

## Fusão de Imagens LANDSAT e JERS para diferenciação entre povoamentos de 'Eucalyptus Spp' e Mata Nativa.

Prof. Dr. Nelson Carlos Rosot <sup>1</sup>

Prof. Dr. Carlos Loch <sup>2</sup>

<sup>1</sup> UFPR – Departamento de Ciências Florestais  
Rua Lothário Meissner, 3400  
CEP 80210-170 Curitiba – PR  
✉ [ncrosot@floresta.ufpr.br](mailto:ncrosot@floresta.ufpr.br)

<sup>2</sup> UFSC – Departamento de Engenharia Civil  
Campus Universitário  
CEP 88040-900 Florianópolis – SC  
✉ [loch@ecv.ufsc.br](mailto:loch@ecv.ufsc.br)

Conteúdo	
	1 Introdução
	2 Material e Métodos
	2.1 Descrição da área
	2.2 Material
	2.2.1 Imagens de Satélites
	2.2.1.1 Imagem JERS
	2.2.1.2 Imagens LANDSAT-5 TM
	2.2.2 Dados auxiliares para Controle de Campo
	2.3 Métodos
	2.3.1 Imagem JERS
	2.3.1.1 Ortoretificação
	2.3.2 Imagem LANDSAT
	2.3.3 Fusão de Imagens
	3 Resultados
	3.1 Imagem JERS
	3.2 Imagem LANDSAT
	3.3 Fusão de Imagens
	4 Conclusões
	5 Agradecimentos
	6 Referências Bibliográficas

**Resumo:** No presente estudo foi avaliada a integração de imagens de sensores ópticos e de microondas para diferenciação de povoamentos de *Eucalyptus spp* e mata nativa no nordeste do Estado do Paraná. Foram utilizadas imagens dos sensores JERS1-SAR e LANDSAT-5 TM, ambas de dezembro de 1995. A imagem de radar foi ortoretificada considerando-se as informações obtidas do modelo do satélite e do modelo digital do terreno (DEM). A imagem LANDSAT TM foi corrigida geometricamente empregando-se transformações polinomiais. Para o registro entre as duas imagens foi empregada a técnica "mestre-escravo", adotando-se como referência a imagem de radar ortoretificada. Entre os processos de fusão aplicados incluíram-se a combinação simples de bandas dos dois sensores, a transformação estatística por componentes principais e a transformação IHS. Neste estudo a combinação simples de bandas envolvendo as componentes principais PC2 e PC5 resultantes das TM1-TM5 e TM7 do LANDSAT e a imagem JERS, PC2-PC5-JERS (RGB) foi considerada a melhor técnica para a fusão de imagens para discriminar povoamentos de *Eucalyptus spp* e mata nativa

**Palavras chave:** sensoriamento remoto, sensores de microondas, JERS, fusão de imagens

**Abstract:** In this paper was assessed the combination of optical and microwave sensors to differentiate *Eucalyptus spp* plantations and native forest in the northeastern Parana State. JERS1-SAR and LANDSAT-5 TM imagery from December 1995 were acquired. A digital elevation model was generated for correction of terrain-related geometric distortions in radar imagery, while for LANDSAT-5 TM imagery rectification, a simple first-order polynomial transformation was found to be adequate. The TM data were coregistered to the SAR orthorectified image using a "master-slave" procedure. Image processing techniques for data fusion included band combinations, statistical transforms and colour space transforms (IHS). The best results were achieved through band combinations of SAR imagery and the principal components of TM imagery. The RGB composition PC2-PC5-JERS was considered one of the most appropriated fusion techniques to differentiate *Eucalyptus spp* plantations and native forest.

**Keywords:** remote sensing, microwave sensors, JERS, image fusion

### 1 Introdução

A fusão digital de diferentes conjuntos de dados espectrais e não-espectrais permite a análise simultânea de diferentes tipos de informação para uma mesma área no terreno. Segundo AVERY e BERLIN (1992), a fusão é a superposição de imagens digitais adquiridas em diferentes comprimentos de onda, em épocas diferentes ou por diferentes sensores, além de imagens digitais representando informações de referência auxiliares de forma que medições congruentes possam ser obtidas para cada pixel correspondente.

Atualmente uma grande quantidade de informações sobre o ambiente e recursos naturais está sendo adquirida por sensores que operam na região de microondas do espectro eletromagnético. Entre estes inclui-se o radiômetro de microondas, que é um sensor passivo por apenas detectar o baixo nível de radiação de microondas natural que é emitido por todos os objetos da superfície terrestre (AVERY e BERLIN, 1992). O radar, por outro lado, é um sensor ativo que propaga radiação artificial de microondas em direção à superfície e detecta a componente refletida. A palavra “radar” é um acrônimo da expressão **Radio Detection And Ranging**. O termo “radio” é usado porque os primeiros sistemas de radar empregavam ondas de radiação bastante longas (de 1 a 10 m), que se situam na bandas de rádio do espectro eletromagnético. Apesar de os sistemas radares atuais utilizarem energia de microondas, o acrônimo não foi alterado.

Os radares de abertura sintética foram empregados com sucesso no mapeamento florestal, especificamente na separação de povoamentos jovens e maduros e, também, na detecção de danos causados por incêndios florestais (LICHTENEGGER, 1994). KATTENBORN et al. (1994) afirmam que, quando comparados aos sensores ópticos multiespectrais, as aplicações florestais para imagens SAR aparentam ser limitadas. Contudo, a cobertura dos sistemas radares orbitais permite o preenchimento de eventuais lacunas da cobertura óptica devida a mau tempo, nuvens, etc.

Com relação às florestas plantadas, AHERN et al. (1993) consideram que os sistemas radares orbitais não são capazes de proporcionar ganho significativo de informações no que diz respeito à composição de espécies (tipologia florestal) ou quanto ao volume utilizável de madeira. No entanto, sugerem que sistemas de microondas que operam com ondas mais longas sejam investigados mais detalhadamente quanto ao seu potencial para aplicações florestais. Isto se deve ao fato de que as ondas emitidas por esses sistemas possuem maior penetração no dossel, fornecendo melhor resposta quanto à densidade e biomassa dos povoamentos florestais.

