

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Campus de Rio Claro

**ALESSANDRA RODRIGUES GOMES**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE DADOS POLARIMÉTRICOS  
RADARSAT-2 PARA MAPEAMENTO DE USO E COBERTURA DA  
TERRA EM TRECHO DE FAIXA DE DUTOS SOBRE DIFERENTES  
CONDIÇÕES GEOMORFOLÓGICAS**

Tese de Doutorado elaborada junto ao Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente para obtenção do Título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente

Orientador: Dra. Paulina Setti Riedel

Co-Orientador: Dra. Corina da Costa Freitas

Rio Claro (SP)

2011

## COMISSÃO EXAMINADORA

1 – Profa. Dra. Paulina Setti Riedel – Orientadora  
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

2 – Profa. Dra. Cenira Maria Lupinacci da Cunha  
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

3 – Prof. Dr. Gilberto José Garcia  
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

4 – Prof. Dr. Waldir Renato Paradella  
OBT/INPE/São José dos Campos (SP)

5 – Prof. Dr. Arnaldo de Queiroz da Silva  
UFPA – Belém (PA)

Conceito - **APROVADO**

*A todos que por mim passaram...*

*E a todos que ainda passarão...*

*DEDICO.*

## AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Dra. Paulina Setti Riedel, pela confiança e pelo apoio incondicionais durante todo o doutorado.

À minha co-orientadora, Dra. Corina Costa Freitas pelo apoio, confiança, incentivo e efetiva participação na orientação deste trabalho.

Ao querido amigo Cleber por toda a ajuda, disponibilidade, equilíbrio e desprendimento em momentos decisivos e importantes.

Ao amigo e colega Sidnei, pelas opiniões, sugestões e elaboração de programas em IDL que permitiram análises imprescindíveis deste trabalho.

Ao Mateus e à Darlene, pelas incontáveis ajudas com relação ao meu trabalho e às questões práticas, que não seriam solúveis sem a ajuda deles.

À minha família que, em todos os momentos, sempre acreditou em mim e na minha capacidade de finalizar este trabalho.

Às amigas e amigos espirituais, que estiveram e participaram durante todos os momentos e me mantiveram confiante e esperançosa. Obrigada Janaína e Adriana, por levarem meu nome e minhas aflições para onde nem sei. Nestes momentos é que percebemos onde estão nossos amigos invisíveis, mas presentes.

Às amigas-irmãs Luciana Spinelli, Cassya, Isabel Vega, Luciana Soler, Joelma, Érica e Flavinha pelos momentos de descontração e, muitas vezes, neuroses compartilhadas durante períodos de isolamento necessários.

Ao chefe do INPE Amazônia, Cláudio Almeida, por ter facilitado e dado apoio ao meu trabalho durante a elaboração, finalização e logística da tese.

Às Secretárias de todos os lugares por onde passei e que, em algum momento, precisei de ajuda e fui prontamente atendida: Luciana Moreira, Camila, Hellen, Cristina, Tamara, Soraya, Mayara. Obrigada pela ajuda e pelo apoio nos momentos que não dependem mais da gente.

À equipe de Capacitação do INPE Amazônia (Rafaela, Sadeck, Ulisses, Cesar e Carlos), pelo apoio e pela parceria de sucesso.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, pelos momentos compensadores de retorno à Universidade.

Aos meus colegas de turma de doutorado/mestrado Aguinaldo, Luziane, Francely, Maitê, Thiago, Sardinha, Miguel, Hélio, Carol, Robson pelos momentos de aluna e simplesmente aluna, revividos.

À Beatriz, Thais, Eder, Marcelo, Rodrigo, Efigênia, Eymar, Natália, Carol, Beatriz, Letícia, Daniel e todos aqueles que contribuíram para minha estada mais alegre e sossegada durante o processo de doutorado, em Rio Claro.

Aos companheiros das noites e domingos na UNESP, Carol Del Roveri, Salsicha, Letícia e tantos que faziam dos corredores, salas de espera ou de tortura.

Aos amigos que conquistei durante disciplinas cursadas no INPE: Arnaldo, Cleber, Igor, Fabrício, Fábio, Lariana, Emerson, Polyanna, Cristiane, Haron e Bruno Prado, com quem passei momentos de muito, muito estudo e percepções de que nada se conhece.

Aos meus companheiros de república, durante minha fase aluna, Mariela, Francely, Thiago, Miguel, Sardinha, Heros, Patrick e Simone por dividir comigo momentos de uma fase inesquecível.

Ao pessoal da Senzala (INPE), que me apoiou na fase das correções e nas mudanças entre programas: Ricardo, Pires, Luciana, Stelle, Rogério e Saldanha.

À Secretaria da Pós do IGCE, em especial à Rosângela e Andréia pelo apoio e carinho demonstrados deixando a pós-graduação sempre respeitada e querida.

A todos aqueles que por acaso esqueci, mas que sabem que me ajudaram de alguma forma, com uma palavra, com um gesto, com qualquer sinal de incentivo e força.

Aos senhores Alair D'Allantonia e Cristina Costa, do INMET por fornecer os dados meteorológicos que serviram de análise a este estudo.

À Petrobras, pelo apoio em campo, cessão de funcionários e transporte para que pudéssemos ter o campo mais "chique" que já participei. Agradeço, especialmente, aos companheiros de campo Cristina Bentz, Leandro Rodrigues, Ivanil, Salvador, Luciano, Marcelo e Genésio, que se dispuseram a nos ajudar a chegar nos pontos selecionados.

Ao CENPES, especialmente no nome da Dra. Cristina Bentz, que permitiu a interação entre o Projeto Petrobrás com esta pesquisa de doutorado, facilitando a aquisição de imagens RADARSAT-2, sem as quais este trabalho não seria possível.

A CAPES e CNPq, por ter concedido bolsa de pesquisa, sem a qual não teria iniciado a pesquisa de doutorado.

Ao Programa de Geociências e Meio Ambiente, sob a atual responsabilidade do Dr. Alexandre Perinotto e Dr. Mario Assine, que efetivaram minha participação como aluna de doutorado e representante discente do Programa.

"Nunca ande pelo caminho traçado, pois ele conduz somente  
até onde os outros foram".  
(Alexander Graham Bell)

## RESUMO

Com a expansão das atividades de petróleo e gás, o transporte destes produtos precisa ser monitorado para permitir o abastecimento e preservar as paisagens sobre as quais o transporte é realizado e uma das formas mais recomendadas para o Brasil é através de dutos, devido à distância entre a produção e os centros de consumo. Para esta pesquisa foi selecionado um trecho na faixa de dutos Rio de Janeiro – Belo Horizonte para avaliar as potencialidades de dados Fine QuadPol do RADARSAT-2 no mapeamento do uso e cobertura da terra sobre diferentes condições geomorfológicas. A partir das matrizes de coerência e covariância dos dados Fine QuadPol foram realizadas análises da decomposição de alvos (Cloude-Pottier e Freeman-Durden) e classificadores de Wishart derivados destas decomposições. Para os dados em amplitude, foi utilizado o classificador MaxVer-ICM. Para todos os resultados também foi analisado o efeito da aplicação do filtro polarimétrico de Lee com janelas 5x5 e 7x7 pixels. Foram estabelecidas 11 classes de uso e cobertura da terra (nível 2) e realizada uma análise exploratória baseada nos dados em sigma zero e parâmetros resultantes das decomposições de Cloude-Pottier e Freeman-Durden (anisotropia, entropia, ângulo alfa, contribuições dos espalhamentos superficial, *double-bounce* e volumétrico). Como a separação das classes não foi possível para o nível 2, optou-se por manter o nível 1 onde são mapeadas somente as classes de cobertura da terra. Com base nos resultados alcançados pelos classificadores, pode-se dizer que o MaxVer-ICM apresentou o maior índice de concordância kappa (38%) enquanto o classificador de Cloude-Pottier teve o pior desempenho (19%). Os classificadores de Wishart obtiveram kappa de 27% para a Wishart derivada de Cloude-Pottier e 25% para a Wishart derivada de Freeman-Durden. Apesar dos classificadores resultantes da decomposição de alvos e diferentes parâmetros terem apresentados resultados visualmente mais coerentes com a área de estudo, os resultados com dados em amplitude obtiveram melhores resultados estatísticos. Não houve diferença estatisticamente significativa entre os resultados gerados com imagens filtradas com janelas 5x5 e 7x7. Os resultados obtidos demonstraram que, com relação aos dados Fine QuadPol do RADARSAT-2, a análise dos dados polarimétricos foi determinante para a análise das amostras e definição das classes de cobertura da terra adotadas neste trabalho e os resultados dos classificadores também indicam potencialidades quanto à utilização destes dados. Os resultados do mapeamento em diferentes condições geomorfológicas foi dificultado nas áreas com relevo fortemente ondulado (sub-região 1) apresentando confusões entre classes devido aos efeitos gerados durante o processo de aquisição de imagens SAR, que persistiram nas áreas com relevo ondulado (sub-região 2). Nas áreas de relevo plano, que incluem além da sub-região 3, áreas planas da sub-região 1 e 2, a identificação das classes foi mais coerente com a heterogeneidade da área de estudo. A obtenção de imagens com diferentes modos de aquisição ou a aplicação de técnicas, como a fusão de imagens, pode propiciar melhores resultados para a discriminação de classes de cobertura da terra em diferentes condições geomorfológicas.

## ABSTRACT

Due to the expansion of the activities of oil and gas, the transportation of these products must be monitored to allow the supplies and preserve the landscapes on which transport is carried out and one of the most recommended forms of transport to Brazil is through pipelines due to distance of the consumers centers. For this research was selected a stretch in the Rio de Janeiro - Belo Horizonte pipelines to evaluate the potential of QuadPol Fine RADARSAT-2 data for mapping land use and land cover on different geomorphological conditions. From the covariance and coherence matrices of Fine QuadPol data was performed target decomposition (Cloude-Pottier and Freeman-Durden) and Wishart classifiers derived from these decompositions. For amplitude data, MaxVer-ICM was used as classifier. For all results was also analyzed the effect of applying Lee polarimetric filter with windows of 5x5 and 7x7 pixels. It was established 11 land use and land cover classes (level 2) and performed an exploratory analysis based on data from sigma nought and parameters resulting from the decomposition of Cloude and Pottier-Freeman-Durden (anisotropy, entropy, alpha angle, contributions from surface, double-bounce and volume scattering). As the separation of classes was not possible to level 2, we chose to keep a level where they are mapped only the classes of land cover. Based on the results achieved by the classifiers, we can say that the ICM-MaxVer had the highest rate of agreement kappa (38%) while the classifier Cloude-Pottier had the worst performance (19%). Wishart classifiers obtained kappa of 27% for the Wishart from Cloude-Pottier and 25% for the Wishart from Freeman-Durden. Based on the classifiers from the target decomposition and different parameters have presented results more visually consistent with the study area, the results with data obtained better results in amplitude statistics. There was no statistically significant difference between the results generated with filtered images in different sizes windows (5x5 or 7x7 pixels). The results showed that, with respect to Fine QuadPol RADARSAT-2 polarimetric data analysis was crucial to the analysis of samples and definition of land cover classes used in this research and the results of the classifiers also indicate potential for the use of these data. Mapping results in different geomorphological conditions was difficult in areas with strongly rugged relief (sub-region 1) showing confusion between classes due to the effects generated during the process of acquisition of SAR images, which persisted in areas with rugged relief (sub-region 2). In areas of flat terrain, which also include the sub-region 3, flat areas of the sub-region 1 and 2, the identification of classes was more consistent with the heterogeneity of the study area. The acquisition of images with different modes of acquisition or application of techniques such as image fusion may provide better results for the discrimination of land cover classes in different geomorphological conditions.



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Bases de distribuição de petróleo e derivados. ....	24
Figura 2 - Etapas para implantação de dutos terrestres .....	25
Figura 3 – Localização da faixa de dutos RJ-BH. AID: área de interferência direta e All.....	27
Figura 4 - Espectro eletromagnético e bandas da região de micro-ondas. ....	29
Figura 5 - Interação do pulso e eco do radar com a superfície.....	30
Figura 6 - Geometria de aquisição de imagens SAR.....	31
Figura 7 - Interação dos diferentes comprimentos de onda com a vegetação.....	34
Figura 8 - Composições coloridas R-HH, G-HV e B-VV exemplificando a variação da frequência e a discriminação de alvos em área agrícola.....	34
Figura 9 - Geometria de aquisição de imagem de radar com os ângulos de incidência e depressão representados, de acordo com o near range ( $\beta_n$ e $\theta_n$ ) e far range ( $\beta_f$ e $\theta_f$ ).....	35
Figura 10 - Distorções de encurtamento, inversão e sombreamento.....	37
Figura 11 - Direção da órbita e variação no azimute de visada .....	39
Figura 12 - Célula de resolução em azimute e em range. ....	40
Figura 13 - Diferença entre resolução em azimute SAR e RAR. ....	40
Figura 14 - Representação dos atributos de uma onda eletromagnética. (a) onda com polarização vertical e (b) onda com polarização horizontal. Ev: vetor campo elétrico vertical; Eh: vetor campo magnético horizontal, $\lambda$ : comprimento de onda, A: amplitude, $\Phi$ : fase.....	41
Figura 15 - Variação de polarização em imagem RADARSAT-1, banda C e composição colorida resultante.....	43
Figura 16 - Tipos de espalhamentos de acordo com a superfície sob a qual incide a onda eletromagnética. ....	46
Figura 17 - Reflexão da onda eletromagnética em refletores de canto.....	46
Figura 18 - Tipos de retroespalhamentos complexos. (A) espalhamento direto no dossel da floresta; (B) espalhamento múltiplo e volumétrico no interior do dossel; (C) retroespalhamento na superfície do solo; (D) interação tronco-solo (ou água) e (E) sombra. ....	47
Figura 19 - Tipos de espalhamento. ....	53
Figura 20 - Distorção em slant range gerada pela geometria de aquisição da imagem SAR. ....	56
Figura 21 - Plano entropia/ângulo $\alpha$ ( $H/\alpha$ ).....	61
Figura 22 - Órbitas do RADARSAT. ....	64
Figura 23 - Modos de aquisição dos dados RADARSAT-2.....	65
Figura 24 - Área de cobertura da imagem RADARSAT-2.....	67
Figura 25 - Localização da área de estudo desta pesquisa.....	68
Figura 26 - Mapa de unidades morfoestruturais da área de estudo.....	69
Figura 27 - Mapa geomorfológico da área de estudo. ....	70
Figura 28 - Colinas isoladas na área de estudo.....	72

Figura 29 - Colinas dissecadas, morrotes e morros baixos na área de estudo.....	73
Figura 30 - Escarpas serranas na área de estudo. ....	74
Figura 31 - Planícies aluviais na área de estudo. ....	76
Figura 32 - Planícies colúvio-alúvio-marinhas na área de estudo.....	77
Figura 33 - Mapa altimétrico e isoietas da área de estudo. ....	79
Figura 34 - Mapa de vegetação original da área de estudo.....	80
Figura 35 - Fluxograma geral das principais etapas realizadas neste trabalho. ....	82
Figura 36 - Recorte de imagem RSAT-2 projetado sobre a carta planialtimétrica - CAVA (DSG), escala 1:50.000.....	83
Figura 37 - Área de estudo sobre imagem RADARSAT-2, ascendente, de 03/08/09, composição colorida R-HH, G-HV e B-VV e linha do duto RJ-BH, em vermelho. ....	86
Figura 38 - Modelo Digital de Elevação (DEM) da área de estudo. ....	88
Figura 39 - Imagem do relevo sombreado da área de estudo. ....	89
Figura 40 - Classes de declividade da área de estudo. ....	90
Figura 41 - Localização das estações meteorológicas próximas à área de estudo. Em vermelho a delimitação da área de estudo.....	91
Figura 42 - Precipitação média observada nas Estações Xerém (RJ), Pico do Couto (RJ) e Vila Militar (RJ) de 28/07/09 a 12/08/09 .....	92
Figura 43 - Localização das subáreas visitadas em campo e faixa de dutos.....	94
Figura 44 - Detalhes da subárea 1 visitada em campo.....	95
Figura 45 - Detalhes da subárea 2 visitada em campo.....	96
Figura 46 - Detalhes da subárea 3 visitada em campo.....	97
Figura 47 - Detalhes da subárea 4 visitada em campo.....	98
Figura 48 - Detalhes da subárea 5 visitada em campo.....	99
Figura 49 - Detalhes da subárea 6 visitada em campo.....	100
Figura 50 - Detalhes da subárea 7 visitada em campo.....	101
Figura 51 - Detalhes da subárea 8 visitada em campo.....	102
Figura 52 - Detalhes da subárea 9 visitada em campo.....	103
Figura 53 - Detalhes da subárea 9 visitada em campo.....	104
Figura 54 - Detalhes da subárea 11 visitada em campo.....	105
Figura 55 - Detalhes da subárea 12 visitada em campo.....	106
Figura 56 - Detalhes da subárea 13 visitada em campo.....	107
Figura 57 - Detalhes da subárea 14 visitada em campo.....	108
Figura 58 - Detalhes dos pontos aéreos coletados em helicóptero. ....	109
Figura 59 - Fluxograma de processamentos realizados nos dados RADARSAT-2 Fine Quad-Pol.....	110
Figura 60 - Distribuição das amostras de treinamento na área de estudo. ....	116
Figura 61 - Características da área de estudo, de acordo com a declividade e imagem do relevo sombreado. ....	122

Figura 64 - Resultado visual (HHR-HVG-VVB) da aplicação de filtro polarimétrico Lee, com diferentes tamanhos de janela de processamento. ....	125
Figura 63 - Imagem IKONOS e composição colorida $\alpha$ -R, A-G e H-B. Imagens dos parâmetros ângulo $\alpha$ entropia e anisotropia geradas a partir de imagem filtrada com janela de 5x5 <i>pixels</i> e respectivos histogramas de frequência de <i>pixels</i> . 128	128
Figura 64 - Imagem IKONOS e composição colorida $\alpha$ -R, A-G e H-B. Imagens dos parâmetros ângulo $\alpha$ entropia e anisotropia geradas a partir de imagem filtrada com janela de 7x7 <i>pixels</i> e respectivos histogramas de frequência de <i>pixels</i> . 129	129
Figura 65 - Distribuição dos <i>pixels</i> da área de estudo no plano H/ $\alpha$ a partir de imagens filtradas com janelas de (a) 5x5 e (b) 7x7. ....	130
Figura 66 - Planos H/ $\alpha$ para imagens filtradas: (a) 5x5 e A<0,5; (b) 5x5 e A>0,5; (c) 7x7 e A<0,5 e (d) 7x7 e A>0,5. ....	131
Figura 67 - Imagens resultantes do processo de decomposição de alvos de Freeman-Durden para imagens filtradas com janela 5x5 e frequência de <i>pixels</i> para a área de estudo: (a) espalhamento superficial; (b) espalhamento <i>double-bounce</i> ; (c) espalhamento volumétrico e (d) composição colorida superficial R, <i>Double-bounce</i> -G e volumétrico-B.....	132
Figura 68 - Imagens resultantes do processo de decomposição de alvos de Freeman-Durden para imagens filtradas com janela 7x7 e frequência de <i>pixels</i> para a área de estudo: (a) espalhamento superficial; (b) espalhamento <i>double-bounce</i> ; (c) espalhamento volumétrico e e (d) composição colorida superficial-R, <i>double-bounce</i> -G e volumétrico-B.....	133
Figura 69 - Valores de $\sigma^0$ para cada classe nas polarizações HH (a), HV (b) e VV (c) de acordo com as sub-regiões definidas para a pesquisa.....	136
Figura 70 - Análise dos valores de $\sigma^0$ para as polarizações HH (a), HV (b) e VV (c) considerando todas as amostras definidas na área de estudo.....	137
Figura 71 - Médias e desvios padrões das amostras para cada classe dos parâmetros ângulo alfa, anisotropia e entropia a partir de imagens filtradas com janela 5x5 (a, c, e) e 7x7 (b, d, f). ....	139
Figura 72 - Distribuição do plano H/ $\alpha$ das amostras com as imagens filtradas com janelas de 5x5 e 7x7 <i>pixels</i> . ( Amostras representam as classes: (a): de área florestada;(b): cultivo perene; (c): campo natural; (d): área agrícola; (e): pastagem; (f): solo preparado para cultivo; (g): mineração; (h): vias de acesso; (i): área urbana; (j): água e (l): sombra.....	140
Figura 73 - Distribuição do plano H/ $\alpha$ das amostras com a imagem filtrada com janela de 5x5 <i>pixels</i> e anisotropia maior e menor que 0,5. Amostras representam as classes: (a): de área florestada;(b): cultivo perene; (c): campo natural; (d): área agrícola; ; (e): pastagem; (f): solo preparado para cultivo; (g): mineração; (h): vias de acesso; (i): área urbana; (j): água e (l): sombra. ....	141
Figura 74 - Distribuição do plano H/ $\alpha$ das amostras com a imagem filtrada com janela de 7x7 <i>pixels</i> e anisotropia maior e menor que 0,5. Amostras representam as classes: (a): de área florestada;(b): cultivo perene; (c): campo natural; (d): área agrícola; (e): pastagem; (f): solo preparado para cultivo; (g): mineração; (h): vias de acesso; (i): área urbana; (j): água e (l): sombra.....	142

Figura 75 - Média e desvio padrão das amostras para cada classe de acordo com os mecanismos de espalhamento a partir de imagens filtradas com janela 5x5 e 7x7. (a) e (b) superficial; (c) e (d) <i>double-bounce</i> e (e) e (f) volumétrico. ....	144
Figura 76 - Análise comparativa das amostras entre dados em sigma zero e parâmetros da decomposição e Freeman-Durden e Cloude-Pottier. (a) HH e superficial; (b) HH e <i>double-bounce</i> ; (c) HH e volumétrico; (d) HH e anisotropia; (e) HH e ângulo $\alpha$ e (f) HH e entropia. ....	146
Figura 77 - Análise comparativa das amostras entre dados em sigma zero e parâmetros da decomposição e Freeman-Durden e Cloude-Pottier. (a) HV e superficial; (b) HV e <i>double-bounce</i> ; (c) HV e volumétrico; (d) HV e anisotropia; (e) HV e ângulo $\alpha$ e (f) HV e entropia. ....	147
Figura 78 - Análise comparativa das amostras entre dados em sigma zero e parâmetros da decomposição e Freeman-Durden e Cloude-Pottier. (a) VV e superficial; (b) VV e <i>double-bounce</i> ; (c) VV e volumétrico; (d) VV e anisotropia; (e) VV e ângulo $\alpha$ e (f) VV e entropia. ....	148
Figura 79 - Análise comparativa das amostras entre e parâmetros da decomposição e Freeman-Durden e Cloude-Pottier. (a) anisotropia e superficial; (b) ângulo $\alpha$ e superficial; (c) entropia e superficial; (d) anisotropia e <i>double-bounce</i> ; (e) ângulo $\alpha$ e <i>double-bounce</i> e (f) entropia e <i>double-bounce</i> . ....	149
Figura 80 - Análise comparativa das amostras entre e parâmetros da decomposição e Freeman-Durden e Cloude-Pottier. (a) anisotropia e volumétrico; (b) ângulo $\alpha$ e volumétrico e (c) entropia e volumétrico. ....	150
Figura 81 - Resultado da classificação de Cloude-Pottier aplicada à imagem da matriz de coerência filtrada com janela de 5x5 <i>pixels</i> e histograma das classes para a área de estudo. ....	153
Figura 82 - Resultado da classificação de Cloude-Pottier aplicada à imagem da matriz de coerência filtrada com janela de 7x7 <i>pixels</i> e histograma das classes para a área de estudo. ....	153
Figura 83 - Sub-regiões e linha do duto sobre imagem Ikonos e resultados da agregação da classificação Cloude-Pottier. ....	157
Figura 84 - Classificação de Wishart derivada de Cloude-Pottier aplicada à imagem da matriz de covariância filtrada com janela de 5x5 <i>pixels</i> e frequência das classes. ....	159
Figura 85 - Classificação de Wishart derivada de Cloude-Pottier aplicada à imagem da matriz de covariância filtrada com janela de 7x7 <i>pixels</i> e frequência das classes. ....	159
Figura 86 - Sub-regiões e linha do duto sobre imagem Ikonos e resultados da agregação da classificação de Wishart derivada de Cloude-Pottier. ....	163
Figura 87 - Sub-regiões, linha do duto, imagem IKONOS e resultados da decomposição de Freeman-Durden (R-superficial; G- <i>double-bounce</i> ; B-volumétrico) geradas a partir da imagem filtrada com janelas de 5x5 e 7x7 <i>pixels</i> . ....	165
Figura 88 - Classificação de Wishart derivada de Freeman-Durden aplicada à imagem da matriz de covariância filtrada com janela de 5x5 <i>pixels</i> e frequência das classes. ....	167

Figura 89 - Classificação de Wishart derivada de Freeman-Durden aplicada à imagem da matriz de covariância filtrada com janela de 7x7 pixels e frequência das classes. ....	168
Figura 90 - Sub-regiões e linha do duto sobre imagem Ikonos e resultados da agregação da classificação de Wishart derivada de Freeman-Durden. ....	171
Figura 91 - Sub-regiões e linha do duto sobre imagem Ikonos e resultados da agregação da classificação MaxVer-ICM. ....	173
Figura 92 - Resultado visual das classificações para a área de estudo (a) CP_5x5 e (b) CP_7x7. ....	175
Figura 93 - Resultado visual das classificações para a área de estudo (a) CP_WIS_5x5 e (b) CP_WIS_7x7. ....	176
Figura 94 - Resultado visual das classificações para a área de estudo (a) FD_WIS_5x5 e (b) FD_WIS_7x7. ....	177
Figura 95 - Resultado visual das classificações para a área de estudo (a) ICM_5x5 e (b) ICM_7x7. ....	178
Figura 96 - Valores de kappa e exatidão global das classificações realizadas com janela 5x5 e 7x7. ....	180

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo dos modos de imageamento do RADARSAT-2.....	66
Tabela 2 - Aplicativos utilizados neste trabalho e suas aplicações.....	84
Tabela 3 - Características das imagens RADARSAT-2 adquiridas.....	85
Tabela 4 - Descrição dos mapas temáticos para este trabalho. ....	87
Tabela 5 - Classes de gradiente de declividade. ....	89
Tabela 6 - Classes de uso e cobertura da terra de acordo com autores e níveis de classificação.....	114
Tabela 7 - Classes cobertura (1º nível) e uso da terra (2º nível) adotadas nesta pesquisa. .....	115
Tabela 8 - Características das amostras de treinamento.....	115
Tabela 9 - Número de amostras (polígonos) de treinamento de acordo com a sub-região. .....	116
Tabela 10 - Índice de concordância Kappa e qualidade das classificações.....	120
Tabela 11 - Lista das classes de uso e cobertura encontradas em cada sub-região analisada.....	123
Tabela 12 - Dados estatísticos para cálculo da relação sinal/ruído em região homogênea das imagens filtradas com filtro Lee e diferentes tamanhos de janela.....	124
Tabela 13 - Parâmetros estatísticos das imagens $\sigma$ , entropia e anisotropia. ....	127
Tabela 14 - Valores de entropia, ângulo alfa e anisotropia para cada classe gerada na classificação de Cloude-Pottier. ....	152
Tabela 15 - Porcentagem de ocorrência das amostras de cobertura da terra para as 16 classes geradas pela classificação de Cloude-Pottier com janela 5x5 <i>pixels</i> ..	154
Tabela 16 - Porcentagem de ocorrência das amostras de cobertura da terra para as 16 classes geradas pela classificação de Cloude-Pottier. Com janela 7x7 <i>pixels</i> .	155
Tabela 17 - Porcentagem de ocorrência das amostras de cobertura da terra para as 16 classes geradas pela classificação de Wishart derivada de Cloude-Pottier com janela 5x5.....	161
Tabela 18 - Porcentagem de ocorrência das amostras de cobertura da terra para as 16 classes geradas pela classificação de Wishart derivada de Cloude-Pottier com janela 7x7.....	162
Tabela 19 - Porcentagem de ocorrência das amostras de cobertura da terra para as 9 classes geradas pela classificação FD_WIS_5x5. ....	169
Tabela 20 - Porcentagem de ocorrência das amostras de cobertura da terra para as 9 classes geradas pela classificação FD_WIS_7x7. ....	170
Tabela 21 - Valores de exatidão global, kappa e qualidade da classificação para todas as classificações geradas. ....	179
Tabela 22 - Matrizes de confusão das classificações geradas neste trabalho.....	182

## SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO .....	18
1.1 – Estruturação do documento.....	20
2 – OBJETIVOS .....	22
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	23
3.1 – Implantação de dutos terrestres .....	23
3.2 – Sensoriamento Remoto .....	28
3.2.1 – Características dos sistemas de radar .....	30
3.2.2 – Parâmetros relativos ao sistema de radar .....	33
3.2.2.1 – Frequência.....	33
3.2.2.2 – Ângulo de Incidência .....	35
3.2.2.3 – Azimute de visada .....	39
3.2.2.4 – Resolução.....	39
3.2.2.5 – Polarização.....	41
3.2.3 – Parâmetros relativos ao alvo .....	44
3.2.3.1 – Rugosidade da superfície .....	45
3.2.3.2 – Propriedades dielétricas .....	48
3.3 - Representação de dados polarimétricos .....	49
3.3.1 – Teoremas de Decomposição de Alvos.....	52
3.3.1.1 – Decomposição de Freeman-Durden.....	53
3.3.1.2 – Decomposição de Cloude e Pottier .....	54
3.4 – Processamentos aplicados às imagens SAR .....	55
3.4.1 - Transformação de slant range para ground range.....	55
3.4.2 – Ortorretificação de imagens .....	56
3.4.3 – Redução do ruído speckle.....	57
3.4.4 – Classificação de imagens para mapeamento de uso e cobertura da terra..	59
3.4.4.1 – Classificador MaxVer-ICM .....	60
3.4.4.2 - Classificador de Cloude-Pottier .....	61
3.4.4.3 – Classificador de Wishart derivado de Cloude-Pottier.....	62
3.4.4.4 – Classificador de Wishart derivado de Freeman-Durden .....	63
3.5 – Sistema RADARSAT-2 .....	63
4 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	68

4.1 – Geomorfologia .....	69
4.1.1 - Colinas Isoladas:.....	71
4.1.2 - Domínio de Colinas Dissecadas, morrotes e morros baixos:.....	72
4.1.3 - Escarpas serranas: .....	74
4.1.4 - Planícies aluviais.....	75
4.1.5 – Planícies colúvio-alúvio-marinhas .....	76
4.2 – Temperatura e pluviosidade .....	78
4.3 – Uso e cobertura da terra .....	79
5 – ETAPAS DE TRABALHO .....	82
5.1 – Definição da área de estudo .....	82
5.2 – Aquisição de material.....	84
5.2.1 – Imagens Orbitais .....	84
5.2.2 – Dados auxiliares.....	87
5.2.2.1 – Mapas temáticos.....	87
5.2.2.2 – Modelo Digital do Terreno .....	87
5.2.2.3 – Dados meteorológicos .....	90
5.3 – Trabalho de campo .....	93
5.4 – Processamentos aplicados à imagem RADARSAT-2.....	110
5.4.1 – Geração da matriz de espalhamento .....	111
5.4.2 – Aplicação de filtro polarimétrico.....	111
5.4.3 – Decomposição de Cloude-Pottier.....	112
5.4.4 – Decomposição de Freeman-Durden .....	112
5.4.5 – Definição das classes de uso e cobertura da terra.....	112
5.4.6 – Análise exploratória das classes de uso e cobertura da terra .....	117
5.4.7 – Classificação de Cloude-Pottier .....	117
5.4.8 – Classificações de Wishart .....	118
5.4.8.1 – Classificações de Wishart derivada de Cloude-Pottier .....	118
5.4.8.2 – Classificações de Wishart derivada de Freeman-Durden.....	118
5.4.9 – Ortorretificação das imagens .....	119
5.4.10 – Classificação MaxVer-ICM .....	119
5.4.11 – Análise dos resultados das classificações .....	120
6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	121
6.1 – Classes de uso e cobertura da terra nas sub-regiões.....	123



6.2 – Avaliação da relação sinal/ruído .....	124
6.3 - Decomposição de alvos de Cloude-Pottier.....	126
6.4 – Decomposição de Freeman-Durden.....	131
6.5 – Análise exploratória das amostras das classes de uso e cobertura da terra ...	134
6.5.1 – Análise exploratória das amostras segundo o parâmetro sigma zero ( $\sigma^0$ )	134
6.5.2 – Análise exploratória das amostras segundo decomposição de alvos de Cloude-Pottier .....	138
6.5.3 – Análise exploratória das amostras segundo decomposição de alvos Freeman-Durden.....	143
6.6 – Definição das classes de uso e cobertura da terra baseada nas análises exploratórias .....	145
6.7 – Resultados das classificações .....	151
6.7.1 - Classificações derivadas da decomposição de Cloude-Pottier.....	151
6.7.1.1 – Classificação de Cloude-Pottier.....	151
6.7.1.2 – Resultados da classificação de Wishart derivada de Cloude-Pottier ..	158
6.7.2 – Classificações derivadas da decomposição de Freeman-Durden.....	164
6.7.2.1 – Classificação de Wishart derivada de Freeman-Durden.....	167
6.7.3 – Classificação MaxVer-ICM .....	172
6.8 – Análise comparativa dos resultados das classificações.....	174
7 – CONCLUSÕES .....	183
8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS .....	186
9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	187

## 1 – INTRODUÇÃO

Atualmente, com as recentes áreas de exploração de hidrocarbonetos no Brasil, como o pré-sal, grande importância vem sendo dada ao setor do petróleo e gás, principalmente quando se consideram os índices econômicos e participação deste setor no PIB brasileiro, com expectativa de 1,5% até a década de 2020 (IPEA, 2010). A expansão deste setor vem incentivando pesquisas na área de produção, refino, abastecimento e, conseqüentemente, monitoramento das áreas de exploração e transporte.

A extração de petróleo e o transporte de seus derivados podem ser realizados em diversas formas e etapas. O monitoramento destas etapas depende da área e forma de extração além do tipo de transporte, seja por meio de navios, oleodutos ou caminhões. Os oleodutos (ou dutos) terrestres são instalados para transportar diferentes produtos químicos e iniciam a operação somente após cuidadosos estudos relacionados ao meio ambiente e propriedades, além de avaliações de impactos ambientais e sociais.

Sendo assim, existe a necessidade de preservar e manter a integridade do duto para o abastecimento e também a preocupação do que a instalação e permanência do duto podem gerar, em termos de impactos, aos diferentes tipos de paisagens. Estas diferentes paisagens podem significar áreas agrícolas, áreas com ocupação humana, vias de acesso, pastagens, campos, florestas e outros diversos tipos de cobertura e uso da terra.

Além disso, as paisagens variam e são bastante diferenciadas de acordo com o relevo sobre o qual estão dispostas. Áreas com relevo mais acidentados possuem diferentes formas de impacto daquelas áreas mais planas. Desta forma, os diferentes tipos de cobertura aliados às diferentes formas de relevo auxiliam e, muitas vezes determinam o traçado do duto e são fatores importantes tanto durante a fase de instalação quanto na fase de monitoramento.

Para a instalação do duto necessita-se de uma faixa de operação de 20 metros, mas para efeitos práticos as empresas que atuam no monitoramento do duto trabalham com uma faixa considerada de influência direta, que varia de 400 a 1000 metros, e uma faixa considerada indireta que pode chegar a 5000 metros. No entorno das faixas de dutos, o avanço da urbanização pode ocasionar uma

diminuição da cobertura vegetal e requer um acompanhamento ao longo do tempo para garantir a segurança, integridade e tempo de vida útil dos dutos.

Como estudo de caso desta situação, onde a ocupação humana e atividades relacionadas a ela podem ser um fator de risco à integridade dos dutos, esta pesquisa escolheu um trecho da faixa de dutos Rio de Janeiro – Belo Horizonte (RJ-BH), que atravessa o Estado do Rio de Janeiro, desde a cidade de Duque de Caxias até Betim, em Minas Gerais. Nesta região, diferentes tipos de uso e cobertura da terra estão dispostos sobre diferentes condições geomorfológicas.

Para facilitar a identificação e caracterização destas diferentes paisagens, os produtos de sensoriamento remoto podem auxiliar no mapeamento inicial, que dá origem ao monitoramento. Desta forma, pode-se observar alterações da paisagem, como a dinâmica de uso e cobertura da terra, no entorno do duto em diferentes escalas espacial e temporal.

Apesar das inúmeras vantagens dos sensores remotos ópticos, que são os mais comumente utilizados no mapeamento de uso e cobertura da terra, a presença de nuvens, comum em regiões tropicais e em áreas de relevo acidentado, devido ao efeito orográfico, pode dificultar a obtenção da informação baseada nestes sensores. Uma opção para esta limitação são os sensores de radar, que operam em todas as condições de iluminação, e são pouco influenciados pelas condições atmosféricas.

Os radares imageadores permitem a obtenção de informações sobre as características físicas (geometria, forma) e elétricas dos alvos, além da capacidade adicional da polarimetria e interferometria. Com o advento dos radares imageadores polarimétricos, que registram a informação de amplitude e fase do sinal de retorno, uma maior possibilidade de caracterização dos alvos na superfície terrestre foi alcançada. Isto ocorre porque as várias configurações possíveis de transmissão e recepção, tanto das ondas emitidas quanto refletidas pela superfície, permitem uma visão dos vários aspectos físicos e geométricos do alvo.

Dentre os diversos radares imageadores hoje existentes e operantes, destacam-se o TerraSAR-X, COSMO-SkyMed e RADARSAT-2. O surgimento e a popularização dos diversos dados de radar acarreta a necessidade de um maior conhecimento dos mecanismos de interação energia/alvo (PARADELLA et. al., 2005) bem como uma análise das técnicas e processamentos digitais específicos para estes dados.

No caso desta pesquisa, o sensor imageador utilizado é o RADARSAT-2 que, lançado em 2009, possui mais de 38 configurações de aquisição e diversas aplicações, incluindo as áreas de uso e cobertura da terra e Geomorfologia. Os dados polarimétricos gerados complementam os estudos já realizados e permitem novas perspectivas para futuros trabalhos.

Considerando o contexto exposto, esta pesquisa pretende responder às seguintes hipóteses:

- 1) É possível discriminar as classes de uso e cobertura da terra utilizando dados Fine-Quad Pol do sensor RADARSAT-2.
- 2) A utilização de dados polarimétricos fornece melhores resultados de classificação de uso e cobertura da terra, quando comparados aos dados polarizados, que utilizam apenas a informação de amplitude do sinal.

Com isso, esta tese possui, como contribuição à comunidade científica, a avaliação da potencialidade de utilização de imagens RADARSAT-2 para o mapeamento de uso e cobertura da terra em uma área da faixa de dutos RJ-BH sobre diferentes condições geomorfológicas.

Em um contexto mais amplo, esta pesquisa pretende identificar técnicas e produtos de sensoriamento remoto que possam contribuir para o mapeamento e monitoramento de faixas de dutos. Até o presente momento, ou que seja do conhecimento do autor, não há trabalhos relacionados diretamente a esta temática e, portanto, os resultados aqui encontrados serão de grande valia e aplicação para o setor de petróleo e gás.

### **1.1 – Estruturação do documento**

Este documento foi estruturado em nove capítulos, ou itens, e aborda, em seu primeiro item, a apresentação do problema definido para esta pesquisa e a contextualização do assunto, bem como as hipóteses que serão testadas e a contribuição desta tese. No segundo capítulo são apresentados os objetivos necessários para testar as hipóteses abordadas no item anterior e que também direcionam o trabalho.

No capítulo três são expostos os conceitos teóricos sobre a implantação de dutos terrestres, a técnica de sensoriamento e obtenção de imagens de radar,

além dos parâmetros de análise do sensor e dos alvos. O item quatro apresenta um detalhamento da localização da área de estudo e informações sobre a Geomorfologia, uso e cobertura da terra, temperatura e altimetria.

Os materiais e a sequência de etapas de trabalho realizadas nesta pesquisa são detalhados e apresentados no capítulo cinco. No capítulo seis são apresentados os resultados encontrados e as discussões resultantes da aplicação dos métodos expostos anteriormente. O capítulo sete apresenta as conclusões a que se chegaram nesta pesquisa e finalmente, o capítulo oito aponta as considerações finais e as recomendações para futuros trabalhos.

Todas as citações realizadas neste trabalho estão listadas no capítulo nove, referências bibliográficas.

## 2 – OBJETIVOS

Essa pesquisa possui como objetivo principal, avaliar as potencialidades dos dados polarimétricos do RADARSAT-2 para o mapeamento de uso e cobertura da terra em um trecho da faixa de dutos RJ - BH, localizado sobre diferentes condições geomorfológicas.

Dentre os objetivos específicos destacam-se:

- Analisar o comportamento das classes de uso e cobertura da terra de acordo com o plano  $H/\alpha$  gerado a partir da decomposição de Cloude-Pottier;
- Analisar o comportamento das classes de uso e cobertura da terra de acordo com a decomposição de Freeman-Durden, baseada nos mecanismos de espalhamento dos alvos;
- Avaliar a influência da aplicação de filtro polarimétrico nos resultados das classificações e decomposições;
- Analisar a capacidade dos diferentes classificadores na discriminação das classes de uso e cobertura da terra sobre diferentes condições geomorfológicas;
- Avaliar a contribuição dos dados polarimétricos para a identificação das classes de uso e cobertura da terra.

### **3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo são descritos o processo de implantação de dutos terrestres, técnicas de sensoriamento remoto específicas para sistemas de radar, a teoria física para compreender os dados polarizados e polarimétricos, e técnicas de processamento digital de imagens aplicados aos dados RADARSAT-2.

#### **3.1 – Implantação de dutos terrestres**

O petróleo é um líquido oleoso com variação de cor e textura que resulta da matéria orgânica soterrada e oxidada durante milhões de anos (TAIOLI, 2001). Variações nas características físico-químicas dos hidrocarbonetos e dos reservatórios de petróleo determinam os métodos de extração, armazenamento e transporte para centros de refinamento e distribuição dos seus diferentes derivados aos consumidores finais.

O duto, ou oleoduto, é o nome dado às tubulações instaladas para transporte de grandes quantidades de petróleo e seus derivados (CARDOSO, 2004). Atualmente existem mais de 350 dutos e terminais (áreas de distribuição) instalados no país com autorização para transporte e transferência de derivados de petróleo (ANP, 2009).

Desde 1912, quando o transporte de petróleo em massa se estabeleceu comercialmente, a utilização de latas, tambores e precárias tubulações sofreu significativa mudança. Atualmente existe uma logística bastante moderna e elaborada para o transporte e distribuição deste material (CARDOSO, 2004; SINDICOM, 2010a).

A Figura 1 apresenta a localização das bases de distribuição de petróleo e derivados espalhados pelo país. As bases primárias recebem os produtos diretamente de uma refinaria ou de centros de importação direta do exterior, não passando por nenhuma outra base. Já as bases secundárias recebem o produto de uma base primária ou secundária (CARDOSO, 2004).

No Brasil, 60% do transporte de cargas incluindo petróleo e seus derivados, é rodoviário, seguido pelo ferroviário e o aquaviário. Apesar do transporte dutoviário não ultrapassar os 4% do total transportado (GEIPOT, 2001), existe uma demanda

crecente de melhoria e implantação de uma maior rede de dutos (OLIVEIRA, 2008), o que justifica e torna este estudo bastante pertinente.

Figura 1 - Bases de distribuição de petróleo e derivados.



Fonte: SINDICOM (2010a).

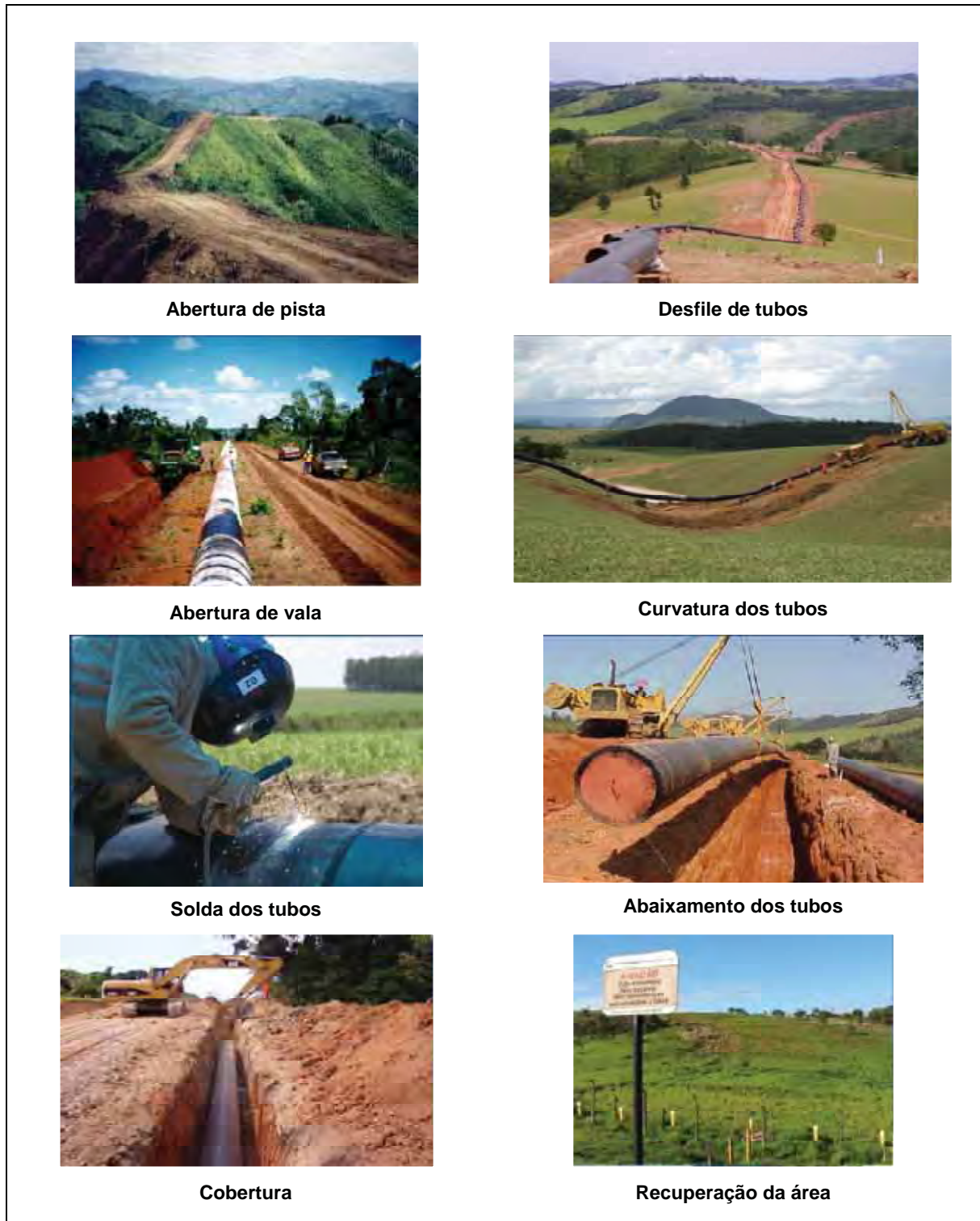
Para a implantação de um duto são necessárias informações fornecidas por bases cartográficas, imagens de satélite, bases de dados estaduais (estradas, drenagem, municípios envolvidos) e municipais (áreas preservadas, cadastros rural e urbano). Também são necessárias informações sobre a cobertura vegetal, unidades de conservação bem como todo um estudo do meio físico a partir de mapas e dados de altimetria, os quais, aliados a informações coletadas em campo, permitem estabelecer alternativas de traçados que aperfeiçoem o transporte do petróleo e seus derivados (PEREIRA JÚNIOR et. al., 2007; MERCANTE et. al., 2005; OLIVEIRA et. al., 2005).

Uma vez definido o traçado do duto, o seu processo de implantação na superfície terrestre compreende as etapas de abertura de pista, desfile dos tubos,



abertura de vala, curvamento dos tubos, solda, abaixamento, cobertura e recomposição da área (OLIVEIRA, 2008). Estes processos podem ser visualizados na Figura 2.

Figura 2 - Etapas para implantação de dutos terrestres



Fonte: OLIVEIRA (2008).

A abertura de pista é realizada ao longo da faixa onde será implantado o duto, a qual é feita com largura mínima de 20 metros para passagem de maquinário, equipamentos e pessoas. Após aberta a vala, os tubos são curvados, dependendo do relevo sobre o qual serão depositados, e soldados. Após testes quanto à integridade e eficiência da solda, os tubos são cobertos e a área é recomposta, com a plantação de gramíneas, e devidamente sinalizada ao longo de todo o trecho da faixa. Todos os projetos atuais de implantação dos dutos englobam a etapa de cobertura, sendo que apenas em projetos antigos os dutos ainda apresentam-se expostos sob a superfície.

Nestas áreas, onde estão implantados os dutos, é permitida a utilização com atividades de baixo impacto, ou seja, estão descartadas construções de edificações bem como mecanização agrícola intensa. O trânsito ao longo da faixa é permitido, mas também monitorado por técnicos especializados.

Os impactos sociais e ambientais eventualmente gerados pelo transporte do petróleo ou seus derivados do centro produtor para o centro consumidor estão atrelados aos riscos de derramamento devido ao desgaste dos dutos ou fatores externos. Derramamentos de petróleo em terra podem afetar os ambientes, fauna e comunidades próximas às faixas de dutos, principalmente àquelas próximas ao evento. Uma das alternativas para minimizar estes impactos é a implantação de regras e protocolos que considerem a legislação e que possa determinar técnicas de monitoramento de dutos eficientes para evitar grandes desastres naturais e sociais (O'ROURKE e CONNOLLY, 2003).

As pesquisas relacionadas ao monitoramento das faixas de dutos podem contribuir para melhores condições durante a instalação de novos dutos, em diferentes situações de pressão antrópica ou ambiental.

Para esta pesquisa foi selecionado uma trecho da faixa de dutos Rio de Janeiro – Belo Horizonte que se destina à transferência de nafta, óleo diesel, gasolina e LCI (óleo leve de reciclo, utilizado para diluição do óleo combustível) produzidos na REGAP – Refinaria Gabriel Passos para tancagem no Terminal de Campos Elíseos (TECAM), ou diretamente para a REDUC – Refinaria Duque de Caxias. Esta faixa é compartilhada pelos oleodutos ORBEL I e II e gasodutos GASPAL e GASBEL. O trecho selecionado para esta pesquisa possui uma extensão de 23 quilômetros e cruza os municípios de Duque de Caxias e Nova Iguaçu.

Apesar de, durante a instalação do duto, ser definida uma faixa de 20 metros para as atividades de implantação, também são consideradas as áreas de interferência direta, que varia entre 400 metros a 1 km para cada lado da faixa, e a área de interferência indireta, de 1 km a 5 km (Figura 3). Estas áreas variam e estão sujeitas a monitoramento contínuo depois de instalado o duto.

Figura 3 – Localização da faixa de dutos RJ-BH. AID: área de interferência direta e AII Área de interferência indireta.



A faixa de dutos RJ-BH, exibido na Figura 3, atravessa 18 municípios no Estado de Minas Gerais e 6 municípios no Estado do Rio de Janeiro, totalizando 24 municípios. A passagem por diferentes municípios, com diferentes aptidões

econômicas, configura diferentes tipos de pressão sobre o duto (mecanização agrícola, ocupação antrópica, abertura de vias de acesso, por exemplo).

Além disso, dados do SIDICOM (2010) apontaram aumento no consumo de gasolina e óleo diesel, o que deve provocar uma demanda maior para os dutos que transportam tais combustíveis, como é o caso do RJ-BH. Tais fatores tornam o acompanhamento temporal das mudanças ocorridas nestas faixas, necessário e os produtos de sensoriamento remoto aliados às técnicas de processamento digital de imagens podem contribuir nesta fase.

### **3.2 – Sensoriamento Remoto**

A técnica de sensoriamento remoto permite a obtenção de informações sobre a superfície terrestre baseada no registro da energia eletromagnética emitida ou refletida pelo alvo que pode ser captada por sensores que atuam em diferentes faixas do espectro eletromagnético. Estes sensores podem estar a bordo de diferentes plataformas, como satélites ou aeronaves, e geram diferentes produtos que podem constituir perfis ou imagens compostas da combinação das respostas dos alvos aos sensores (LILLESAND e KIEFER, 1994; NOVO, 1992).

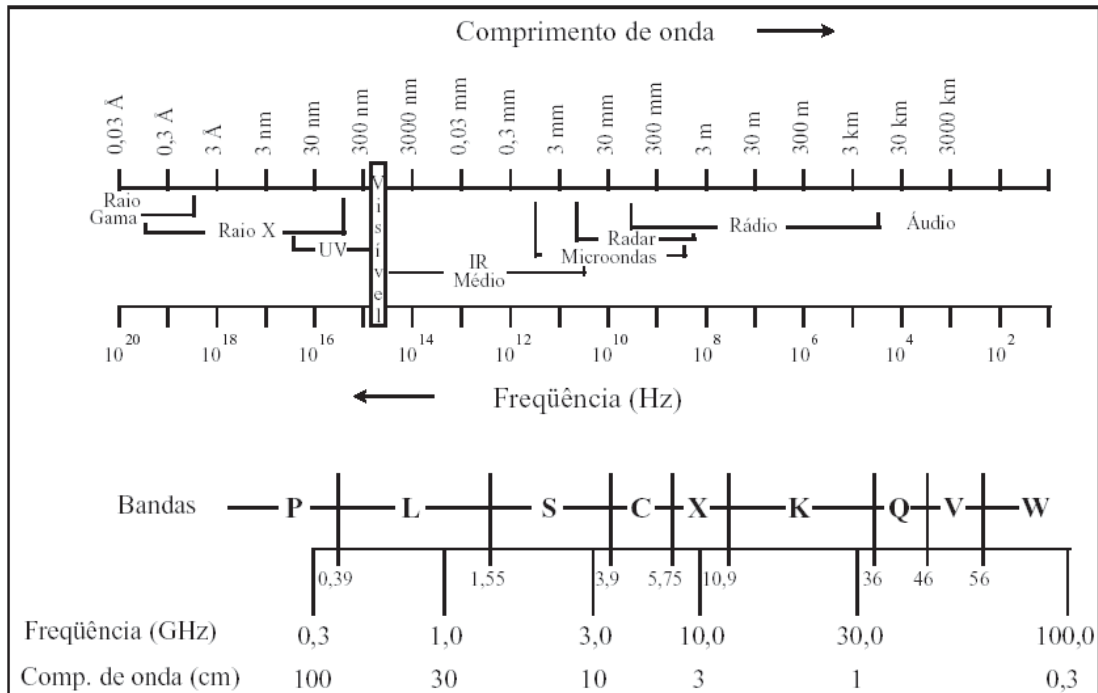
Os sensores que produzem as imagens de sensoriamento remoto possuem muitas divisões e classificações (MOREIRA, 2001; LIU, 2006). A mais relevante para este estudo é a divisão dos sistemas quanto à faixa de abrangência no espectro eletromagnético. Os sensores que operam na faixa de micro-ondas são conhecidos como radares, cuja principal característica é que são dotados de energia eletromagnética própria a qual independe da iluminação do alvo pelo Sol e, em geral, não sofre influência das condições atmosféricas. O acrônimo RADAR se refere ao termo em inglês “*R*Adio *D*etection *A*nd *R*anging” (Detecção e localização por meio de ondas de rádio).

Sendo assim, dentre as vantagens desses sensores estão a versatilidade de imageamento mesmo em condições atmosféricas adversas; a visada lateral que permite realçar a topografia; o alto poder de penetração no dossel das árvores e a fonte própria de energia, que independe de iluminação solar.

A faixa de atuação dos sensores de micro-ondas varia de 0.3mm a mais de 1 metro em comprimento de onda e de  $3 \cdot 10^{11}$  a  $3 \cdot 10^8$  Hz em frequência. A Figura 4 ilustra uma designação arbitrária das bandas de radar existentes para diferentes

sensores, as quais foram classificadas por letras indicando um maior ou menor poder de penetração.

Figura 4 - Espectro eletromagnético e bandas da região de micro-ondas.



Fonte: Adaptado de DALLEMAND et. al. (1993).

As bandas mais comumente utilizadas em radares imageadores, segundo CSA (1999), CCRS (2001), DLR (2008), ESA (2007a,b), ASI (2008) e JAXA (2006) são:

Banda X – compreende uma faixa de comprimento de onda de 2,4 a 3,8 cm e está presente em sensores como TerraSAR-X, da Agência Espacial Alemã, e o COSMO SkyMed, da Agência Espacial Italiana.

