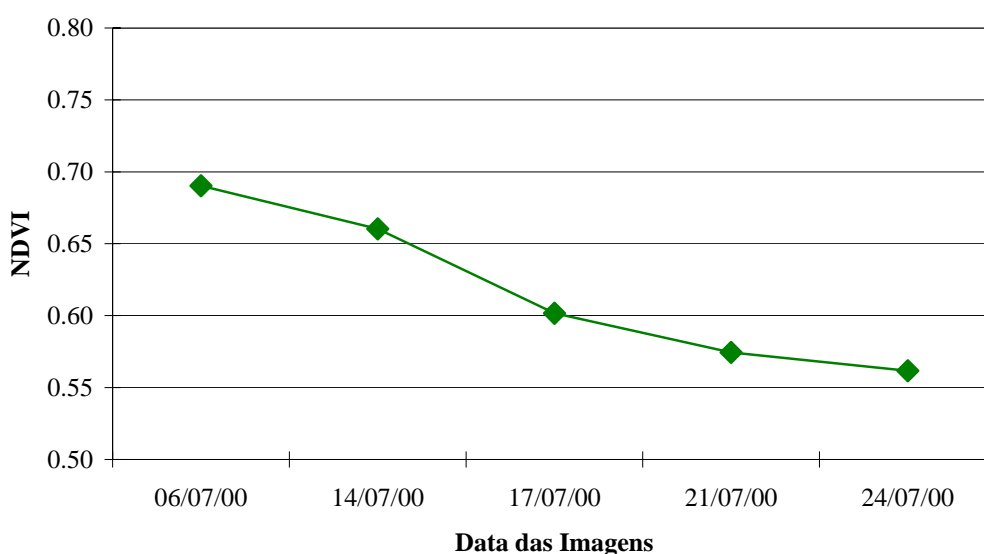


Figura 18. Valores médios de NDVI para 36 lavouras em 5 datas do MODIS imagens diárias.

Na tabela 4 são apresentados os resultados do teste t para pares de observação entre os valores do NDVI obtidos da imagem antes da geada (referência) com os das imagens posteriores a ocorrência das geadas.

Tabela 4. Resultados do teste t aplicado para valores médios de NDVI do MODIS (diária).

Diferença entre as datas	Média	Desvio padrão	Valor de t	Pr > t
06/07/00 – 14/07/00	0,03	0,0674	2,67**	0,0115
06/07/00 – 17/07/00	0,0886	0,0841	6,32**	< 0,0001
06/07/00 – 21/07/00	0,1158	0,1129	6,15**	< 0,0001
06/07/00 – 24/07/00	0,1286	0,0899	8,59**	< 0,0001

Os dados (Tabela 4) mostram que, com exceção da imagem de 14/07/00, em que o nível de significância foi de 5% de probabilidade, nas demais datas os resultados do teste foram altamente significativos. Esse resultado leva a crer que o efeito no contexto espectral da geada já é perceptível um dia após sua ocorrência. Esse resultado é bastante interessante do ponto de vista prático, pois permitiu visualizar não só a extensão da área atingida pela geada, como também observar as mudanças no comportamento espectral com um dia após a ocorrência da geada.

A análise visual (Figuras 19 a 23) permite detectar as mudanças no comportamento do índice de uma data para outra, tendo como base a imagem do dia 06/07/00. Nota-se que o NDVI é sensível a geada e que ela foi generalizada em todo o estado. O efeito da geada pôde ser verificado um dia após a ocorrência da mesma.

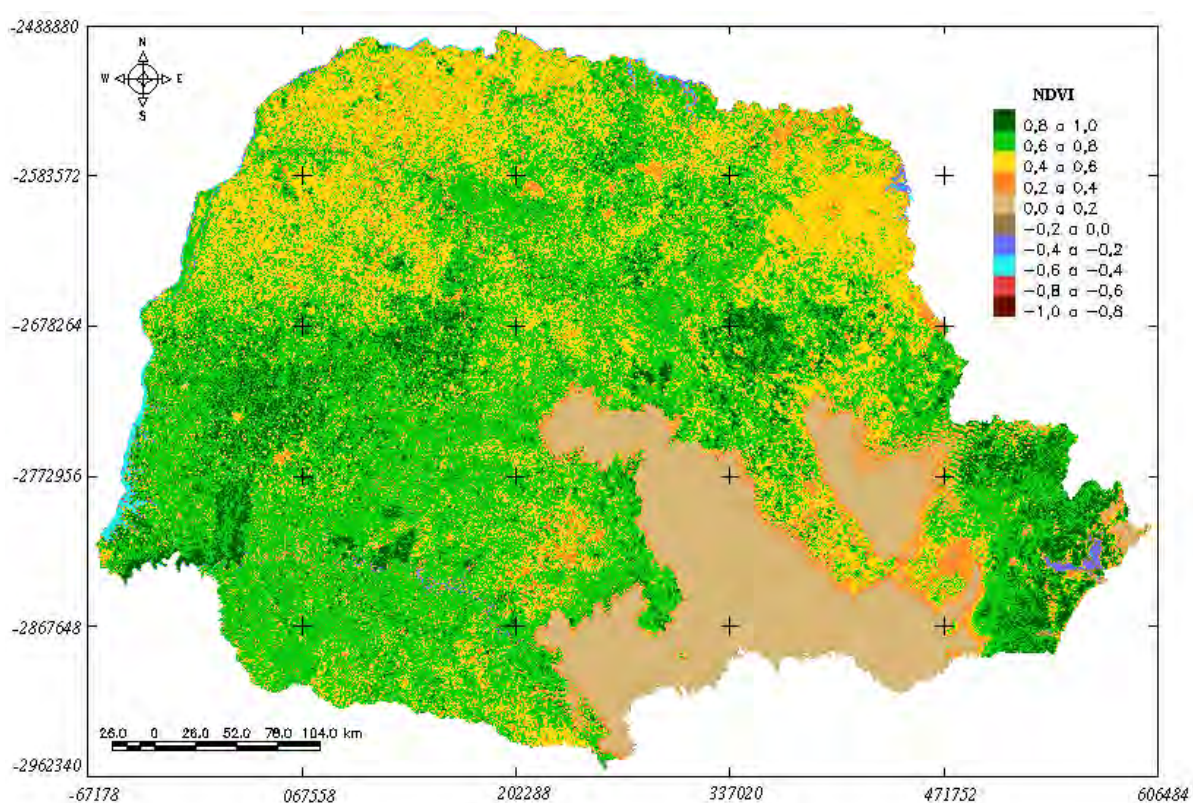


Figura 19. Imagem NDVI diária fatiada, obtida em 06/07/00, antes da ocorrência da geada do dia 13/07/00.

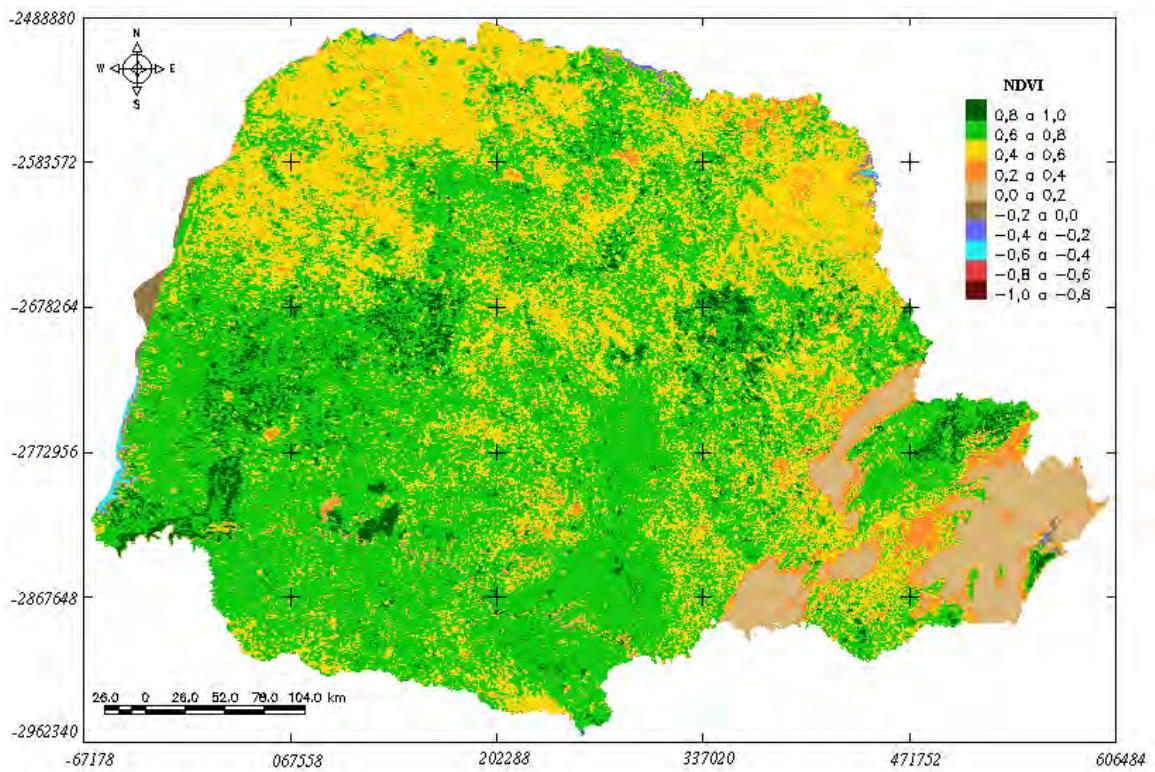


Figura 20. Imagem NDVI diária fatiada, obtida em 14/07/00, após a ocorrência da geada do dia 13/07/00.

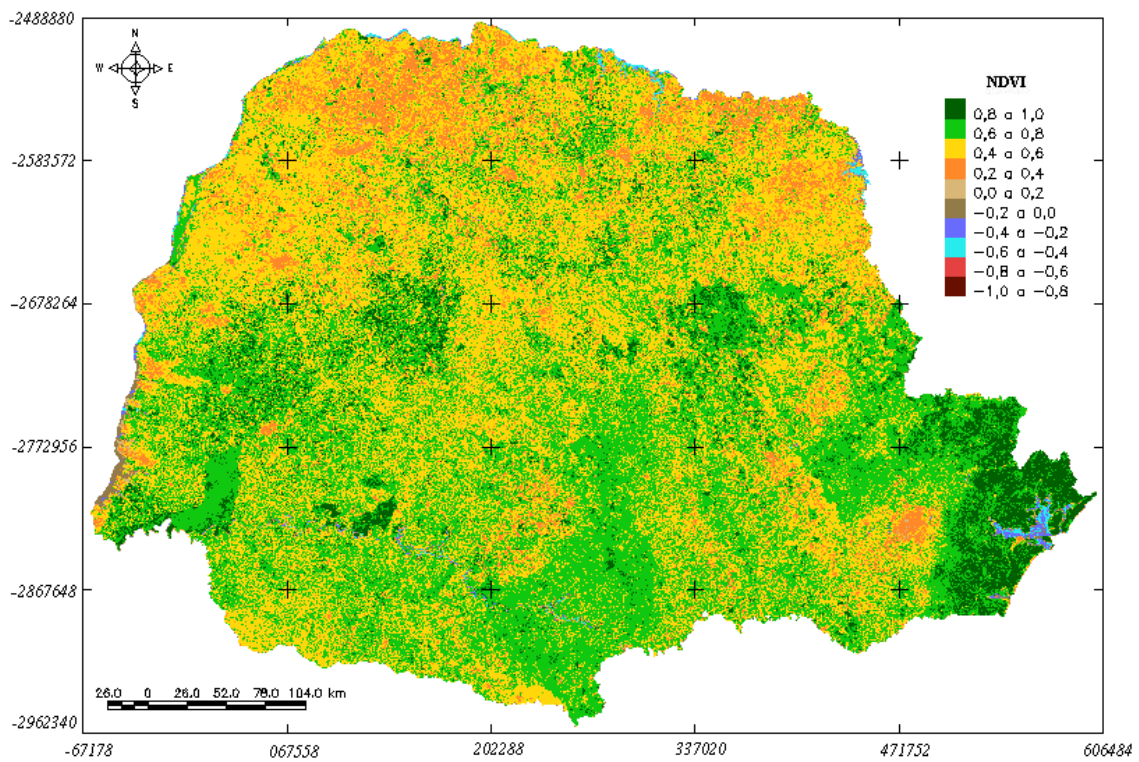


Figura 21. Imagem NDVI diária fatiada, obtida em 17/07/00, no dia da geada.

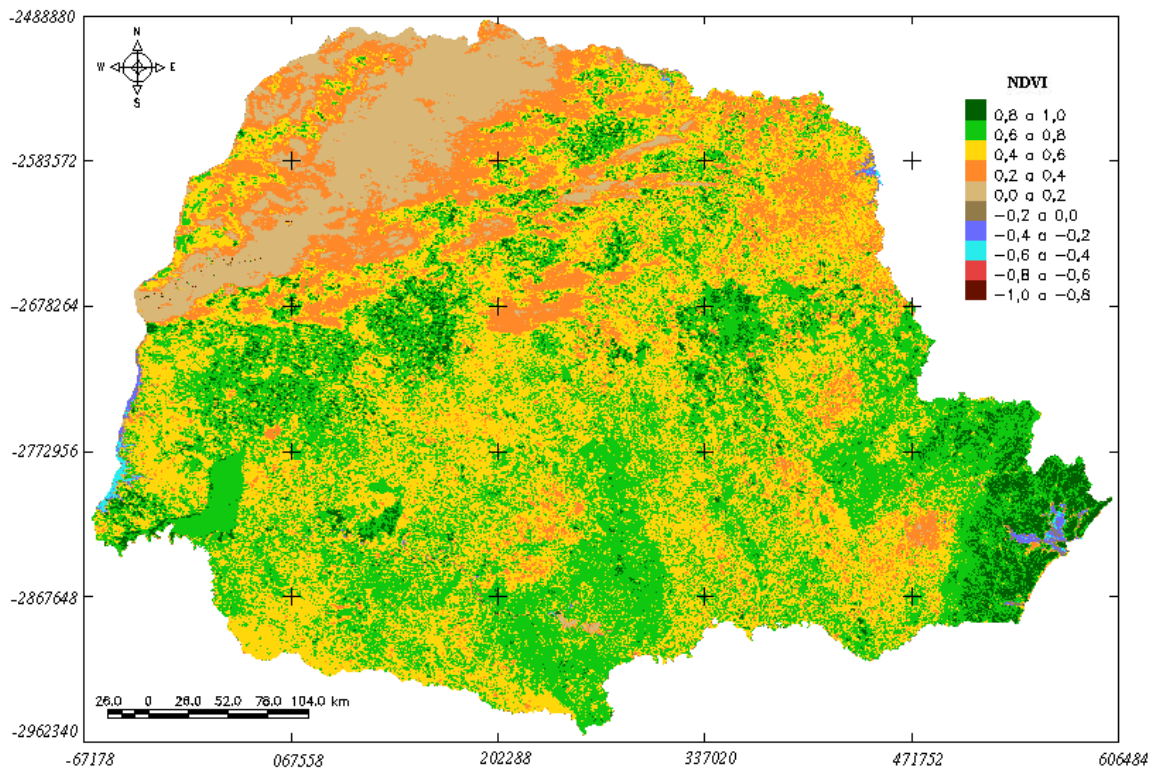


Figura 22. Imagem NDVI diária fatiada, obtida em 21/07/00, após as geadas.