O objetivo da fusão de dados SAR (Radar de Abertura Sintética) é explorar os diferentes conteúdos de informação sobre alvos capturados pelo SAR e por outros sensores, de forma a melhorar o reconhecimento e a discriminação de feições na cena. Isto é efetivado realçando-se a interpretabilidade visual das feições ou melhorando-se a separabilidade entre classes em classificações numéricas. O produto final da fusão através de realce é, tipicamente, uma imagem colorida, na qual o SAR e outros dados foram combinados numa cena atrativa e facilmente interpretável. A fusão de SAR para classificação deve resultar em acurácias de classificações melhoradas para as classes de interesse (MANORE et al., 1997; ROSOT, 2001).

LECKIE (1990) demonstra que quanto à discriminação as imagens de radar e as ópticas na região do visível/infravermelho são complementares entre si. As imagens ópticas apresentam boa discriminação para grandes grupos tais como florestas de coníferas, floresta de folhosas, plantios mistos de várias espécies, etc, enquanto que o radar parece ser mais efetivo na distinção de espécies de coníferas.

A fusão de dados ópticos e de microondas pode ser efetuada por técnicas de transformação no espaço de cores, por transformações estatísticas ou por combinação simples de bandas (MANORE et al., 1997). Considerando esta abordagem com finalidades de mapeamento geo ambiental, SILVA JR (1999) concluiu que as composições que usaram a banda C do sensor RADARSAT no canal vermelho mostraram-se mais adequadas para interpretação visual, provocando uma maior variação tonal das classes. Entre as melhores composições destacaram-se a C, TM5, TM3 (RGB) significativa para uma interpretação geral da área e TM5, TM4, C (RGB), onde as áreas de reflorestamento de eucalipto e várzea mostraram-se bem definidas.

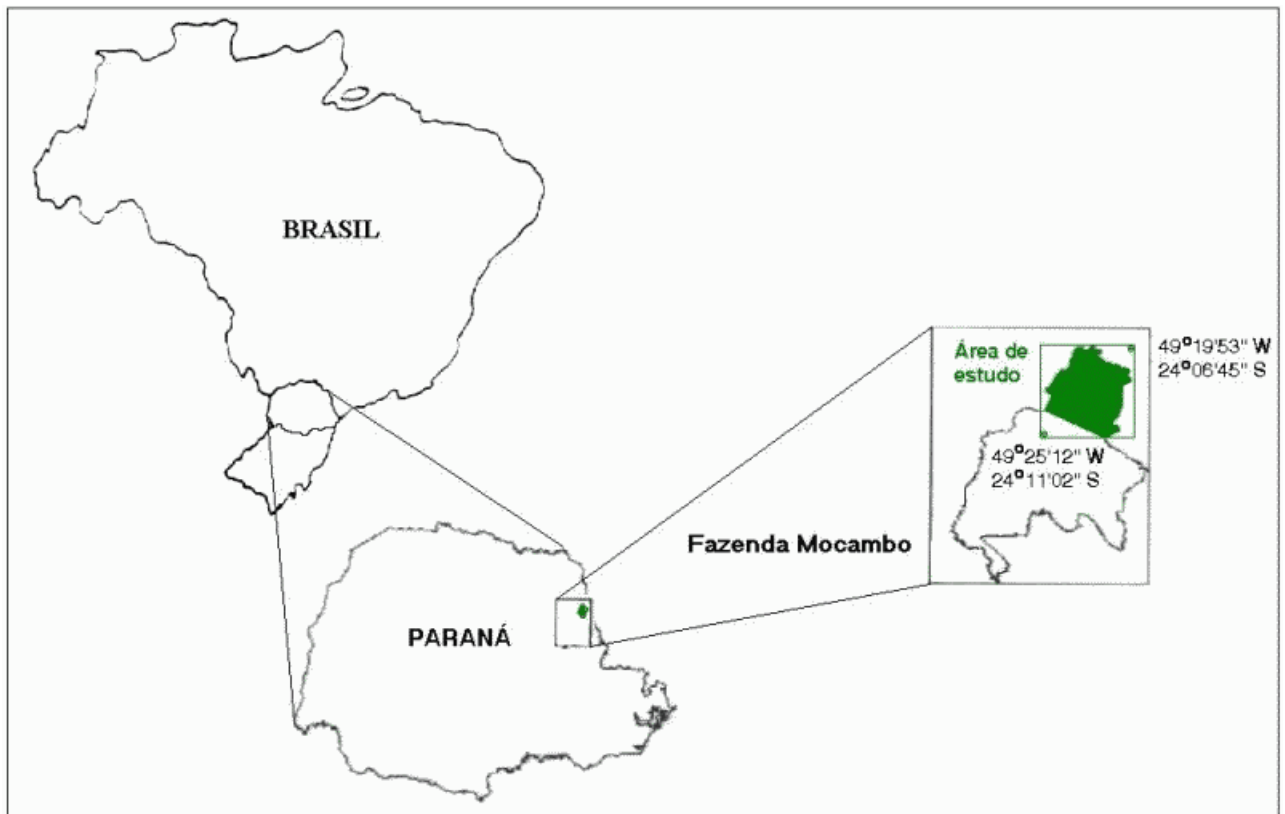
Devido à natureza das imagens de radar – onde são enfatizadas as propriedades físicas e elétricas dos alvos – nem sempre serão obtidos os resultados esperados em termos de classificação. É de se supor que a fusão de imagens de sensores radares e ópticos – em que as propriedades químicas dos objetos se manifestam nas variações tonais – possa contribuir significativamente na discriminação das diferentes espécies usadas em reflorestamentos, gerando classificações mais acuradas em comparação aos resultados obtidos quando se utiliza cada sensor isoladamente.

O objetivo geral do trabalho é avaliar a integração de imagens de sensores ópticos e de microondas na diferenciação de povoamentos de *Eucalyptus spp* e mata nativa. Os objetivos específicos são avaliar o desempenho de técnicas de processamento digital de imagens e analisar as técnicas de fusão de imagens de sensores ópticos (LANDSAT-5 TM) e microondas (JERS1-SAR) visando a diferenciação entre povoamentos de *Eucalyptus spp* e floresta nativa.