Banda C – compreende uma faixa de comprimento de onda de 3,8 a 7,5 cm, empregada em sensores orbitais tradicionais como o ERS-1, ERS-2 e o ENVISAT/ASAR desenvolvido pela Agência Espacial Européia e o RADARSAT-1 e 2, da Agência Espacial Canadense.

Banda S – compreende uma faixa de comprimento de onda de 7,5 a 15 cm e foi empregada no satélite russo ALMAZ, na década de 90. Atualmente não existem sensores orbitais operando nesta faixa.

Banda L – compreende uma faixa de comprimento de onda de 15 a 30 cm e foi empregada no sensor SAR a bordo do SEASAT, o primeiro satélite de micro-

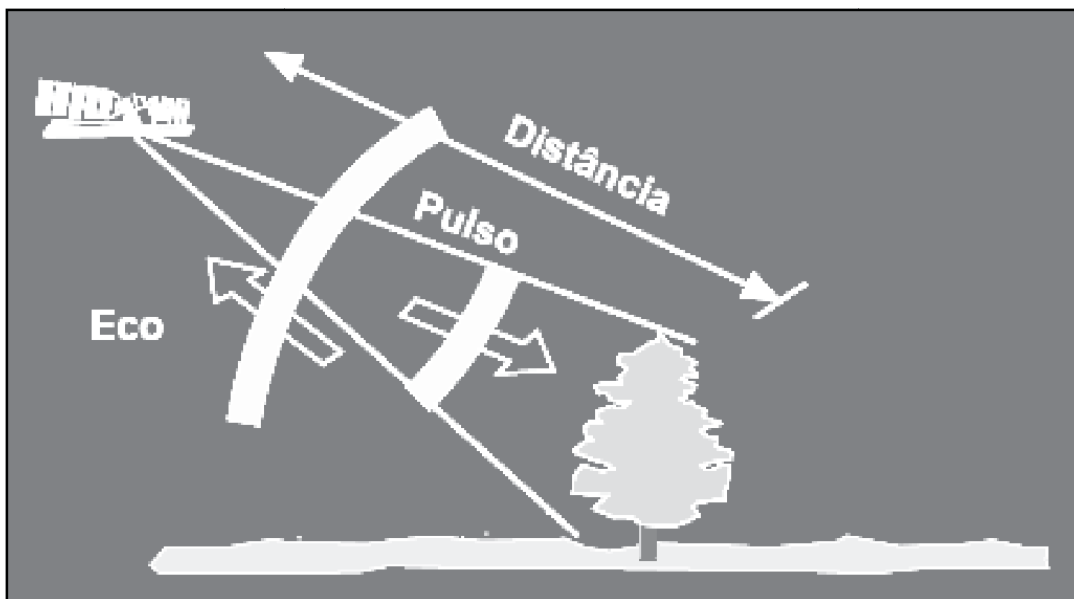
ondas desenvolvido pela NASA para mapear os oceanos, e posteriormente nos sensor SAR a bordo do JERS-1, substituído em 2006 pelo ALOS/Palsar, desenvolvido pela Agência Espacial Japonesa (JAXA).

Banda P – compreende uma faixa de comprimento de onda de 75 a 133 cm e é empregada comumente em sensores aerotransportados (AIRSAR, da Agência Espacial Alemã e os radares InSAR da ORBISAT, empresa privada brasileira).

### 3.2.1 – Características dos sistemas de radar

Os sistemas de radar possuem três funções primárias: 1) transmitir sinais de micro-ondas (rádio) em direção a uma cena; 2) receber parte da energia transmitida que é retroespalhada pela cena e; 3) registrar a intensidade e a defasagem dos sinais de retorno (CCRS, 2001). Esta interação das micro-ondas com o alvo está ilustrada na Figura 5.

Figura 5 - Interação do pulso e eco do radar com a superfície.



Fonte: GLOBESAR (2001).

Os sensores de radar produzem a sua própria fonte de energia, emitem o pulso em direção ao alvo e captam a resposta (eco), registrando assim a informação. Os sistemas de radar podem ser divididos em imageadores e não-imageadores. Dentre os não-imageadores destacam-se os escaterômetros, espectrômetros e altímetros. Os imageadores correspondem aos radares de visada lateral de abertura

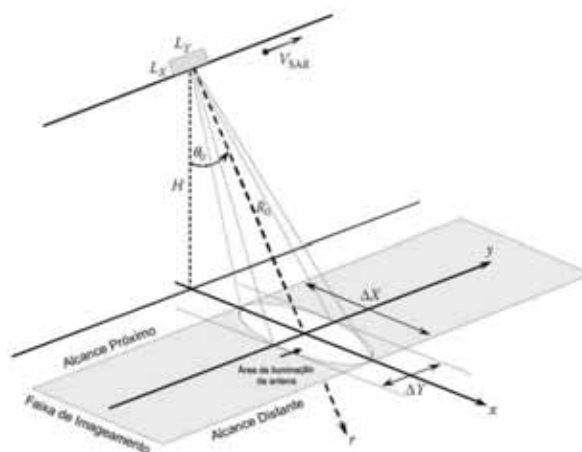
real (RAR – *Real Aperture Radar* e SLAR – *Side Looking Airborne Radar*) e os radares de visada lateral de abertura sintética (SAR – *Synthetic Aperture Radar*), ambos com início de desenvolvimento a partir da década de 50. Os sensores SAR, no entanto, correspondem ao avanço na tecnologia em relação aos sistemas RAR (CCRS, 1997; CCRS, 2001).

As imagens utilizadas nesta pesquisa são de um sistema SAR e, nesses sistemas, o processamento digital simula antenas virtuais de grande dimensão o que viabiliza a formação de imagens com alta resolução espacial. Por conta disso, imagens SAR possuem boa resolução espacial quando comparadas às imagens de outros sistemas de radar imageador.

A aquisição de informação é feita durante o deslocamento da plataforma, ao longo de sua trajetória sobre a superfície terrestre, a qual é iluminada perpendicularmente à direção de voo. Apesar de suas inúmeras vantagens, os sensores SAR possuem limitações inerentes à sua concepção, em especial no que se refere às distorções geométricas. A Figura 6 apresenta a geometria de aquisição de imagens SAR.

Considerando uma plataforma móvel (aeronave, satélite ou ônibus espacial) situada a uma altura  $H$  da superfície terrestre, e se movendo a uma velocidade  $V_{SAR}$ , a direção de voo é o azimute (eixo  $y$ ) e a direção ortogonal a ela (eixo  $x$ ) é a direção em alcance (*range*). A antena é posicionada perpendicular à direção do voo e o feixe de iluminação é direcionado à superfície da Terra que forma, com a normal à superfície, o ângulo de incidência  $\theta_0$  com relação ao alvo.

Figura 6 - Geometria de aquisição de imagens SAR



Fonte: Adaptada de LEE e POTTIER (2009).

Ao se deslocar o radar mapeia uma faixa a partir do eixo transversal, denominada *range* (alcance) que pode ser *ground range* (alcance no solo) ou *slant range*, “r” (alcance inclinado). O *range* pode estar próximo ao sensor, denominado *near range* (alcance próximo) ou mais afastado do sensor, chamado de *far range* (alcance distante).

Ainda observando a Figura 6, os parâmetros  $\Delta X$  e  $\Delta Y$  correspondem a variações na direção radial e azimutal, respectivamente. Além disso, o  $L_x$  e  $L_y$  correspondem às dimensões físicas da antena.

A forma fundamental de descrever a interação da onda eletromagnética com um determinado alvo é dada pela equação de radar (1) para um pulso (ULABY et al., 1986), para alvos pontuais:

$$P_r = \frac{P_t G_t(\theta, \phi)}{4\pi R_t^2} \sigma_{SC} \frac{A_{ER}(\theta, \phi)}{4\pi R_r^2} \quad (1)$$

Onde:  $P_R$  é a potência recebida pelo sensor,  $P_T$  é a potência transmitida pelo sensor,  $G_T$  é o ganho da antena na direção do alvo,  $A_{ER}$  é a abertura efetiva da antena transmissora,  $R_t$  é a distância do alvo à antena transmissora,  $R_r$  é a distância do alvo à antena receptora, os ângulos  $\theta$  e  $\Phi$  correspondem aos ângulos de azimute e elevação, respectivamente, e a seção cruzada de radar,  $\sigma_{SC}$ , determina o efeito do alvo de interesse no balanço de energia (LEE e POTTIER, 2009).

Para alvos extensos, no entanto, surge o termo coeficiente de espalhamento ou sigma zero ( $\sigma^0$ ) que representa a seção cruzada de radar ( $\sigma_{SC}$ ) por unidade de área projetada na superfície. Segundo LEE e POTTIER (2009), o coeficiente de espalhamento também representa a razão da densidade de potência espalhada média pela superfície de uma esfera de raio  $r$ , sendo um parâmetro adimensional que varia em função dos parâmetros do sensor e das propriedades dos alvos.

O coeficiente de espalhamento é a grandeza radiométrica que representa o retroespalhamento, entendido como o retorno do sinal registrado pelo sensor SAR. Segundo HENDERSON e LEWIS (1998), os principais parâmetros que condicionam o retroespalhamento são os relacionados ao sistema de radar (frequência, ângulo de incidência, azimute de visada, resolução espacial e polarização) e às propriedades



dos alvos (rugosidade da superfície, propriedades dielétricas e inclinação e orientação).

### **3.2.2 – Parâmetros relativos ao sistema de radar**

Nesta seção são descritos os parâmetros que determinam a configuração do sistema de radar, bem como os parâmetros que definem o processo de aquisição das imagens SAR.

#### **3.2.2.1 – Frequência**

A frequência é um dos principais parâmetros que podem afetar o conteúdo de informação de uma imagem SAR e está relacionada ao número de ciclos de passagem de uma onda por um ponto fixo, por unidade de tempo (CCRS, 1997). O comprimento de onda ( $\lambda$ ) e a frequência ( $f$ ) são grandezas inter-relacionadas através da velocidade da onda, a qual no caso das ondas eletromagnéticas é constante e igual à velocidade da luz ( $c$ ). Dessa forma tem-se (equação 2):

$$c = f \lambda \quad \text{ou} \quad \lambda = \frac{c}{f}, \quad (2)$$

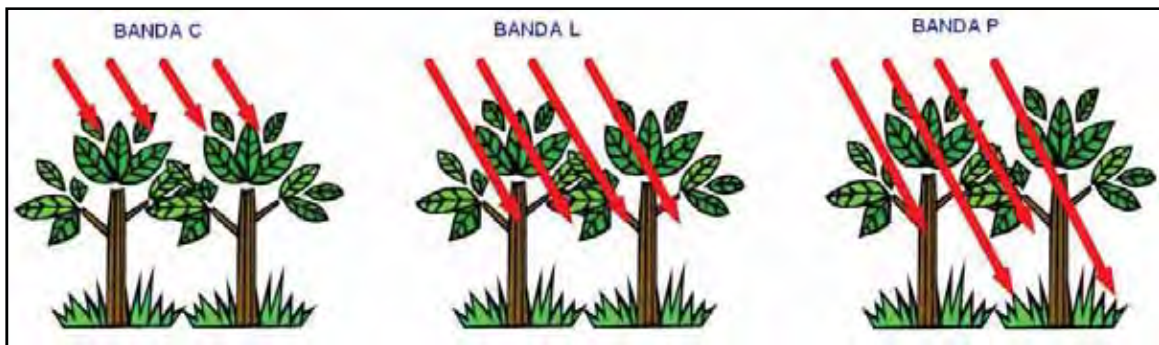
onde:  $f$  e  $\lambda$  são medidas no sistema internacional em Hz e cm, respectivamente.

A frequência é uma grandeza física inversamente proporcional ao comprimento de onda, ou seja, quanto maior o comprimento de onda, menor a frequência e vice-versa. Além disso, nas imagens de radar, quanto maior a frequência, maior a potência requerida para geração do sinal e menor a penetração da onda na superfície terrestre.

A penetração da onda eletromagnética no dossel florestal depende da frequência, do ângulo de incidência e da arquitetura e cobertura do dossel. Sensores que operam em banda X registram a interação da radiação com o topo do dossel, enquanto a radiação dos que operam na banda C interagem com o topo e o interior do dossel. Sensores que operam na banda L são capazes de fornecer medidas de interação do sinal com o interior do dossel e até da superfície do terreno, dependendo da estrutura florestal.

Para VAN DER SANDEN (1997), em superfícies com cobertura vegetal, quanto maior o comprimento de onda, maior a penetração no dossel desta vegetação. A Figura 7 apresenta de forma ilustrativa, a capacidade de penetração de acordo com as diferentes bandas operadas pelos sensores de radar.

Figura 7 - Interação dos diferentes comprimentos de onda com a vegetação.

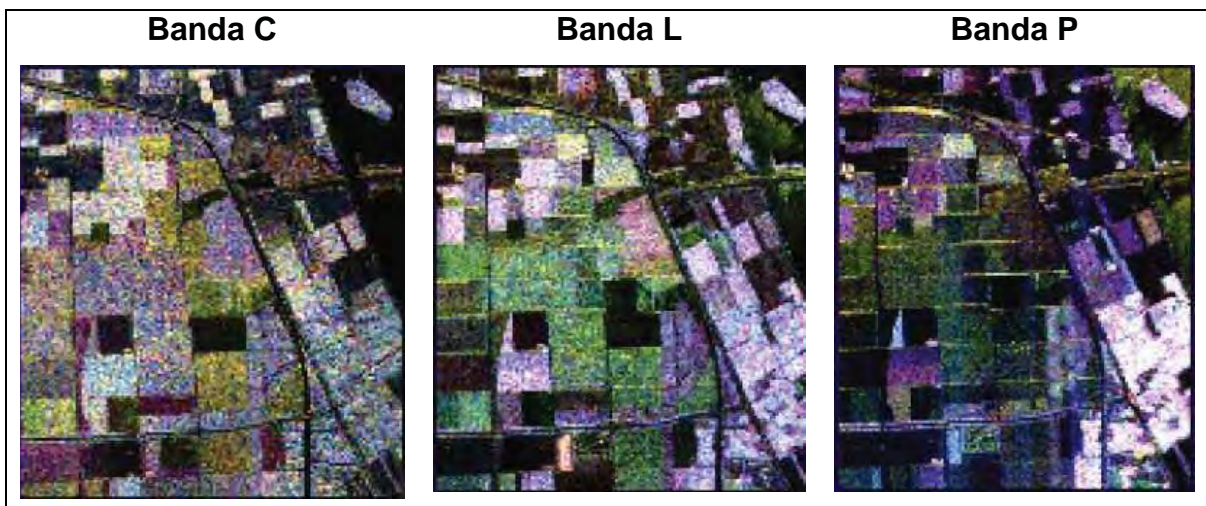


Fonte: SANT'ANNA et. al. (2007).

Partindo da premissa de que diferentes estruturas florestais podem permitir diferentes graus de penetração de acordo com a banda operada pelo sensor, é possível gerar intervalos de valores de espalhamento que diferenciam as tipologias florestais (KUPLICH, 2003).

A Figura 8 apresenta imagens SAR coletadas sob uma mesma área em diferentes comprimentos de onda e frequências. As imagens foram adquiridas em uma área agrícola na Holanda, sendo as composições coloridas geradas de acordo com as diferentes polarizações do sensor.

Figura 8 - Composições coloridas R-HH, G-HV e B-VV exemplificando a variação da frequência e a discriminação de alvos em área agrícola.



Fonte: GLOBESAR (2001).

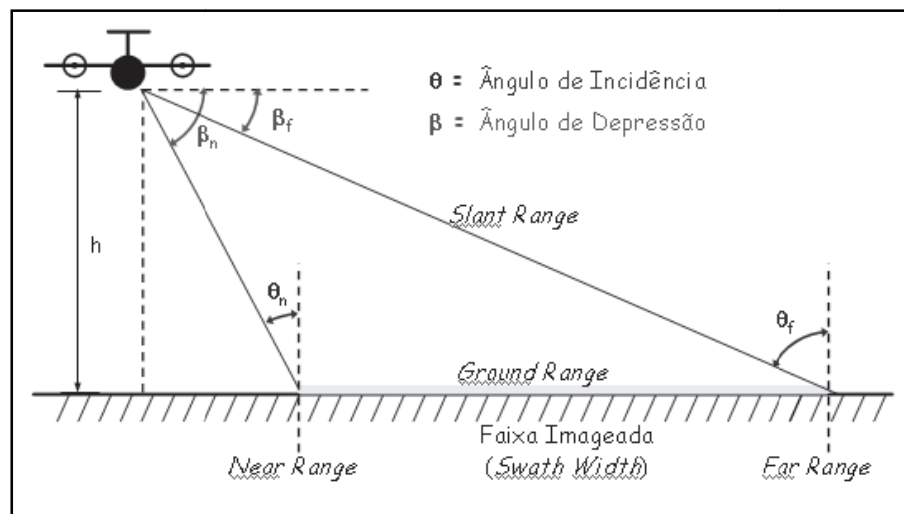
As regiões agrícolas observadas na Figura 8 permitem uma análise das variações de espalhamento fornecidas pelos alvos quando analisadas as diferentes frequências e comprimentos de onda. É possível discriminar tipos de cultura ou estágios de plantio e deste modo, adquirir dados com a banda que melhor se adequa ao foco do estudo.

Ao contrário do que acontece com os sensores ópticos, que possuem diferentes bandas, os radares imageadores orbitais, por questões operacionais, atuam em apenas uma faixa do espectro. Assim, um mesmo SAR não pode operar na banda L e P ao mesmo tempo; para tal seriam necessários dois sensores distintos. Apesar desta limitação de uma única banda, os novos sensores SAR possibilitam diferentes polarizações numa mesma frequência de sinal, o que permite a construção de composições coloridas como as da Figura 8 onde cada polarização traz informações específicas distintas dos alvos, permitindo sua interpretação e classificação em categorias de interesse.

### 3.2.2.2 – Ângulo de Incidência

A intensidade da radiação refletida depende, dentre outros fatores, do ângulo de incidência que é o ângulo formado entre o feixe do sinal emitido pelo radar e a reta normal à superfície refletora (HENDERSON e LEWIS, 1998; SANT'ANNA et. al., 2007), conforme Figura 9.

Figura 9 - Geometria de aquisição de imagem de radar com os ângulos de incidência e depressão representados, de acordo com o near range ( $\beta_n$  e  $\theta_n$ ) e far range ( $\beta_f$  e  $\theta_f$ ).



Fonte: SANT'ANNA et. al (2007).

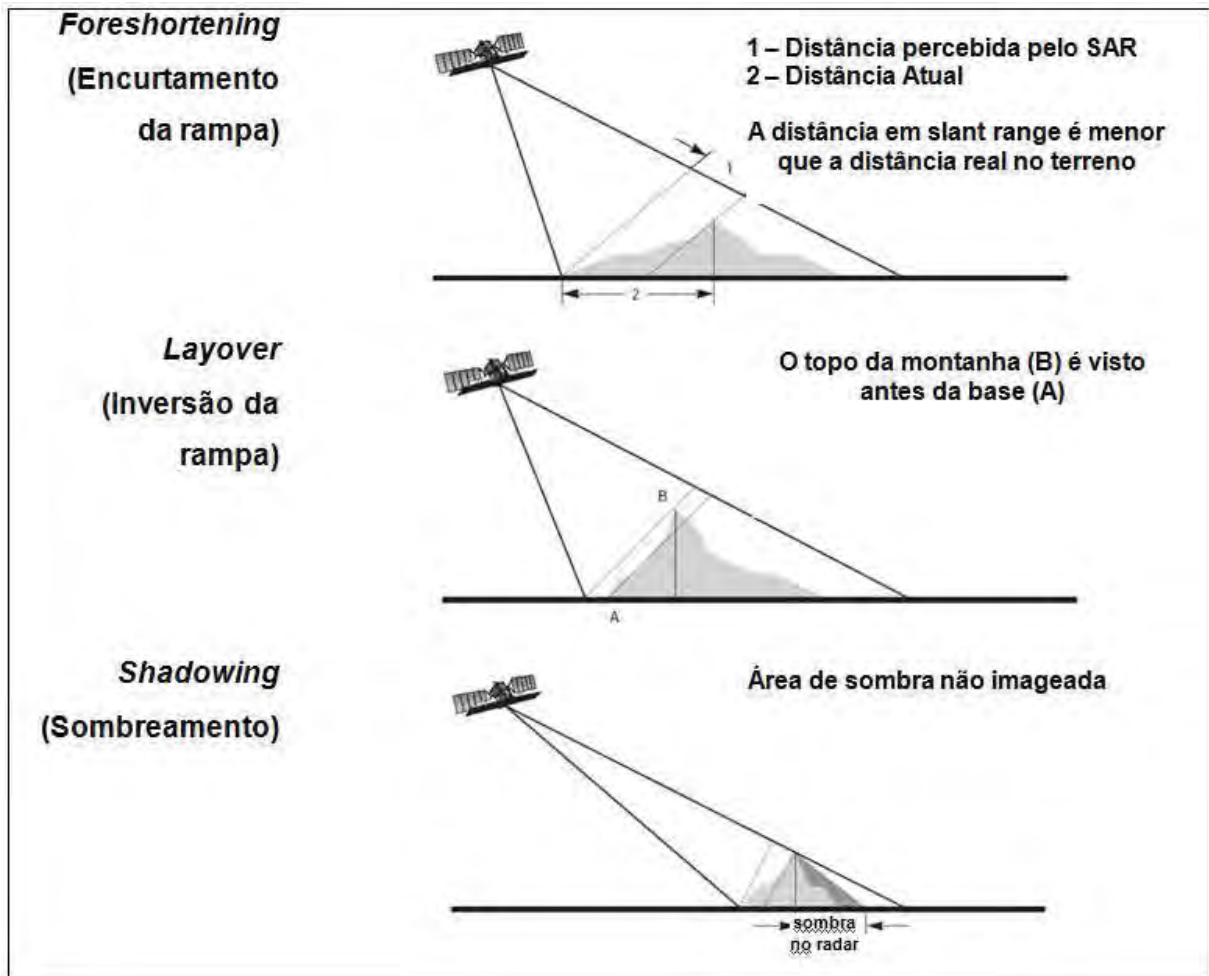
A variação no ângulo de incidência local pode gerar diferentes resultados na resposta do radar, resultando em imagens SAR cujas classificações são distintas do ponto de vista estatístico.

WEYDAHL (2002) utilizou imagens de alvos de área urbana e examinou os diferentes sinais de resposta de acordo com as variações dos ângulos de incidência, tendo como parâmetro constante apenas a área geográfica. Neste estudo percebeu-se que imagens SAR adquiridas com grande variação de ângulos de incidência complementam a informação de alvos de difícil separação e fornece registro do número de objetos presentes na área, produzidos pelo homem. Este tipo de análise necessita de controle das condições de imageamento para posterior comparação das imagens e tomada de decisão sobre a melhor configuração de imageamento que maximize a diferenciação os alvos.

Ao se trabalhar com variação no ângulo de incidência para classificar extensas áreas ou identificar um único objeto, deve-se avaliar a disponibilidade de aquisição de uma grande quantidade de cenas possibilitando diversos testes. Isto porque a variação no ângulo de incidência pode provocar distorções geométricas relacionadas aos deslocamentos topográficos, consideradas as de mais difícil solução, além das distorções relativas ao processo de aquisição das imagens.

As distorções geométricas por topografia mais comuns são inversão (*layover*), encurtamento (*foreshortening*) e sombreamento (Figura 10).

Figura 10 - Distorções de encurtamento, inversão e sombreamento.



Fonte: RADARSAT (2007).

O encurtamento de rampa (*foreshortening*) ocorre quando o feixe de radar atinge a base de um alvo alto, como por exemplo um morro, antes de atingir o topo, provocando na imagem uma aparência de compressão das feições topográficas da cena. O deslocamento horizontal, resultante do uso de ângulos de incidência pequenos, causa o encurtamento da rampa de encostas voltadas para o radar e pode chegar ao máximo quando a inclinação de uma encosta íngreme é ortogonal ao feixe de radar (CCRS, 1997; SANT'ANNA et. al.,2007).

Em alguns casos, o aumento do ângulo de incidência pode reduzir o encurtamento, mas o sombreamento poderá ser mais evidente. Ou seja, na escolha do ângulo de incidência há sempre uma compensação entre a ocorrência do encurtamento e de sombreamento na imagem (CCRS, 1997). PARADELLA et. al. (2003) ressalta que, em terrenos montanhosos, quanto menor for o ângulo de

incidência da iluminação de radar, o que representaria uma observação mais verticalizada, maiores serão os efeitos do encurtamento e inversão do relevo.

Quando as posições dos topos de montes íngremes ou picos aparecem na imagem como se estivessem mais próximos ao sensor do que suas bases, significa que houve o efeito de inversão da rampa (*layover*). Esta distorção é comum em imagens de terrenos montanhosos adquiridas sob ângulos de incidência baixos. Assim, os *pixels* dos picos/topos de montanhas se sobrepõem aos *pixels* da base, ou seja a imagem mostra a base do relevo invertida em relação ao topo mais alto, provocando uma distorção de inversão do relevo (CCRS, 1997; ULABY et. al., 1986).

Geralmente a inversão é mais comum em imagens com pequenos ângulos de incidência. O encurtamento e a inversão se relacionam da seguinte forma (CCRS, 1997):

- Se a declividade da encosta mapeada pelo radar for inferior ao ângulo de incidência, ocorrerá encurtamento;
- Se os dois ângulos forem iguais, haverá coincidência no posicionamento da feição do relevo e o encurtamento atingirá o seu máximo;
- Se o ângulo da encosta for superior ao ângulo de incidência, ocorrerá a inversão.

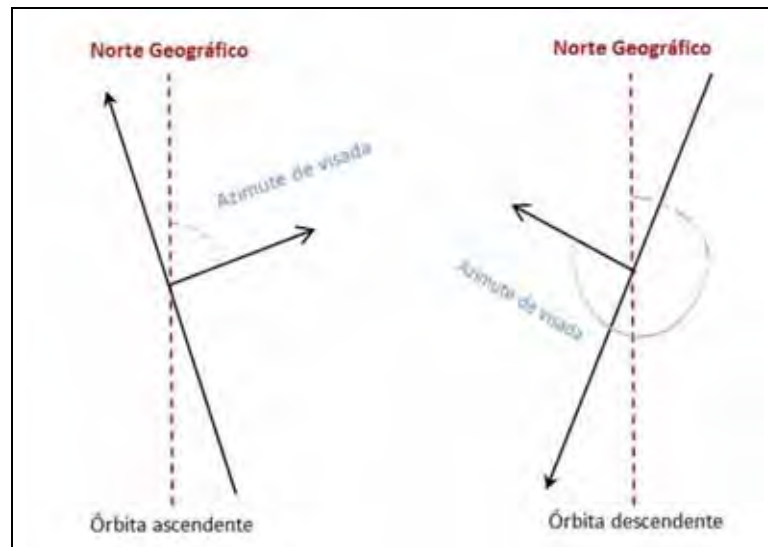
As áreas de sombreamento indicam perda de informação e são mais severas quando grandes ângulos de incidência são adotados em áreas de alto relevo. Dessa forma, as sombras de alvos numa imagem SAR indicam que a área não foi iluminada pelo radar, ou seja, não recebeu sinal emitido pelo radar e, portanto não o refletiu ao sensor, mas estas áreas podem ser úteis na interpretação de alvos do terreno (CCRS, 1997), principalmente quando de posse de informações complementares como um modelo digital do terreno.

Estas distorções podem ser minimizadas com a correção geométrica que inclui a transformação do alcance inclinado para alcance no terreno, registro e correções do ângulo de incidência local. A técnica de ortoretificação, considerada uma correção geométrica rigorosa, tem sido utilizada para este fim e será descrita no item 3.4.2.

### 3.2.2.3 – Azimute de visada

O azimute de visada (Figura 11) indica o ângulo entre o norte geográfico e a direção de apontamento do feixe de iluminação do sensor em sentido horário (GLOBESAR, 2001).