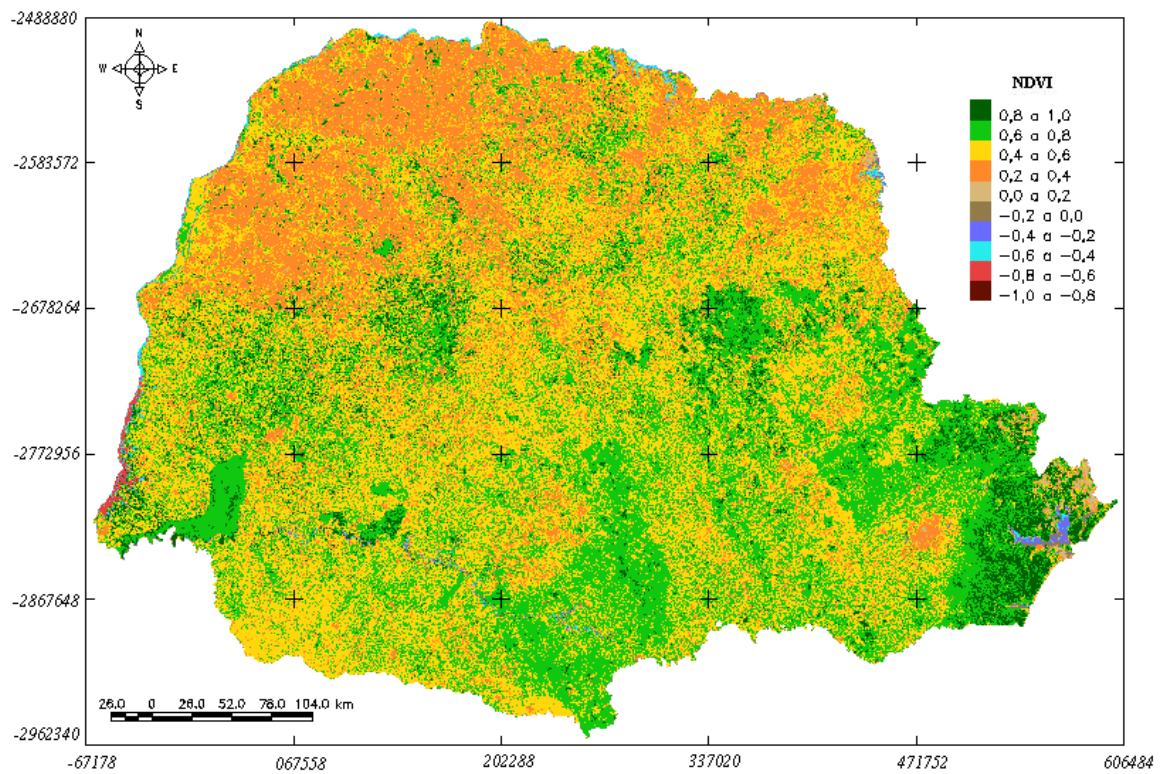


Figura 23. Imagem NDVI diária fatiada, obtida na data de 24/07/00, após as geadas.

6.7 Imagens HCVI do MODIS (diárias)

A análise dos valores médios de HCVI (Figura 24) mostra dois comportamentos diferenciados. Nas imagens dos dias 14 e 21 de julho de 2000 nota-se que houve um aumento no valor do índice, em relação aos valores médios obtidos nas imagens dos dias 6, 17 e 24 de julho de 2000. Em outras palavras, esperava-se uma tendência decrescente para os valores desse índice em todas as datas após a ocorrência da geada, como aconteceu com o NDVI (Figura 18). Assim, nota-se que o índice HCVI é inversamente proporcional à temperatura, ou seja, quanto menor a temperatura maior o valor do índice e vice-versa.

Desta forma, para os dias 14 e 21 a temperatura foi mais baixa do que nos outros dias observados. Essa queda na temperatura acarretou um aumento do valor do índice.

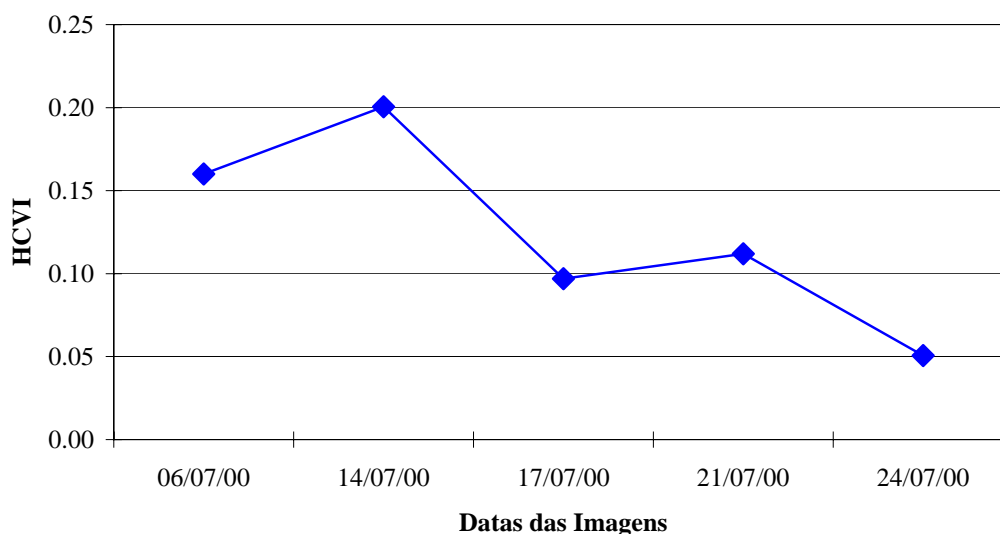


Figura 24. Valores médios de HCVI das imagens MODIS (diárias) nas 36 lavouras para 5 datas.

Todas as datas apresentaram o valor da probabilidade associada ao teste t inferior a 0,05, mostrando diferença significativa ao nível de 5 % de significância entre a imagem do dia 06/07/00 e as demais imagens (Tabela 5).

Tabela 5. Resultados do teste t aplicado para valores médios de HCVI do MODIS diárias.

Diferença entre as datas	Média	Desvio padrão	Valor de t	Pr > t
06/07/00 – 14/07/00	-0,041	0,0627	-3,88**	0,0004
06/07/00 – 17/07/00	0,631	0,0516	7,33**	< 0,0001
06/07/00 – 21/07/00	0,0481	0,0839	3,44**	0,0015
06/07/00 – 24/07/00	0,1094	0,0538	12,21**	< 0,0001

Nas Figuras 25 a 29, observa-se alterações nos valores de HCVI entre a imagem do dia 06/07/00 e as demais datas estudadas. Verificou-se que o HCVI é sensível a geada porém seu enfoque é a temperatura e o conteúdo de água na planta, diferente do NDVI que indica o vigor vegetativo da vegetação. O índice pode ser utilizado para acompanhar o efeito residual da geada assim como o NDVI.

De acordo com Yi (2004) que utilizou o HCVI para avaliar o estresse hídrico das plantas, ele é mais sensível a mudança de água na planta do que o NDVI. No trabalho desenvolvido pelo autor, o índice foi bastante sensível na avaliação do estresse hídrico.

Nas imagens índice (Figuras 25 a 29), as regiões com nuvens estão em branco, fora do intervalo de -1 a 1, isso se deve ao fato de que são aplicadas máscaras nos locais com nuvens nas imagens do MODIS de temperatura de superfície ficando esses locais com valores nulos.

Em algumas lavouras de café o valor do índice, após a ocorrência da geada foi negativo. Ao analisar os dados coletados em campo, notou-se que a causa desse resultado negativo pode estar associado a dois fatos, ou seja, a idade das lavouras, com mais de 13 anos, e o espaçamento utilizado de 4 m x 2 m. Isso somado ao efeito da geada fez com que a contribuição da superfície de fundo (solo exposto) fosse maior. Assim, a reflectância na região do infravermelho médio foi maior do que no infravermelho próximo, conseqüentemente, tornando os valores do índice negativos.

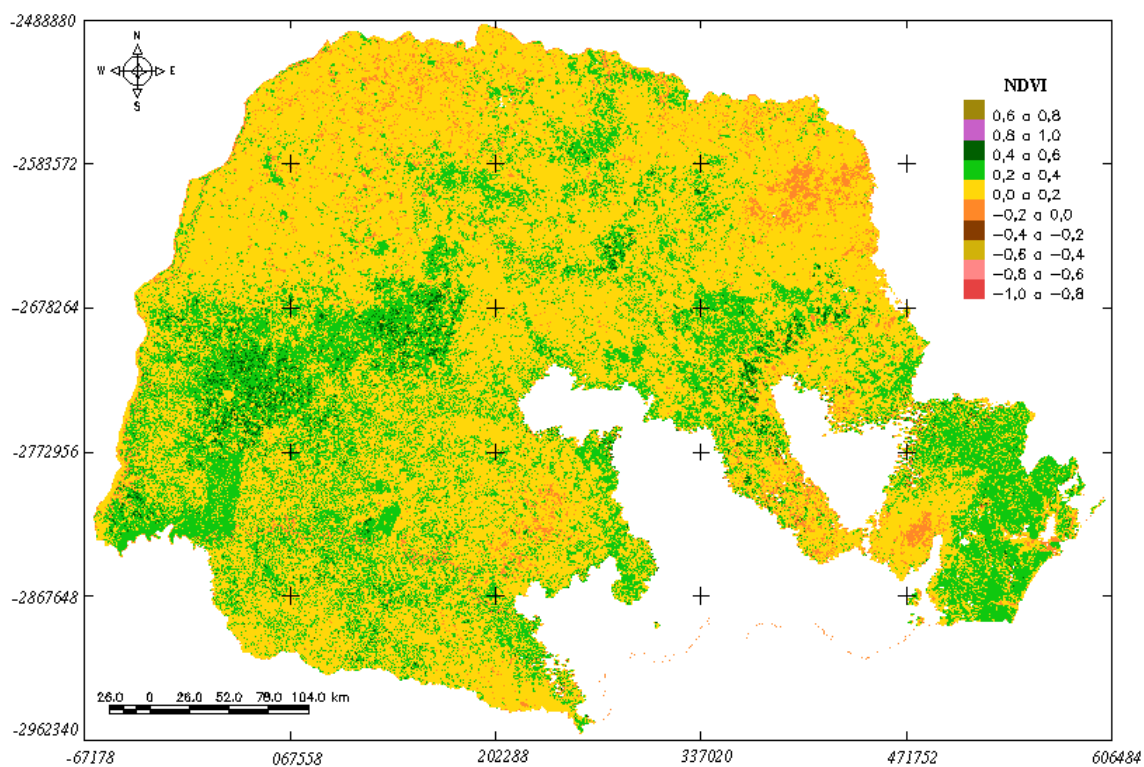


Figura 25. Imagem HCVI diária fatiada do MODIS, obtida em 06/07/00.

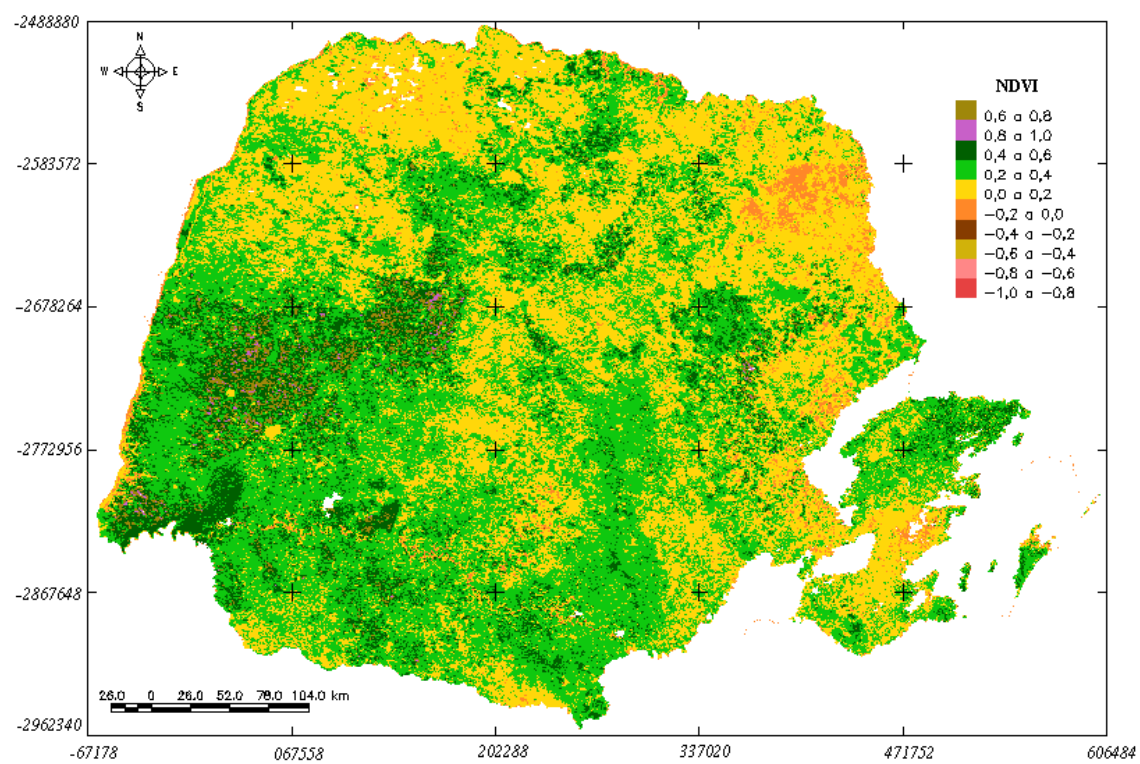


Figura 26. Imagem HCVI diária fatiada do MODIS, obtida em 14/07/00, após a primeira geada.