## 2 Material e Métodos

### 2.1 Descrição da área

A área de estudo (Figura 1) está localizada na Fazenda Mocambo, de propriedade da Pisa Florestal S.A., situada no Município de Sengés – PR, distante 280 km da cidade de Curitiba, compreendida entre as coordenadas 24° 06' 45" e 24° 11' 02" de latitude Sul e 49° 19' 53" e 49° 25' 12" de longitude oeste.



**Figura 1** : Localização da área de estudo no Brasil e no Estado do Paraná

## 2.2 Material

### 2.2.1 Imagens de Satélites

Foram empregadas imagens de sensores ópticos (LANDSAT 5 TM) e de microondas (JERS-1).

#### 2.2.1.1 Imagem JERS

Foi empregada uma imagem do sensor de microondas (JERS-1/SAR) em CD no formato CEOS-BSQ, correspondente à órbita 387, ponto 341, de 18/12/1995. A imagem foi doada pela Agência Nacional de Desenvolvimento Espacial do Japão (NASDA) para o projeto nº J-2RI-004.

#### 2.2.1.2 Imagens LANDSAT-5 TM

Foi adquirida uma imagem LANDSAT 5 do sensor *Thematic Mapper* (TM), com seis bandas espectrais (TM1 a TM5 e TM7), órbita 221, ponto 77 segundo o WRS (*World Reference System*). Para que fosse possível efetuar a fusão de dados, foi selecionada a data de 03/12/1995, que mais se aproximava da data de aquisição da imagem JERS (18/12/1995).

O produto foi solicitado em CD, no formato TIFF com nível de processamento 5, em que são efetuadas correções geométricas básicas na imagem, com reamostragem por vizinho mais próximo.

## 2.2.2 Dados auxiliares para Controle de Campo

Foi utilizado o mapa do IBGE - Departamento de Cartografia da cidade de Itararé, folha SG-22-X-B-I-1 na escala de 1:50.000, elaborado a partir de fotografias aéreas de 1965, com apoio suplementar e reambulação executados em 1974.

Também foram adquiridas fotos aéreas do levantamento aerofotogramétrico realizado para a Pisa Florestal S.A. em 1989, escala 1:25.000, num vôo efetuado pela empresa Aerosul S.A. – Levantamentos Aeroespaciais e Consultoria. Por ocasião do aerolevanteamento foram gerados dois arquivos vetoriais em meio digital, georreferenciados, um deles contendo a altimetria da fazenda Mocambo e, o outro, a divisão dos talhões e estradas, empregados nesta pesquisa nas etapas de geração de modelo numérico do terreno e ortorretificação.

O cadastro florestal, estruturado em 1990 e composto pelo banco de dados do manejo florestal, é atualizado sempre que houver qualquer alteração nas unidades mínimas de manejo (talhões). Foram utilizados os dados referentes aos povoados, correspondentes à época em que foram tomadas as imagens JERS. Os mapas temáticos e topográficos da empresa foram considerados como a “verdade de campo” nos procedimentos de diferenciação de espécies dos povoados.

## 2.3 Métodos

O processamento digital das imagens para a diferenciação de espécies nos talhões de reflorestamentos foi efetuado em etapas distintas para os sensores de microondas (JERS1-SAR) e ópticos (LANDSAT-5 TM) e para os produtos de sua fusão.

### 2.3.1 Imagem JERS

A partir da imagem JERS original de 75 Km por 80 Km, composta por 6000 colunas e 6400 linhas, foi efetuado um recorte contendo a área de estudo. Para produzir imagens de radar que possam ser interpretadas, é necessário efetuar a transformação matemática dos dados brutos adquiridos pelo sensor, incorporando-se correções radiométricas e geométricas. As imagens utilizadas nesta pesquisa foram pré-processadas pela Agência Nacional de Desenvolvimento Espacial do Japão (NASDA) com um nível de correção 2.1, que equivale ao georreferenciamento padrão da imagem reamostrada para a projeção UTM. As imagens de radar pré-processadas apresentam-se num formato original de 16 bits com 18m de resolução espacial. A conversão de inteiro para *byte* (de 16 para 8 bits) não foi efetuada como uma etapa do pré-processamento, mas, sim, durante o processo de ortorretificação.

#### 2.3.1.1 Ortorretificação

Considerando que a geometria das imagens de radar freqüentemente causa distorções que permanecem mesmo após terem sido efetuadas correções geométricas, optou-se por realizar a ortorretificação da imagem JERS1-SAR. Este procedimento objetivou, principalmente, a correção das distorções causadas pelo relevo, uma vez que a área de estudo não é totalmente plana.

O algoritmo de ortorretificação implementado no *software* PCI envolve duas etapas distintas. A primeira diz respeito à construção do modelo do satélite, executada através do módulo SMODEL (*Satellite model*). Para tanto foram necessários:

1. os dados de efemérides do satélite;
2. pontos de a imagem original SAR, contendo a cena inteira;
3. controle (GCPs) definidos pelo usuário.

Empregou-se aqui a imagem JERS1-SAR original, portanto não submetida previamente a nenhuma correção radiométrica, por ser esta uma exigência do modelo. Assim, não foram aplicados filtros para a redução do *speckle*. No entanto, foi efetuada a conversão automática da imagem de 16 para 8 bits. O *software* PCI possui uma função específica para esse tipo de reamostragem, denominada quantização normalizada (NQ – *normalized quantization*). Além disso, o tamanho do pixel original da imagem JERS (12,5 m) foi reamostrado para 18 m, que equivale, efetivamente, à resolução espacial da imagem.

Os dados de efemérides incluem informações sobre o modelo da Terra, sobre a órbita e sobre o sensor. Estes dois últimos encontram-se no arquivo *header* (cabeçalho), conhecido também como segmento *orbit*, que acompanha a imagem (ANDRADE, 2000). Este segmento foi lido e interpretado pelo *software* PCI.

O modelo da Terra foi baseado no Sistema Geodésico Sul Americano – SAD 69, com as seguintes características:

1. a. elipsóide de referência – UGGI 67 (recomendado pela União Geodésica e Geofísica Internacional em 1967);
2. origem das coordenadas (Datum planimétrico) – vértice Chuá (MG).