Figura 11 - Direção da órbita e variação no azimute de visada



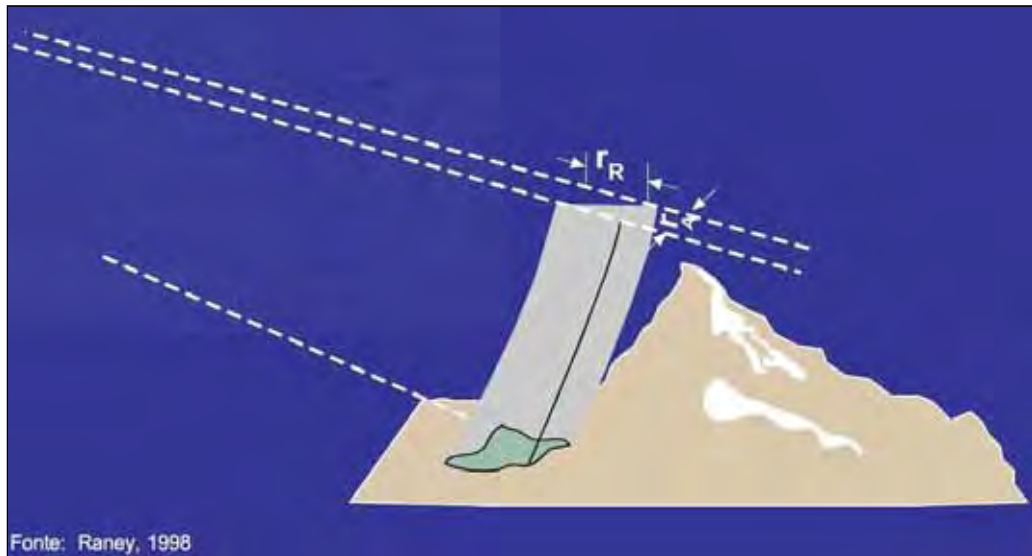
Alvos com forma linear e orientação perpendicular à direção de imageamento apresentam maior retroespalhamento, e alvos ou feições lineares com orientação paralela apresentam atenuação da resposta retroespalhada.

Como os alvos possuem uma orientação preferencial, este parâmetro auxilia para a aquisição das imagens, quando analisado em conjunto com a direção de órbita, se ascendente ou descendente. Os valores destes ângulos dependem da configuração do sistema sensor e, por isso, maiores detalhes serão descritos no item destinado ao Sistema RADARSAT.

### 3.2.2.4 – Resolução

A resolução define a distância necessária entre dois alvos para que possam ser diferenciados em suas características (HENDERSON e LEWIS, 1998). A resolução do radar é definida em duas direções: paralela e perpendicular à linha de voo (Figura 12). A perpendicular é chamada de resolução em alcance (*range*) e a resolução paralela é conhecida como resolução em azimute.

Figura 12 - Célula de resolução em azimute e em range.



Fonte: RANEY (1998) apud GLOBESAR (2001).

A resolução em *range* de um sistema SAR é uma característica da imagem, determinada pela largura da banda do sistema radar ou pelo comprimento efetivo do pulso. É dependente do comprimento do pulso processado, uma vez que pulsos mais curtos resultam em uma resolução maior.

A resolução em azimute é uma resolução característica da dimensão azimutal e limitada pela largura da banda Doppler do sistema. Em um radar de abertura real (RAR), a resolução em azimute é dada pela largura do feixe azimutal enquanto o radar de abertura sintética (SAR) utiliza o processamento de sinais para obter uma resolução em azimute menor que o comprimento da antena (Figura 13).

Figura 13 - Diferença entre resolução em azimute SAR e RAR.



Fonte: GLOBESAR (2001).



Não se deve confundir a resolução de um sensor SAR com espaçamento de *pixel* sendo este decorrente de amostragem efetuada pelo processador de imagem SAR (CCRS, 1997).

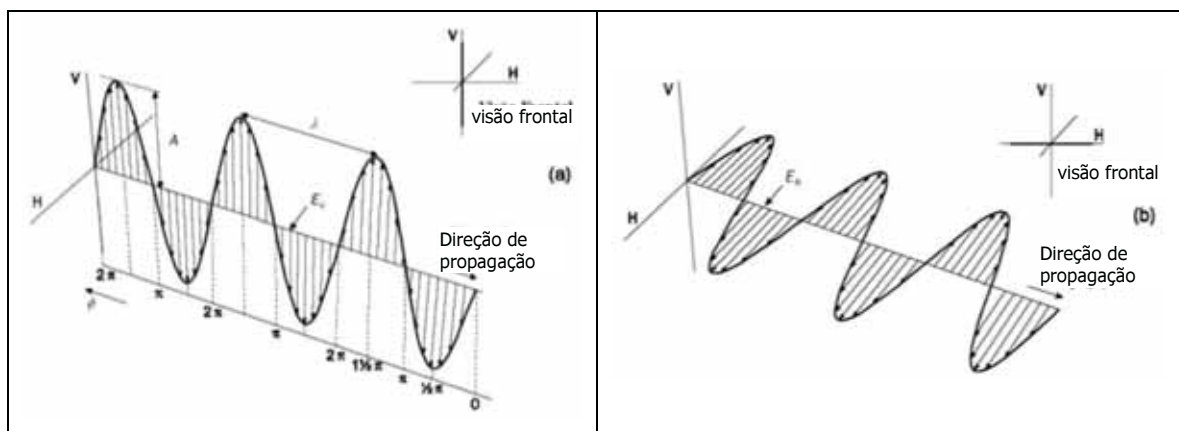
### 3.2.2.5 – Polarização

Uma onda eletromagnética possui atributos físicos que descrevem seu movimento. Estas propriedades são o comprimento da onda, amplitude, fase, frequência, direção de propagação e polarização. No caso das micro-ondas, a maioria dos fenômenos é mais bem descrita quando utilizamos a teoria de ondas (WOODHOUSE, 2006; MOTT, 2007).

A polarização de uma onda eletromagnética descreve a orientação do vetor resultante dos vetores campo elétrico e campo magnético. Por convenção, utiliza-se o vetor campo elétrico para descrever o estado de polarização de uma onda eletromagnética (WOODHOUSE, 2006; ULABY e ELACHI, 1990).

A amplitude, conforme apresentado na Figura 14, corresponde ao desvio máximo em altura da onda, sendo um indicador direto da intensidade do sinal ( $I=A^2$  onde  $I$  é a intensidade e  $A$ , a amplitude). A informação da fase indica a posição de vibração da onda no senóide, de acordo com o modelo de descrição de trajetória do sinal, para um dado tempo e variando de  $0$  a  $2\pi$ .

Figura 14 - Representação dos atributos de uma onda eletromagnética. (a) onda com polarização vertical e (b) onda com polarização horizontal.  $E_v$ : vetor campo elétrico vertical;  $E_h$ : vetor campo magnético horizontal,  $\lambda$ : comprimento de onda,  $A$ : amplitude,  $\Phi$ : fase.



Fonte: Adaptado de VAN DER SANDEN (1997).

Se a figura geométrica descrita pela ponta do vetor resultante dos vetores campo elétrico e campo magnético for uma elipse, a polarização é elíptica, se for um círculo, a polarização é circular e se for uma linha, linear. As polarizações elíptica e circular podem ser para a direita ou para a esquerda. Já a polarização linear pode ser horizontal (H) ou vertical (V) e é a orientação frequentemente utilizada para sistemas SAR. A antena do radar recebe a energia retroespalhada em polarização horizontal ou vertical e podem existir quatro combinações de polarizações transmitidas e recebidas:

HH – para transmissão e recepção horizontal

HV – para transmissão horizontal e recepção vertical

VH – para transmissão vertical e recepção horizontal

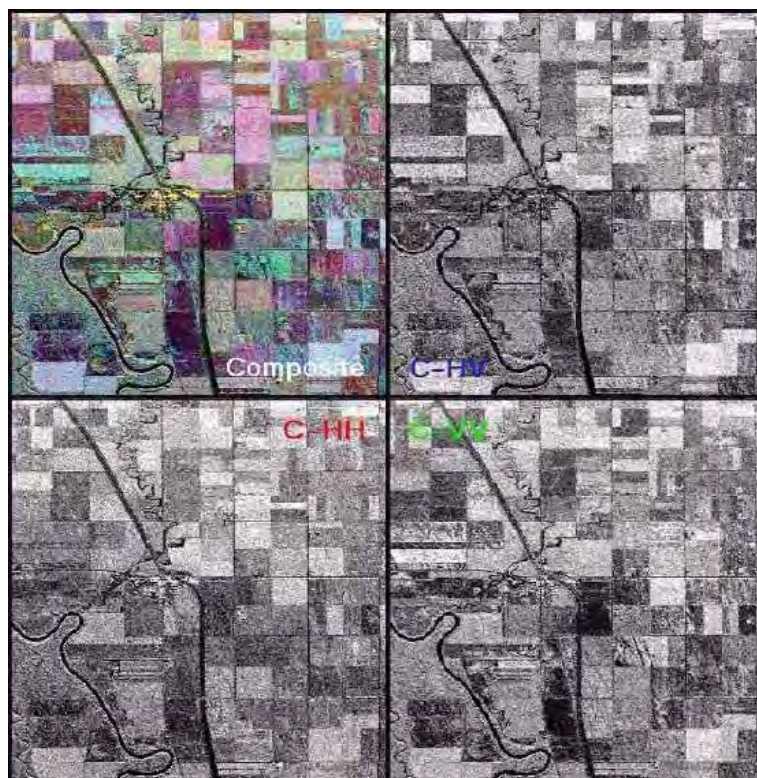
VV – para transmissão e recepção vertical

Os sistemas que utilizam polarização linear podem ser co-polarizados (HH e VV), quando transmitem e recebem na mesma polarização; ou podem ser ainda de polarização cruzada (HV e VH), quando transmitem em uma polarização (V ou H) e recebem na outra polarização (H ou V). Neste trabalho, as imagens utilizadas apresentam polarização linear com as quatro combinações de polarização (HH – HV – VH – VV).

As polarizações ajudam a distinguir a estrutura física dos alvos pela forma com a qual a energia é espalhada ou refletida. Uma parte desta energia retorna na direção da antena do radar e convencionou-se chamar essa energia refletida de retroespalhamento. As variações de tonalidade de uma imagem de radar, dadas pelos níveis de cinza, resultam das diferenças da energia retroespalhada pelos alvos no terreno (HENDERSON e LEWIS, 1998).

A Figura 15 ilustra a variação de informação sobre uma mesma região, de acordo com as polarizações emitidas e recebidas em uma área agrícola.

Figura 15 - Variação de polarização em imagem RADARSAT-1, banda C e composição colorida resultante.



Fonte: GLOBESAR (2001).

As três polarizações observadas na Figura 12 são sensíveis às diferenças no tipo de cultura em cada talhão. Cada polarização fornece informações únicas sobre o alvo, assim a composição colorida de imagens SAR em diferentes polarizações permite separar diferentes tipos ou estágios de culturas agrícolas.

O diferencial das imagens multipolarizadas está no fato de que a quantidade de informação existente apresenta forte influência na capacidade de discriminar e delimitar alvos da superfície terrestre. A polarização HH é mais sensível na identificação de objetos dispostos na superfície de forma horizontal enquanto a polarização VV discrimina melhor os objetos dispostos de forma vertical. As polarizações cruzadas (HV e VH) costumam ser mais ruidosas quando comparadas às co-polarizações (HH e VV).

De qualquer forma, a resposta em cada uma das quatro polarizações depende da geometria de visada do radar, da geometria de iluminação, das propriedades dos alvos e da interação da onda eletromagnética com os mesmos.

Estudos indicam que imagens co-polarizadas podem ser utilizadas para diferenciar tipologias florestais, e até mesmo distinguir estágios de regeneração

(DOBSON, 2000; SAATCHI et. al., 1997). Isto se deve ao fato de que as polarizações HH e VV estão mais relacionadas à rugosidade da superfície. Os dados de polarização cruzada (HV e VH) apresentam um grande potencial para detecção de desmatamentos, áreas queimadas e vegetação secundária (ALMEIDA FILHO et. al., 2005; ALMEIDA FILHO et. al., 2007).

Os sistemas de radar SAR operam normalmente com uma única polarização, geralmente HH ou VV, por uma questão de economia. Já os sistemas voltados às pesquisas tendem a apresentar polarizações múltiplas (HH, HV, VH, VV) também conhecidas como polarização quádrupla, ou quad-pol (GLOBESAR, 2001). Quanto maior o número de polarizações disponíveis no sistema de radar, maior a possibilidade de complementar a informação para a interpretação das propriedades e comportamento dos alvos.

Quando um sistema de radar produz dados em diferentes polarizações, são considerados multipolarizados e o termo “polarimétrico” se dá quando estes mesmos sistemas fornecem dados com informação de amplitude e fase das ondas eletromagnéticas.

Devido a essas variações, podem-se encontrar imagens polarizadas (com diferentes polarizações em amplitude, magnitude, intensidade e potência do sinal) e polarimétricas (diferentes polarizações e informações de fase do sinal). Neste trabalho foram utilizados tanto os dados multipolarizados (em amplitude e intensidade) quanto os multipolarimétricos (com informações de fase).

A polarimetria é a ciência que utiliza as medidas da matriz de dispersão de polarização de espalhamento para inferir propriedades físicas da superfície terrestres (CCRS, 1997). Maiores detalhes sobre a representação de dados polarimétricos serão apresentados no item 3.3.

### **3.2.3 – Parâmetros relativos ao alvo**

São parâmetros que variam de acordo com os tipos de alvos e características intrínsecas que os diferenciam ou caracterizam. Neste trabalho, destacamos a rugosidade da superfície, intimamente relacionada à geometria da superfície, e as propriedades dielétricas.

### 3.2.3.1 – Rugosidade da superfície

Um dos atributos mais importantes do alvo e que influenciam diretamente no retroespalhamento é a rugosidade superficial registrada em imagens SAR.

Segundo DIERKING (1999), a superfície pode ser separada em diferentes regimes de rugosidade: microtopografia, topografia de grande escala (macropografia) e uma escala intermediária, encontrada entre estes dois regimes. Segundo LEWIS e HENDERSON (1998), a macropografia está relacionada às grandes variações em estruturas como montanhas, vales, encostas, que são responsáveis pelos grandes efeitos de distorções na imagem. A microtopografia se refere basicamente à rugosidade superficial, próximas ao comprimento de onda do radar, e que determina a intensidade do retroespalhamento do radar dentro da célula de resolução.

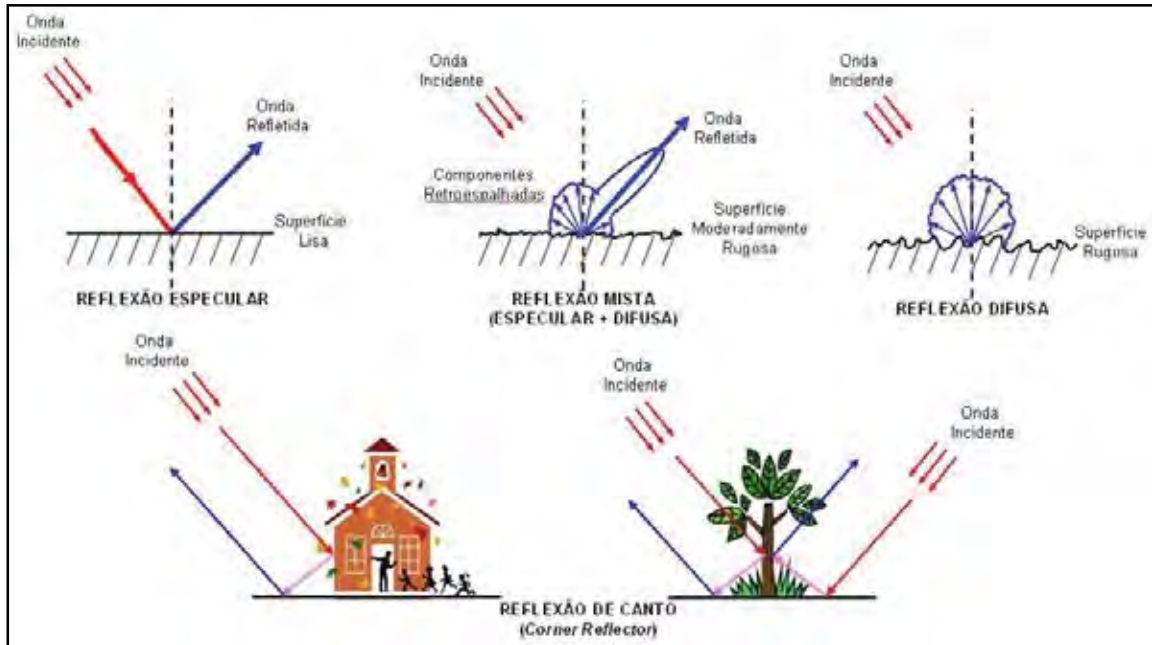
A rugosidade superficial, segundo ULABY et. al (1982), pode ser dividida em três categorias: lisa, intermediária e rugosa. Quando a superfície reflete grande parte da energia incidente de forma especular e, em direção oposta ao sensor, é considerada rugosidade lisa e na imagem apresenta tonalidade escura. As superfícies com rugosidade intermediária são encontradas em regiões onde a energia incidente é refletida de uma forma difusa, apresentando tonalidades de cinza intermediárias na imagem. As superfícies rugosas apresentam a energia incidente retroespalhada em todas as direções e, na imagem, são observadas em tonalidades de cinza médias e claras, devido à grande quantidade de energia retroespalhada que retorna ao sensor.

Um caso de superfície lisa que apresenta uma reflexão especular com um retroespalhamento muito fraco e nível de cinza muito baixo são as áreas de águas calmas de lagos e rios, que aparecem muito escuras nas imagens SAR (SOARES, 1997; CCRS, 1997). Já em áreas de florestas, considerados alvos difusos, o retroespalhamento pode ter maior intensidade aparecendo com tonalidades intermediárias. Os alvos artificiais (edifícios, navios) possuem alto espalhamento do tipo *double bounce*, podendo aparecer claros na imagem, dependendo da forma, orientação e material constituinte.

Nesta pesquisa, foi analisada a macropografia, com informações fornecidas pelo modelo digital do terreno, imagem do relevo sombreado e declividade das encostas.

Os diferentes tipos de espalhamentos estão apresentados na Figura 16.

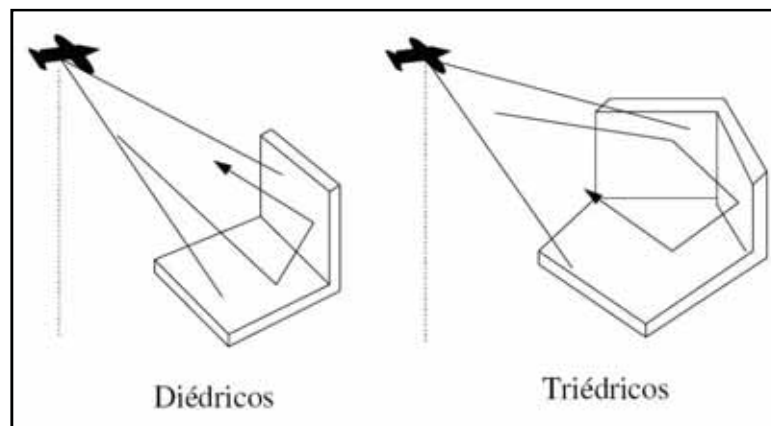
Figura 16 - Tipos de espalhamentos de acordo com a superfície sob a qual incide a onda eletromagnética.



Fonte: SANT'ANNA et. al. (2007).

Os refletores de canto são estruturas que podem ser construídas ou fixadas no terreno servindo como pontos de calibração absoluta das imagens geradas pelo sensor e, por serem facilmente identificados nas imagens devido ao alto retorno (pontos brilhantes), também servem como pontos de controle para georreferenciamento das imagens. O diedro e o triedro aparecem brilhantes no imageamento do radar (Figura 17).

Figura 17 - Reflexão da onda eletromagnética em refletores de canto.



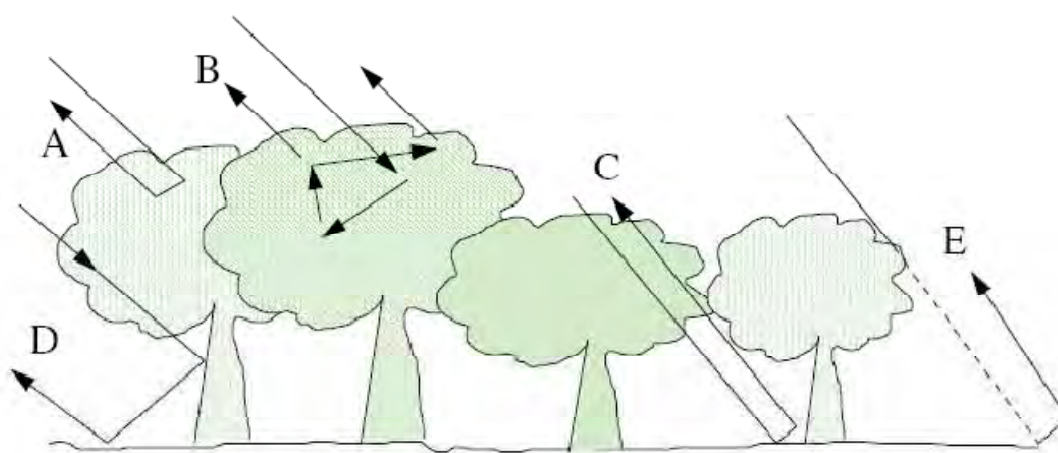
Fonte: SOARES (1997).

Sabe-se que além do espalhamento baseado na rugosidade das superfícies dos objetos, existe ainda o espalhamento por volume, também chamado de espalhamento volumétrico. Este tipo de espalhamento está relacionado a múltiplos processos de espalhamento em um determinado meio como, por exemplo, o caso de culturas e vegetação de pequeno porte (espalhamento intermediário) ou o caso de vegetação de grande porte (espalhamento complexo) (CCRS,2001; HENDERSON e LEWIS, 1998).

No caso do espalhamento volumétrico intermediário existem três mecanismos importantes: espalhamento difuso em terra; espalhamento direto a partir de vários elementos da vegetação e espalhamento duplo (*double bounce*) entre a vegetação e o terreno. Variações na polarização da onda permitem diferenciações entre as informações (CCRS, 2001).

No caso do espalhamento volumétrico complexo existem cinco fatores importantes: 1) retroespalhamento direto a partir da copa florestal; 2) espalhamento múltiplo na copa florestal; 3) espalhamento a partir do terreno; 4) espalhamento de salto duplo entre o tronco e o terreno; 5) sombras produzidas na copa ou outras partes da copa que podem reduzir o espalhamento total (CCRS, 2001; KUPLICH, 2001, SOARES, 1997). Os casos de espalhamento volumétrico complexo são apresentados na Figura 18.

Figura 18 - Tipos de retroespalhamentos complexos. (A) espalhamento direto no dossel da floresta; (B) espalhamento múltiplo e volumétrico no interior do dossel; (C) retroespalhamento na superfície do solo; (D) interação tronco-solo (ou água) e (E) sombra.



Fonte: SOARES (1997).

### 3.2.3.2 – Propriedades dielétricas

O três termos utilizados para caracterizar as propriedades eletromagnéticas de um material são: permissividade elétrica ( $\epsilon$ ), a permeabilidade magnética ( $\mu$ ) e a condutividade elétrica ( $\sigma$ ). A permissividade elétrica é um importante parâmetro para estudos de radar, pois mede a habilidade do material de conduzir ou refletir a energia de micro-ondas. Como a maioria dos materiais sólidos considerados como alvos em estudos de sensoriamento remoto são não-condutores, ao avaliar este tipo de material costuma-se falar em propriedades dielétricas ou constante dielétrica (WOODHOUSE, 2006).

A constante dielétrica poderia ser considerada uma descrição da parte real da permissividade elétrica complexa. Para estudos de micro-ondas, a constante dielétrica é o parâmetro que descreve as propriedades elétricas de um meio e influencia a capacidade de absorção da energia de micro-ondas afetando diretamente o espalhamento da radiação eletromagnética (WOODHOUSE, 2006, CCRS, 2001). Ela varia de acordo com o conteúdo de água e elementos químicos condutores presente nos materiais e é dada pela equação (3) (WOODHOUSE, 2006):

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (3)$$

onde:  $\epsilon_r$  é a constante dielétrica relativa,  $\epsilon_c$  é a constante dielétrica do meio,  $\epsilon_0$  é a constante dielétrica do espaço livre,  $\epsilon'$  representa a parte real e  $\epsilon''$ , a parte imaginária da permissividade.

Na prática,  $\epsilon'$  governa a relação entre as energias transmitida e refletida e quando se combina  $\epsilon'$  com  $\epsilon''$  pode-se determinar a quantidade de energia absorvida pelo meio considerado. A constante dielétrica ( $\epsilon_r$ ) de meios naturais como solo e vegetação é fortemente influenciada pelo conteúdo de umidade.

Com isso, pode-se dizer que conteúdo hídrico de um meio é inversamente proporcional à penetração da onda eletromagnética. Quanto maior for o conteúdo hídrico, maior será sua constante dielétrica do meio e maior será sua refletividade (potencialmente alto de retorno do sinal do radar). Quanto menor for o conteúdo



hídrico, menor será a constante dielétrica do meio e menor será a sua refletividade (potencialmente baixo retorno).

Não só o conteúdo hídrico, como a umidade de um material pode mudar suas propriedades elétricas e afetar sua aparência na imagem. Por isso é de grande importância a obtenção de dados de pluviosidade antes e durante as datas de aquisição da imagem, permitindo uma análise com maior embasamento para interpretação dos resultados encontrados.

### **3.3 - Representação de dados polarimétricos**

A polarização do retroespalhamento é resultante das características geométricas e elétricas do alvo combinadas com as propriedades da onda incidente e geometria de imageamento. As características do sensor definirão a capacidade de se recuperar toda a informação contida no sinal retroespalhado.

Existem diversas formas de representação matemática para a polarização, e uma das formas que será abordada neste trabalho é através de uma estrutura complexa denominada matriz de espalhamento [S], que representa a relação entre os estados de polarização das ondas incidente e retroespalhada (HELLMAN, 2001). Esta matriz corresponde, nesta pesquisa, ao dado RADARSAT-2 SLC (*Single Look Complex*) e contem toda a informação polarimétrica sobre um espalhador determinístico.

A matriz de espalhamento (equação 4) é definida por BOERNER et. al. (1998) como:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde:  $S_{hh}$ ,  $S_{hv}$ ,  $S_{vh}$ ,  $S_{vv}$  são os elementos complexos que representam o retroespalhamento do alvo imageado nas respectivas polarizações indicadas pelas letras subscritas.

A relação entre as componentes do vetor campo elétrico recebido ( $\vec{E}^r$ ) e o transmitido ( $\vec{E}^t$ ) pelo radar é dada pela equação (5) (ULABY et. al., 1986):

$$\vec{E}^r = \frac{\exp(ikR)}{R} [S] \vec{E}^t, \quad (5)$$

onde:  $[S]$  é a *matriz de espalhamento complexa* dos alvos,  $R$  é a distância entre o alvo e a antena de recepção, e  $k$  é o número de onda.

Para a onda plana, considerando um sistema monoestático (o mesmo sensor emite e recebe) em um meio recíproco (i.e. um campo elétrico variante no tempo induz um campo magnético), considera-se que a componente de espalhamento HV é igual à VH ( $S_{hv} = S_{vh}$ ), pelo princípio da reciprocidade (TOUZI et. al., 2004; HENDERSON e LEWIS, 1998).

Segundo MURA et. al. (2008), antes da calibração das imagens SAR as componentes  $S_{hv}$  e  $S_{vh}$  são distintas entre si. Porém, após a calibração polarimétrica, e para a maioria dos alvos em sensoriamento remoto, as imagens são iguais.

A representação dos elementos da matriz de espalhamento é dependente da base de polarização (HELLMAN, 2001). Para o realce de algumas propriedades dos alvos, costuma-se alterar esta base. As transformações mais comuns são para a base de Borgeaud e para base de Pauli. Nos dois casos, a matriz pode ser representada de uma forma vetorial baseada no vetor de Borgeaud, conforme equação (6):

$$\vec{k}_B = [S_{hh} \ S_{hv} \ S_{vh} \ S_{vv}]^T \quad (6)$$

ou vetor de Pauli equação (7):

$$\vec{k}_P = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{hh} + S_{vv} \ S_{hh} - S_{vv} \ S_{hv} + S_{vh} \ i(S_{hv} - S_{vh})]^T \quad (7)$$

Os dois vetores tentam representar os espalhadores dos alvos. Existem espalhadores determinísticos e não determinísticos, sendo que na natureza os espalhadores são em geral não determinísticos, assim como os descritos pela matriz de espalhamento (equação 4). Para o caso do espalhador determinístico,

pressupõe-se que quando o espalhador interage com a onda eletromagnética, gera uma onda perfeitamente polarizada, preservando a polarização da onda incidente.

Para alvos naturais, no entanto, não é válido supor que os espalhadores são determinísticos, pois estão sujeitos a variações no espaço e no tempo e possuem mais de um centro de espalhamento. Costumam ser representados por um arranjo de espalhadores simples (determinísticos), distribuídos aleatoriamente na célula de resolução.