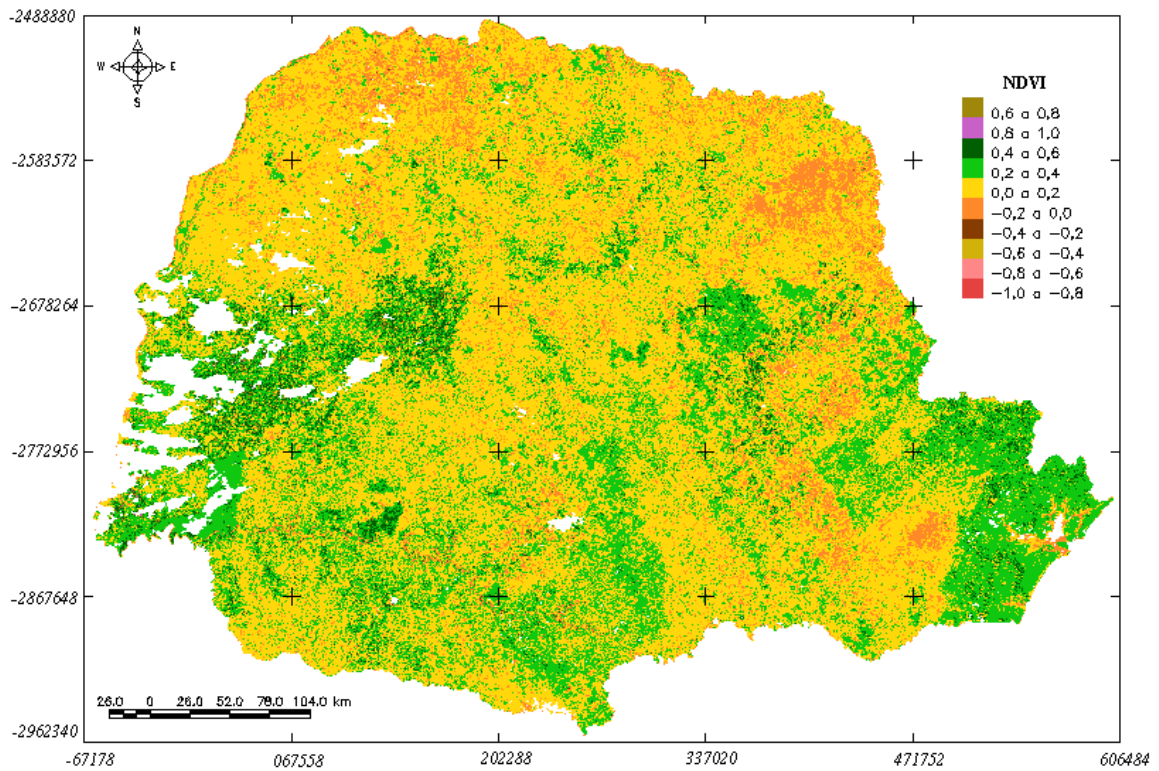


Figura 27. Imagem HCVI diária fatiada do MODIS, obtida em 17/07/00, dia da geada.

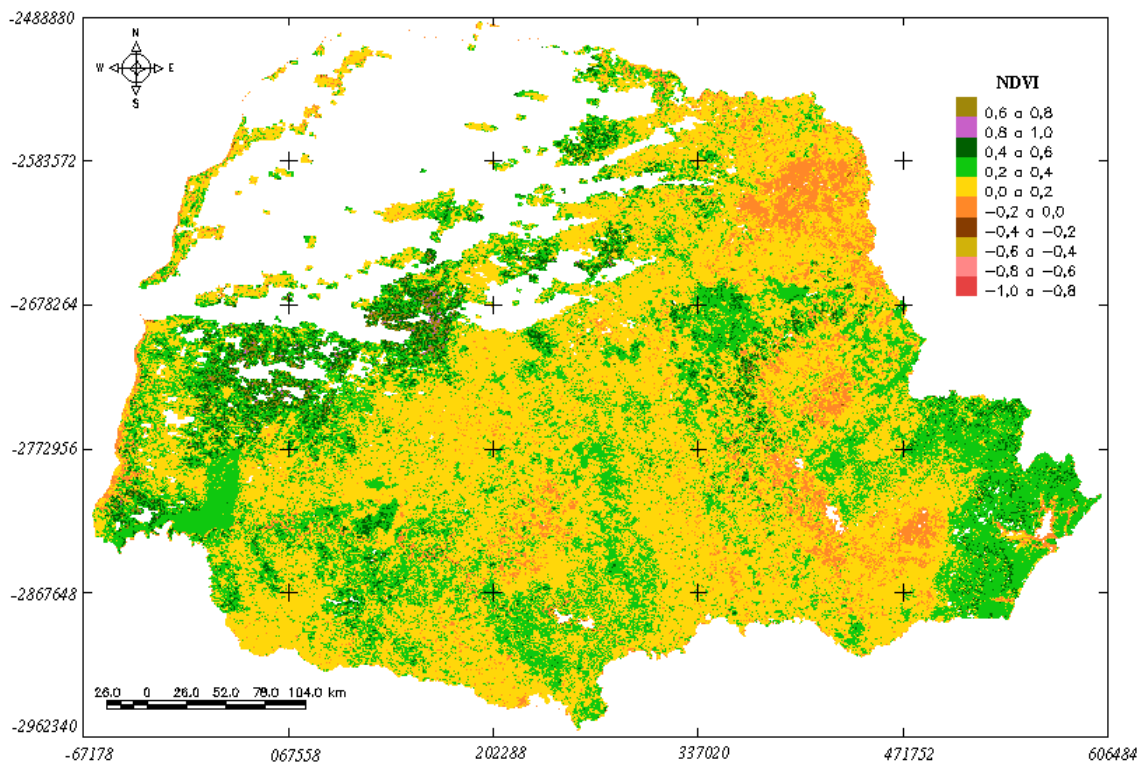


Figura 28. Imagem HCVI diária fatiada do MODIS, obtida em 21/07/00, após as geadas.

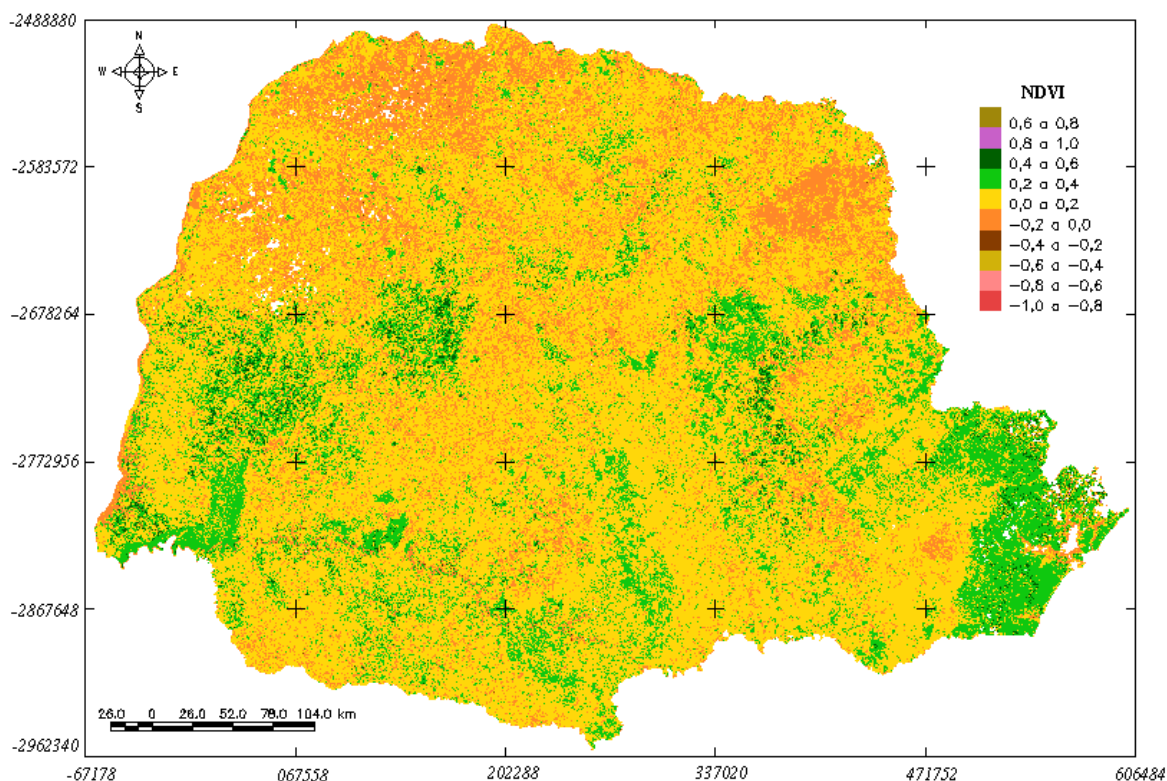


Figura 29. Imagem HCVI diária fatiada do MODIS, obtidas em 24/07/00.

6.8 Imagens Landsat 5/TM e Landsat 7/ETM+

Devido a ocorrência de nuvens na região, foi possível obter somente três imagens do Landsat nessa época. Mesmo assim, as imagens não foram obtidas na época ideal para testar esses dados. De qualquer forma, fez-se uma análise dos dados contidos nas imagens, obtidas nas datas de 30/01/2000, 16/07/2000 e 18/09/2000.

Os resultados da retificação radiométrica foram considerados satisfatórios, conforme pode ser verificado nos gráficos de dispersão (Figura 30) entre as imagens “greenness” e “brightness” (verdor e brilho) da imagem referência (16/07/00, TM) e das imagens que foram retificadas (30/01/00, ETM+ e 18/09/00, TM). Conforme Shimabukuro et al. (2002) citado por Espírito-Santo (2003), quando há variação das condições atmosférica ou de alterações fenológicas da vegetação entre as datas analisadas, torna-se necessário a

realização da retificação radiométrica, em que, os gráficos de dispersão das imagens “greenness” e “brightness”, das imagens multitemporais precisam ser sobrepostos.

O resultado da sobreposição dos gráficos de dispersão da imagem referência e das imagens retificadas (Figura 30) indicam que o método de retificação foi bem sucedido.

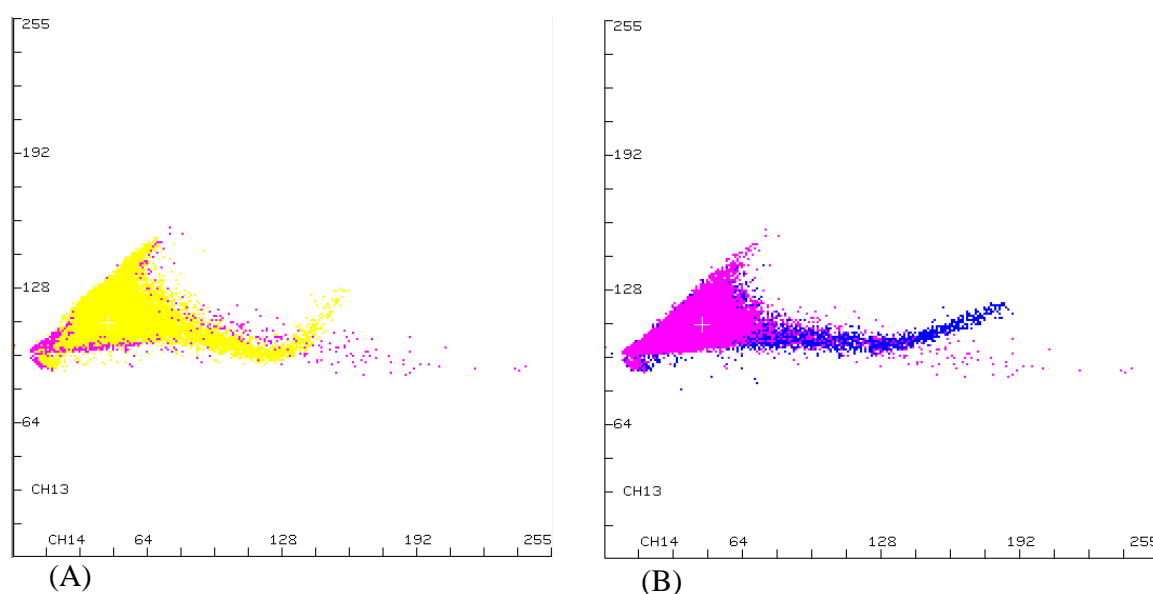


Figura 30. Gráficos de dispersão entre as imagens “greenness” e “brightness” da imagem de referência (rosa) e as imagens que foram retificadas (amarelo e azul), onde em (A) é apresentado o resultado da retificação entre as imagens de 16/07/00 e 30/01/00; e em (B) o resultado da retificação entre as imagens de 16/07/00 e 18/09/00.

Na avaliação dos valores médios do NDVI das 36 lavouras (Figura 31) para as imagens Landsat notou-se que o gráfico também teve um comportamento semelhante ao observado para o NDVI obtido dos dados MODIS. Esse resultado mostra que o efeito da geada foi além do observado para os dados MODIS. Em outras palavras, uma vez afetada a lavoura pela geada a recuperação, caso ocorra é bastante lenta, uma vez que na imagem da última data (18/09/00) foram mais de dois meses após a ocorrência da geada e ainda assim, foi perceptível nos valores desse índice.

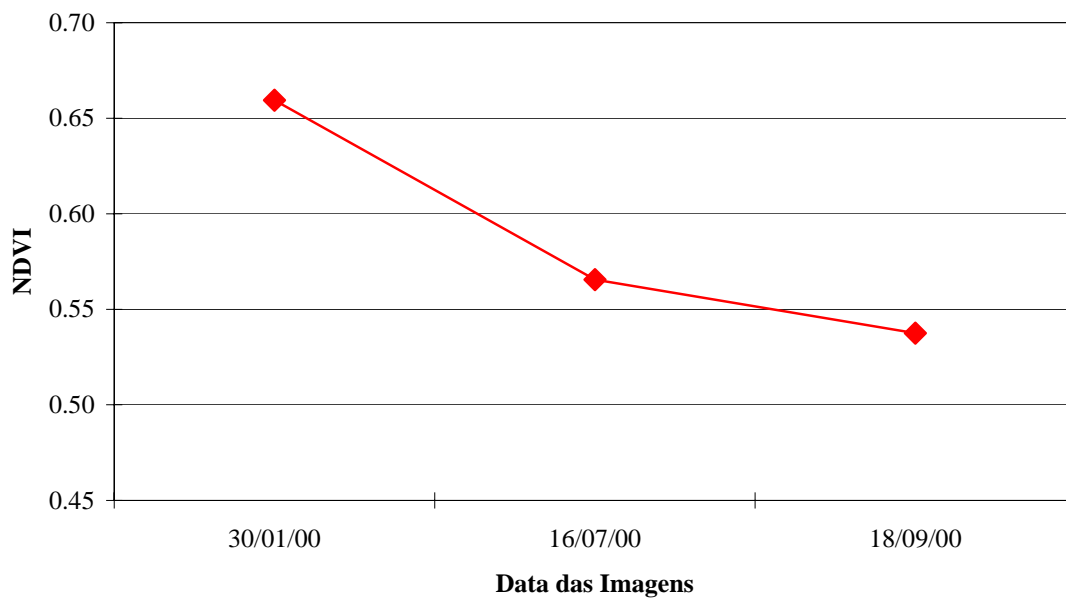


Figura 31. Valores médios de NDVI para as 36 lavouras nas 3 datas analisadas.