A segunda etapa do algoritmo de ortorretificação foi executada através do módulo SRORTHO (*Satellite Radar Orthorectification*), usando o modelo do satélite e o modelo digital de elevação (DEM).

Para a geração do modelo digital de elevação no *software* SPRING foi utilizado um arquivo de altimetria em formato *dxg*, contendo curvas de nível e pontos cotados, obtidos através de restituição aerofotogramétrica.

A partir da grade regular gerada foi obtida uma imagem em nível de cinza, com resolução de 18m que corresponde ao *raster* DEM. Como o DEM se encontrava em formato *raster*, sendo os valores de elevação representados por níveis de cinza, foi necessário definir valores de escala e *offset*, para que os dados de altimetria pudessem ser interpretados pelo algoritmo. Através do exame do arquivo original com as curvas de nível e os pontos cotados foram determinadas as altitudes mínima e máxima ocorrentes na área de estudo.

Excetuando-se os valores extremos (0 e 255), correspondentes ao preto e ao branco absoluto, respectivamente, a diferença em termos de elevação está compreendida entre 254 níveis de cinza. Considerando que a porção mais baixa da fazenda estava situada a 590 m acima do nível do mar e que o ponto mais alto era equivalente a 1040 m, determinou-se um fator de escala igual a 1,77, ou seja, a variação unitária no nível de cinza correspondia a 1,77 m de variação na altitude. O valor obtido para o *offset* foi igual a 332, calculado através da seguinte fórmula:

Durante a execução da reamostragem no módulo SRORTHO foi aplicado um filtro para redução do *speckle*.

### 2.3.2 Imagem LANDSAT

A imagem LANDSAT TM utilizada nesta pesquisa foi adquirida com correções geométricas básicas, incluindo-se aí as correções para as distorções sistemáticas. Para efetuar a geocodificação foi utilizado o método “imagem-mapa”, empregando-se um mapa planimétrico georreferenciado, em meio digital, com escala original igual a 1:10.000, elaborado a partir de aerolevanteamento efetuado em 1989, onde foram selecionados 12 pontos de controle perfeitamente identificáveis na imagem da banda TM4 e no mapa. A experiência prática sugere que sejam tomados de 10 a 15 pontos de controle para efetuar o georreferenciamento em se tratando de imagens LANDSAT TM ou MSS ou SPOT e áreas relativamente pequenas, de até  $1024^2$  pixels (MATHER, 1999). Empregou-se uma transformação polinomial de primeira ordem e reamostragem por interpolação bilinear, sendo a precisão da função de mapeamento avaliada através do erro da raiz quadrada média - RMS.

As composições coloridas consistem em conjuntos de três bandas, sendo cada uma atribuída a um dos canais RGB, disponíveis para visualização no sistema de processamento de imagens utilizado. Foram testadas diversas composições e selecionadas aquelas que melhor discriminaram os diferentes tipos florestais existentes na área. Operações de realce de imagens, disponíveis nos *software* utilizados nesta pesquisa, foram aplicadas às melhores composições, com a finalidade de produzir imagens mais facilmente interpretáveis e realçar as feições de interesse.

O baixo nível de saturação nas imagens LANDSAT TM é responsável pelos característicos tons “pastel” apresentados pelas composições coloridas (SABINS, 1997). Alguns dos *software* empregados permitiram a aplicação automática de técnicas de transformação no espaço de cores com o objetivo de realçar a imagem. O processo consistiu, inicialmente, na transformação das bandas das composições coloridas selecionadas do espaço RGB para o espaço IHS. Em seguida foi aplicado um contraste do tipo “gaussiano” na banda “saturação”, para que fosse preenchida toda a sua amplitude de valores. Na última etapa efetuou-se a transformação inversa para o espaço RGB.

Outra transformação de imagens aplicada aos dados originais foi a análise por componentes principais (ACP), efetuada envolvendo o conjunto das seis bandas LANDSAT TM.

### 2.3.3 Fusão de Imagens

A primeira etapa para a fusão de imagens dos sensores JERS-1 e LANDSAT TM consistiu no registro entre as duas imagens, no procedimento denominado mestre/escravo (*master-slave*). A imagem de referência “mestre” (*master*) foi a do sensor JERS1-SAR, uma vez que a mesma foi ortorretificada e possui, portanto, menores distorções quanto ao relevo. A imagem “escravo” (*slave*) foi a LANDSAT-5 TM.

No registro “imagem-a-imagem” foram selecionados pontos de controle facilmente identificáveis em ambas imagens, especialmente os cruzamentos das estradas que dividem os talhões. As coordenadas destes pontos na imagem JERS e na LANDSAT constituíram o conjunto de dados para estimar os coeficientes da função de mapeamento (polinomial de primeira ordem). No processo de reamostragem dos pixels da imagem LANDSAT foi empregado o método da interpolação bilinear, que evita a ocorrência de alterações significativas nos níveis de cinza da imagem original (SILVA JR., 1999).

Foram testadas as técnicas de fusão de dados mais comumente empregadas, entre elas a combinação simples de bandas (SILVA JR., 1999), transformações estatísticas como as componentes principais e a transformação IHS das composições coloridas originais ou das componentes principais (SOARES et al., 1997; HARRIS et al., 1990; VALLE, 1997). O nível de discriminação entre espécies dos talhões foi utilizado como critério para selecionar o melhor produto híbrido.

## 3 Resultados

### 3.1 Imagem JERS

Após o recorte, o tamanho da imagem JERS-1 SAR ficou reduzido a 1131 linhas e 951 colunas, facilitando a manipulação de arquivos. As curvas de nível do arquivo de altimetria foram utilizadas para a geração do modelo digital de elevação (DEM), com cada nível de cinza correspondendo a 1,77 m de altitude.

Foram utilizados doze pontos de controle selecionados na imagem e no arquivo vetorial dos talhões para serem empregados no ajuste do modelo do satélite. Obteve-se um RMS igual a 13,61 m, inferior, portanto, à resolução da célula do DEM, que é de 18 m. Durante o procedimento de reamostragem foram aplicados vários filtros, sendo que o filtro Enhanced Frost com janela 5 x 5 foi o que proporcionou melhor discriminação visual dos talhões com diferentes espécies. Na Figura 2 é apresentado o recorte da imagem JERS1-SAR ortorretificada com reamostragem dos pixels para 18m.