O sinal original de alvos naturais, gerado a partir da interação da radiação eletromagnética com estes alvos, corresponde à sobreposição de um grande número de ondas com variadas polarizações. Para tratar dos alvos não determinísticos costumam ser utilizadas as matrizes derivadas da matriz de espalhamento [S], também chamadas de matrizes de segunda ordem, as matrizes de covariância e coerência.

Então, para tratar a natureza não determinística dos espalhadores é utilizada a matriz de covariância [C], formada pelo produto vetorial entre o vetor de espalhamento na base de Borgeaud e seu conjugado transposto. Esta matriz é definida da seguinte forma (equação 8), conforme ULABY e ELACHI (1990):

$$[C] = \left\langle \vec{k}_B \cdot \vec{k}_B^{*T} \right\rangle = \begin{bmatrix} \langle |S_{hh}|^2 \rangle & \langle S_{hh} S_{hv}^* \rangle & \langle S_{hh} S_{vh}^* \rangle & \langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle \\ \langle S_{hv} S_{hh}^* \rangle & \langle |S_{hv}|^2 \rangle & \langle S_{hv} S_{vh}^* \rangle & \langle S_{hv} S_{vv}^* \rangle \\ \langle S_{vh} S_{hh}^* \rangle & \langle S_{vh} S_{hv}^* \rangle & \langle |S_{vh}|^2 \rangle & \langle S_{vh} S_{vv}^* \rangle \\ \langle S_{vv} S_{hh}^* \rangle & \langle S_{vv} S_{hv}^* \rangle & \langle S_{vv} S_{vh}^* \rangle & \langle |S_{vv}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (8)$$

onde:  $k_B$  é o vetor de espalhamento na base de Borgeaud;  $k_B^{*T}$  - é o conjugado transposto e  $\langle \rangle$  - denota a média espacial de *pixels* vizinhos.

Na diagonal principal da matriz de covariância estão as informações de intensidade e nas demais posições, informações sobre a diferença de fase.

Na base de Pauli, o produto entre o vetor de espalhamento e seu conjugado transposto resulta na matriz de coerência [T], que contem as mesmas informações

da matriz de covariância (HELLMANN, 2001). Considerando a teoria da reciprocidade ( $S_{hv} = S_{vh}$ ) ( $S_{hv} = S_{vh}$ ), conforme TOUZI (2004), a matriz de coerência (equação 9) é representada por:

$$[T]_{3 \times 3} = \left\langle \vec{k}_P \cdot \vec{k}_P^{*T} \right\rangle = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle |A|^2 \rangle & \langle AB^* \rangle & \langle AC^* \rangle \\ \langle A^*B \rangle & \langle |B|^2 \rangle & \langle BC^* \rangle \\ \langle A^*C \rangle & \langle B^*C \rangle & \langle |C|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (9)$$

onde:

$$\begin{aligned} A &= S_{hh} + S_{vv} \\ B &= S_{hh} - S_{vv} \\ C &= 2S_{hv} \end{aligned}$$

Portanto, a matriz [S] é usada para representar alvos determinísticos e as matrizes de potência como as matrizes [C] e [T] são empregadas para modelar a interação do sinal incidente com o sinal espalhado em alvos não determinísticos. Uma das técnicas para analisar estas matrizes se baseia em teoremas de decomposição de alvos não determinísticos, descritos a seguir.

### 3.3.1 – Teoremas de Decomposição de Alvos

Os teoremas de decomposição de alvos consistem em técnicas de análise de dados polarimétricos para fornecer informações relativas aos processos físicos de espalhamento. Estes teoremas expressam o espalhamento dos alvos como a soma de espalhadores independentes associados a um mecanismo físico do espalhamento (CLOUDE e POTTIER, 1996). Os parâmetros extraídos dessas decomposições podem ser utilizados para alimentar algoritmos de classificação com o intuito de melhor separarem os diferentes alvos da imagem.

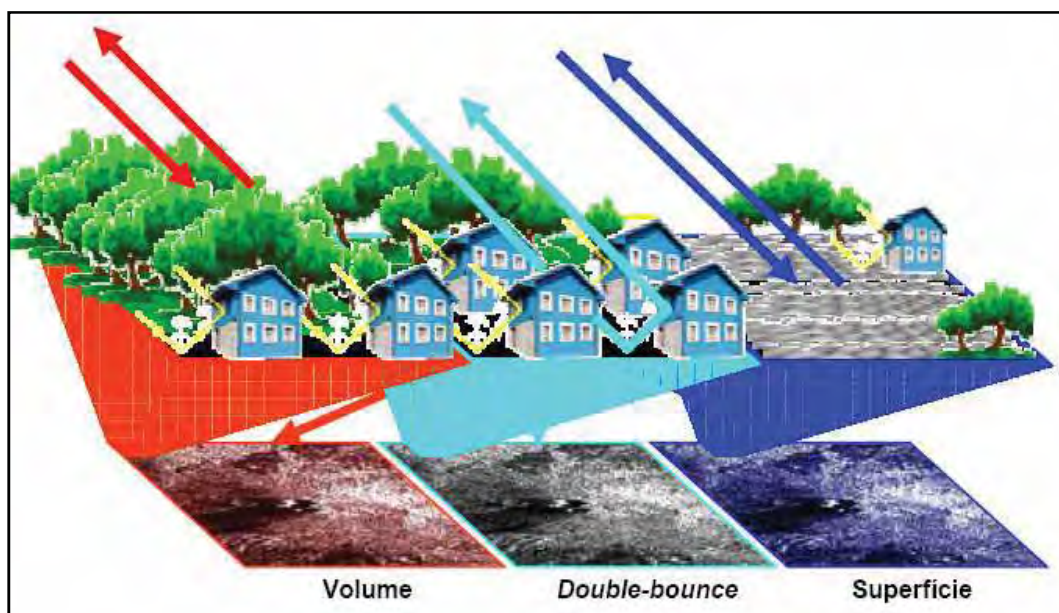
Neste trabalho serão descritos e utilizados os teoremas de alvos não-determinísticos mais utilizados, a decomposição de Freeman-Durden (FREEMAN e

DURDEN, 1998) e a decomposição de alvos de Cloude-Pottier (CLOUDE e POTTIER, 1996).

### 3.3.1.1 – Decomposição de Freeman-Durden

A decomposição de Freeman-Durden considera três mecanismos de espalhamento: volume, superfície e *double-bounce* (Figura 19) e estima a contribuição no retroespalhamento total, de cada um destes três mecanismos de espalhamentos. O modelo pode ser aplicado para imagem inteira ou pequenas áreas e utiliza a matriz de covariância complexa [C] como entrada (FREEMAN e DURDEN, 1998).

Figura 19 - Tipos de espalhamento.



Fonte: SANT'ANNA et. al. (2007).

A primeira componente da decomposição de Freeman-Durden, a superficial, consiste de uma modelagem de espalhamento Bragg de primeira ordem que ocorre em superfícies rugosas e as componentes cross-polarizadas são insignificantes. O espalhamento *double-bounce* é modelado pelo espalhamento de um refletor diédrico, que pode corresponder à interação tronco-solo em uma floresta. Para a componente “volumétrica”, o modelo considera que o retorno ao radar vem de uma nuvem de dipolos orientados aleatoriamente que podem representar a copa de uma árvore (FREEMAN e DURDEN, 1998; LEE e POTTIER, 2009).

A decomposição e Freeman-Durden possui a vantagem de ser baseada nos mecanismos de espalhamento e não apenas em uma construção matemática. Desta forma, possibilita uma primeira análise sobre quais são os mecanismos de dispersão dominantes e assim, qual a origem dos espalhamentos observados nas imagens SAR polarimétricas (LEE e POTTIER, 2009).

Porém, uma das limitações da decomposição de Freeman-Durden é o condicionamento às reflexões simétricas, o que limita sua aplicação em terrenos planos e causa confusão de alvos urbanos com floresta (LEE e POTTIER, 2009). Segundo LEE et. al. (2004) superfícies rugosas podem produzir significativa despolarização e produzir alto espalhamento nas polarizações cruzadas (HV e VH) e confundir com alto espalhamento volumétrico, especialmente nas bandas X e C. Em áreas montanhosas, com grande ângulo de incidência, espalhadores florestais podem induzir baixo retorno o que pode confundir com espalhamento superficial.

### 3.3.1.2 – Decomposição de Cloude e Pottier

CLOUDE e POTTIER (1996) introduziram os conceitos de auto vetores e autovalores, pertencentes à álgebra vetorial, no processo de decomposição de alvos. Após a parametrização da matriz de coerência complexa  $[T_3]$ , os elementos da diagonal principal são os autovalores e as colunas da matriz são seus auto vetores. Partindo desses conceitos, foram obtidos os atributos: a entropia polarimétrica, a anisotropia polarimétrica e o ângulo alfa (CLOUDE e POTTIER, 1997).

A entropia polarimétrica (H) indica a quantidade de aleatoriedade, ou desordem, do processo de espalhamento. Se estiver próxima a zero (0), diz-se que existe um único mecanismo de espalhamento determinístico dominante e, ao contrário, se estiver próxima a 1, que não existe um mecanismo dominante de espalhamento. Uma entropia média indica a presença de dois ou mais mecanismos de espalhamento.

A anisotropia polarimétrica (A) indica a importância relativa dos mecanismos de espalhamento secundários, sendo complementar à entropia. Este atributo só contém informação adicional quando a entropia é intermediária ou alta. Neste caso, a anisotropia é utilizada para determinar a importância dos espalhadores intermediários ou que atuam na relação dos dois autovalores menos significativos. Altos valores de anisotropia (próximo a 1) indicam que somente o segundo

mecanismo é importante, enquanto baixos valores (próximos a zero) indicam a presença de um terceiro mecanismo (CLOUDE e POTTIER, 1996).

O ângulo alfa ( $\alpha$ ) é calculado a partir dos auto vetores da matriz de coerência e descreve tipo de mecanismo de retroespalhamento.  $\alpha=0^\circ$  representa espalhamento superficial,  $\alpha=45^\circ$  representa espalhamento por dipolos (volumétrico) e  $\alpha=90^\circ$  representa reflexão de canto (*double-bounce*) (CLOUDE e POTTIER, 1997).

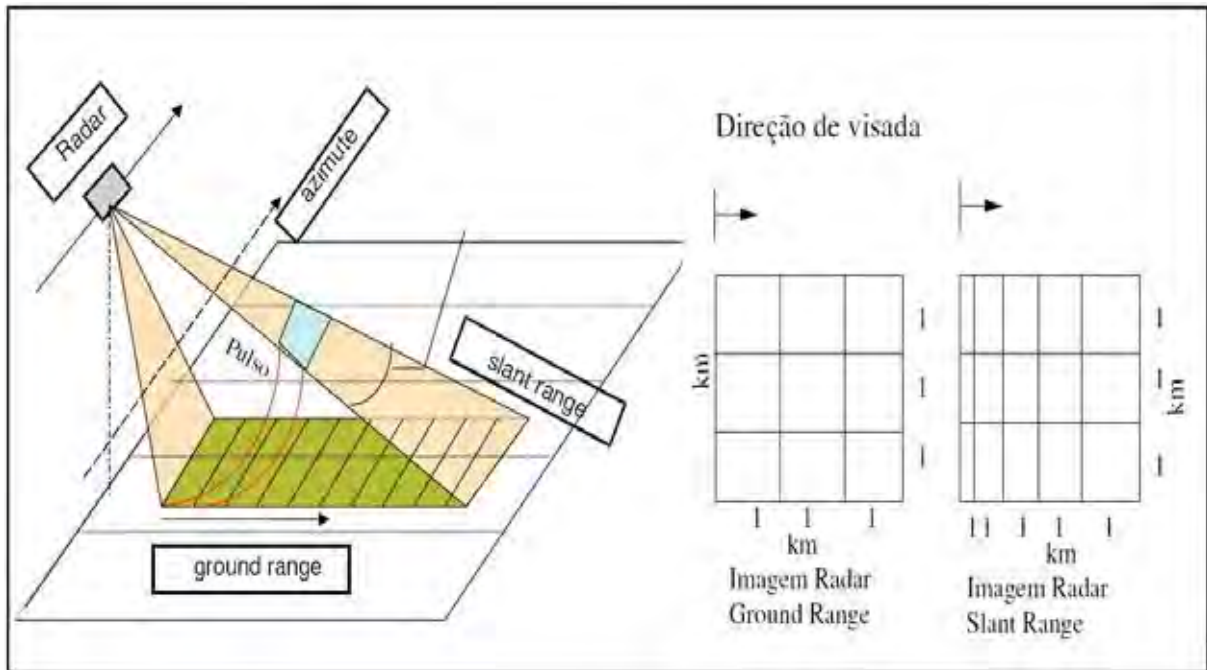
### **3.4 – Processamentos aplicados às imagens SAR**

O processamento de imagens de radar deve incluir etapas iniciais de correção dos dados para posterior aplicação de algoritmos mais específicos, como os de classificação de imagens. Dentre os pré-processamentos para as imagens polarimétricas destacam-se: correção do padrão da antena e conversão de *slant range* para *ground range*. As imagens RADARSAT-2 utilizadas nesta tese já possuem a correção do padrão da antena. Por este motivo, será discutida abaixo somente a conversão de *slant range* para *ground range*.

#### **3.4.1 - Transformação de *slant range* para *ground range***

Os dados SAR são adquiridos em projeção *slant range* (alcance inclinado), que é a distância entre o sensor e o alvo medida ao longo da direção de visada no terreno (CCRS, 1997). A forma normalmente retangular da célula de resolução de imagens SAR é devido ao fato das resoluções espaciais em azimuth e range serem diferentes. A resolução azimuthal se mantém constante na direção radial, enquanto a resolução em range varia ao longo da direção radial, conferindo compressão na célula nas porções proximais (Figura 20).

Figura 20 - Distorção em slant range gerada pela geometria de aquisição da imagem SAR.



Fonte: SOARES (1997).

A conversão de *slant range* para *ground range* (alcance no terreno) é feita para projetar a imagem adquirida em um sistema terrestre e é preciso conhecer a geometria de imageamento, a altitude da plataforma, o atraso no alcance e a elevação do terreno (CCRS, 1997). Com exceção da elevação do terreno, os demais parâmetros de efemérides do sensor comumente são encontrados junto ao arquivo digital das imagens.

Atualmente, o processo de ortorretificação permite esta transformação automática ao fazer a correção geométrica da imagem e gerar uma saída com o espaçamento de *pixel* corrigido e que, nesta pesquisa, foi configurado de acordo com a resolução nominal do sensor.

### 3.4.2 – Ortorretificação de imagens

As imagens orbitais estão sujeitas a uma série de distorções geométricas que requerem correção e uma das técnicas mais precisas é a ortorretificação que leva em consideração, segundo TOUTIN (1995), as distorções relacionadas à plataforma (posição, velocidade, orientação), as distorções relacionadas ao sensor (ângulo de orientação) e distorções relacionadas à projeção cartográfica (elipsoide e plano cartográfico).



Para realizar a ortorretificação é necessária a utilização de um modelo de correção geométrica que contemple o componente satélite (dados de efemérides com informações orbitais e do sensor, o modelo da Terra e pontos de controle coletados) e a componente ortorretificação (retificação da imagem com o modelo digital de elevação) (ADAM et. al., 1997).

Nesta pesquisa foi utilizado o modelo *Rational Functions* que constrói uma correlação entre os *pixels* e suas localizações no terreno e recomendado quando não se possui pontos de controle rigorosamente coletados em campo. Este modelo é computado para cada imagem separadamente, usando a média de duas funções polinomiais para computar a imagem linha e a imagem coluna. O modelo *Rational Functions* pode ter mais acurácia que o modelo polinomial desde que seja considerado o modelo de elevação do terreno (GEOMATICA, 2005).

### **3.4.3 – Redução do ruído speckle**

Cada *pixel* de uma imagem SAR é composto pelo resultado da soma vetorial de muitos espalhadores que retornam à antena um sinal. A flutuação estatística ou incerteza associada com o brilho de cada *pixel* de uma imagem de radar é o que podemos chamar de *speckle* (CCRS, 1997; HENDERSON e LEWIS, 1998). Também conhecido como efeito sal e pimenta, o *speckle* retrata a interferência local construtiva ou destrutiva aparecendo na imagem respectivamente como pontos brilhantes ou escuros.

Existem duas formas de reduzir o ruído *speckle*. Uma delas é o processamento conhecido como *multi-look* (múltiplas visadas) e consiste em produzir visadas independentes baseadas na posição angular dos alvos, diminuindo a resolução azimutal. A outra forma está relacionada à aplicação de filtros específicos, como o processo de *pressumming* que utiliza um filtro do tipo de média para transformações de matrizes, ou ainda filtros específicos para redução do ruído *speckle*, que visam aumentar a relação sinal-ruído, mas que ao mesmo tempo provocam a perda de resolução espacial.

Os filtros mais utilizados para redução do *speckle* em imagens SAR são: Frost, Lee, Kuan e Gamma. A descrição de cada filtro, dada a seguir, foi baseada em INPE (2006), GONZALEZ e WOODS (2000); SCHOWENGERDT (1997), SANT'ANNA (1995):

- Filtro Frost - Filtro convolucional linear, específico para imagens de radar, que minimiza o ruído *speckle*, supondo uma função de correlação espacial exponencial entre os *pixels*; minimiza o erro quadrático médio, incorpora a dependência dos *pixels* vizinhos e é adaptativo;
- Filtro Lee – Filtro local, específico para imagens de radar, que utiliza estatísticas do *pixel* a ser filtrado, considerando a não estacionaridade da média e da variância do sinal; minimiza o erro quadrático médio localmente e é linear, expande o modelo multiplicativo em série de Taylor e utiliza somente os termos de 1ª ordem; pode ser adaptativo ou não. LEE et. al. (1999b) apresentaram filtros polarimétricos específicos para imagens como a RADARSAT-2 adquiridas para esta pesquisa. Neste caso, o filtro reduz o *speckle* na imagem e preserva as informações espaciais e polarimétricas. Como dados de entrada podem ser utilizadas matrizes de espalhamento, covariância, coerência ou Kennaugh e o resultado é uma imagem que representa as mesmas quantidades físicas dos dados de entrada (beta zero, sigma zero ou gamma zero).
- Filtro Kuan - Filtro geral adaptativo, minimiza o erro quadrático médio localmente e é linear, transforma o modelo multiplicativo dos dados de radar em modelo aditivo, utilizado comumente para dados ópticos. A estimação é realizada ponto a ponto utilizando-se o filtro de Wiener sem nenhuma aproximação.
- Filtro Gama - Filtro adaptativo baseado no pressuposto de que a distribuição do ruído *speckle* é baseada na distribuição estatística Gama. Esse filtro minimiza a perda de informações de textura em imagens com distribuição Gama quando comparado a filtros como o Frost e Lee, pois esses filtros não são baseados em modelos estatísticos que utilizam as propriedades da cena.

Para a escolha do melhor filtro, SANT'ANNA (1995) utilizou a análise da relação sinal-ruído que é a razão entre o nível do sinal original e o seu ruído. Esta análise quantifica o desempenho do filtro aplicado a partir de medidas de qualidade que leva em conta a média e a variância. O tamanho das janelas também pode influenciar o resultado, que pode ser avaliado quantitativamente através da relação

sinal/ruído (SANT'ANNA et. al., 2003) e qualitativamente de acordo com o aspecto da imagem filtrada.

De qualquer forma, a filtragem degrada a imagem e resulta em perda de resolução espacial. Por isso, a escolha do filtro depende da análise de diversas variáveis e deve estar de acordo com o objetivo a ser alcançado.

#### **3.4.4 – Classificação de imagens para mapeamento de uso e cobertura da terra**

Apesar de uma grande quantidade de técnicas existentes para mapear e monitorar a cobertura da terra (LU et. al., 2004), a classificação de imagens ainda é uma das técnicas mais utilizadas para este fim.

CORREIA (1999) divide os métodos para classificar dados polarimétricos em 4 classes:

- Classe 1 – algoritmos baseados em técnicas de classificação supervisionada ou não supervisionada, sem nenhum modelo estatístico para os dados;
- Classe 2 – algoritmos de classificação supervisionada baseados em um modelo estatístico para os dados;
- Classe 3 – algoritmos de classificação supervisionada ou não-supervisionada baseados nos Teoremas de Decomposição de Alvos;
- Classe 4 – algoritmos híbridos que utilizam os conceitos das classes 2 e 3.

Neste trabalho foram utilizados classificadores da classe 2 (MaxVer-ICM), da classe 3 (Classificador baseado no Teorema de Decomposição de Alvos e classificador Freeman-Durden) e classe 4 (Classificador de Wishart - Cloude-Pottier e Wishart - Freeman-Durden), os quais são descritos a seguir.

Maiores detalhes sobre tipos de classificadores supervisionados e não supervisionados, estatísticos ou não, aplicáveis às imagens SAR podem ser encontrados em SCHOWENGERDT (1997), CLOUDE e POTTIER (1997), HENDERSON e LEWIS (1998), FREEMAN e DURDEN (1998), CORREIA (1999), LEE et. al. (1999a) e ALBERGA (2007),

#### 3.4.4.1 – Classificador MaxVer-ICM

O classificador MaxVer, originário do método estatístico de Máxima Verossimilhança, é um classificador supervisionado pontual (*pixel a pixel*) que considera a ponderação das distâncias entre médias dos níveis digitais das classes, utilizando parâmetros estatísticos (SCHOWENGERDT, 1997). Nesse processo de classificação as informações proporcionadas pelos *pixels* vizinhos não são consideradas.

O classificador MaxVer-ICM considera, além dos parâmetros estatísticos estabelecidos para o MaxVer, um refinamento das classificações substituindo a classe associada a cada coordenada por aquela classe que maximiza um certo critério (CORREIA, 1999). Desta forma, ele considera a dependência espacial, o que os intérpretes consideram informação de contexto, para gerar o resultado final.

Disponível no SIG SPRING, o classificador MaxVer-ICM realiza a classificação pelo algoritmo MaxVer e, em uma segunda fase, considera a informação contextual (*pixels* vizinhos) para seu resultado.

Para áreas de estudo com, no máximo 1000 linhas e 1000 colunas, também pode ser utilizado o classificador *Polarimetric SAR Classifier 0.7* que é um algoritmo de classificação estatístico polarimétrico desenvolvido por CORREIA (1999). Foi implementado no *software* ENVI (RSI, 2005) em linguagem IDL (*Interactive Development Language*) e diversos estudos mostraram sua eficácia na classificação de imagens SAR (FREITAS et. al., 2008; FRERY et. al., 2007; SILVA, 2007; GABOARDI, 2002). Este classificador possibilita a modelagem estatística dos dados de SAR para distribuições apropriadas às imagens de radar (FRERY et. al., 1997; FREITAS et. al., 2005), além da distribuição gaussiana.

O sistema dispõe de sete classificadores definidos a partir do tipo de dado de entrada: par de imagens em intensidade, razão de imagens em intensidade, intensidade e fase, diferença de fase, amplitude, multivariado em amplitude e multivariado complexo. O classificador *Polarimetric SAR Classifier 0.7* inicia o processo de classificação com a classificação MaxVer e aprimora a classificação utilizando o algoritmo ICM.

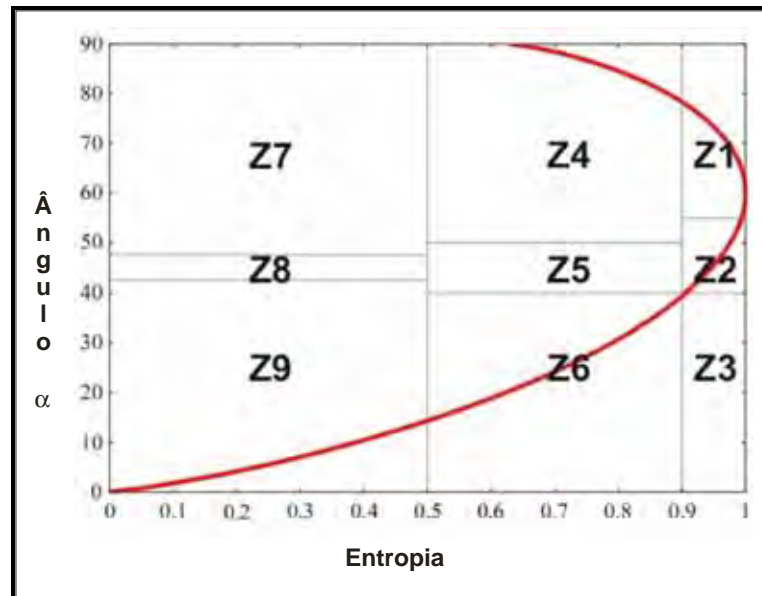
O grande diferencial deste classificador é a capacidade de ajuste dos dados em diferentes modelos estatísticos, através de diferentes funções de densidade de

probabilidade (fdp) para as diferentes classes. Essas diferentes funções são escolhidas através de testes de aderência dos dados às funções.

#### 3.4.4.2 - Classificador de Cloude-Pottier

CLOUDE e POTTIER (1997) desenvolveram um classificador não-supervisionado baseado no Teorema de decomposição de alvos (CLOUDE e POTTIER, 1996). Este classificador utiliza os atributos entropia e ângulo alfa para construir um plano dividido em nove zonas (oito zonas válidas) que representam diferentes elementos e mecanismos físicos de espalhamento (Figura 21).

Figura 21 - Plano entropia/ângulo  $\alpha$  (H/ $\alpha$ )



Cada zona do plano H/ $\alpha$  possui um significado, como segue:

- Zona 1: alta entropia - espalhamento múltiplo. Pode-se identificar espalhamento do tipo *double-bounce* em ambiente de alta entropia ( $H > 0,90$ ). Tais mecanismos podem ser observados em floresta ou vegetação com copa e ramos bem estruturados.
- Zona 2: alta entropia – espalhamento em vegetação. Espalhamento volumétrico ( $\alpha$ ) em ambiente da alta entropia ( $H > 0,90$ ) pressupõe espalhamento produzido pelo dossel de floresta ou de alguns tipos de superfície vegetadas com elementos de espalhamento anisotrópico altamente aleatório.

- Zona 3: alta entropia – espalhamento superficial. Considerara uma zona não válida por ser praticamente impossível distinguir espalhamento superficial em ambiente de alta entropia ( $H > 0.90$ );
- Zona 4: média entropia – espalhamento múltiplo. Mecanismo de espalhamento do tipo *double-bounce* em áreas urbanas com denso arranjo de espalhadores;
- Zona 5: média entropia – espalhamento em vegetação. Superfícies vegetadas com espalhadores anisotrópicos (secundários) e moderada correlação com a orientação dos espalhadores;
- Zona 6: média entropia – espalhamento superficial. Propagação da onda no dossel da vegetação ou elevação da rugosidade da superfície;
- Zona 7: baixa entropia – eventos de múltiplos espalhamentos. Espalhadores dielétricos isolados e diédricos metálicos;
- Zona 8: baixa entropia – espalhamento modelado por dipolo. Vegetação com elementos de espalhamento anisotrópicos altamente correlacionados;
- Zona 9: baixa entropia – espalhamento superficial. Superfícies como água e oceano, bem suaves e lisas.

Na classificação de Cloude-Pottier, cada *pixel* é atribuído a uma das oito classes definidas pelas oito zonas válidas. O parâmetro anisotropia pode ser incorporado na classificação em que cada classe é dividida em duas novas classes: com anisotropia  $>$  que 0,5 e com anisotropia  $<$  que 0,5, gerando 16 classes.

#### 3.4.4.3 – Classificador de Wishart derivado de Cloude-Pottier

Trata-se de um classificador híbrido não-supervisionado que alia o plano  $H/\alpha$  a um algoritmo k-médias baseado na distribuição de Wishart da matriz de covariância complexa (LEE et. al., 1999a).

Após definido o número de iterações, determinado pelo usuário, o classificador gera uma imagem com oito classes. A aplicação do algoritmo de k-médias pode acarretar que um *pixel*, inicialmente em uma das oito zonas do plano  $H/\alpha$ , migre para outra zona. Portanto, *pixels* pertencentes às oito classes finais desta classificação não necessariamente possuem o mesmo significado das oito zonas

iniciais. Assim como a classificação de Cloude-Pottier, o parâmetro anisotropia pode ser incorporado, gerando uma classificação com 16 classes (POTTIER e LEE, 1999).