O comportamento espectral de cada uma das lavouras, nas imagens das bandas do visível, infravermelho próximo e médio do sensor TM e ETM+ do Landsat 5 e 7, antes e após a geada (Figuras 32 e 33) permitiu realizar algumas inferências sobre fatores que estavam afetando estas lavouras.

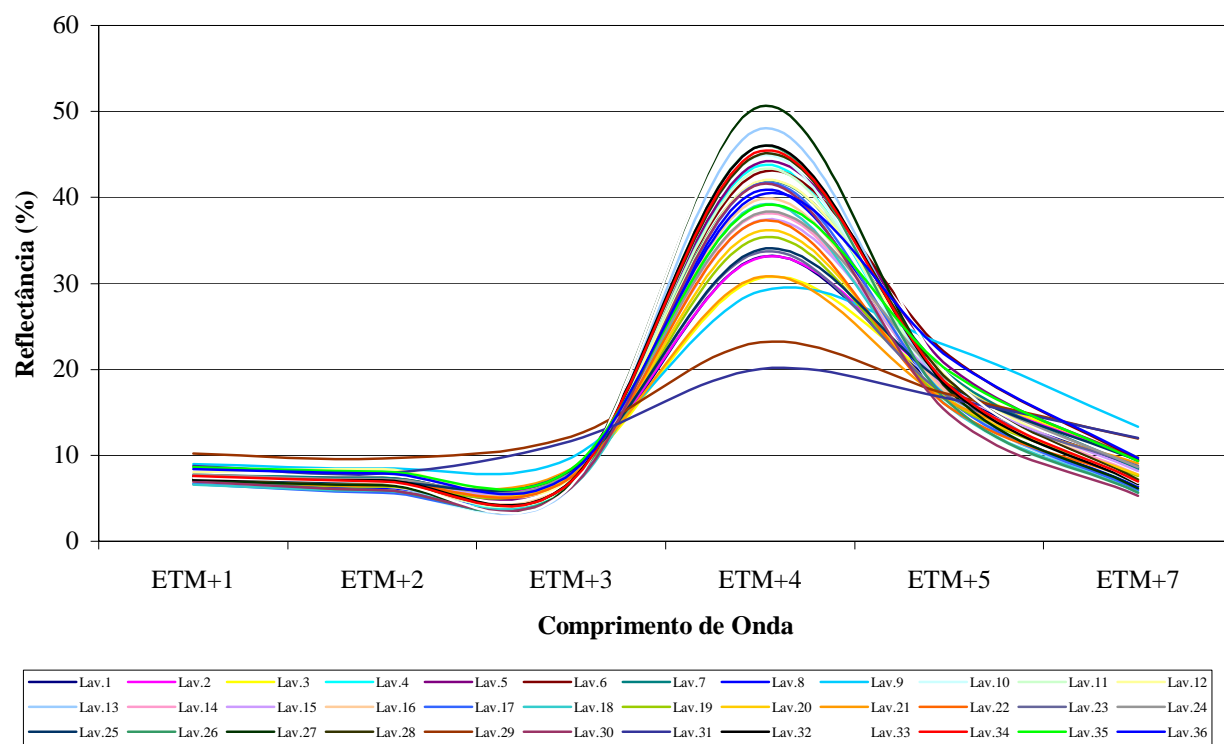


Figura 32. Comportamento espectral de cada uma das lavouras estudadas no dia 30/01/00.

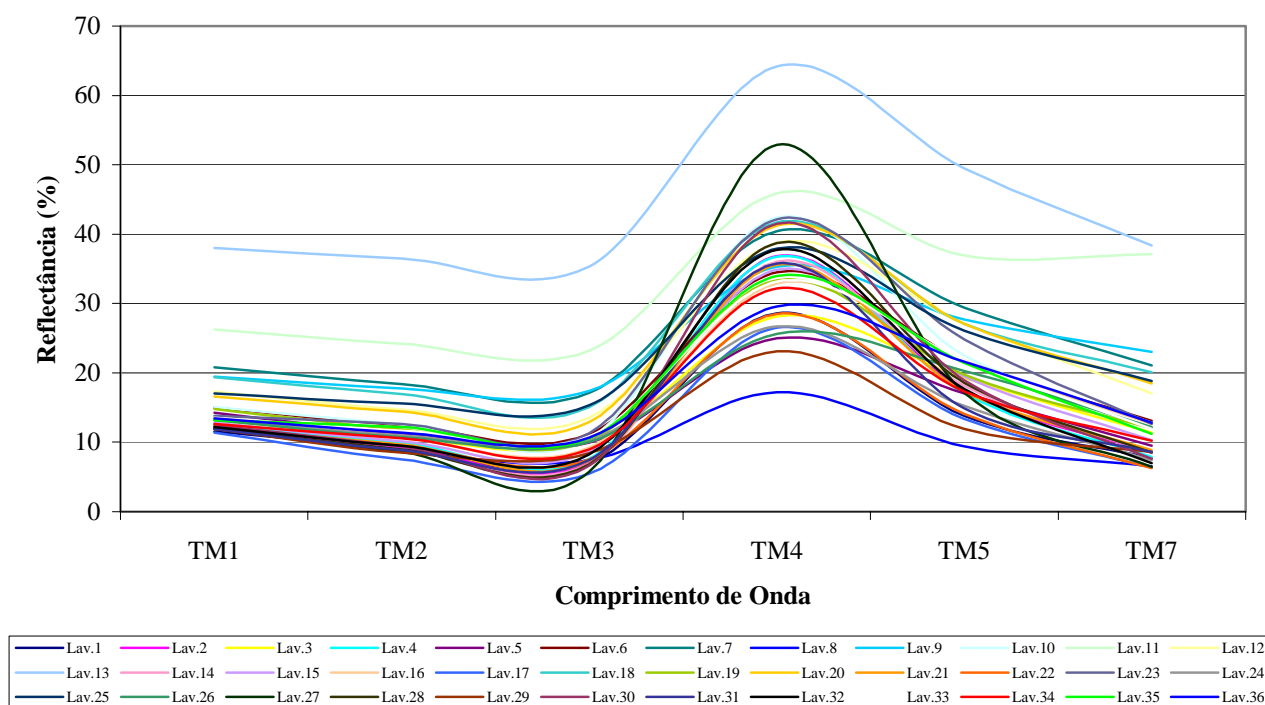


Figura 33. Comportamento espectral de cada uma das lavouras estudadas no dia 18/09/00.

A análise da Figura 32 mostra duas curvas (Lav. 29 e Lav. 31) com valores baixos no IVP e mais elevadas que as demais no vermelho, um indicativo de pouca fitomassa, pois houve menor absorção da radiação no vermelho e pouca reflectância no IVP. Para as demais curvas verificou-se que ocorreu pouca variação no vermelho e bastante no IVP. Este resultado pode ser explicado em termos de efeito de camada de folha, ou seja, quanto maior a camada de folha, maior é o valor da reflectância no IVP, indicando um maior volume de fitomassa.

A curva azul clara (Lav.9) apresenta uma resposta espectral mais elevada no vermelho e no IVP, este comportamento pode ser um indicativo de algum tipo de estresse. No mês de janeiro a precipitação média foi de 117 mm, (Figura 34), porém nos meses anteriores a média de precipitação foi inferior a outros anos (49 mm em novembro de 1999 e 89 mm em dezembro de 1999).

Na Figura 33, que se refere à imagem após a ocorrência das geadas (18/09/00), verifica-se um achatamento das curvas espectrais na região do IVP e um aumento na região do visível. Esse fato pode estar associado a vários fatores que podem reduzir a quantidade de fitomassa das lavouras, como acontece na colheita onde há muita queda de folhas. No entanto, foi visto, pelas imagens do sensor MODIS que a geada afetou o comportamento espectral do café, o que pode ser detectado na imagem do dia seguinte após a ocorrência da mesma. Assim, essas diferenças observadas do comportamento espectral obtidas das imagens Landsat podem ser atribuídas como sendo o efeito da geada.

O comportamento espectral da curva azul celeste (Lav.13), indica que o café possuía bastante fitomassa e foi atingido pela geada, porém o impacto da geada não foi suficiente para alterar as estruturas internas das folhas, em função disto continuou refletindo no IVP. No entanto, afetou as clorofilas e isto fez com que a curva aumentasse a reflexão no vermelho.

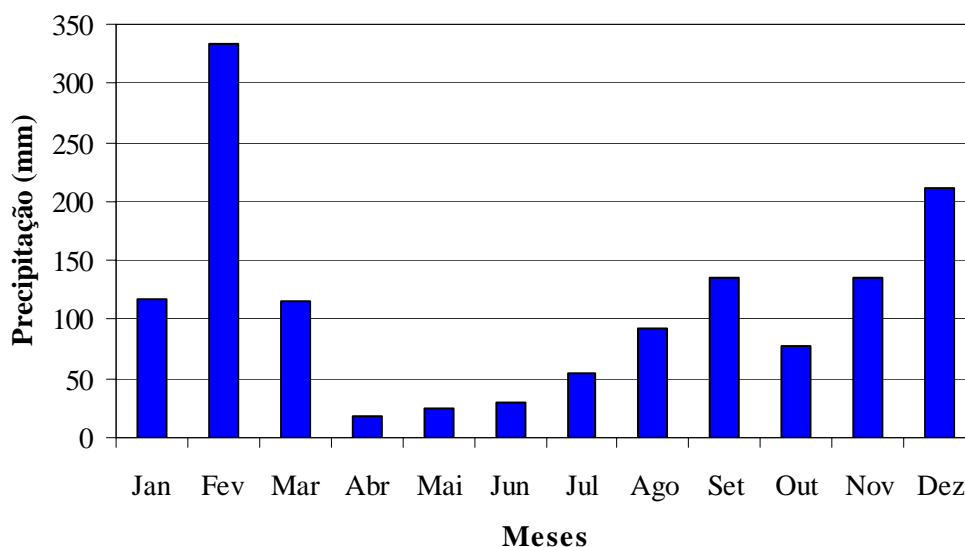


Figura 34. Precipitação mensal para o ano de 2000 (SEAB/DERAL, 2004).

Os resultados do teste t (Tabela 6) mostraram que houve diferença significativa (5 % de significância) para os valores da reflectância das datas de 30/01/00 e 16/07/00 e altamente significativa para as datas de 30/01/00 e 18/09/00 (1 % de significância).

Tabela 6. Resultados do teste t aplicado para valores médios de NDVI do Landsat.

Diferença entre as datas	Média	Desvio padrão	Valor de t	Pr > t
30/01/00 – 16/07/00	0,0939	0,1459	3,86**	0,0005
30/01/00 – 18/09/00	0,1219	0,146	5,01**	< 0,0001

A análise visual das Figuras 35 a 37 permite verificar alterações de cores entre a imagem do dia 30/01/00 e as demais datas analisadas, ou seja, observa-se diminuição nos valores médios de NDVI, indicando que ocorreu um decréscimo da fitomassa em função do impacto das geadas.

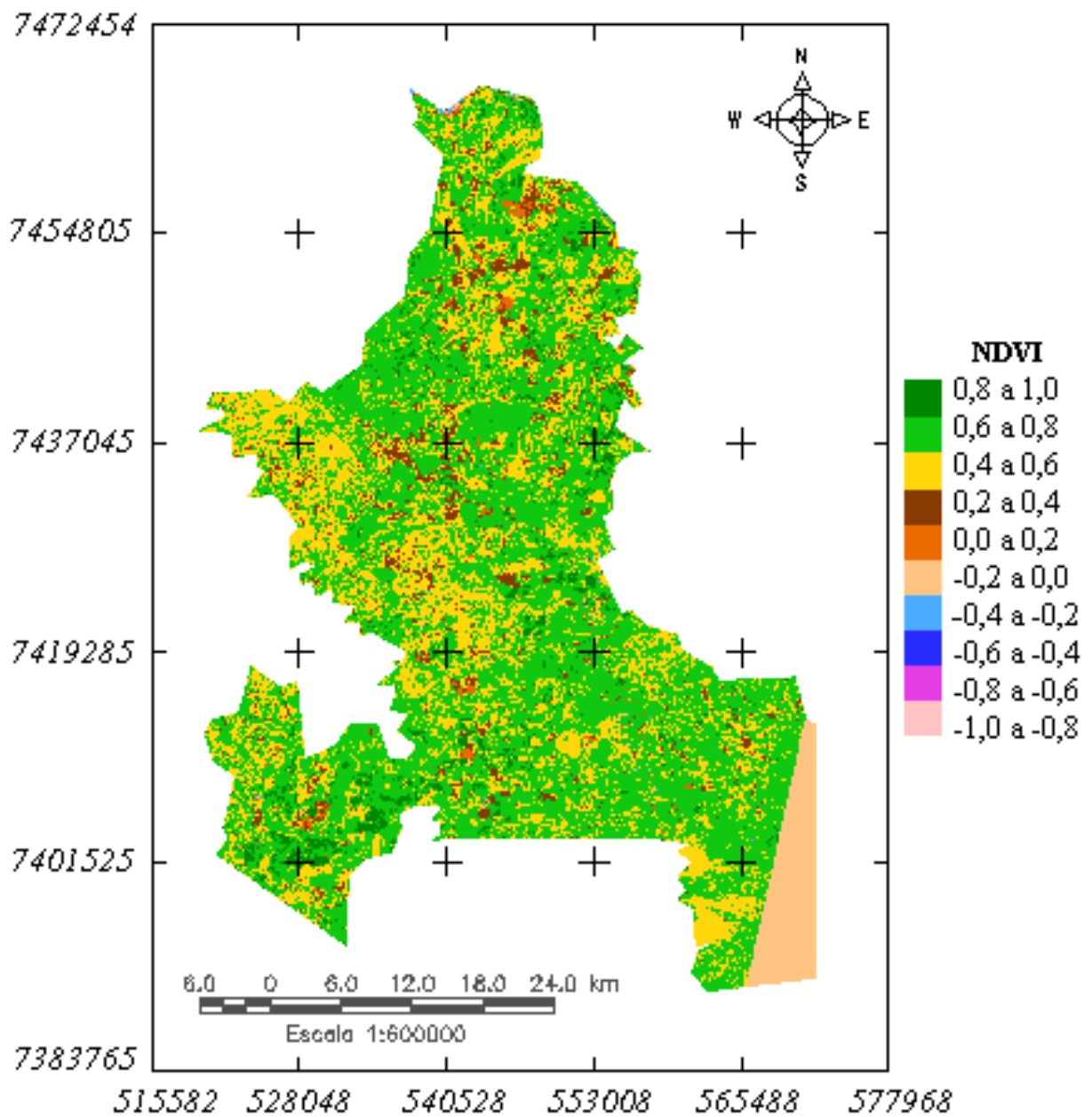


Figura 35. Imagem NDVI fatiada, obtida em 30/01/00.