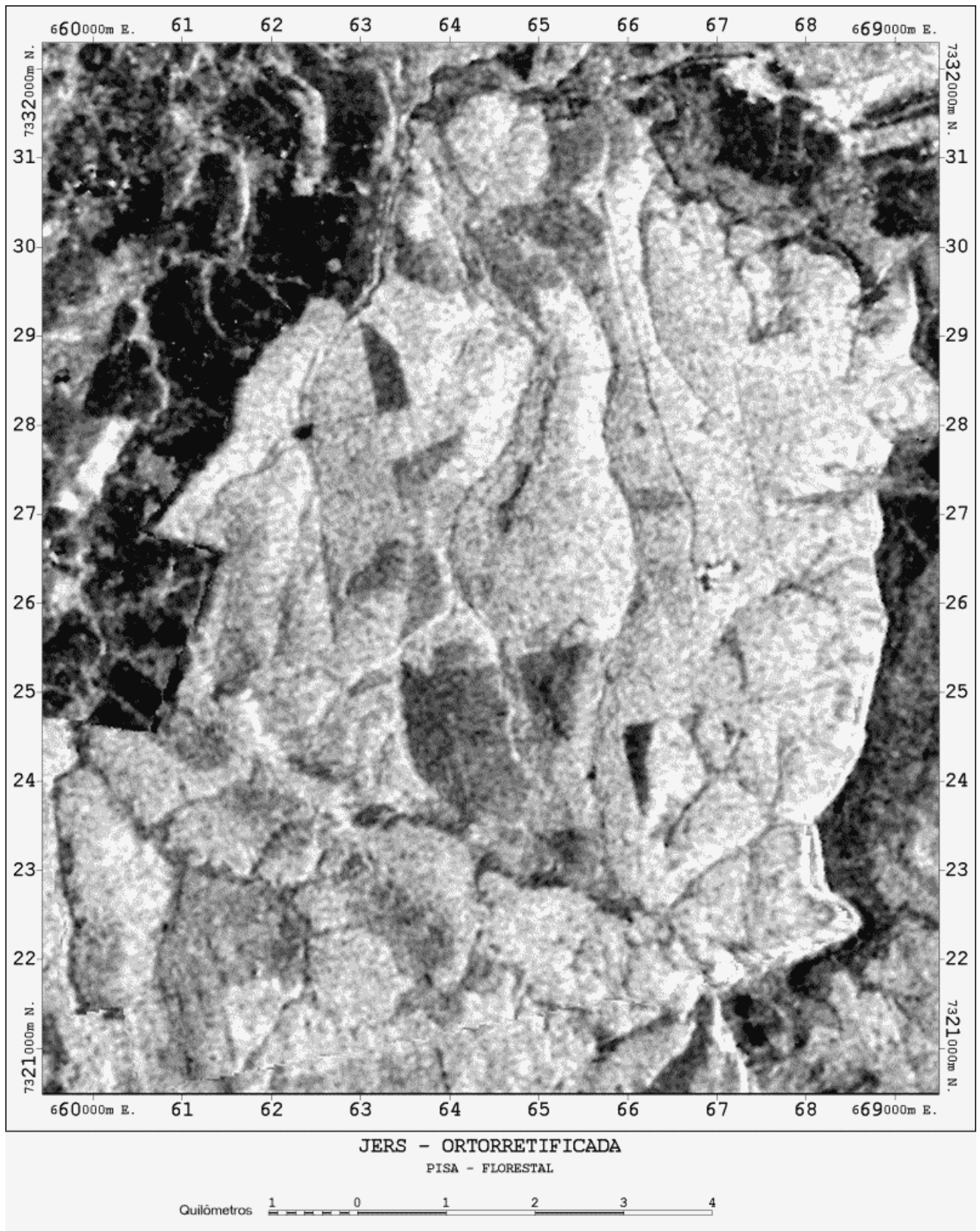


Figura 2 : Imagem JERS1-SAR, ortorretificada, contendo a área de estudo.

### 3.2 Imagem LANDSAT

Após o recorte da cena LANDSAT órbita 221, ponto 77, contendo a área de estudo, foi obtida, para cada banda, uma imagem de 405 colunas por 416 linhas.

Analisando-se os histogramas de frequência e as estatísticas da cena LANDSAT TM, observou-se que, nas bandas TM4, TM5 e TM7, o valor mínimo dos DNs foi igual a zero e esses valores foram encontrados no interior dos corpos d'água delimitados nas imagens. Assim não foi necessário aplicar a correção para os efeitos atmosféricos com base no método do mínimo do histograma. Empregando-se uma transformação linear (polinomial de 1º. grau) para efetuar a correção geométrica da imagem LANDSAT-5 TM, obteve-se um RMS máximo por ponto igual a 0,33 pixel e um RMS total de 0,221 pixel para todos os pontos considerados no ajuste, o que equivale a um erro de aproximadamente 6,63 metros no terreno. Após a aplicação da função de mapeamento, os níveis de cinza da imagem foram reamostrados por interpolação bilinear.

As técnicas de realce aplicadas às bandas da imagem LANDSAT TM permitiram uma melhor discriminação das feições de interesse, particularmente as diversas espécies florestais encontrados na área de estudo. Na maioria das vezes foram efetuados contrastes interativos, com manipulação do histograma. A opção de transformação mais utilizada foi a raiz quadrada, que segundo SPRING (1998), deve ser empregada quando se deseja realçar as porções mais escuras da imagem.

Todas as operações de realce de contraste efetuadas nas imagens tiveram por objetivo melhorar as condições de visualização e interpretabilidade das feições de interesse. Proporcionaram, também, a possibilidade de se obter uma imagem mais adequada para a seleção de pontos de controle no georreferenciamento. As transformações por componentes principais foram efetuadas considerando-se os DNs obtidos após o processo de reamostragem (georreferenciamento), sem realce de contraste.