Segundo LEE et. al. (2004), no método de Wishart derivado de Cloude-Pottier, a estabilidade na convergência dos *pixels* não é boa, e a preservação do mecanismo de espalhamento não é garantida, devido à medida de distância de Wishart ser um classificador estatístico que classifica os *pixels* ignorando suas propriedades de espalhamento.

#### **3.4.4.4 – Classificador de Wishart derivado de Freeman-Durden**

A classificação Wishart derivada de Freeman-Durden (LEE et al., 2004) utiliza o método de decomposição de FREEMAN e DURDEN (1998) e o algoritmo K-médias com a distância derivada da distribuição de Wishart. Os *pixels* são inicialmente agrupados em três classes de acordo com o mecanismo de espalhamento predominante: volumétrico, *double-bounce* e de superfície. Cada uma destas classes é dividida em três classes, gerando uma classificação com nove classes.

Segundo SILVA (2010), a vantagem desta classificação é que preserva a natureza dos mecanismos de espalhamento dos *pixels*.

### **3.5 – Sistema RADARSAT-2**

Diversas pesquisas têm demonstrado as potencialidades existentes dos atuais sensores que atuam na faixa de micro-ondas. O sistema RADARSAT-2 se destaca devido principalmente às inúmeras configurações de imageamento que a plataforma oferece além de sua confiabilidade e operacionalidade na aquisição e comercialização do dado.

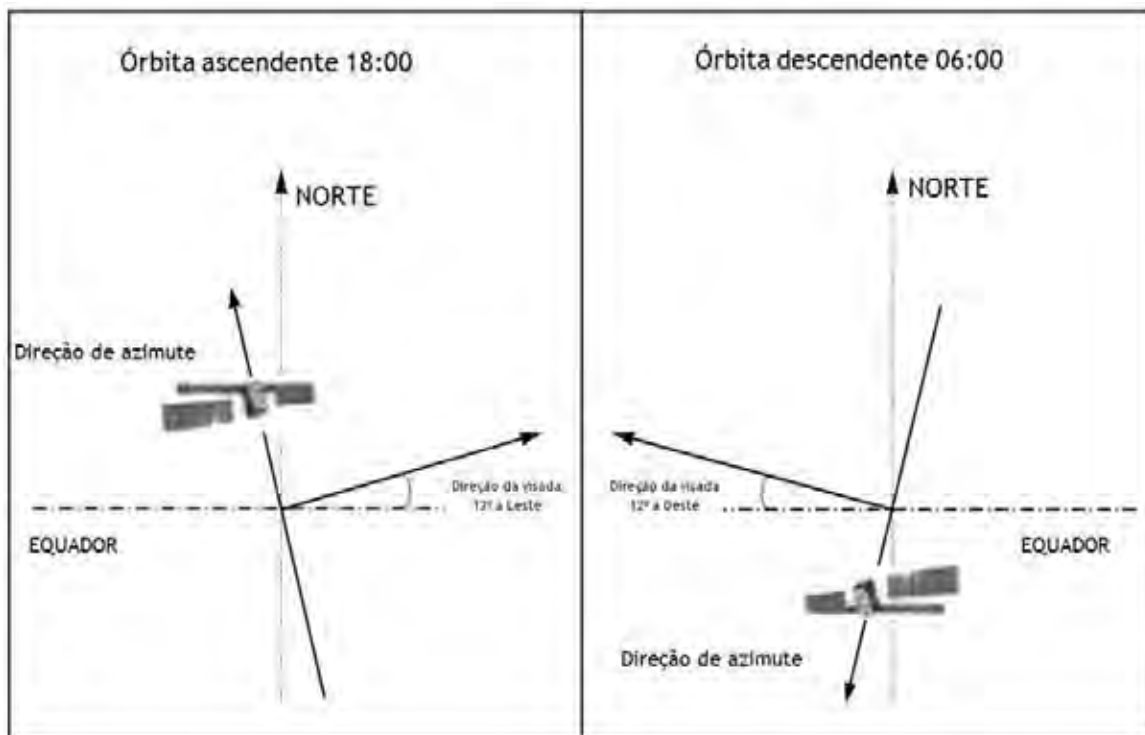
A RADARSAT é uma missão de observação da Terra idealizada em 1980 pela Agência Espacial Canadense (CSA). Esta missão resultou no surgimento do primeiro sistema orientado apenas para dados de radar. Foram criados acordos entre instituições e empresas canadenses que tinham por objetivo monitorar as atividades antrópicas para manejo e proteção ambiental além de encontrar novas alternativas de fontes de óleo, durante a crise do petróleo na década de 70 (LANGHAM, 1982; PARASHAR et. al., 1993).

O início operacional da missão se deu em novembro de 1995, quando foi lançado o satélite RADARSAT-1, operando em banda C (frequência de 5,3 GHz), com polarização HH, órbita heliossíncrona, a uma altitude de 798 km e com aquisição de imagens em órbita ascendente (visada para leste) e descendente (visada para oeste) (CSA,1999).

O RADARSAT-1 constituiu o primeiro satélite exclusivo para imageamento com radar com abertura sintética (SAR), com diversas configurações de visada, resolução e faixa imageada, concebido principalmente para a área das geociências (TOUTIN e RIVARD, 1997).

A direção da órbita define para que direção o sensor registra a cena e isso pode ser ascendente ou descendente. Na visada de órbita descendente, que parte do Pólo Norte, o sistema RADARSAT se volta para o lado oeste enquanto na órbita ascendente, que parte do Pólo Sul, possui visada para leste (Figura 22). Para a órbita descendente, na linha do Equador, o ângulo de azimute de visada é de  $278.6^\circ$  e para a órbita ascendente,  $78^\circ$ .

Figura 22 - Órbitas do RADARSAT.



Fonte: RADARSAT (2007).



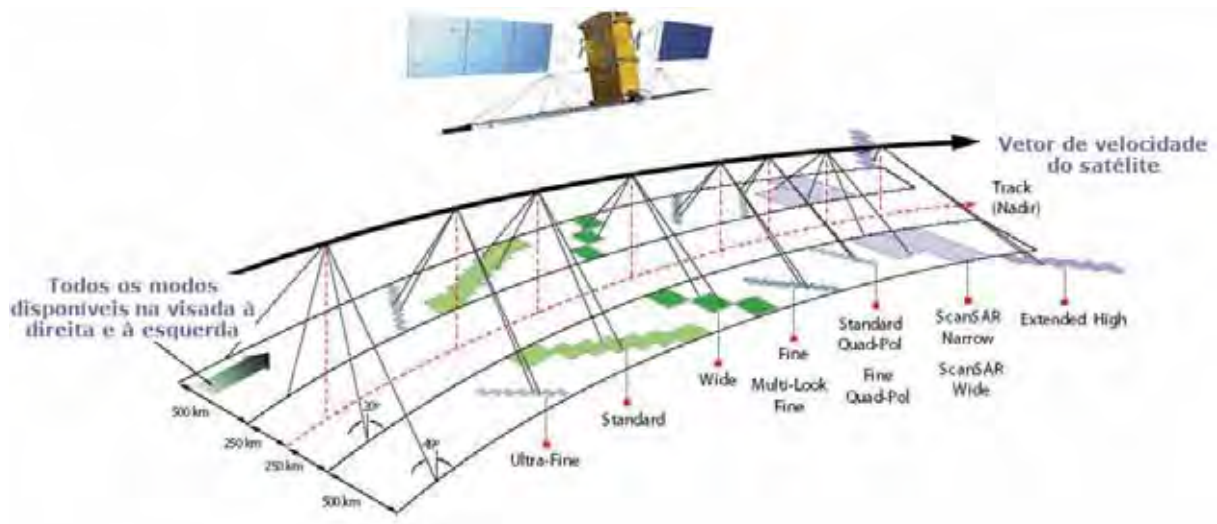
Na passagem ascendente, o azimute de visada é aproximadamente  $12^\circ$  a leste e na descendente, aproximadamente  $12^\circ$  a oeste. Este azimute controla a orientação dos modos de aquisição do radar com respeito ao alinhamento das estruturas sobre a superfície da Terra.

Este é um dos principais parâmetros que devem ser definidos durante a aquisição das imagens de radar, pois dependendo do tipo da visada da órbita, pode-se esconder ou evidenciar estruturas e alvos.

Dando continuidade ao programa RADARSAT, foi lançado, em dezembro de 2007, o satélite RADARSAT-2 que não somente permitiu a continuidade do primeiro sensor, operando na banda C (frequência de 5,4 GHz), mas também viabilizou novas aplicações a partir de novos modos de imageamento disponíveis.

Os modos de aquisição apresentados na Figura 23 são resultados da ampliação do programa RADARSAT com novas configurações e modos de aquisição para os dados RADARSAT-2, o que permite maiores possibilidades em termos de pesquisa, análise e operações comerciais em diversas áreas (FOX et. al., 2004).

Figura 23 - Modos de aquisição dos dados RADARSAT-2.



Fonte: MDA (2008).

A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros encontrados em cada um dos modos de imageamento.

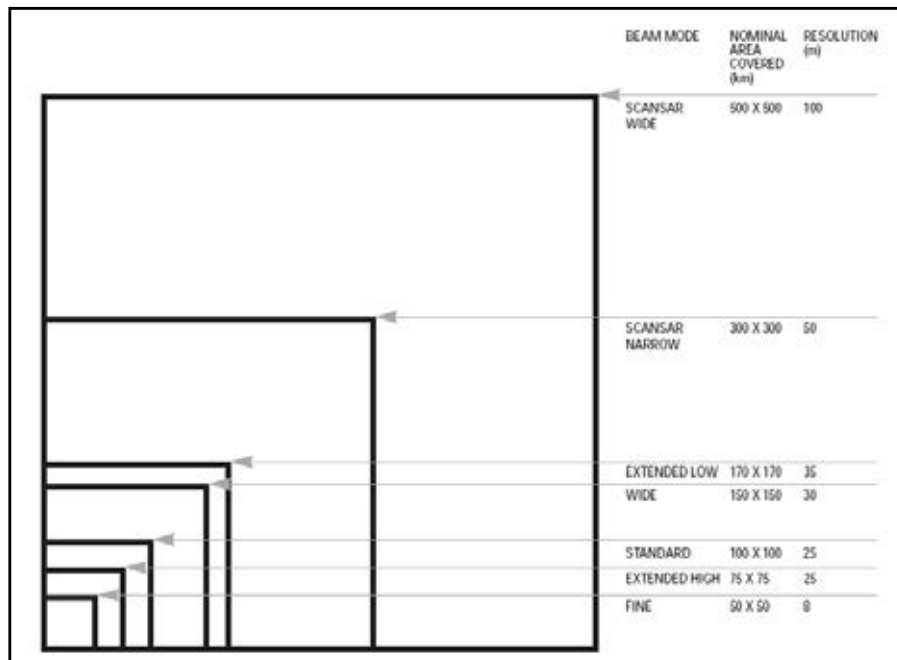
Tabela 1 - Resumo dos modos de imageamento do RADARSAT-2.

<b>Modo de imageamento</b>	<b>Intervalo do ângulo de incidência ao longo da faixa</b>	<b>Largura da faixa imageada (km)</b>	<b>Resolução aproximada (ground range x azimute) (m)</b>	<b>Número de looks (rg x az)</b>
<b>Polarização seletiva (transmite H ou V; recebe H e/ou V)</b>				
<b>Fine</b>	37 - 49	50	10 x 9	1 x 1
<b>Standard</b>	20 - 49	100	25 x 28	1 x 4
<b>Baixa incidência</b>	10 - 23	170	40 x 28	1 x 4
<b>Alta incidência</b>	50 - 60	70	20 x 28	1 x 4
<b>Extenso (wide)</b>	20 - 45	150	25 x 28	1 x 4
<b>ScanSAR limitado</b>	20 - 46	300	50 x 50	2 x 2
<b>ScanSAR extenso</b>	20 - 49	500	100 x 100	4 x 4
<b>Polarimétrico (transmite H e V em pulsos alternados; recebe H e V em qualquer pulso)</b>				
<b>Fine quad-polarização</b>	20 - 41	25	<b>11 x 9</b>	1 x 1
<b>Standard quad-polarização</b>	20 - 41	25	25 x 28	1 x 4
<b>Polarização simples seletiva</b>				
<b>Ultra-fine</b>	30 - 40	20	3 x 3	1 x 1

Fonte: Adaptado de ALI et. al. (2004).

Cada modo de aquisição define uma área a ser imageada e, conforme a Figura 24, pode-se observar a área de cobertura das diferentes cenas.

Figura 24 - Área de cobertura da imagem RADARSAT-2.

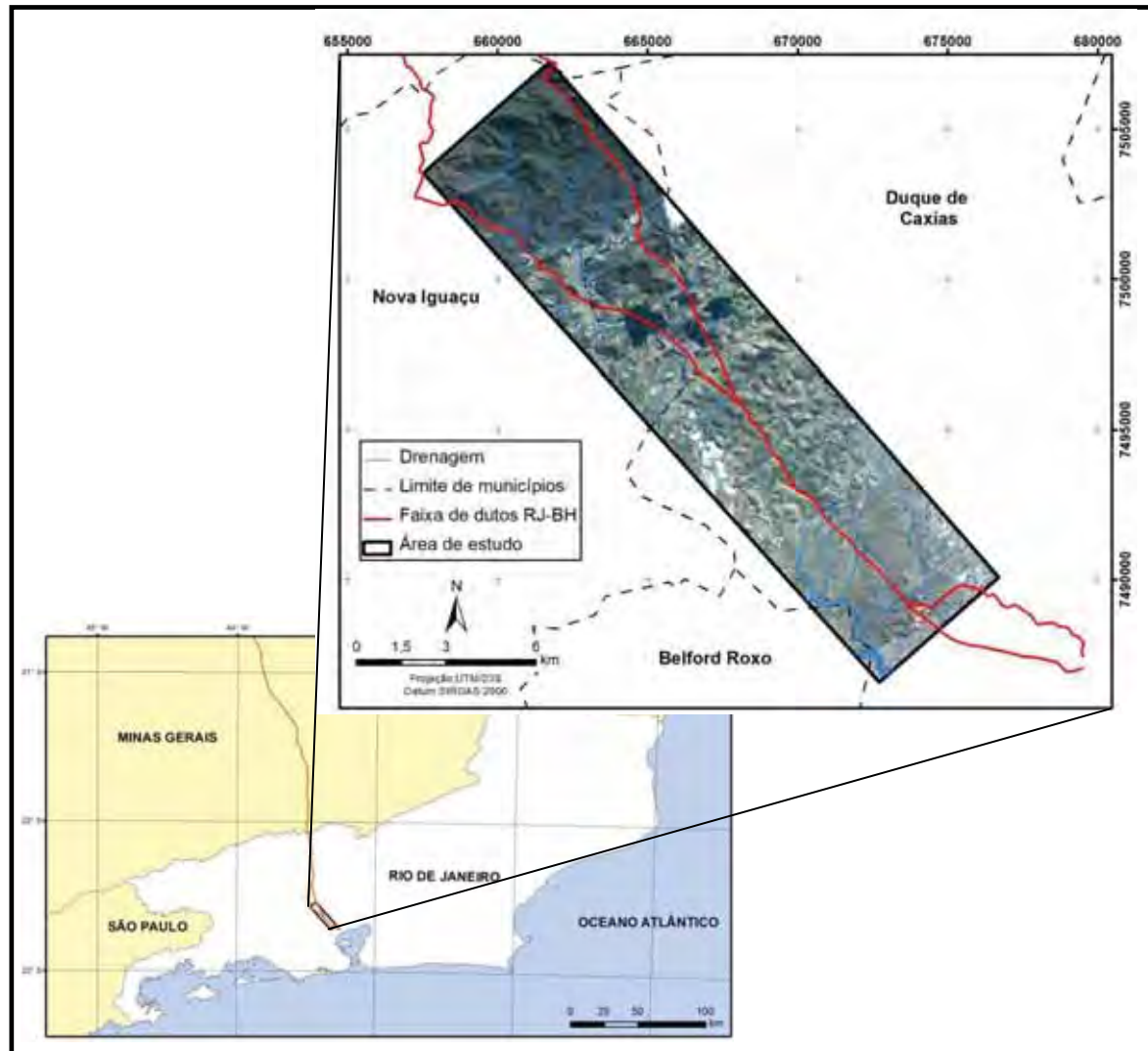


Fonte: RADARSAT (2007).

#### 4 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo desta pesquisa corresponde a uma área de 124 km<sup>2</sup>, localizada no Estado do Rio de Janeiro, abrangendo parte dos municípios de Belford Roxo, Duque de Caxias e Nova Iguaçu, como apresentado pela Figura 25.

Figura 25 - Localização da área de estudo desta pesquisa.

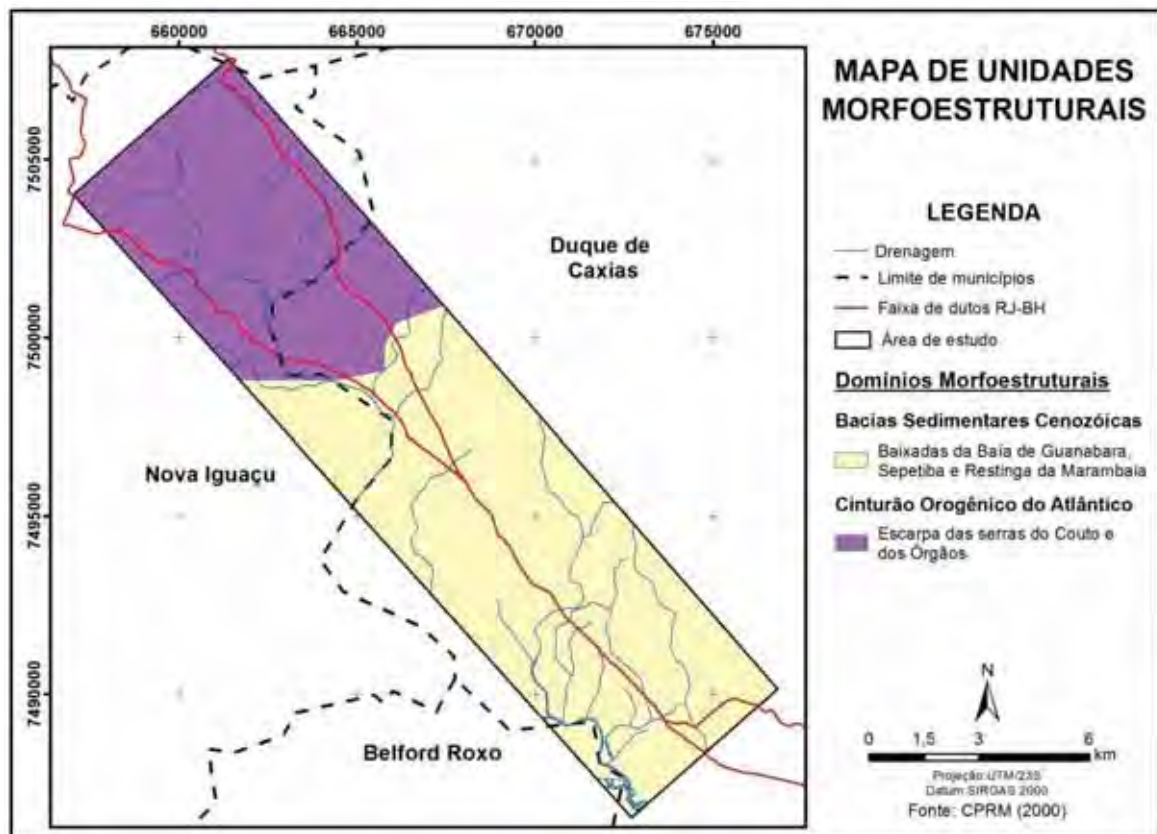


Esta área foi escolhida por estar no entorno da faixa do duto ORBEL, que atravessa diferentes tipos de paisagem, onde os processos dinâmicos de alteração na paisagem são intensos, e também por possuir diferentes condições geomorfológicas. As características ambientais baseadas em informações sobre o relevo, o clima e o uso da terra serão descritos a seguir, como forma de caracterizar a área estudada.

#### 4.1 – Geomorfologia

Geomorfologicamente, a área de estudo está inserida em dois grandes Domínios Morfoestruturais: o Cinturão Orogênico do Atlântico e as Bacias Sedimentares Cenozóicas (Figura 26).

Figura 26 - Mapa de unidades morfoestruturais da área de estudo.



O Cinturão Orogênico do Atlântico, ou Escudo Atlântico, é uma das importantes feições geotectônicas da fachada atlântica brasileira, encontrado de Santa Catarina até o norte da Bahia. É composto por diversas faixas de dobramento, como a Faixa de Dobramentos Ribeira, que abrange todo o estado do Rio de Janeiro (CPRM, 2000).

Esse cinturão constitui-se em um conjunto diversificado de rochas graníticas e gnáissicas, submetidas a diversos eventos orogenéticos ao longo do Pré-Cambriano (ALMEIDA, 1976; HEILBRON et .al., 1995).

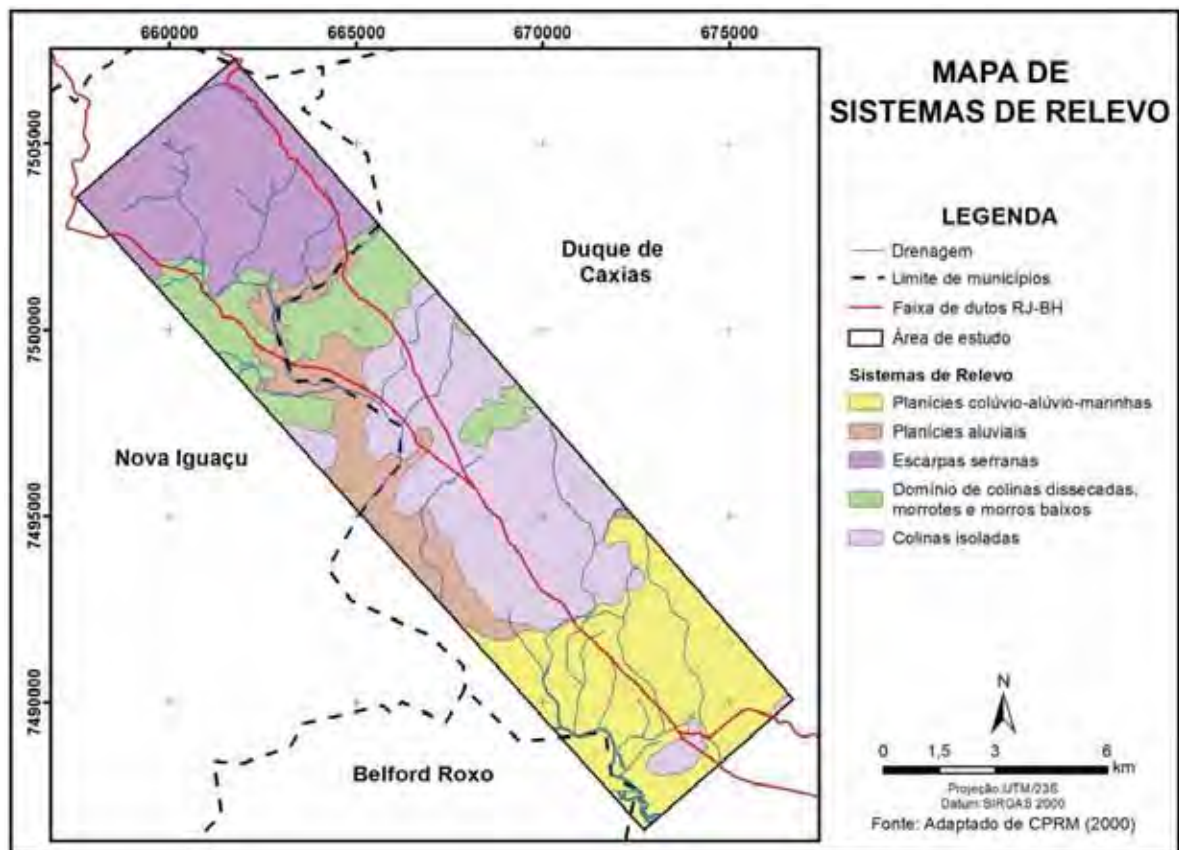
Uma das unidades morfoestruturais encontrada na área de estudo se refere à Escarpa das Serras do Couto e dos Órgãos que consiste em uma muralha

montanhosa que delimita o recôncavo da bacia da Baía de Guanabara. Esse planalto elevado, alçado a mais de 2.000m de altitude, contrasta com o relevo extremamente acidentado das escarpas serranas, caracterizado por vertentes muito íngremes e topos aguçados.

A outra unidade morfoestrutural são as Bacias Sedimentares Cenozóicas que representam uma das mais importantes feições geotectônicas resultantes da tectônica extensional pós-cretácica no Sudeste brasileiro. Compreendem um conjunto de bacias tafrogênicas continentais denominadas “Sistema de *Rifts* da Serra do Mar” por ALMEIDA (1976) ou “Sistema de *Rifts* Continentais do Sudeste do Brasil” por RICCOMINI (1989).

Ocorrem na área de estudo, diferentes sistemas de relevo conforme Figura 27.

Figura 27 - Mapa geomorfológico da área de estudo.



As feições geomorfológicas encontradas na área de estudo, segundo CPRM (2000), são:

- Colinas isoladas
- Domínio de colinas dissecadas, morrotes e morros baixos
- Escarpas serranas
- Planícies aluviais
- Planícies colúvio-alúvio-marinhas

#### **4.1.1 - Colinas Isoladas:**

Colinas residuais, com vertentes convexas e topos arredondados ou alongados, com sedimentação e colúvios, remanescentes do afogamento generalizado do relevo produzido pela sedimentação flúvio-marinha que caracteriza as baixadas litorâneas. Apresenta densidade de drenagem muito baixa com padrão dendrítico e predomínio de amplitudes topográficas inferiores a 100 metros e gradientes suaves (CPRM, 2000).

A Figura 28 apresenta exemplos de colinas isoladas na área de estudo.

Figura 28 - Colinas isoladas na área de estudo.



Fonte: Fotos obtidas em sobrevoo (03/09/2010).

As colinas isoladas são sustentadas por ortognaisses, paragnaisses, granitóides e granodioritos situados no *graben* da Baía da Guanabara. Estão isoladas pela sedimentação fluvial nos baixos cursos dos principais rios e atualmente estão ocupadas por pastagens e pequenos fragmentos de mata, sendo densamente urbanizadas na Região Metropolitana CPRM (2000).

#### **4.1.2 - Domínio de Colinas Dissecadas, morrotes e morros baixos:**

Constituído por colinas dissecadas, com vertentes convexo-côncavas e topos arredondados e/ou alongados e de morrotes e morros dissecados, com vertentes retilíneas e côncavas e topos aguçados ou alinhados. Apresenta densidade de drenagem média a alta com padrão variável, de dendrítico a treliça ou



retangular e o predomínio de amplitudes topográficas entre 100 e 200 metros e gradientes suaves a médios (CPRM, 2000).

A Figura 29 apresenta exemplos de colinas, morrotes e morros baixos registrados na área de estudo.

Figura 29 - Colinas dissecadas, morrotes e morros baixos na área de estudo.



Fonte: Fotos obtidas em sobrevoo (03/09/2010).

Os morrotes alinhados e morros baixos são sustentados por ortognaisses, paragnaisses, granitos e granitóides. Relevo bastante dissecado, de morros com vertentes convexo-côncavas e topos arredondados ou alongados ou morrotes com vertentes côncavas e topos alinhados e amplitudes topográficas entre 100m e 200m. Atualmente estas unidades estão ocupadas por pastagens e pequenos fragmentos de mata (CPRM, 2000).

#### 4.1.3 - Escarpas serranas:

Constituídas de relevos montanhosos, extremamente acidentados, transicional entre dois sistemas de relevo. As vertentes são predominantemente retilíneas a côncavas, escarpadas e topos de cristas alinhadas, aguçados ou levemente arredondados. Apresentam densidade de drenagem muito alta com padrão variável, de paralelo a dendrítico, ou treliça a retangular, com predomínio de amplitudes topográficas superiores a 500 metros e gradientes muito elevados, com ocorrência de colúvios e depósitos de tálus (CPRM, 2000), conforme visualizado na Figura 30.

Figura 30 - Escarpas serranas na área de estudo.



Fonte: Fotos obtidas em sobrevoo (03/09/2010).

As configurações morfológicas dos escarpamentos são bastante diversificadas, causadas principalmente por condicionantes litoestruturais, podendo

se observar muralhas montanhosas imponentes e degraus escarpados mais degradados devido à ação diferencial dos processos tectônicos e erosivos.