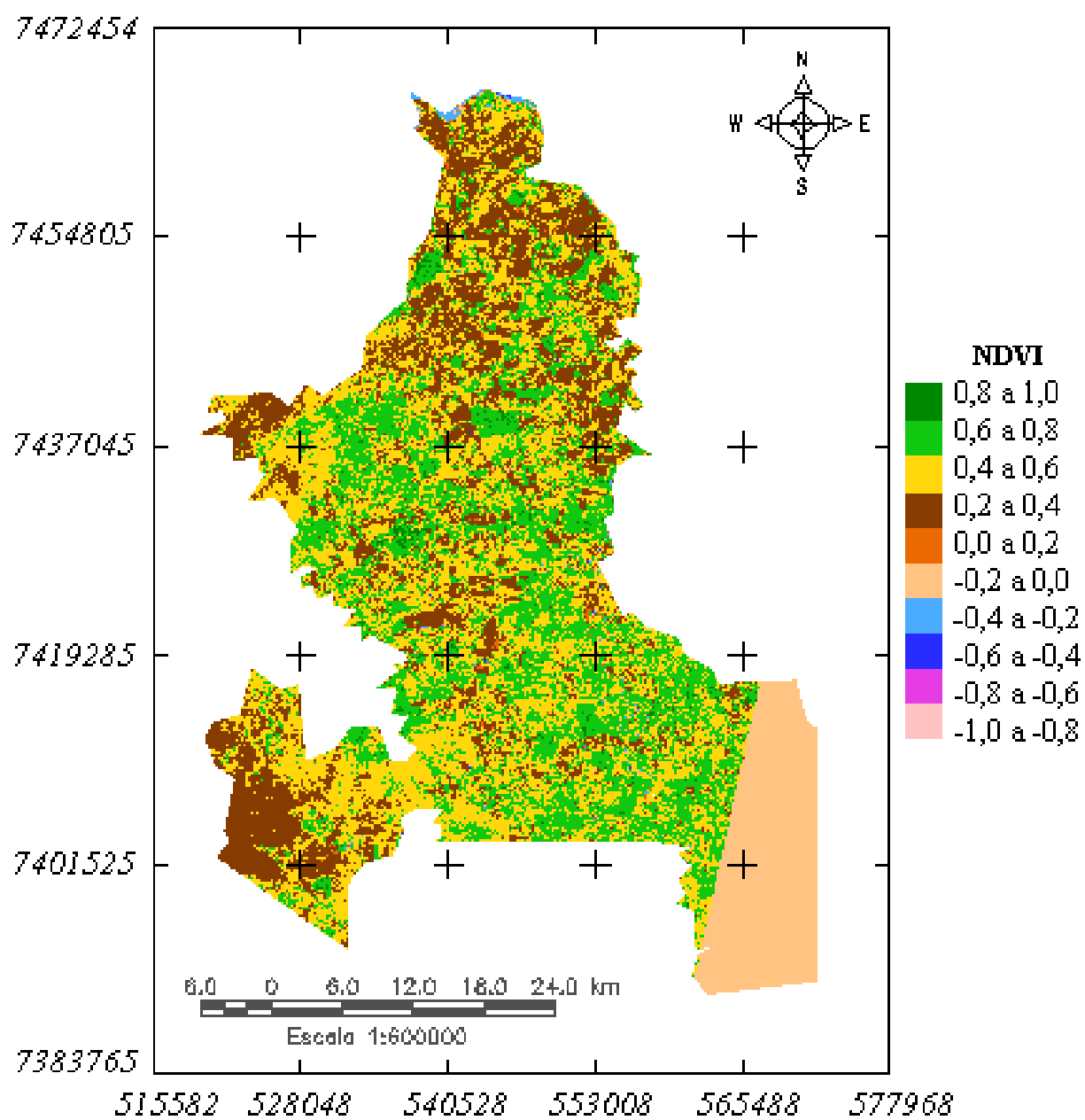


Figura 36. Imagem NDVI fatiada, obtida em 16/07/00.

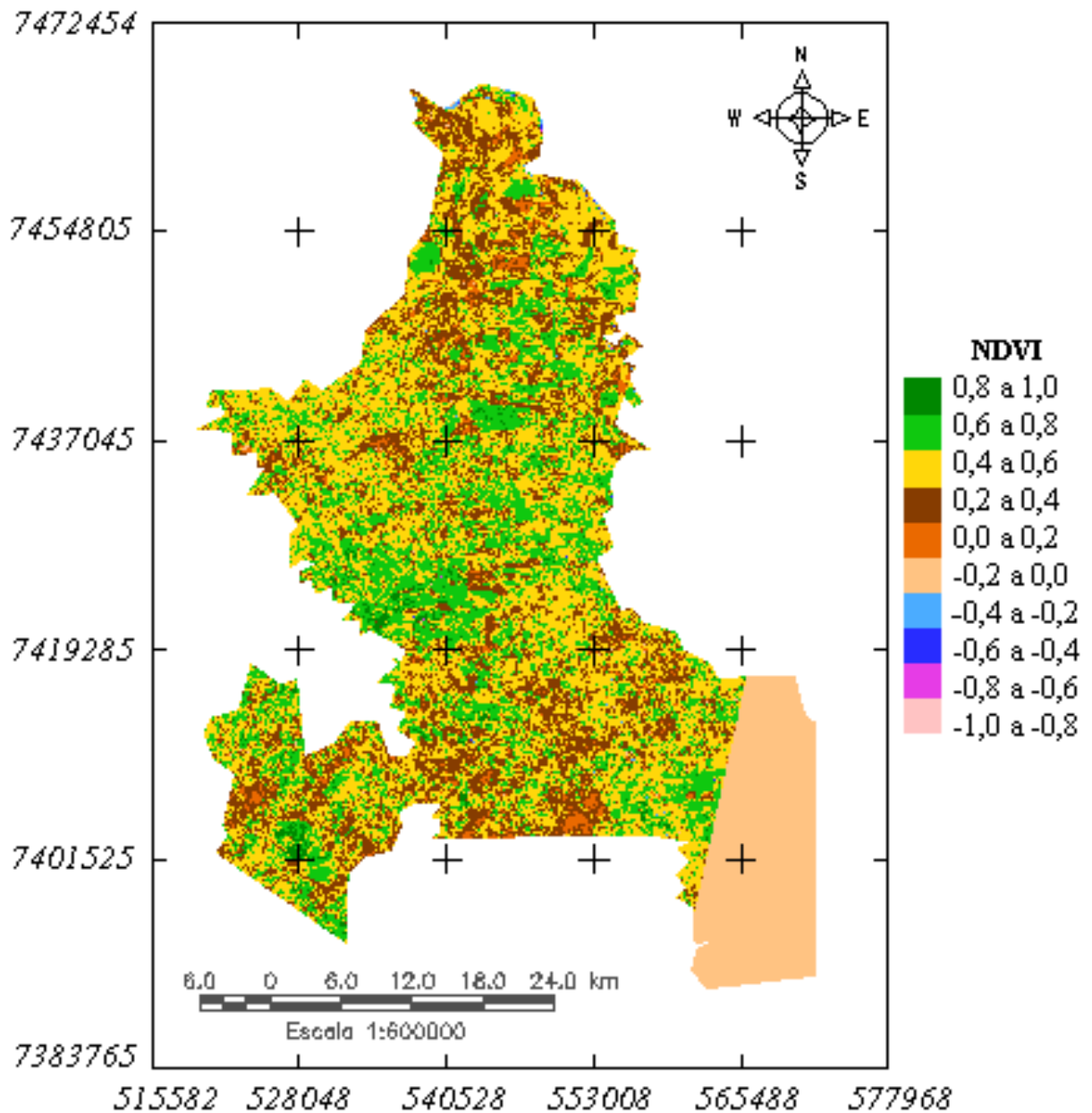


Figura 37. Imagem NDVI fatiada, obtida em 18/09/00.

Para Moreira et al. (2004), a análise espectral e temporal da reflectância permite identificar as lavouras de café que sofreram redução da fitomassa, o que

pode ser notado na ampliação de parte da área para visualizar melhor as mudanças no comportamento espectral das áreas vegetadas e de algumas lavouras de café (Figura 38).

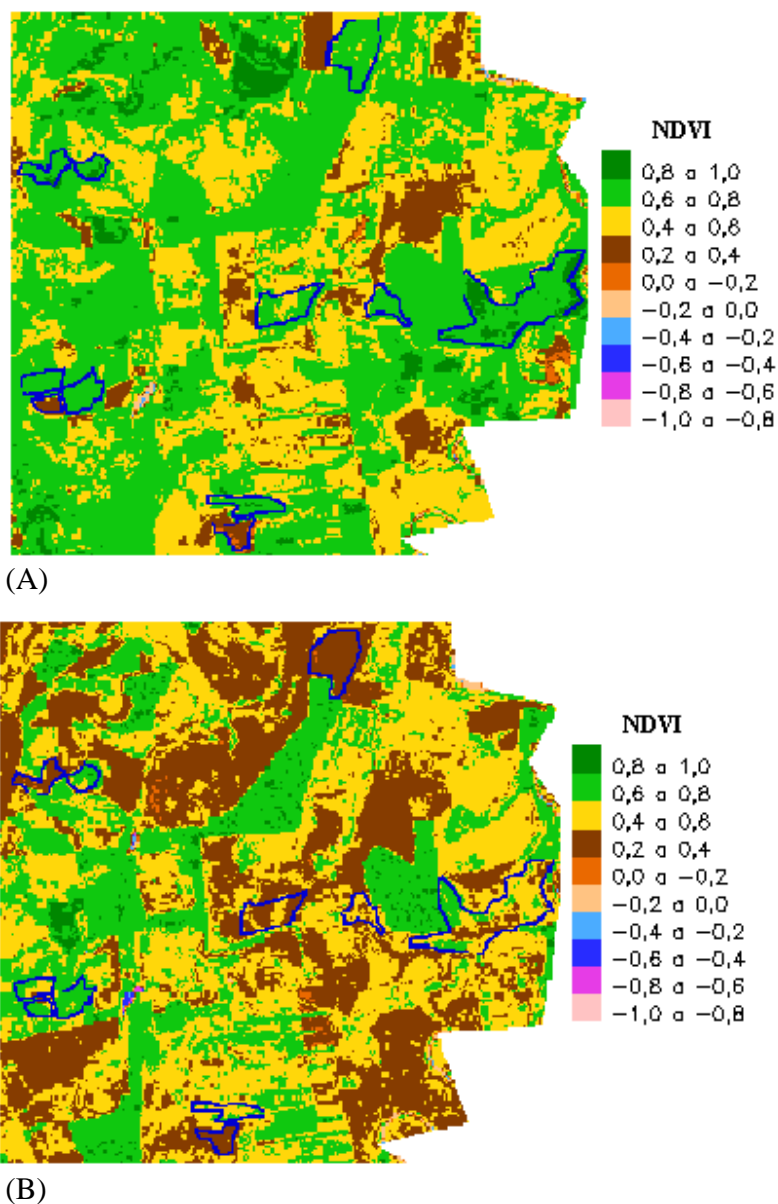


Figura 38. Área com algumas lavouras de café estudadas, onde (A) é a imagem antes da geada (30/01/00) e (B) é a última imagem após as geadas (18/09/00).

A análise da Figura 38 permitiu verificar alteração do comportamento espectral das lavouras e, conseqüentemente, do NDVI. Detectou-se a ocorrência de um

decréscimo nos valores de NDVI entre a imagem do dia 30/01/00, em que os valores de NDVI estão entre 0,6 e 1,0; e no dia 18/09/00, em que os valores de NDVI estão entre 0,2 a 0,8.

A interpretação do NDVI deve também levar em consideração os ciclos fenológicos da cultura (CAMARGO et al., 2001). Na região noroeste do Paraná, como no estado de São Paulo, a partir de julho o café começa a entrar na fase fenológica de repouso e senescência dos ramos.

Na região de estudo, a colheita vai de maio a setembro, assim, no mês de julho, estava exatamente no meio do período de colheita. A derrida de folhas durante a colheita também teve influencia no resultado dos valores de NDVI, porém a maior influência do decréscimo dos valores de NDVI é devido ao impacto da geada, pois este fato é confirmado nas imagens do MODIS que possuem uma resolução temporal bem maior do que a do Landsat.

6.9 Análises complementares

Na análise comparativa das curvas de NDVI e HCVI (Figura 39), notou-se que os dois índices apresentaram uma diminuição dos valores entre a imagem antes e após a geada, ou seja, o HCVI apresentou valores mais baixos que os do NDVI. O índice HCVI é um indicativo da variação da temperatura e é mais sensível a presença de nevas do que o NDVI, o que pode ser percebido nas Figuras 25 a 29.

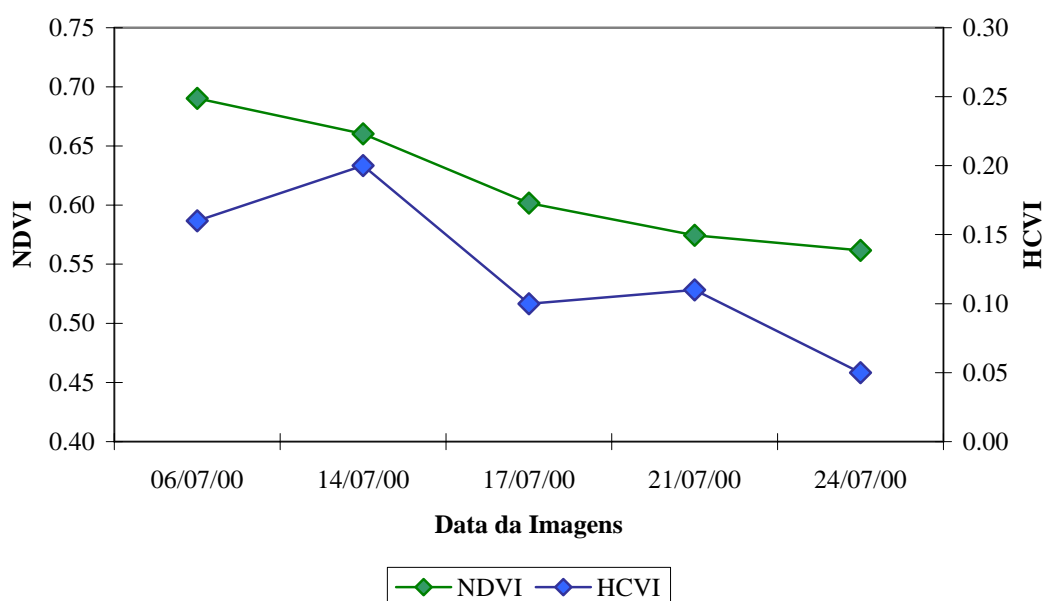


Figura 39. Valores médios de NDVI e HCVI, para as imagens MODIS diárias.