Foram efetuadas inúmeras combinações de cores envolvendo as seis bandas (visível e infravermelho) do sensor TM, porém, conforme SABINS (1997), apenas um pequeno número delas é conveniente para a maioria das aplicações práticas. Dentre as inúmeras combinações de bandas testadas nos canais RGB, a que mais se destacou foi a combinação 543 (RGB), onde foi possível diferenciar mata nativa e os talhões de *Eucalyptus spp*, que se apresentaram em tons verde-claro, sendo que estes últimos apresentaram tonalidades um pouco mais escuras.

Outra composição que proporcionou uma boa discriminação das feições de interesse foi a 457 (RGB), onde talhões de *Eucalyptus spp* e mata nativa foram representados em tons de vermelho escuro e claro, respectivamente. Nessa composição foram realçados detalhes de talhões pequenos, confirmando, assim, o enunciado por SABINS (1997), que afirma que a combinação 457 (RGB) é a que fornece a melhor resolução espacial.

A composição colorida 453 (RGB) também permitiu discriminar talhões de *Eucalyptus spp* e matas nativas, porém em todas as composições testadas observou-se a diferenciação em termos de tons de vermelho e, não, cores diferentes. Deve-se ressaltar que as combinações de cores e, por conseguinte, a interpretabilidade das composições coloridas, dependem significativamente do tipo de realce de contraste aplicado para a visualização em tela. Com o objetivo de transformar os canais originais de dados em novos eixos de medição, visando maximizar a variância inerente aos dados no menor número possível de canais não-correlacionados, aplicou-se a técnica de transformação por componentes principais (CP). Foi empregada a matriz de variância-covariância para medir o grau de associação estatística entre as bandas espectrais. Na Tabela 1 pode-se observar que todas as seis bandas TM possuem correlações positivas relativamente altas entre si, exceto a banda TM4. A menor correlação foi encontrada entre as bandas TM4 e TM7 ( $r=0,49$ ) e entre as bandas TM4 e TM3 ( $r=0,50$ ). Tais resultados são similares aos apresentados em JENSEN (1996), MATHER (1999) e OLIVEIRA (2000), em estudos onde a banda TM4 foi a menos correlacionada com as demais.

**Tabela 1** : Matriz de correlação das seis bandas TM

BANDAS	1	2	3	4	5	7
1	1,00	0,95	0,92	0,52	0,83	0,83
2	0,95	1,00	0,96	0,59	0,92	0,91
3	0,92	0,96	1,00	0,50	0,93	0,96
4	0,52	0,59	0,50	1,00	0,60	0,49
5	0,83	0,92	0,93	0,60	1,00	0,97
7	0,83	0,91	0,96	0,49	0,97	1,00

Os coeficientes das seis componentes principais padrão encontram-se relacionados na Tabela 2, bem como os respectivos auto-valores e a percentagem de variabilidade dos dados concentrada em cada componente. Cerca de 85% da informação das seis bandas está contida na primeira componente (CP1). As primeiras três componentes (CP1, CP2 e CP3) representam, sozinhas, quase que a totalidade da variância dos dados (98,74 %). Para a CP1, as bandas 5, 2 e 7 são as que estão contribuindo com mais informação, o que pode ser constatado pela observação dos valores dos carregamentos ou coeficientes, iguais a 0,46; 0,43 e 0,43, respectivamente. Segundo SPRING (1998), a primeira componente contém a informação de brilho associada às sombras da topografia e às grandes variações da reflectância espectral geral das bandas.

**Tabela 2** : Coeficientes das variáveis das componentes principais (matriz dos auto-vetores transpostos) e auto-valores, com base na matriz de covariância (bandas 1,2,3,4,5 e 7)

CP's	BANDAS						Auto- Valores	% Variância	% Var. Acumulada
	1	2	3	4	5	7			
CP1	0,40	0,43	0,42	0,26	0,46	0,43	24507,83	85,06	85,06
CP2	-0,10	-0,04	-0,21	0,95	-0,02	-0,21	2786,74	9,67	94,73
CP3	-0,70	-0,27	-0,05	0,01	0,49	0,44	1154,16	4,01	98,74
CP4	-0,46	0,21	0,67	0,11	-0,53	0,06	185,62	0,64	99,38
CP5	0,36	-0,73	0,18	0,14	-0,29	0,45	131,28	0,46	99,84
CP6	-0,04	0,40	-0,54	0,02	-0,43	0,61	46,76	0,16	100,00

Embora a segunda componente principal (CP2) represente apenas 9,67% da variabilidade dos dados, a imagem correspondente mostrou-se potencialmente importante para a diferenciação das tipologias existentes na área. Os povoamentos de *Eucalyptus spp* se apresentaram em tonalidades cinza, diferenciando-se da mata nativa, que assumiu tons mais claros, quase brancos.

A CP2 apresentou carregamento positivo no canal infravermelho e carregamento negativo na banda visível TM3. Isso significa que o padrão verde foi realçado nessa componente, onde as folhosas, representadas pela mata nativa e pelos povoamentos de *Eucalyptus spp*, que apresentaram os níveis de cinza mais altos da imagem, gerando tonalidades próximas ao branco.

### 3.3 Fusão de Imagens

Por ocasião dos procedimentos de registro, o tamanho do pixel da imagem LANDSAT (30 m) foi automaticamente reamostrado para a resolução espacial da imagem JERS (18 m). Foi necessário, também, efetuar um recorte na imagem LANDSAT após o registro, para fazê-la coincidir pixel a pixel e em tamanho com a imagem JERS. Dessa forma obteve-se um arquivo contendo as seis bandas TM e a imagem JERS, com dimensões de 559 colunas por 657 linhas. Foram utilizados 12 pontos de controle para o registro, obtendo-se um RMS médio de 0,43 pixels, o que equivale a um erro de aproximadamente 8 m no terreno.