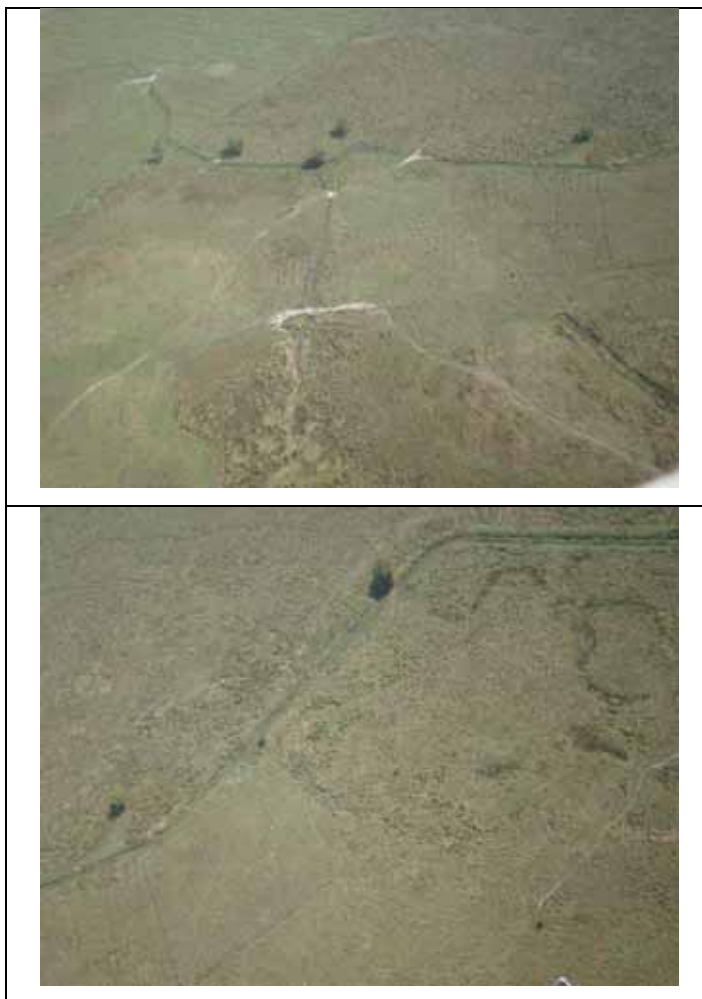
São sustentadas por granitóides, paragnaisses, ortognaisses migmatíticos, granulitos e charnockitos. Apresentam vertentes retilíneas a côncava e amplitudes topográficas superiores a 300 metros. Atualmente são ocupadas por vegetação de Mata Atlântica preservada e por extensos fragmentos de mata e pastagens. As baixas vertentes, no entanto, estão frequentemente desmatadas devido à expansão das atividades agropastoris CPRM (2000).

#### **4.1.4 - Planícies aluviais**

Este sistema é constituído de planícies aluviais de inundação, terraços fluviais e leques alúvio-coluviais. Apresenta superfícies sub-horizontais, com gradientes extremamente suaves e convergentes em direção aos canais-tronco.

Caracterizam-se, nos altos cursos fluviais, por leques aluviais, terraços fluviais e planícies de inundação, que se convergem nos amplos vales fluviais dos baixos cursos (CPRM, 2000). A Figura 31 apresenta exemplo deste sistema na área de estudo.

Figura 31 - Planícies aluviais na área de estudo.



Fonte: Fotos obtidas em sobrevoo (03/09/2010).

Estas planícies são constituídas por sedimentos quaternários, arenosos e/ou areno-argilosos estão localizadas no sopé da escarpa da Serra do Mar, atualmente ocupadas por pastagens e agricultura e pequenos núcleos urbanos e fragmentos de mata (CPRM, 2000).

#### **4.1.5 – Planícies colúvio-alúvio-marinhas**

Este sistema é constituído de terrenos argilo-arenosos das baixadas. Apresenta superfícies sub-horizontais, com gradientes extremamente suaves e convergentes à linha de costa, de interface com os sistemas deposicionais continentais (processos fluviais e de encosta) e marinhos (CPRM, 2000) (Figura 32).

Figura 32 - Planícies colúvio-alúvio-marinhas na área de estudo.



Fonte: Fotos obtidas em sobrevoo (03/09/2010).

Associadas aos sistemas de relevo planícies fluviomarinhas nas baixadas do litoral sul fluminense e são caracterizadas, nos altos cursos fluviais, por leques aluviais, terraços fluviais e planícies de inundação, convergentes nos amplos vales fluviais dos baixos cursos (CPRM, 2000).

Estas regiões caracterizam-se por superfícies de gradiente extremamente suave, convergentes em direção à linha de costa. Limitam-se bruscamente com as escarpas serranas e os maciços costeiros. Originalmente se localizam em terrenos mal a muito mal drenados, mas que, após as sucessivas obras de aterros e retificação de canais, tornaram possível a ocupação na maioria dessas baixadas (CPRM, 2000).

## **4.2 – Temperatura e pluviosidade**

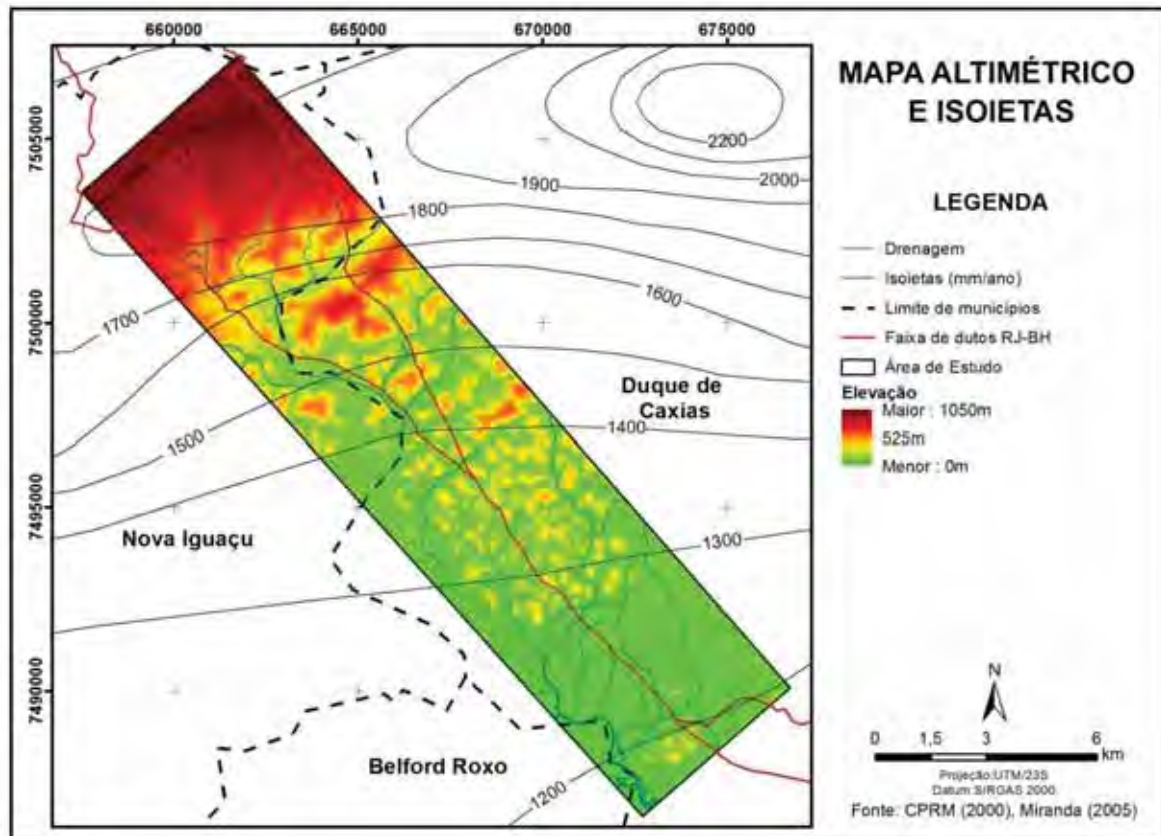
O clima da região é Af com o A significando temperatura média anual sempre superior a 22° e f, sem estação seca (KOEPPEN, 1948). Existe um período de chuvas bem definido (verão), alternado com um período de baixo índice de pluviosidade (inverno). Durante o verão, as frentes frias que se originam na região antártica cruzam o Oceano Atlântico Sul, e se deparam com as massas tropicais de ar quente. Esse encontro gera uma instabilidade atmosférica que, associada ao relevo escarpado, forma uma barreira natural para as correntes de ar e tem como consequência, chuvas torrenciais (GUIDICINI e IWASA, 1976).

Os índices pluviométricos mais elevados do estado são registrados na Serra do Mar, de 2000mm a 4500mm por ano, pois a maior parte das precipitações está relacionada à instabilidades frontais e pós-frontais, sendo assim, a Serra do Mar é sempre a primeira a ser atingida pelas correntes de origem subpolar (CPRM, 2000).

A análise do relevo permite inferir sobre o efeito orográfico, de acordo com o mapa altimétrico e de isoietas (Figura 27), que apresenta a relação entre o relevo e a distribuição e volume da pluviosidade da região. As isoietas foram traçadas a partir de valores médios do período de 1968 a 1995, com dados de precipitação total anual a partir de 270 estações da região, pertencentes às Bacias dos rios Gandu, Caceribu e Bacaxá e suas vizinhanças. Foram consideradas 130 estações localizadas no estado do Rio de Janeiro.

A conformação das isoietas acompanha a topografia, representada na escala 1:250.000, com curvas de nível a cada 100 metros, como consequência dos efeitos orográficos sobre variação espacial das precipitações. O conhecimento de características da dinâmica atmosférica complementou a concepção do mapa de isoietas que, em termos médios, representa a distribuição espacial da pluviosidade total anual, conforme Figura 33.

Figura 33 - Mapa altimétrico e isoietas da área de estudo.

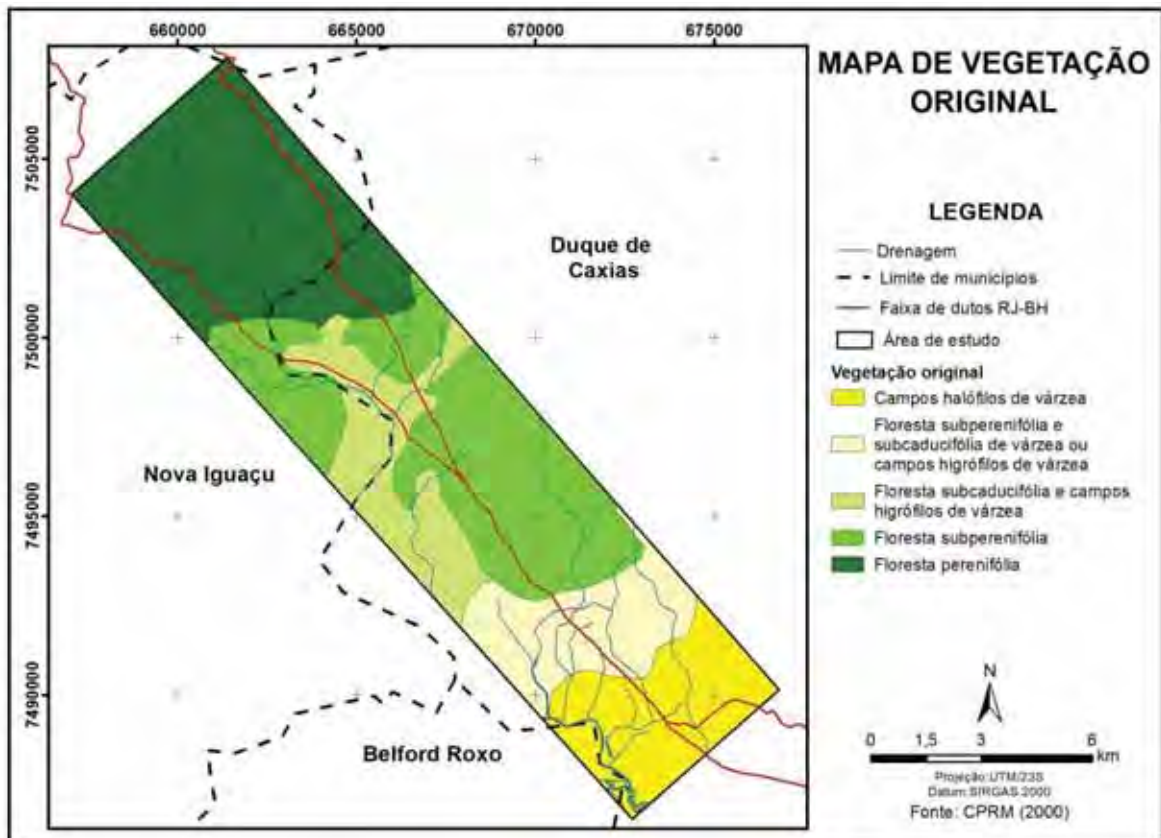


#### 4.3 – Uso e cobertura da terra

Originalmente, a área de estudo se encontra no Domínio da Mata Atlântica, com variações florestais, conforme apresentado na Figura 34.

A Mata Atlântica chegou a ocupar 16% do território brasileiro, distribuídos por 17 estados. Atualmente é encontrada de forma esparsa, ao longo da costa brasileira e representa apenas 8% de sua extensão original. Esse bioma apresenta uma variedade de formações florestais tendo como elemento comum a exposição aos ventos úmidos que sopram do oceano. Também apresenta variações de solos e, por consequência, habitats e fauna (MMA, 2008; RIZZINI, 1997).

Figura 34 - Mapa de vegetação original da área de estudo.



No entanto, com a ocupação da terra, as variações florestais deram espaço às áreas urbanas, pastagens e agriculturas.

Em alguns locais ainda existem fragmentos de mata encontrados, basicamente, nos topos dos morrotes. Muitas dessas áreas já foram alteradas e se encontram em processo de regeneração e sua identificação deve ser criteriosa.

A área de estudo compreende parte dos municípios de Belford Roxo, Nova Iguaçu e Duque de Caxias. Os municípios de Belford Roxo e Duque de Caxias estão inseridos na região Metropolitana do Rio de Janeiro e possuem, respectivamente, 455 mil e 818 mil habitantes (IBGE, 2010b). Economicamente, são municípios que atuam na área de indústrias e serviços, responsáveis por mais de 98% do PIB destes municípios, restando à agricultura praticamente menos de 1% de participação na economia (IBGE, 2010b).

No município de Duque de Caxias, por exemplo, está instalada a refinaria da Petrobras, a Refinaria de Duque de Caxias (REDUC), que integra o maior parque industrial do Rio de Janeiro. Este fato estimula o segmento de química e petroquímica e torna este município basicamente industrial.



O município de Nova Iguaçu já não é inserido na região metropolitana, mas preserva as mesmas características dos demais. Possui uma população, registrada no CENSO de 2010, de 767 mil habitantes (IBGE, 2010b) e participação de 1% de aptidão agrícola em suas atividades econômicas. Este município concentra suas atividades na área industrial e de serviços.

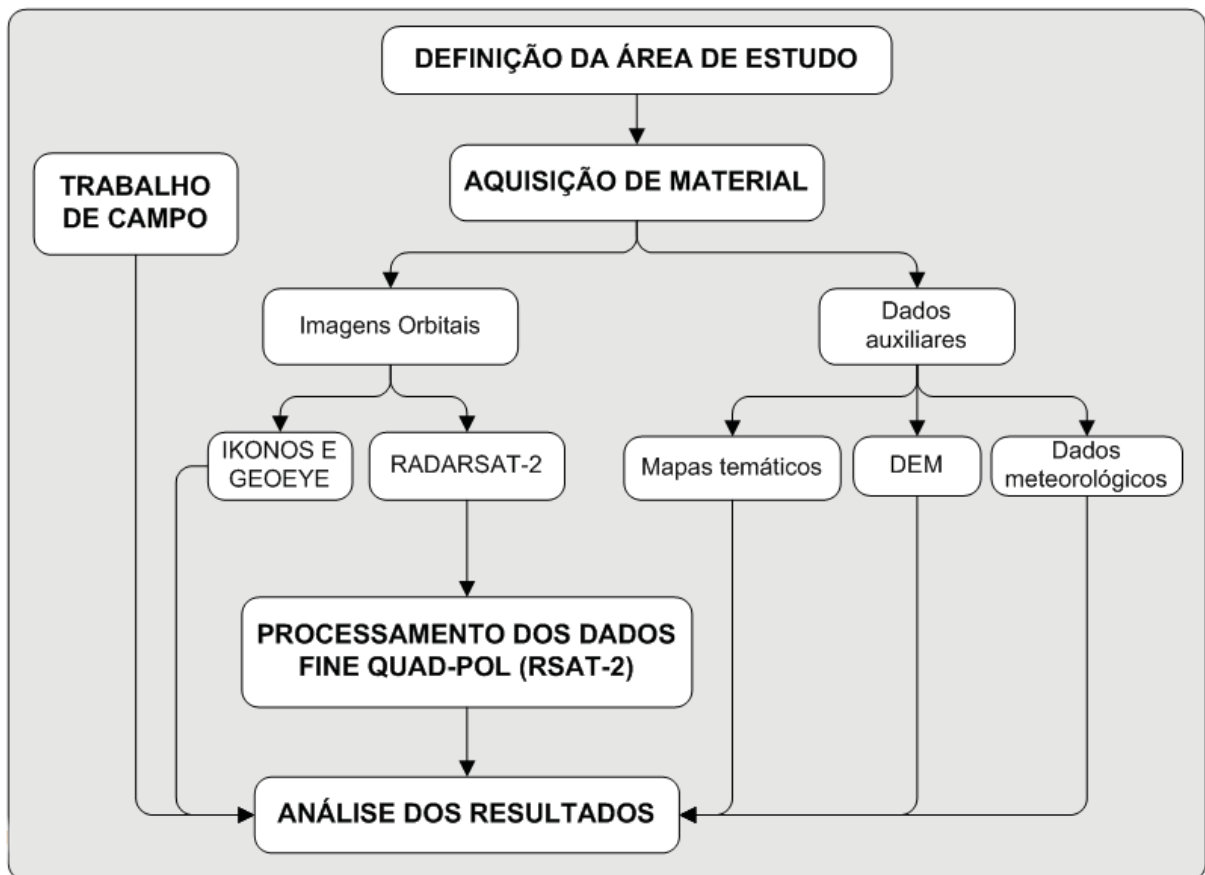
Os dados específicos para população rural, dos municípios que estão compreendidos na área de estudo ainda não foram divulgados, mas em uma primeira análise, a população rural do Brasil apresentou declínio (IBGE, 2010b).

As características econômicas dos municípios evidenciam a maior atuação na área de serviços e indústria, com menor participação da agricultura devido às paisagens encontradas, de difícil acesso e com grandes áreas de Mata Atlântica ainda preservadas.

## 5 – ETAPAS DE TRABALHO

Neste capítulo são apresentados os procedimentos utilizados para alcançar os objetivos propostos. Estes procedimentos foram divididos em etapas de trabalho, as quais são apresentadas na Figura 35, sob a forma de um fluxograma geral e simplificado.

Figura 35 - Fluxograma geral das principais etapas realizadas neste trabalho.



Após a definição da área de estudo, foram adquiridas as imagens orbitais e os dados auxiliares. Este material permitiu análises, comparações e facilitaram os processamentos e análise dos resultados.

### 5.1 – Definição da área de estudo

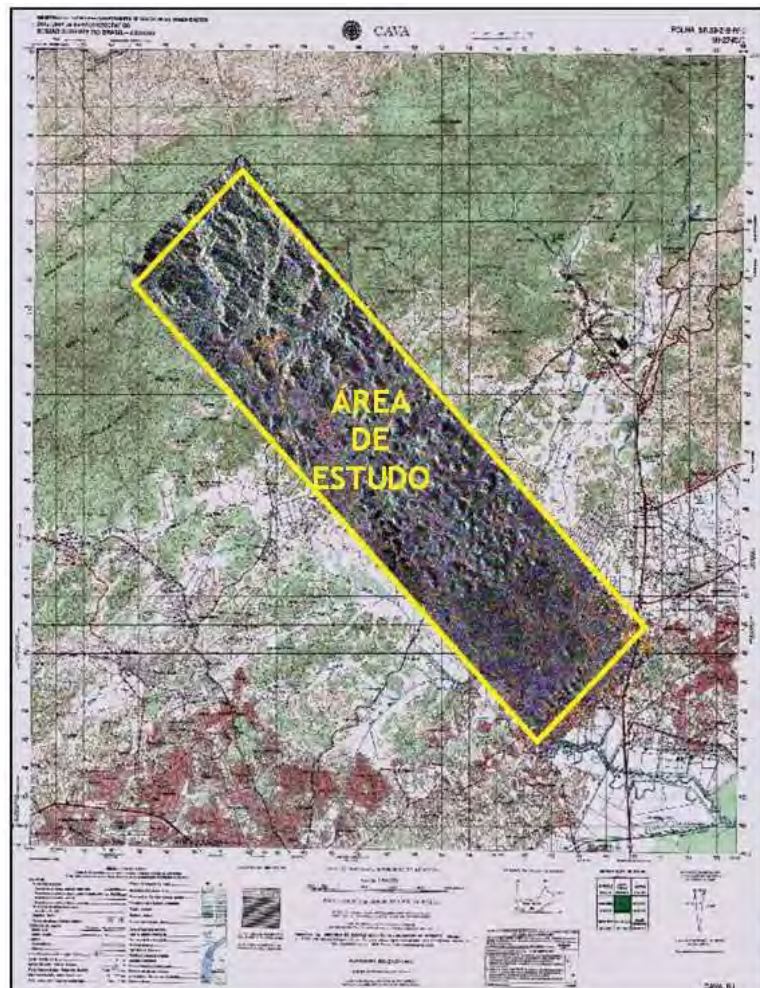
A escolha da área de estudo (Figura 30) foi baseada nos seguintes critérios:

- Área com presença de dutos, principal alvo deste trabalho;

- Região com histórico de presença de nuvens o que dificulta a utilização de imagens de sensores ópticos para o mapeamento e monitoramento;
- Projeto em parceria com Petrobrás/CENPES para realização de testes (sensores e técnicas) com o intuito de auxiliar no mapeamento e monitoramento de faixas do duto RJ-BH;
- Diferentes condições geomorfológicas, o que permitiria uma análise de uso e cobertura da terra aliada às questões de diferentes tipos de relevo.

A Figura 36 apresenta a carta de nome CAVA, em escala 1:50.000 e a localização da área de estudo dentro das configurações cartográficas deste documento, gerado pela Diretoria do Serviço Geográfico do Ministério do Exército (1966).

Figura 36 - Recorte de imagem RSAT-2 projetado sobre a carta planialtimétrica - CAVA (DSG), escala 1:50.000.



Fonte: Adaptada do DSG – Diretoria do Serviço Geográfico (1966).

## 5.2 – Aquisição de material

O material utilizado neste trabalho, descrito nas seções subsequentes, necessitou, em determinado momento, de aplicativos específicos. A Tabela 2 apresenta a lista dos aplicativos utilizados.

Tabela 2 - Aplicativos utilizados neste trabalho e suas aplicações.

<b>Aplicativo</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Fonte</b>
PCI/ GEOMATICA Versão 10.3	- processamento de imagem PolSAR (Módulo SAR Polarimetry) - classificação de imagens - ortorretificação das imagens	PCI (2007)  PCI (2008)
ENVI versão 4.7	- definição das amostras - geração de plano H/ $\alpha$ para amostras (IDL)	ITT (2008)
ArcGIS versão 10.0	- elaboração e importação de mapas temáticos - elaboração de figuras	ESRI (2008)
POLSARPRO versão 4.2	- geração das matrizes [C3] e [T3]	ESA (2007c)
SPRING versão 5.1.6	- edição vetorial - geração de figuras e cálculos - classificação MaxVer-ICM	CÂMARA et. al. (1996)

Foram utilizadas diferentes plataformas para diferentes etapas, de acordo com a experiência no aplicativo e processo a ser executado, que serviram para processamento das imagens orbitais e elaboração/ajuste dos dados auxiliares. Em alguns casos, a mudança do sistema operacional impossibilitou alguns aplicativos, que ainda não possuíam versões adaptadas e este foi um aspecto que deve ser considerado.

### 5.2.1 – Imagens Orbitais

As imagens utilizadas neste trabalho foram do sensor RADARSAT-2, no modo Fine Quad-Pol e, para auxiliar visualmente o resultado das classificações e

auxiliar durante o trabalho de campo, também utilizou-se imagens IKONOS e GEOEYE, respectivamente.

As imagens IKONOS, com resolução espacial de 1 metro, foram adquiridas nos dias 02/07/09 e 10/07/09 e foi gerado um mosaico para cobrir toda a área de estudo. A imagem Geoeeye, utilizada para checagem de dados em campo, possui resolução espacial de 0,5 metro, adquiridas no mesmo mês de agosto de 2009. Ambas as imagens foram adquiridas pela Geoeeye que trabalha com os dois sensores e esta aquisição faz parte do RIEDEL et. al. (2010) que tem, por objetivo, avaliar técnicas de detecção e mudanças para a área de faixa de dutos RJ-BH, utilizando sensores óticos e de radar.

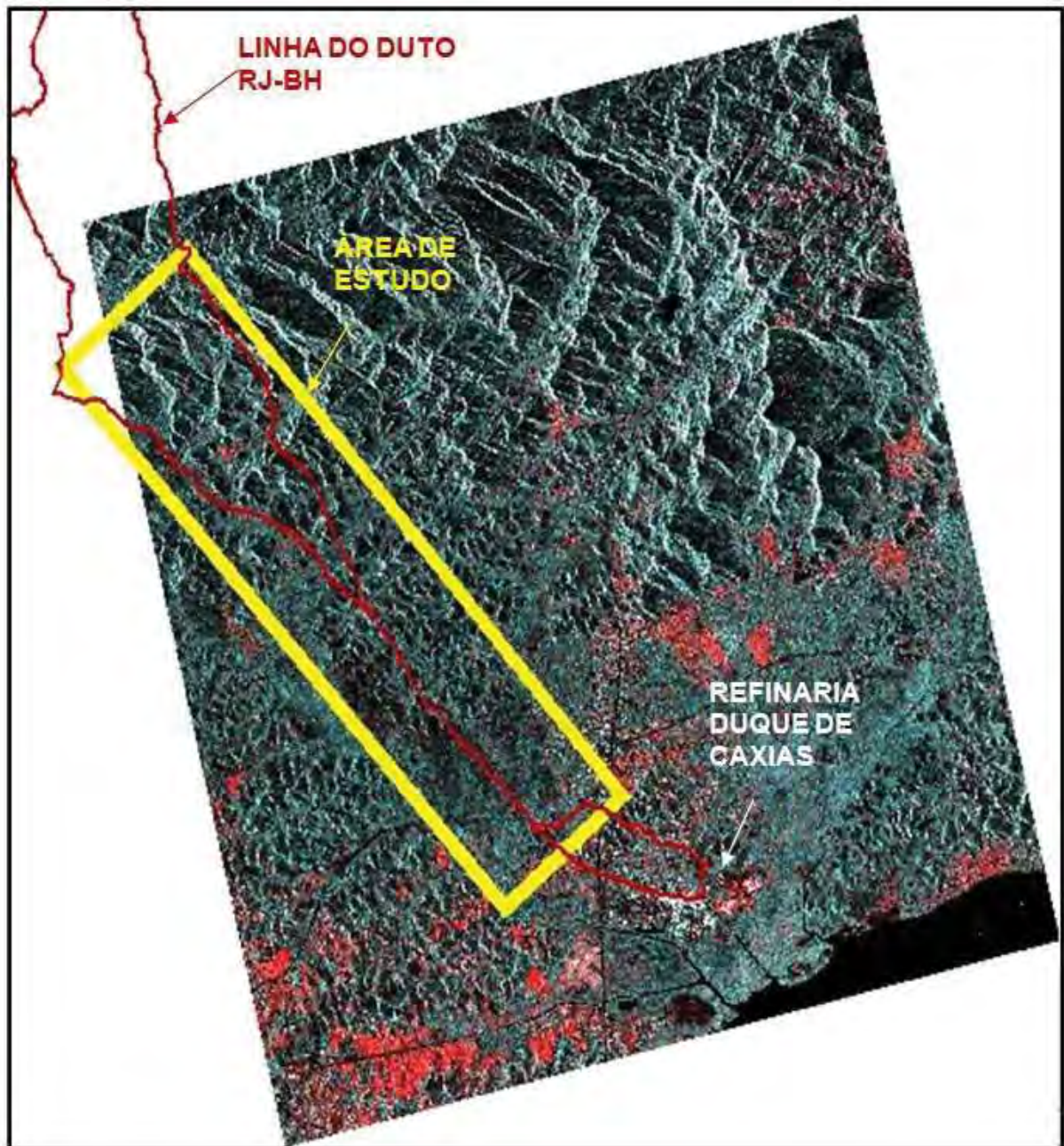
Como o foco deste trabalho é avaliar as imagens RADARSAT-2 (RSAT-2), as características destas estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características das imagens RADARSAT-2 adquiridas.