As imagens MODIS de 8 dias apresentaram valores mais baixos de NDVI do que as imagens MODIS diárias (Figura 40). Esse fato pode ser explicado levando-se em conta que as imagens de 8 dias são obtidas através da realização de um mosaico de pixels livres de cobertura de nuvens durante o intervalo de 8 dias. Portanto, diferente das imagens diárias. De qualquer forma, percebe-se uma tendência de correlação positiva entre os valores desse índice, obtido nos dois tipos de dados.

Os valores médios de NDVI (Figura 40) encontrados para as lavouras de café nas imagens MODIS diárias foram de 0,69 para a primeira imagem e 0,56 para a última imagem, enquanto que para as imagens de 8 dias foram de 0,58 para a primeira e 0,48 para a última.

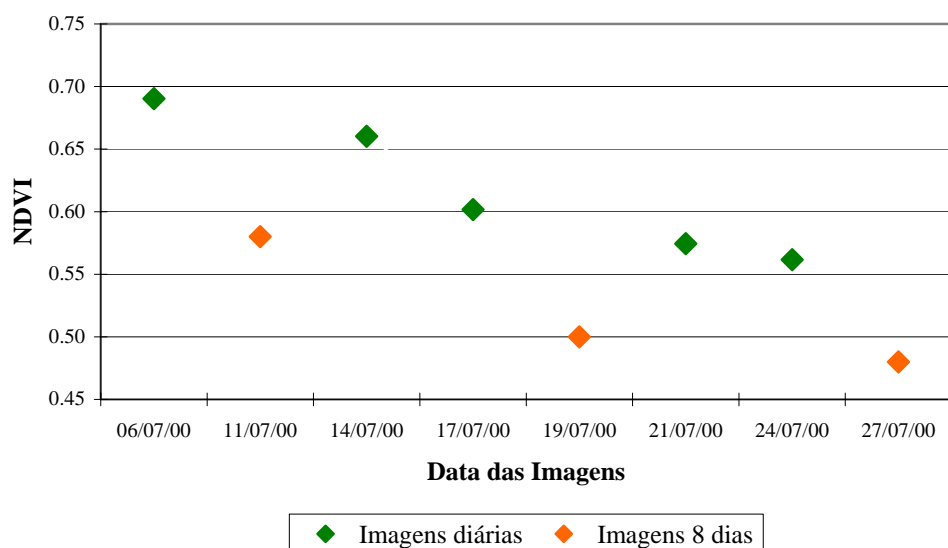


Figura 40. Valores médios do NDVI das imagens MODIS diárias e de 8 dias.

As imagens de temperatura de superfície indicam a tendência de queda de temperatura, apesar de serem do período diurno. Isto também é confirmado através das temperaturas mínimas ocorridas nos dias 13 e 17 de julho (Apêndice 1).

Na Figura 41 são apresentados os valores do NDVI e de temperatura de superfície, verifica-se que os valores de NDVI diminuíram acompanhando a temperatura até o dia 21/07/00, depois desta data, a vegetação já estava comprometida, fazendo com que o NDVI continuasse com valor baixo mesmo com a elevação da temperatura.

Conforme Justice et al. (1985) citado por Ponzoni (1998), é viável o uso do NDVI para avaliar o estado fenológico da vegetação mediante a ação de fatores climáticos.

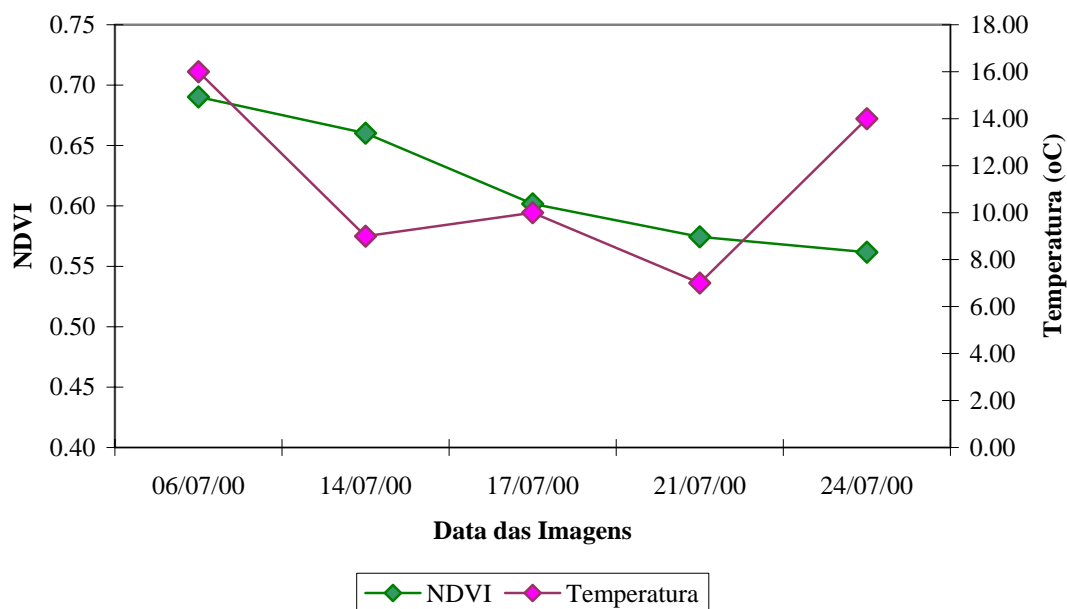


Figura 41. Valores médios de NDVI e Temperatura de Superfície, obtidos das imagens MODIS.

O gráfico da Figura 42 mostra a relação entre a temperatura de superfície e os valores do índice HCVI. Pela análise dos gráficos nota-se que existe uma tendência inversa entre o HCVI e a temperatura.

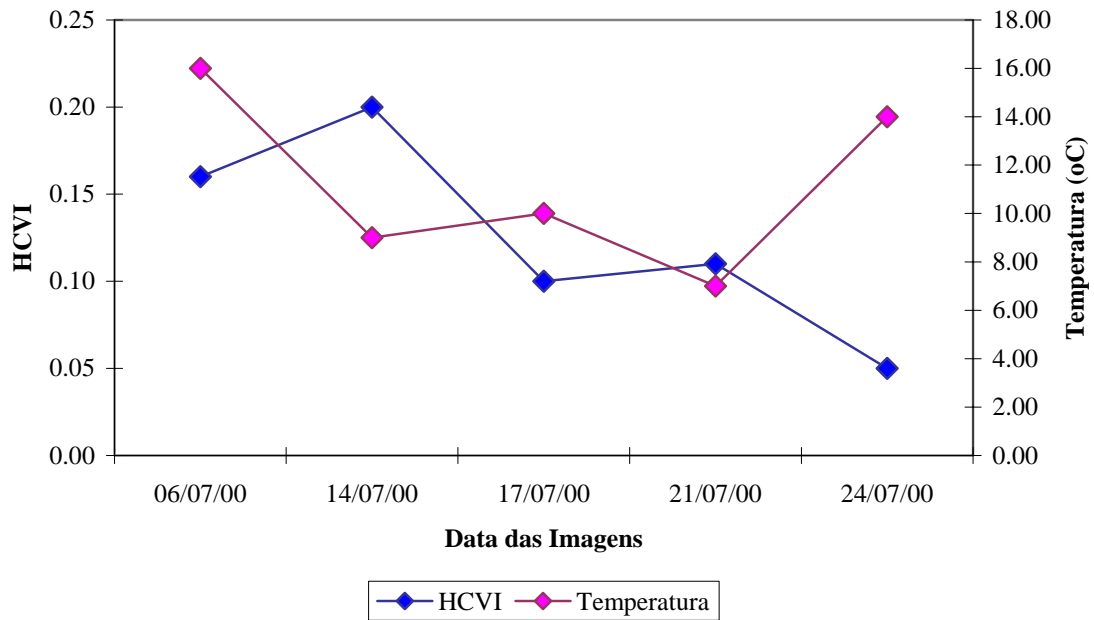


Figura 42. Valores médios de HCVI e Temperatura de Superfície, obtidos das imagens MODIS.

7 CONCLUSÕES

De acordo com a metodologia desenvolvida e os resultados obtidos nesta pesquisa foi possível concluir que:

- A resolução temporal do satélite TERRA permitiu acompanhar mudanças ambientais em tempo hábil para a detecção do impacto da geada em lavouras de café;

- Os índices de vegetação NDVI e HCVI, obtidos das imagens MODIS foram eficientes para o monitoramento do efeito da geada em nível Estadual e localizado, logo após a ocorrência da mesma;

- Os fatores climáticos apresentaram boa correspondência com a dinâmica dos índices NDVI e HCVI;

- Embora as imagens do satélite Landsat apresentaram melhor resolução espacial, a baixa resolução temporal (de 16 dias) e a disponibilidade de poucas imagens livres de nuvens limitam sua aplicação no monitoramento de geada. Assim, imagens do satélite Landsat auxiliaram no detalhamento do efeito do impacto da geada nas lavouras cafeeiras, porém, a resolução temporal foi inadequada para este tipo de estudo, além das imagens apresentarem muitos problemas com ocorrência de nuvens;

- Por outro lado, por ser grande a área de abrangência da geada, requer-se o uso de imagens Landsat de mais de uma órbita, tendo em vista que a largura de faixa das imagens é 185 km x 185 km, elevando o custo para o desenvolvimento do trabalho;

- O aplicativo SPRING apresentou-se adequado para processamento de dados necessários ao monitoramento de áreas cafeeiras atingidas por geadas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO CAFÉ. **Indicadores da indústria de café no Brasil**. Disponível em:< www.abic.com.br/estatisticas>, em 15 set. 2004.

AL-ABBAS, A. et al. Spectra of normal and nutrient deficient maize leaves. **Agronomy Journal**, Madison, v. 66, n.1, p.16-20, Jan./Fev. 1974.

ALMEIDA, B. L. ET AL. **Cenários do norte pioneiro do Paraná**. Curitiba: EMATER-PR, 2000. 174 p.

ARAI, E. et al. Comparação dos índices de vegetação (NDVI) obtidos através de imagens VHRR-NOAA e Sea WIFS – SeaStar para os Estado de São Paulo e Paraná. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2001. p.11-13.

ASRAR, G.; FUCHS, M.; KANEMASU, E.T.; HATFIELD, J.L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v.76, n.2, p.300-306, 1984.

ASRAR, G.; KANEMASU, E.T.; JACKSON, R.D.; PINTER, P.J. Estimation of total above ground phytomas production using remote sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v.17, n.3, p.211-220, 1985.

ASSUNÇÃO, G.V. **Sensoriamento remoto na agricultura: conceitos básicos, metodologia e aplicações**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1989 (INPE-4806-MD/39).

BARET, F. & GUYOT, G. Potential: limits of vegetation indices for LAI; APAR assessment. **Remote/Sensing of Environment**, v.35, n.2-3, p.161-73, 1991.

BAUER, M.E. **The role of remote sensing in determining the distribution:** yield of crops. Indiana: Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University, 1975. (LARS Technical Report 122075).

BAUER, M.E. et al. Spectral properties of agricultural crops ; soils measured from space, aerial, field ; laboratory sensors. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF PHOTOGRAMETRY, 14, 1980, Hamburg. Anais...1980. p.56-73.

BOWMAN, W. D. The relationship between leaf water status, gas exchange, ; spectral reflectance in cotton leaves. **Remote Sensing of Environment**, v.30, n.3, p.249-55, Dec. 1989.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Paraná (PR):** mapa das limitações dos usos dos solos do Estado do Paraná por suscetibilidade à erosão. Brasília, 1981. (Mapa Temático. Escala 1:600.000).

CÂMARA, G.; DAVIS, C. **Introdução ao geoprocessamento.** Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/>>. Acesso em: 5 ago. 2000.

CÂMARA G. et al. **SPRING:** integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics*, 2003, p.395-403, May-Jun, 1996.

CAMARGO, Â. P. Apontamentos de agrometeorologia. **Apostila da FAZMCG**, Esp. Sto. Do Pinhal, 1972.

CAMARGO, Â. P. de. O clima e a cafeicultura no Brasil. **Informativo EPAMIG.** Disponível em: <http://www.tecnigran.com.br/html/manual_de_geada_2002.htm>. Acesso em: 12 out. 2003.

CAMARGO, Â. P. de; CAMARGO, M. B. P. de; PALLONE FILHO, W. J. Modelo climático-fenológico para determinação das necessidades de irrigação de café arábica na região norte de São Paulo e no triângulo mineiro. **Boletim Técnico do IAC**, . Campinas, , 2001. p.190.

CAMARGO, Â. P. de e CAMARGO, M. B. P. Definição das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. Campinas, SP. **Agrometeorologia**, v.60, n.1, p.65-68, 2001.

CARAMORI, P. H. et al. Zoneamento de riscos climáticos para a cultura de café (*Coffea arábica* L.) no estado do Paraná. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v.9, n.3, p.486-494, 2001.

CARTER, G.A. Primary ; secondary effects pf water content on the spectral reflectance of leaves. **American Journal of Botany**, v.78, n.7, p.916-24, Jul. 1991.

CEBALLOS, J. C. & SCHROEDER, W. **Índices de vegetação baseados em imagens NOAA**. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/ffch/lab-geo/notas-vegetacao.docl>>. Acesso em: 7 set. 2002.

CHOUDHURY, B.J. Relationships between vegetation indices, radiation; net photosynthesis evaluated by a sensitivity analysis. **Remote Sensing Environment**, v.22, n2, p.209-34, July 1987.

CHUVIECO, E. et al. Estimación del estado hídrico de la vegetación a partir de sensores de alta y baja resolución. **Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica**, n.1, p.1-16, 2001.

CLEVERS, J.G.P.W. The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf area index by correting for soil moisture. **Remote Sensing Environment**, v.29, n.1, p.25-37, Jul.1989.

CLIMA BRASILEIRO. **Geada**. Disponível em: <<http://www.climabrasileiro.hpg.ig.com.br/geada.htm>> Acesso em: 7 set 2003.

COLWELL, J.E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v.3, n.3, p.175-183. 1974.

COORDENAÇÃO DO PROGRAMA INTEGRADO DE APOIO À CAFEICULTURA – PRÓ- CAFÉ. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/dfpv/caf e.html>> Acesso em: 23 out. 2002.

CREPANI, E. **Princípios básicos de sensoriamento remoto**. São José dos Campos: INPE, 1983. 45 p.

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

DAUGHTRY, C.S.T. ; V;ERBILT, V.C. ; POLLARA, V.J. Variability of reflectance measurements with sensor altitude; canopy type. **Agronomy Journal**, v.74, n.4, p.744-51, Jul./Aug. 1982.