Para a fusão de imagens foram testadas as técnicas de combinação simples de bandas, transformação IHS e componentes principais. Foram testadas inúmeras combinações simples de bandas em RGB, constatando-se que a atribuição da imagem JERS ao canal verde (G) não produz resultados satisfatórios. As imagens geradas apresentaram influência do *speckle* e foram, sem dúvida nenhuma, dominadas pela radiometria da imagem JERS. A contribuição multiespectral da imagem LANDSAT foi neutralizada, prejudicando, assim, a discriminação das diferentes classes temáticas existentes na área. As melhores composições foram aquelas em que se utilizou a banda do radar nos canais vermelho (R) ou azul (B), confirmando os resultados encontrados por SILVA JR. (1999). Segundo esse mesmo autor, tal fato se deve, em parte, à maior sensibilidade do olho humano para esses comprimentos de onda. A composição TM5-TM4-JERS foi a combinação de bandas que melhor caracterizou as classes de vegetação, possibilitando a separação entre os povoamentos de *Eucalyptus spp* e mata nativa para a maioria das áreas em que essas formações aparecem. No entanto, os tons de verde e azul em que essas tipologias se apresentam são muito próximos para a percepção do olho humano, o que dificulta a discriminação das classes.

Os produtos híbridos “LANDSAT-5 TM – JERS1-SAR” obtidos pela transformação IHS apresentaram, em geral, qualidade inferior àqueles gerados pela combinação simples de bandas.

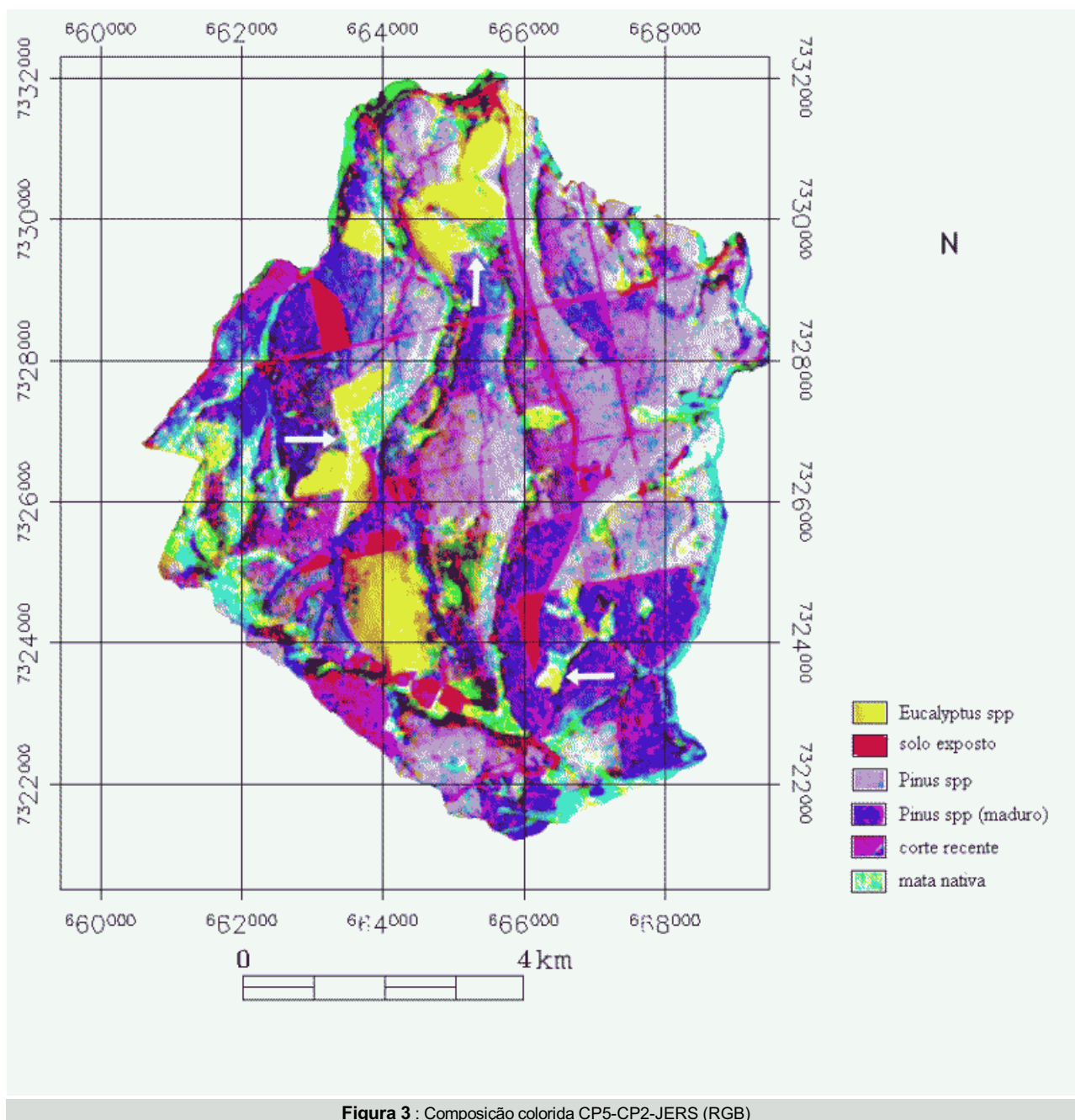
As componentes principais (CPs) geradas a partir das 6 bandas TM foram testadas para diferentes combinações em RGB. A técnica de fusão consistiu na atribuição das CPs a dois dos canais RGB disponíveis, enquanto que a banda JERS foi atribuída ao canal restante.

As melhores combinações das componentes principais e da imagem JERS foram aquelas em que se atribuiu a imagem de radar ao canal azul (B) ou vermelho (R). Embora as CP1 e CP2 juntas representassem 94,73% da variância dos dados, sua inclusão na composição colorida gerou imagens em que não foi possível diferenciar facilmente *Eucalyptus spp* de mata nativa.

Após inúmeros testes envolvendo todas as componentes principais, selecionou-se a composição CP5-CP2-JERS (RGB) como a combinação de bandas que melhor discriminou as espécies de interesse. Embora a CP2 e a CP5 representem, respectivamente, apenas 9,67% e 0,46% da variância dos dados, a sua combinação com a imagem JERS, mostrada na Figura 3, permitiu separar bem os talhões de *Eucalyptus spp*, que aparecem em amarelo, e mata nativa, em verde, conforme se pode observar nas áreas indicadas pelas setas.

A componente principal CP2 é, caracteristicamente, a componente “vegetação”, uma vez que é maciçamente dominada pela banda TM 4 (infravermelho próximo) e apresenta carregamentos negativos e baixos nas bandas do visível. Por outro lado a CP5 apresentou o maior coeficiente na banda TM 2, que corresponde aproximadamente à região verde do espectro e é, portanto, uma região importante para a detecção da vegetação verde sadia.

Conforme se pode visualizar na composição colorida CP5-CP2-JERS (Figura 3), as imagens dos dois sensores estão perfeitamente sobrepostas, sem deslocamentos aparentes, principalmente nas estradas e limites de talhões. Isso vem comprovar que o resultado do registro entre imagens foi satisfatório, estando condicionado à precisão do ajuste da função polinomial (georreferenciamento da imagem LANDSAT) e do ajuste do modelo do satélite (ortoretificação da imagem JERS).



#### 4 Conclusões

Em função dos resultados obtidos nesta pesquisa pode-se afirmar que a fusão de imagens de sensores de microondas (JERS1-SAR) e ópticos (LANDSAT-5 TM) é tecnicamente viável para a diferenciação de povoamentos de *Eucalyptus spp* e mata nativa na região nordeste do Paraná. A intensa utilização das componentes principais nos processos de integração de dados demonstram a importância desta técnica no processamento digital de imagens. Deve-se ressaltar que, no presente estudo, as bandas resultantes dessa transformação estatística foram empregadas não com o intuito de reduzir a dimensionalidade dos dados, mas, sim, para discriminar alvos de interesse, não detectáveis nas bandas originais, isoladamente ou em composições coloridas. Dentre as diferentes técnicas de fusão testadas, a mais facilmente implementada e a que produziu os melhores produtos híbridos foi a combinação simples da imagem JERS original e de componentes principais das bandas TM em composições coloridas RGB. A melhor composição foi aquela em que se utilizou a 5ª componente principal CP5 no canal vermelho (R), a 2ª componente principal (CP2) no canal verde (G) e a banda do radar JERS no canal azul (B).

#### 5 Agradecimentos

À Agência Nacional de Desenvolvimento Espacial do Japão (NASDA), pela doação da imagem de radar (JERS-1-SAR), à PISA Florestal, por ter disponibilizado o cadastro florestal da fazenda Mocambo e ao laboratório de tratamento de imagens digitais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelo apoio técnico-científico na etapa de ortorretificação.

#### 6 Referências Bibliográficas

AHERN, F.J.; LECKIE, D.G.; WERLE, D. Applications of RADARSAT SAR data in forested environments. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 19, n. 4, p.330 – 337, 1993.

ANDRADE, N.S. de O. **Qualidade geométrica de imagens JERS (SAR) e RADARSAT (modos S2 e S3) em ambiente de floresta tropical (Rondônia)**. São José dos Campos, 2000. 212 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Secretaria da Ciência e Tecnologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

AVERY, T.E.; BERLIN, G L. **Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation**. 5. ed.. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1992. 472 p.

HARRIS, J.; MURRAY, R.; HIROSE, T. HIS transform for the integration of radar imagery and other remotely sensed data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 56, n. 12, p. 1631 – 1641, 1990.

JENSEN, J.R. **Introductory digital image processing**. 2. ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 1996. 318 p.

KATTENBORN, G.; NEZRY, E.; DE GRANDI, G.; SIEBER, A.J. High resolution detection, monitoring and analysis of changes using ERS-1 SAR data. In: workshop ON "Use of ERS-1 SAR Data for Agricultural, Forestry and Environmental Applications in Central-Eastern Europe", 1993, Frascati, Italy. **Proceedings...** Frascati: ESA, 1994. p. 19-29.

LECKIE, D.G. Synergism of synthetic aperture radar and visible/infrared data for Forest type discrimination. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 56, n. 9, p. 1237 – 1246, 1990.

LICHTENEGGER, J. ESA's ERS Programme: A Summary Status Report on SAR Data Distribution and Applications. In: workshop ON "Use of ERS-1 SAR Data for Agricultural, Forestry and Environmental Applications in Central-Eastern Europe", 1993, Frascati, Italy. **Proceedings...** Frascati: ESA, 1994. p. 5 –10.

MANORE, M.; D'ORIO, M.; HARRIS, J. SAR Data Fusion. In: First Latino-American Seminar on Radar Remote Sensing. Image Processing Techniques, 1., 1996, Buenos Aires. **Proceedings ...**Noordwijk: ESA Publications Division, 1997. p. 91-96

MATHER, P.M. **Computer processing of remotely sensed images**. An introduction. 2. ed. Chichester : John Wiley & Sons, 1999.

OLIVEIRA, Y.M.M. de. **Investigation of remote sensing for assessing and monitoring the Araucaria Forest region of Brazil**. Oxford, 2000. 247 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Department of Plant Sciences, University of Oxford.

ROSOT, N.C. **Integração de imagens de sensores de microondas e ópticos para fins de mapeamento e classificação de reflorestamentos no sul do Brasil**. Florianópolis, 2001. 190 f. (Tese de Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina

SABINS, F.F. **Remote sensing: principles and interpretation**. São Francisco : W.H Freeman, 1997.

SILVA JR., A.F. da. **Combinação de imagens RADARSAT e LANDSAT-5 TM para fins de mapeamento geo-ambiental**. Curitiba, 1999. 113 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná.

SOARES, S.M.; SANT'ANNA, S.J.; KUNTSCHIK, G. Integração de dados multiespectrais landsat-5 TM com imagens SAR JERS-1, para fins cartográficos. In: First Latino-American Seminar on Radar Remote Sensing. Image Processing Techniques, 1., 1996, Buenos Aires. **Proceedings ...**Noordwijk: ESA Publications Division, 1997. p. 115-123.

SPRING – Sistema de processamento de informações georreferenciadas. São José dos Campos : NETGIS, 1998 (a). v. 2: Processamento de imagens.

VALLE, H.F. del; ELISSALDE, N.O.; GAGLIARDINI, D.A. ERS-1/SAR and SPOT data for irrigated land evaluations in a sector of the Chubut Inferior Valley (Central Patagonia, Argentina). In: INTERNATIONAL SEMINAR ON "THE USE AND APPLICATION OF ERS IN LATIN AMERICA", 1996, Vina del Mar. **Proceedings ...** Noordwijk: ESA Publications Division, 1997. p. 89 – 92.