EMBRAPA. PARANA (ESTADO) – TEMÁTICO: **Mapa das limitações do uso do solo do Estado do Paraná por suscetibilidade à erosão**. Escala 600000..-ed. [S%:s.n.], 1984. CH: 600000

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.

EMBRAPA. **Economia cafeeira**. Disponível em:
<http://www.embrapa.br/cafe/consorcio/home_html>. Acesso em: 12 set. 2002.

ENGESAT. **MODIS, o instrumento**. Disponível em:
<<http://www.engesat.com.br/satelites/modis.htm>>. Acesso em: 30 out. 2003.

EPIPHANIO, J. C. N.; ALMEIDA JR., A.C. de; FORMAGGIO, A.R. Desenvolvimento do trigo avaliada com dois índices de vegetação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, 1996. ANAIS... 1996. p.1-6.

EPIPHANIO, J. C. N. & FORMAGGIO, A. R. Relação entre multitemporabilidade de satélites e comportamento espectral de culturas agrícolas. SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCION REMOTA, 4, 1989, Argentina. ANAIS... Argentina, 1989. p.86-93.

ESPÍRITO-SANTO, E.D.B. **Caracterização e mapeamento da vegetação da região da Floresta Nacional do Tapajós através de dados óticos, radar e de inventários florestais**, 2003. 277f. Dissertação (Mestrado) – INPE, São José dos Campos, 2003. (INPE -10133-TDI/898).

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Using PCI Software (PCI)**. Ontário, Canadá, Dez. 1994. 478p.

FERREIRA, L.G. et al. Monitoramento sistemático da cobertura vegetal no bioma cerrado através dos índices de vegetação MODIS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. ANAIS..., São José dos Campos: INPE, 2003. p.2729-2736.

FONSECA, E.L. da; ROSA, L.M.G.; FONTANA, D.C. **Caracterização espectral de *Paspalum notatum* em diferentes níveis de adubação nitrogenada**. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, v.37, n.3, p.365-371, mar. 2002.

FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N. Reflectância multiespectral TM/LANDSAT-5 para o sensoriamento remoto das condições de vigor da cultura de feijão In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 6, 1990, Manaus. ANAIS... São José dos Campos: INPE, 1990. p.24-29.

GALLO, K.P.; DAUGHTRY, C.S.T. ; BAUER, M.F. spectral estimation in corn canopies. **Agronomy Journal**, v.78, n.5, p.752-56, Sept./Oct. 1985.

GAUSMAN, H. W. ; ESCOBAR, D.E. ; RODRIGUEZ, R.R. Effect of stress ; pubescence on plant leaf ; canopy reflectance. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE

SENSING FOR OBSERVATION; INVENTORY OF EARTH RESOURCES ; THE ENDANGERED ENVIRONMENT. **Proceedings**. Freiburg, F.R.G. 2-5 July, v.23. 1978. p.719-49.

GRANER, E. A. & GODOY JÚNIOR, C. **Culturas da fazenda brasileira**. São Paulo: Edições Melhoramentos, 1967. 461 p.

GREEN, C.F. Nitrogen nutrition ; wheat growth in relation to absorbed solar radiation. **Agricultural ; Forest ; Meteorology**, v.41, n.3-4, p.207-48, Dec. 1987.

GRODZKI, L. et al. Riscos de ocorrência de geada no estado do Paraná. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria, v.4, n.1, p.93-99, 1996.

GUYOT, G. **Optical properties of vegetation canopies**. In: Steven, M>D>; Clarck, J.A. ed. **Applications of remote sensing in agriculture**. London: Butterworths, 1990. p.19-43.

GUYOT, G. et al. Investigation into the mid-IR spectral b; best suited to monitoring vegetation water content. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 18., Ann Arbor, MI, ERIM, 1985. **Proceedings**. Ann Arbor, MI, ERIM, 1985. p.1049-63.

HALL, F.G. et al. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multi-date, multi-sensor images. **Remote Sensing of Environment**. v.1, n.35, p. 11-27. Jan. 1991.

HATFIELD, D.L.; ASRAR, G.; KANEMASU, E.T. Intercepted photosynthetically active radiation estimated by spectral reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v.14, n.1-3, p.65-75, Jan. 1984.

HATFIELD, D.L.; KANEMASU, E.T.; ASRAR, G.; JACKSON, R.D.; PINTER Jr., P.J.; REGINATO, R.J.; IDSO, S.B. Leaf area estimates from spectral measurements over various planting data of wheat. **International Journal Remote Sensing**, v.6, n.1, p.167-75, Jan.1985

HOFFER, R.M.; JOHANNSEN, C.J. Ecological potentials in espectral signature analysis. In: JOHNSON, P.L. ed. **Remote sensing in Ecology**. Athens: University of Georgia Press, 1969. p. 1-16.

HOFFER, R.M. Biological ; physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensing data. In: SWAIN, P.H; DAVIS, S. M., Ed. **Remote sensing the quantitative approach**, New York: McGraw Hill, 1978. cap.5, p. 228-89.

HOLBEN, B.N. Characterustucs if maximum-value composite images from temporal AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v.7, n.11, p.1417-1434, 1986.

- HOLBEN, B.N.; TUCKER, C.J., FAN, C. Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.46, n.5, p.651-656, May, 1980.
- HORLER, D.N.H.; BARBER, J. ; BARRINGER, A. R. Effect of heavy metals on the absorbance ; reflectance spectra of plants. **International Journal of Remote Sensing**, v.1, n.2, p.121-36, Apr./Jun. 1980.
- HORLER, D.N.H. ; DOCKRAY, M. ; BARBER, J. The red edge of plant leaf reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, v.4, n.2, p.273-88, Apr./Jun. 1983.
- HUNT, E.R. & ROCK, B.N. Detection of changes in leaf water content using near- ; middle-infrared reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v.30, n.1, p.43-54, Oct. 1989.
- IAPAR - FUNDAÇÃO INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Cartas climáticas básicas do Estado do Paraná**. Londrina, IAPAR, 1978. 41 p.
- IAPAR. **O café no Paraná**. Disponível em: <<http://www.pr.gov.br/iapar/café/p&m-para.html>>. Acesso em: 26 set. 2002.
- IAPAR. Disponível em: <<http://www.pr.gov.br/iapar/zonpr/Cafe.html>>. Acesso em: 14 mar. 2004.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **SPRING**: tutorial de geoprocessamento. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/teoria/index.html>. Acesso em: 15 set.2004.
- JACKSON, R.D.; PINTER Jr, P.J.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J. Wheat spectral reflectance: interations between crop configuration, sun elevation ; azimuth angle. **Applied Optics**, v.18, n.22, p.3730-31, Nov. 1979.
- JACKSON, R. D. & HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, n.11, p.185-200. 1991.
- KAUTH, R.J.; THOMAS, G.S. The tasseled cap transformation - a graphic description of the spectral temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In: SYMPOSIUM ON THE MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA, Purdue. **Proceedings**. Purdue: Purdue University, 1976. p. 4B41-4B51.
- KNIPLING, E.B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v.1, n.3, p.155-59, 1970.

- KOLLENKARK, J. C.; V; ERBILT, V. C.; BAUER, M. E.; HOUSLEY, T. L. Effect of cultural practices on agronomic ; reflectance characteristics of soybean canopy. **Agronomy Journal**, v.7, n.4, p.751-58, Jul./Aug. 1982.
- LAMPARELLI, R. A. C.; ROCHA, J. V.; BORGHI, E. **Geoprocessamento e agricultura de precisão** – fundamentos e aplicações. Guaíba: Agropecuária, 2001. 118p.
- LIMA, F.B. Café no Paraná: diagnóstico da cultura, análise e perspectivas. **Revista Brasileira de Tecnologia Cafeeira**. Instituto Brasileiro de Café, n.7, p.22-25, jul/out, 1989.
- MARCHIORATO, I. A.; SANTOS, J. M.; RUDORFF, B. F. T.; SANTOS JUNIOR, R. F. Utilização do sensoriamento remoto com medidas de espectrorradiômetro no visível e infravermelho próximo para detecção de áreas infestadas com *Meloidogyne incognita* em algodão. In: ENCONTRO CIENTÍFICO DE PÓS-GRADUANDOS DA FCAV E II ENCONTRO CIENTÍFICO DE PÓS-GRADUANDOS DE CIÊNCIAS AGROPECUÁRIAS DA UNESP, 3, 2001, Jaboticabal. **ANAIS...** 2001. 1 CD-ROM.
- MATIELLO, J. B. Fatores que afetam a produtividade do café no Brasil. **Cultura do Cafeeiro** – fatores que afetam a produtividade. Piracicaba, p.1-12, 1986.
- MOREIRA, M. A.; AULICINO, L. C. M.; SHIMABUKURO, Y. E.; DUARTE, V.; RUDORFF, B. F. T.; YI, J. L. R.; SOUZA, I. de M. e. **Modelo de mistura espectral para identificar e mapear áreas de soja e milho em quatro municípios do estado de Minas Gerais**. ANAIS - IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Santos, 1998, p.1-5.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. 250p.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. Viçosa: UFV, 2003. 307p.
- MOREIRA, M. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B.F.T. Análise espectral e temporal da cultura do café em imagens Landsat. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.3, p.223-231, mar. 2004. 307p.
- MYERS, V. I. Soil, water, plant relationships. In: Remote Sensing With Spectral Reference to Agriculture ; **Forestry**. Washington, DC: National Academy of Science. 1970. p.253-79.
- NASA Goddard Space Flight Center. **EOS Data Products** – Handbook. 2003. 258p.
- NOVO, E. M. L. DE M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São José dos Campos, 1988. 308 p.
- PASSOS, S. M. G.; CANÉCHIO FILHO, V.; JOSÉ, A. **Principais culturas (1)**. Campinas, Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1973. 403 p.

PEARSON R.L. & MILLER, R.D. Remote mapping of starting crop biomass for estimation of the productivity of the short grass prairie, Pawnee National Grassland, Colorado. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 8., Ann Arbor, 2-6 Oct. 1972. **Proceedings**. Ann Arbor, MI, ERIM, v.2, 1972. p.1355-73.

PINTER Jr., P.J.; JACKSON, R.D.; EZRA, C.E.; GAUSMAN, H.W. Sun-angle ; canopy-architecture effects on the spectral reflectance of six wheat cultivars. **International Journal of Remote Sensing**, v.6, n.12, p.1813-25, Dec. 1985.

PINTO, H.S.; ZULLU JR., J.; BRUNINI, O.; ALFONSI, R.R.; CAMARGO, M.B.P.DE; CORAL G.; BARBANO, M.T. Um modelo para estimativa de danos causados por geadas em cafezais. **Agroclimatologia**. Brasília/DF: Embrapa Café/Minasplan. v.1, p.120-121. 2000.

PINTO, H.S.; ZULLU JR., J.; BRUNINI, O. **Geadas**: condições de ocorrência e cuidados. 1999. Disponível em: <<http://orin.cpa.unicamp.br/geadas99.html>>. Acesso em: 17 set. 2003.

PONZONI, F. J. Avaliação de imagens-índice e imagens-proporção na identificação de plantios florestais desfolhados por geadas e pelo ataque de insetos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.54, p.07-118, dez. 1998.

PONZONI, F. J. **Sensoriamento remoto**: reflectância de alvos naturais. Brasília, DF: UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. 262 p.

PRADO, H. **Solos do Brasil**: gênese, morfologia, classificação e levantamento. Piracicaba: H. do Prado, 2001. 220 p.

PRINCE, S. D. A model of regional primary production for use with coarse-resolution satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, p.12, n.6, p.1313-30, Jun. 1991.

QUEIROZ, J.E.R. de & BARROS, M.A. de. **Princípios de processamento digital de imagens multiespectrais**. Universidade Federal da Paraíba – Centro de Ciências e Tecnologia – Laboratório de Meteorologia, Recursos Hídricos e Sensoriamento da Paraíba, 1995. 59 p.

REICHARDSON, A. J. ; WIEG, C.L. ; GAUSMAN, H.W.; CUELLAR, J.A.; GERBERMANN, A.H. Plant, soil and shadow reflectance components of row crops. **Photogrammetric Engineering; Remote Sensing**, 41(11): 1401-7, Nov. 1975.

RIPPLE, W.J. Spectral reflectance relationships to leaf water stress. **Photogrammetric Engineering ; Remote Sensing**, v.52, n.10, p.1669-75, Oct. 1985.

ROCHA, C.H.B. **Geoprocessamento**: tecnologia transdisciplinar. Juiz de Fora, MG: do Autor, 2000. 220p.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Third ERTS Symposium, **Proceedings**, NASA SP-351, NASA, Washington, DC, v.1, p.309-317,1973.

SANGIOLO, A.C. & NERY, J. T. Distribuições de extremos de temperatura mínima no Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.8, n.2, p. 247-253, 2000.

SANTOS, R. F.; CARVAÇHAIS, H. B.; PIRES, F. **Planejamento ambiental e sistemas de informações geográficas**. Campinas, v.1, n.2, 1997. p.1-12. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/revista/cigv1n2a2.htm>>. Acesso em: 2 ago. 2000.

SAS Institute Inc., **SAS/STAT® User's Guide, Version 8**, Cary, NC: SAS Institute Inc., 1999.

SEAB/DERAL. **Café – Paraná** – área, produção e rendimento por sistema de cultivo – safra 2003. Disponível em: <<http://www.pr.gov.br/seab/deral/cprsc.xls>>. Acesso em: 5 mai. 2004.

SELLER, P.J. Canopy reflectance, photosynthesis ; transpiration. **International Journal of Remote Sensing**,v.6, n.8, p.1335-72, Aug. 1985.

SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. L. **Meteorologia agrícola**. Piracicaba: ESALQ, 2000. 172p.

SILVA O.M. da; LEITE, C.A.M. **Café: produtividade, qualidade e sustentabilidade**. [Editado por] Laércio Zambolim. Viçosa: UFV, Departamento de Fitopatologia, 2000. 396p.

TAIZ, L & ZEIGER, E. **Plant physiology**. California: The Benjamin/Cummings Pub. Co., 1991. 559p.

TARDIN, A.T.; PALESTINO, ^aT.; SONNENBURG, C.R.**Levantamento de áreas ocupadas por café e trigo no Noroeste do Paraná por análise automática de dados do satélite Landsat**. São José dos Campos: INPE-875-NTE/065. 1976. 18p.

TARDIN, A.T. et al. **Uso de sensoriamento remoto para avaliação de danos causados pela geada no Noroeste do Paraná**. São José dos Campos: INPE-745-NTE/026. 1975. 38p.

THOMAS, J.R.; NAMKEN. L.N.; OERTHER, G.F.; BROWN, R.G. Estimating leaf water content by reflectance measurements. **Agronomy Journal**, v.63, n.6, p. 845- 47, Nov./Dec. 1971.

THOMAZIELLO, R.A.; OLIVEIRA, E.G.de; TOLEDO FILHO, J.A.de. Cultura do Café. **Boletim Técnico 193**. Campinas, Coordenadoria de Assistência Técnica Integral, 1987. 56 p.

TOLEDO FILHO, J. A. de; THOMAZIELLO, R. A.; OLIVEIRA, E. G. de; COSTA, T. E. da Cultura do café. Campinas, SP. **Boletim Técnico da CATI**, n.193, abril 2002.

TUCKER, C.L.; GARRATT, M.W. Leaf optical system modeled as a stochastic process. **Applied Optical**, v.16, n.3, p.635-42, Mar. 1977.

TUCKER, C. L. H. Red ; Photographic infrared linear combinations for monitoring vegetations. **Remote Sensing of Environment**, v.8, n.2, p.127-50, May. 1979.

VANDERBILT, V.C.& GRANT, L. Ligth polarization measurements: a method to determine the specular ; difuse lighth scattering properties of both leaves ; plant canopies. In: II COLL. INTERNATIONAL SIGNATURE SPECTRALES D'OBJECTS EN TÉLÉDÉTECTION. **Proceedings**. Bordeaux, 12-16, Sept. 1983.

VEGRO, C.L.R.; MARTIN, N.B.; MORICOCHI, L. **Café**: produtividade, qualidade e sustentabilidade. [Editado por] Laércio Zambolim. Viçosa: UFV, Departamento de Fitopatologia, 2000. 396p.

WIEGAND, C.L.; GAUSMAN, H.W.; CUELLAR, J.A.; GERBERMAN, A.H.; RICHARDSON, A.J. Vegetation density as deduced from ERTS-1 MSS response. In: ERTS Symposium, 3., **Proceedings**. Washington, DC, v.1, p. 93-116,1974.

WIEGAND, C.L.; RICHARDSON, A.J; ESCOBAR, D.E. Vegetation indices in crop assessment. **Remote Sensing of Environment**. v.35, p.105-119, 1991.

APÉNDICE

Apêndice 1. Estações meteorológicas no estado do Paraná e temperaturas mínimas ocorridas no dias 13 e 17 de julho de 2000.

ID	CIDADE	EMPRESA	TEMP. MÍNIMA - °C	
			13/07/00	17/07/00
1	Castro	INMET	-3.30	-3.90
2	Irati	INMET	-4.50	-5.10
3	Ivaí	INMET	-3.60	-4.50
4	Paranaguá	INMET	5.40	5.80
5	Antonina	SIMEPAR	5.90	3.40
6	Assis Chateaubriand	SIMEPAR	-0.30	-0.70
7	Campo Mourão	SIMEPAR	-0.90	-4.40
8	Candido de Abreu	SIMEPAR	-0.40	-3.80
9	Cascavel	SIMEPAR	-2.80	-2.90
10	Cerro Azul	SIMEPAR	0.00	-2.50
11	Curitiba	SIMEPAR	-0.60	-2.60
12	Foz do Iguaçu	SIMEPAR	-0.60	-0.10
13	Guaira	SIMEPAR	0.70	0.30
14	Guaratuba	SIMEPAR	8.20	5.90
15	Jaguariaíva	SIMEPAR	-1.30	-2.50
16	Maringá	SIMEPAR	0.20	0.20
17	N.Prata do Iguaçu	SIMEPAR	-1.10	-0.30
18	Palmital	SIMEPAR	-1.90	-2.20
19	Pinhais	SIMEPAR	-2.40	-3.50
20	Santa Helena	SIMEPAR	2.60	-1.00
21	Toledo	SIMEPAR	-2.80	-4.50
22	União da Vitória	SIMEPAR	-2.40	-2.80
23	Apucarana	IAPAR	0.10	-0.20
24	Bandeirantes	IAPAR	2.50	0.20
25	Bela V. Paraíso	IAPAR	2.20	1.60
26	Cambará	IAPAR	-0.60	-1.80
27	Cianorte	IAPAR	0.80	0.00
28	Clevelândia	IAPAR	-4.00	-5.00
29	Fernandes Pinheiro	IAPAR	-2.20	-4.70
30	Francisco Beltrão	IAPAR	-2.60	-3.80
31	Guaraqueçaba	IAPAR	2.80	0.20
32	Guarapuava	IAPAR	-2.00	-6.00
33	Ibipora	IAPAR	2.40	0.00
34	Joaquim Tavora	IAPAR	-1.80	-2.80
35	Lapa	IAPAR	-2.50	-4.50
36	Laranjeiras do Sul	IAPAR	-1.40	-2.70
37	Londrina	IAPAR	-0.20	-1.30
38	Morrestes	IAPAR	6.00	4.80
39	Nova Cantu	IAPAR	-1.40	-2.80
40	Palmas	IAPAR	-3.00	-6.20
41	Palotina	IAPAR	-2.00	-3.80
42	Paranavaí	IAPAR	0.60	0.60
43	Pato Branco	IAPAR	-2.80	-4.00
44	Planalto	IAPAR	-1.00	-1.50
45	Ponta Grossa	IAPAR	-2.60	-3.80
46	Telemaco Borba	IAPAR	-1.80	-4.30
47	Umuarama	IAPAR	-0.10	1.30

Apêndice 2. Altitude e tipo de solo de cada um dos polígonos das lavouras de café estudadas.

ID	Cidade	Intervalo Altitude	Altitude Média	Tipo de Solo
1	Ribeirão do Pinhal	580-660	620	LEe1+Pva7
2	Ribeirão do Pinhal	640-700	670	LEe1+Pva7
3	Ribeirão do Pinhal	540-640	590	LEe1
4	Ribeirão do Pinhal	600-700	650	PVa7
5	Nova Fátima	600-680	660	LEa4+LRd2
6	Nova Fátima	600-680	660	LEa4
7	Nova Fátima	640-760	700	LEa4+LRd2
8	Nova Fátima	700-740	720	LRd2
9	Nova Fátima	640-700	670	LRd2
10	Nova Fátima	640-680	660	LRd2
11	S. S da Amoreira	640-680	660	LRe2
12	S. S da Amoreira	560-640	600	LRe2+TRe3
13	S. S da Amoreira	640-700	670	LRe2
14	Cornélio Procópio	500-580	540	LRe2
15	Cornélio Procópio	500-580	540	LRe2
16	Cornélio Procópio	540-660	600	LRe2+RE10+TRe3
17	Cornélio Procópio	560-640	600	TRe3
18	Cornélio Procópio	600-640	620	TRe3+RE10
19	Cornélio Procópio	540-620	580	TRe3+RE10
20	Cornélio Procópio	560-620	590	TRe3
21	Cornélio Procópio	560-600	580	TRe3
22	Cornélio Procópio	580-620	600	TRe3
23	Cornélio Procópio	560-600	580	TRe3
24	Cornélio Procópio	520-560	540	RE10
25	Cornélio Procópio	460-540	500	RE10
26	Santa Mariana	420-460	440	TRe3
27	Santa Mariana	420-460	440	TRe3
28	Santa Mariana	460-500	480	TRe3+LRe2
29	Santa Mariana	460-500	480	TRe3+LRe2
30	Santa Mariana	440-500	470	TRe3
31	Santa Mariana	420-460	440	TRe3+LRe2
32	Santa Mariana	440-460	450	TRe3
33	Santa Mariana	400-480	440	TRe3+LRe2
34	Santa Mariana	380-440	410	TRe3
35	Santa Mariana	340-420	380	TRe3+LRe2
36	Santa Mariana	380-420	400	TRe3

Apêndice 3. Questionário para levantamento de informações sobre as propriedades estudadas e o impacto das geadas em 13 e 17 de julho de 2000.

1. Dados da propriedade

Data do levantamento:
Propriedade:
Proprietário:
Município:
Fotos n ^{os} :

2. Características dos talhões

Área total de café:	
Cultivar:	
Idade em 2000:	
Espaçamento:	
Sistema de plantio: () Em nível () Sem nível	
Possui quebra-ventos:	Tipo:
Existe culturas intercalares:	Tipo:

4. Topografia e tipo de solo

Tipo de solo:
Topografia: () Plana () Suave ondulada () Ondulada

5. Clima

Ocorrência de geadas:
Área de café atingida: %
Característica da geada:
Origem: () De vento () De radiação () Mista
Aspecto visual: () Negra () Branca
Intensidade: () Fraca () Moderada () Severa
Descrição dos danos causados:
Utilizou algum tipo de proteção contra a geada:
Quantos dias após a geada os danos estavam consolidados:
Descrição do entorno:
Coordenadas:
Croqui:

Apêndice 4. Localização em coordenadas UTM e área em hectares de cada um dos polígonos das lavouras de café estudadas.

ID	Cidade	Coordenada X	Coordenada Y	Área dos Polígonos
1	Ribeirão do Pinhal	563427,04	7408244,48	88,63
2	Ribeirão do Pinhal	561973,68	7408490,66	126,27
3	Ribeirão do Pinhal	562022,78	7409849,61	55,56
4	Ribeirão do Pinhal	559960,58	7407909,66	78,01
5	Nova Fátima	548542,56	7405602,75	36,28
6	Nova Fátima	547285,78	7406515,72	98,44
7	Nova Fátima	545425,34	7405414,20	85,06
8	Nova Fátima	544702,93	7406585,19	23,57
9	Nova Fátima	544138,86	7407398,92	40,88
10	Nova Fátima	545831,07	7408887,47	39,99
11	S. S da Amoreira	534370,17	7410469,41	19,95
12	S. S da Amoreira	533746,31	7410525,02	29,60
13	S. S da Amoreira	533917,30	7409876,24	14,52
14	Cornélio Procópio	546467,46	7428601,00	38,77
15	Cornélio Procópio	547464,19	7428640,39	37,12
16	Cornélio Procópio	544324,30	7417013,09	84,09
17	Cornélio Procópio	544948,15	7418133,96	26,35
18	Cornélio Procópio	546143,88	7418759,56	40,09
19	Cornélio Procópio	546650,77	7420088,97	78,37
20	Cornélio Procópio	548132,43	7419697,97	39,69
21	Cornélio Procópio	548899,26	7419763,13	20,24
22	Cornélio Procópio	549094,21	7419489,43	9,62
23	Cornélio Procópio	549848,04	7419945,60	13,21
24	Cornélio Procópio	550588,87	7418485,86	14,55
25	Cornélio Procópio	551186,74	7419163,60	26,57
26	Santa Mariana	547845,02	7451614,80	24,01
27	Santa Mariana	548458,68	7451717,36	15,58
28	Santa Mariana	547679,80	7448206,57	28,14
29	Santa Mariana	547845,02	7447835,76	11,31
30	Santa Mariana	548482,28	7448009,33	21,08
31	Santa Mariana	551187,51	7446138,82	19,01
32	Santa Mariana	550966,37	7445671,54	23,76
33	Santa Mariana	551831,34	7449516,93	154,25
34	Santa Mariana	553358,59	7449462,23	22,78
35	Santa Mariana	555316,74	7449090,29	45,10
36	Santa Mariana	552976,78	7453898,16	63,21

Apêndice 5. Características das lavouras de café estudadas.

ID	Cidade	Variedade	Idade	Espaçamento	Quebra-vento	Topografia	Intensidade da geada
1	Rib. do Pinhal	Catuái	22	4,0 x 2,0	Sim	Suave ondulada	Severa
2	Rib. do Pinhal	Catuái	23	4,0 x 2,0	Sim	Suave ondulada	Severa
3	Rib. do Pinhal	Catuái	25	4,0 x 2,0	Sim	Suave ondulada	Severa
4	Rib. do Pinhal	Catuái	22	4,0 x 2,0	Sim	Suave ondulada	Severa
5	Nova Fátima	Mundo Novo	25	4,0 x 1,5	Sim	Suave ondulada	Severa
6	Nova Fátima	Mundo Novo	25	4,0 x 1,5	Sim	Suave ondulada	Severa
7	Nova Fátima	Catuái	25	4,0 x 1,5	Sim	Suave ondulada	Severa
8	Nova Fátima	Catuái	25	4,0 x 1,5	Sim	Suave ondulada	Severa
9	Nova Fátima	Catuái	25	2,0 x 0,8	Sim	Suave ondulada	Severa
10	Nova Fátima	Catuái	25	2,0 x 0,8	Sim	Suave ondulada	Severa
11	S. S da Amoreira	Mundo Novo	24	4,0 x 2,0	Sim	Suave ondulada	Severa
12	S. S da Amoreira	Mundo Novo	24	4,0 x 2,0	Sim	Suave ondulada	Severa
13	S. S da Amoreira	Mundo Novo	24	4,0 x 2,0	Sim	Suave ondulada	Severa
14	C. Procópio	Mundo Novo	35	4,0 x 2,0	Sim	Suave ondulada	Severa
15	C. Procópio	Catuái	13	4,0 x 1,5	Sim	Suave ondulada	Severa
16	C. Procópio	Mundo Novo	24	4,0 x 1,5	Sim	Suave ondulada	Severa
17	C. Procópio	Catuái	24	4,0 x 1,5	Sim	Suave ondulada	Severa
18	C. Procópio	Catuái	30	4,0 x 1,5	Sim	Suave ondulada	Severa
19	C. Procópio	Catuái	24	4,0 x 1,5	Não	Suave ondulada	Severa
20	C. Procópio	Catuái	24	4,0 x 1,5	Não	Suave ondulada	Severa
21	C. Procópio	Catuái	22	4,0 x 1,5	Não	Suave ondulada	Severa
22	C. Procópio	Catuái	23	4,0 x 1,5	Não	Suave ondulada	Severa
23	C. Procópio	Obatã	22	4,0 x 1,5	Não	Suave ondulada	Severa
24	C. Procópio	Catuái	23	4,0 x 1,5	Não	Suave ondulada	Severa
25	C. Procópio	Catuái	23	4,0 x 1,5	Não	Suave ondulada	Severa
26	Santa Mariana	Catuái	13	4,0 x 2,5	Não	Suave ondulada	Severa
27	Santa Mariana	Obatã	5	2,5 x 0,8	Não	Suave ondulada	Moderada
28	Santa Mariana	Catuái	30	4,0 x 2,0	Não	Suave ondulada	Severa
29	Santa Mariana	IAPAR 59	2	1,75 x 1,5	Não	Suave ondulada	Severa
30	Santa Mariana	Catuái	30	4,0 x 2,0	Não	Suave ondulada	Severa
31	Santa Mariana	Catuái	8	1,20 x 0,70	Não	Suave ondulada	Severa
32	Santa Mariana	IAPAR 59	4	1,20 x 0,70	Não	Suave ondulada	Severa
33	Santa Mariana				Não	Suave ondulada	
34	Santa Mariana				Não	Suave ondulada	
35	Santa Mariana				Não	Suave ondulada	
36	Santa Mariana				Não	Suave ondulada	