<b>Imagem</b>	<b>Data de aquisição</b>	<b>Geometria de aquisição</b>	<b>Ângulo de incidência</b>	<b>Modo de aquisição</b>	<b>Nível de processamento</b>
RSAT-2 Fine Quad Pol (HH+HV+ VH+VV)	12/06/08	Descendente	29,32°	FQ10	SLC (Single Look Complex)  SSG (Map image)
RSAT-2 Fine Quad Pol (HH+HV+ VH+VV)	3/08/09	Ascendente	29,32°	FQ10	SLC (Single Look Complex)

A Figura 37 apresenta a delimitação da área de estudo e a linha do duto RJ-BH sobre a imagem RADARSAT-2, FQ10, ascendente, órbita 23-82A, de 3/08/09.

Figura 37 - Área de estudo sobre imagem RADARSAT-2, ascendente, de 03/08/09, composição colorida R-HH, G-HV e B-VV e linha do duto RJ-BH, em vermelho.



A imagem RADARSAT-2 com geometria de aquisição descendente foi utilizada em um primeiro estágio do trabalho. Com o estudo mais aprofundado, e como resultado de discussão sobre a orientação do duto e a geometria de visada, foi necessário adquirir uma imagem com órbita ascendente, pois a descendente não facilitava a iluminação do duto, orientado a NW (PARADELLA, 2009).

## 5.2.2 – Dados auxiliares

Como dados auxiliares, podem-se destacar os mapas temáticos, o DEM (Modelo Digital do Terreno) e os dados meteorológicos.

### 5.2.2.1 – Mapas temáticos

A relação dos mapas temáticos utilizados neste trabalho é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Descrição dos mapas temáticos para este trabalho.

MAPAS	ESCALA	FONTE
Mapa de Unidades Morfoestruturais do Estado do Rio de Janeiro	1:400.000	CPRM (2000)
Mapa de Sistemas de Relevo do Estado do Rio de Janeiro	1:250.000	CPRM (2000)
Mapa de Isoietas Totais Anuais do Estado do Rio de Janeiro	1:400.000	CPRM (2000)
Mapa de Vegetação Original do Estado do Rio de Janeiro	1:400.000	CPRM (2000)

Todos os mapas foram obtidos junto ao Projeto Rio de Janeiro (CPRM, 2000). Este projeto foi realizado através do Programa de Informações para Gestão Territorial – GATE, da Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial do Serviço Geológico do Brasil - CPRM para todo o Estado do Rio de Janeiro.

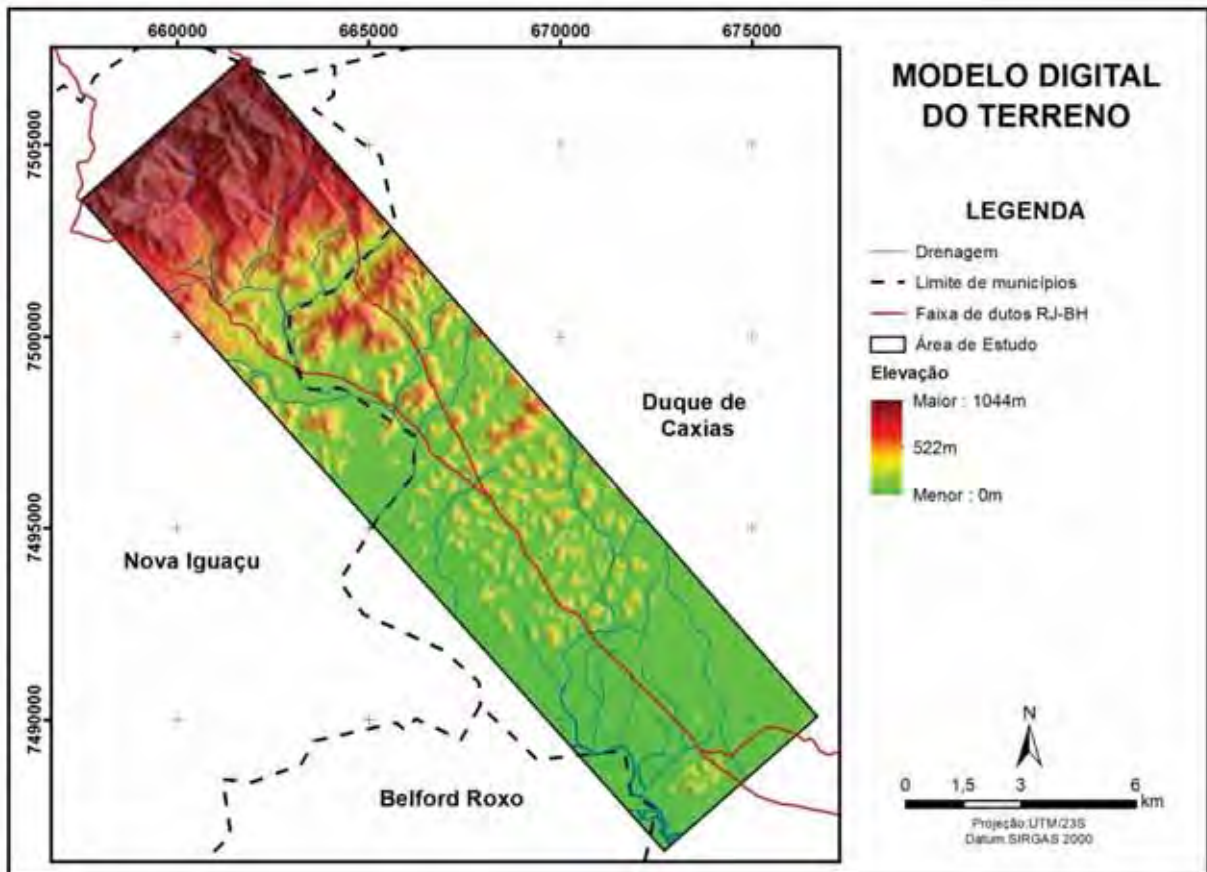
O objetivo do Projeto Rio de Janeiro foi subsidiar estudos na área em esfera municipal, estadual e federal e por isso, muitos órgãos foram parceiros para a elaboração, atualização e confecção destes mapas, que foram úteis para a caracterização da área de estudo e localização das diferentes condições geomorfológicas.

### 5.2.2.2 – Modelo Digital do Terreno

O modelo numérico do terreno (MNT) da área de estudo foi obtido junto ao IBGE (2010a) a partir de isolinhas e pontos cotados de cartas topográficas (2745-1 e

2745-2) na escala 1:25.000. Os dados disponibilizados pelo site estavam em formato tabela e texto e tiveram que ser organizados e configurados para leitura no PCI®, onde foi gerado o Modelo Digital do Terreno (DEM), com resolução de 20 metros, apresentado na Figura 38.

Figura 38 - Modelo Digital de Elevação (DEM) da área de estudo.



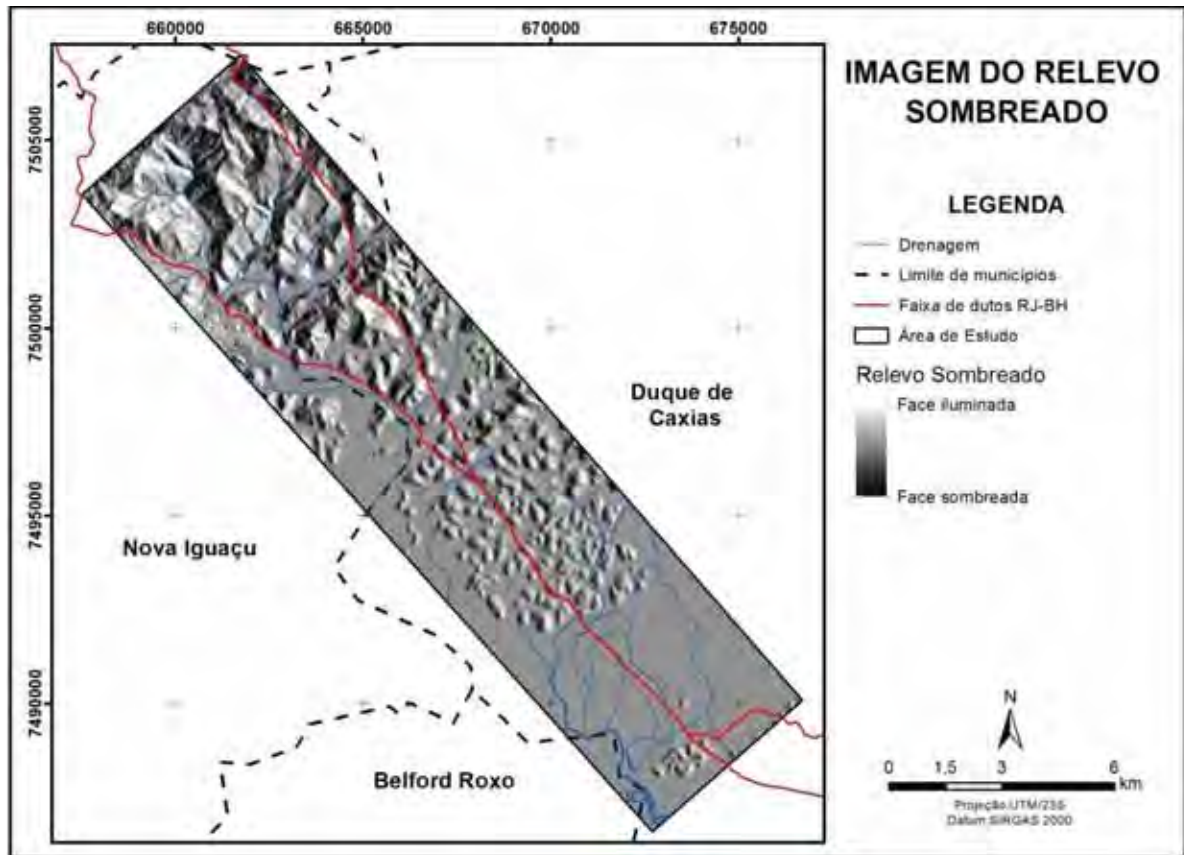
Fonte: Adaptada de IBGE (2010a).

A partir do DEM foram gerados a imagem do relevo sombreado (Figura 39) e o mapa de declividade (Figura 40).

A imagem do relevo sombreado foi gerada baseada nos parâmetros do sensor (azimute=78° e ângulo de incidência=29,32°) e representa as faces iluminadas e sombreadas, de acordo com o sensor. Desta forma, a coleta de amostras de uso e cobertura da terra, descrita na seção 5.4.5, foi realizada nas faces iluminadas do terreno.



Figura 39 - Imagem do relevo sombreado da área de estudo.



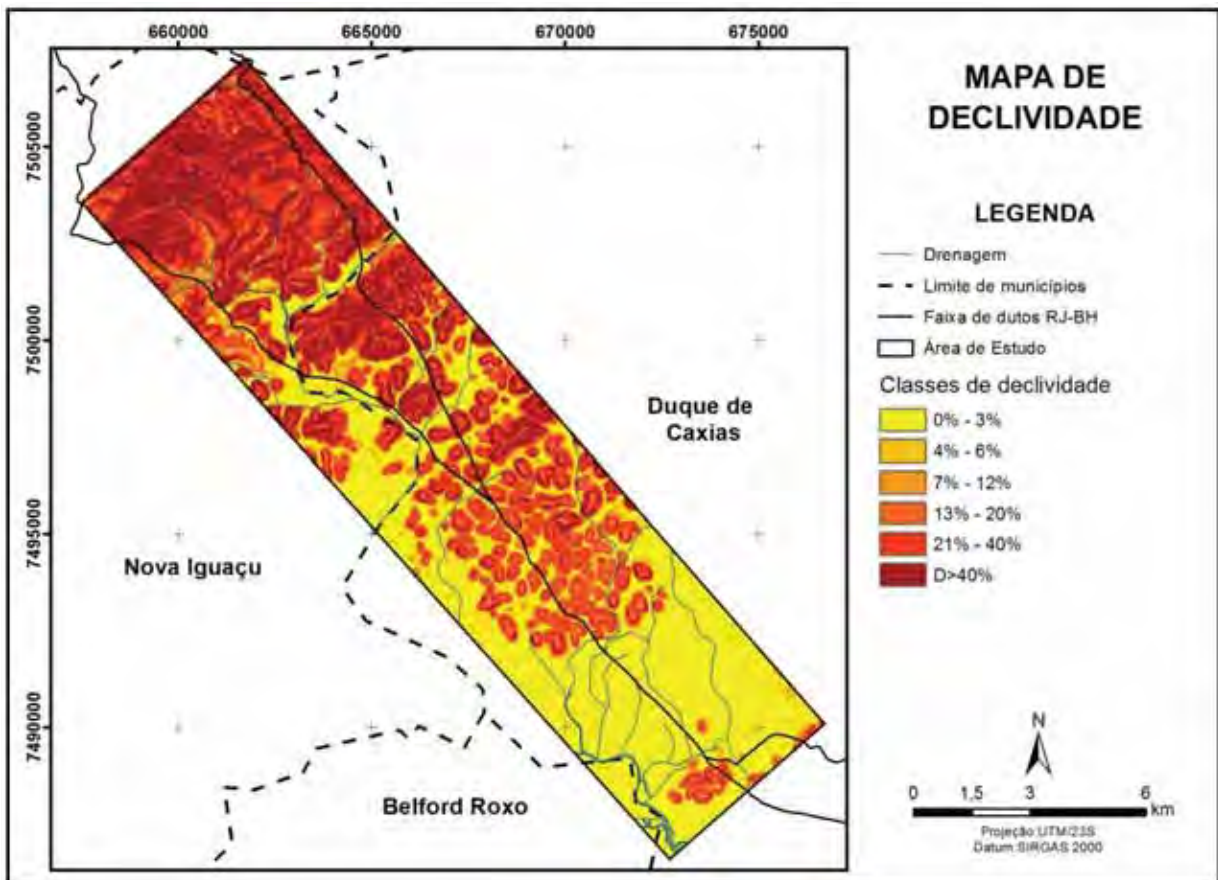
Para estratificar e diferenciar a área de estudo de acordo com classes de declividade foi realizada uma sub-divisão baseada no método de gradiente de declividade, descrito por DE BIASE (1993) e apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Classes de gradiente de declividade.

Declividade (%)	Relevo
0 – 3	Várzea
3 – 6	Plano e suavemente ondulado
6 – 12	Suavemente ondulado a ondulado
12 – 20	Ondulado a fortemente ondulado
20 – 40	Fortemente ondulado a montanhoso
>40	Montanhoso

Fonte: DE BIASE (1993).

Figura 40 - Classes de declividade da área de estudo.



Para algumas análises e avaliações dos resultados das classificações, a área de estudo foi diferenciada em 3 sub-regiões, de acordo com o tipo de relevo e a declividade:

- Sub-região 1: relevo fortemente ondulado a montanhoso, com declividades altas;
- Sub-região 2: relevo suavemente ondulado a ondulado com declividades médias;
- Sub-região 3: relevo de várzea, plano e suavemente ondulado com declividade baixa.

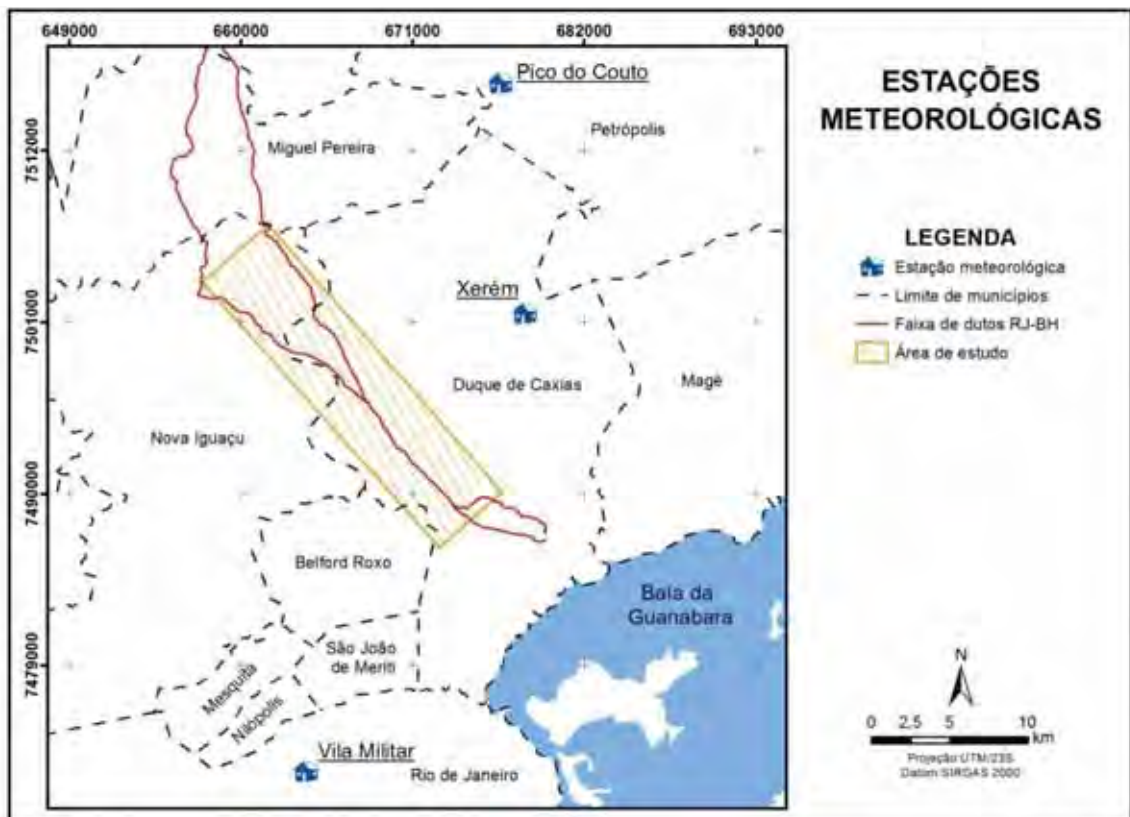
### 5.2.2.3 – Dados meteorológicos

Os **dados meteorológicos** foram obtidos a partir de estações automáticas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Este tipo de estação é composto por uma unidade de memória central, ligada a vários sensores dos parâmetros

meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, etc.), que integra os valores observados minuto a minuto e os registra automaticamente.

As estações meteorológicas, apresentadas na Figura 41, são as mais próximas da área de estudo. A Estação Xerém se encontra a 8,8 km do limite da área de estudo, a estação Pico do Couto, a 15,5 km e a estação Vila Militar a 20,15 km de distância.

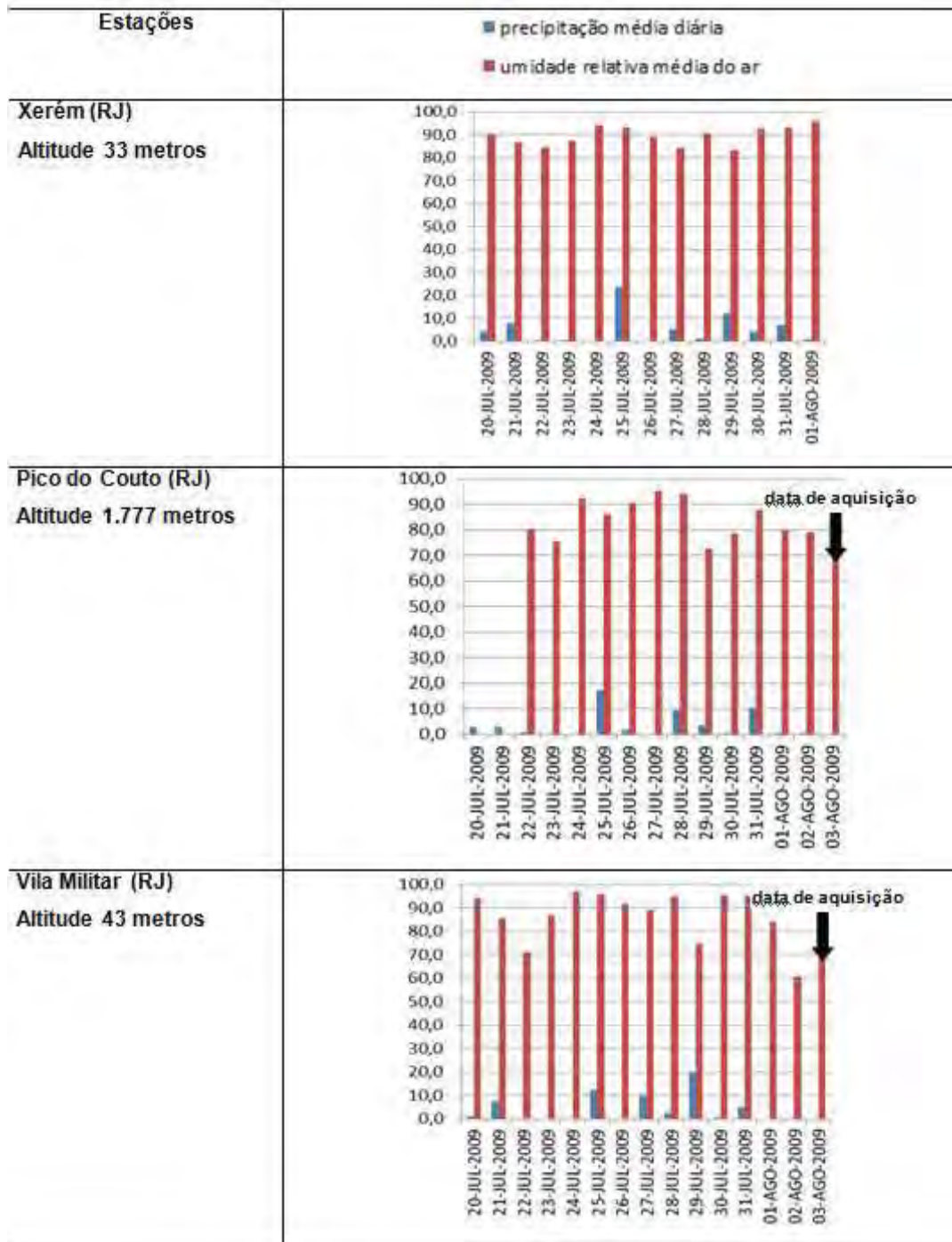
Figura 41 - Localização das estações meteorológicas próximas à área de estudo. Em vermelho a delimitação da área de estudo.



Fonte: INMET (2010).

Dentre estas, a estação Xerém foi a única da área de estudo que não registrou dados depois do dia 1º de agosto. A Figura 42 apresenta a precipitação média diária e umidade relativa média do ar de 15 dias anteriores à data de aquisição da imagem RADARSAT-2, para as estações com dados registrados.

Figura 42 - Precipitação média observada nas Estações Xerém (RJ), Pico do Couto (RJ) e Vila Militar (RJ) de 28/07/09 a 12/08/09



Fonte: INMET (2010).

A previsão inicial de aquisição da imagem RADARSAT-2 seria na última semana de julho de 2009. Ao acompanhar sites de previsão do tempo, foi solicitado o adiamento devido à interferência que as chuvas poderiam trazer na análise dos alvos. Isto pode ser observado pelas precipitações mais altas, chegando a 20mm da

Estação Vila Militar e 10mm na Estação Xerém e Pico do Couto, justamente neste período. Em agosto, porém, as precipitações não ultrapassaram 10mm.

A umidade relativa do ar, no entanto, apresentou altos valores, mesmo estando em período de inverno, o que pode ser explicado, para a estação Pico do Couto pela altitude em que ela se encontra (1.777metros). Nas demais estações, ressalta-se que se trata de medidas médias diárias e, no período da noite e início da manhã, a umidade geralmente é mais alta.

Apesar das imagens de radar não sofrerem interferência para a coleta de dados da superfície, a ocorrência de chuvas próximas à data da aquisição da imagem poderia interferir na interpretação dos alvos, com alteração na resposta da constante dielétrica.

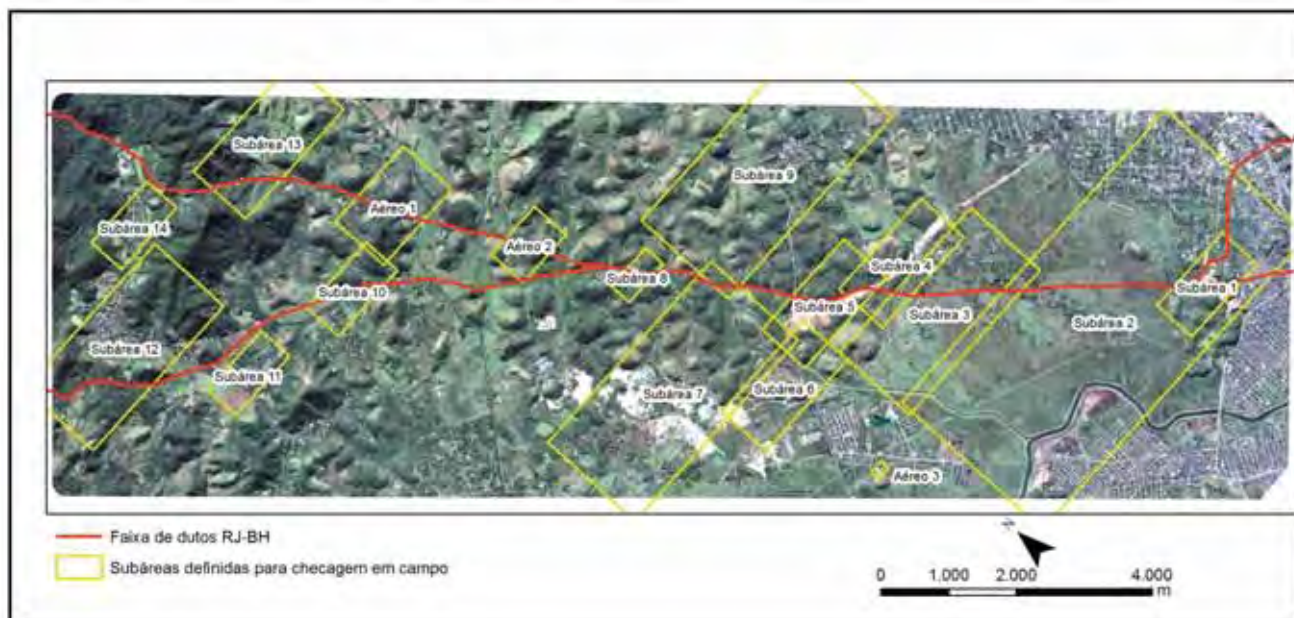
### **5.3 – Trabalho de campo**

O trabalho de campo foi realizado entre os dias 01 a 03 de setembro de 2010 e foram percorridos trechos da área de estudo tendo, como suporte, as equipes do CENPES (Centro de Pesquisas do Petrobrás) e da Transpetro (Petrobras Transporte).

Foram registrados e coletados cerca de 40 pontos terrestres com a utilização de GPS além de registros fotográficos a bordo de helicóptero. Estes dados serviram para esclarecer dúvidas e permitir uma maior familiarização com a área estudada, com entendimento e *in locu* de algumas feições encontradas nas imagens orbitais. A única área com acesso dificultado foi a de escarpas serranas e, mesmo com o sobrevoo, a neblina dificultou o registro fotográfico.

Para facilitar a identificação das áreas visitadas foi utilizada uma imagem Geoeye, com resolução de 0,5 metro, de agosto de 2010 para a identificação dos alvos. As Figuras 44 a 58 foram organizadas de acordo com a programação de campo e as áreas delimitadas para visitação estão apresentadas na Figura 43, em polígonos amarelos. Estes polígonos foram definidos durante a fase de preparação para facilitar o deslocamento e estabelecer áreas prioritárias para o trabalho de campo.

Figura 43 - Localização das subáreas visitadas em campo e faixa de dutos.



Fonte: RIEDEL et. al. (2010).

Foram visitadas 14 áreas em campo terrestre e três áreas com registro aéreo, onde o acesso foi dificultado. As áreas visitadas estão apresentadas na Figura 44 à Figura 58.

Figura 44 - Detalhes da subárea 1 visitada em campo.

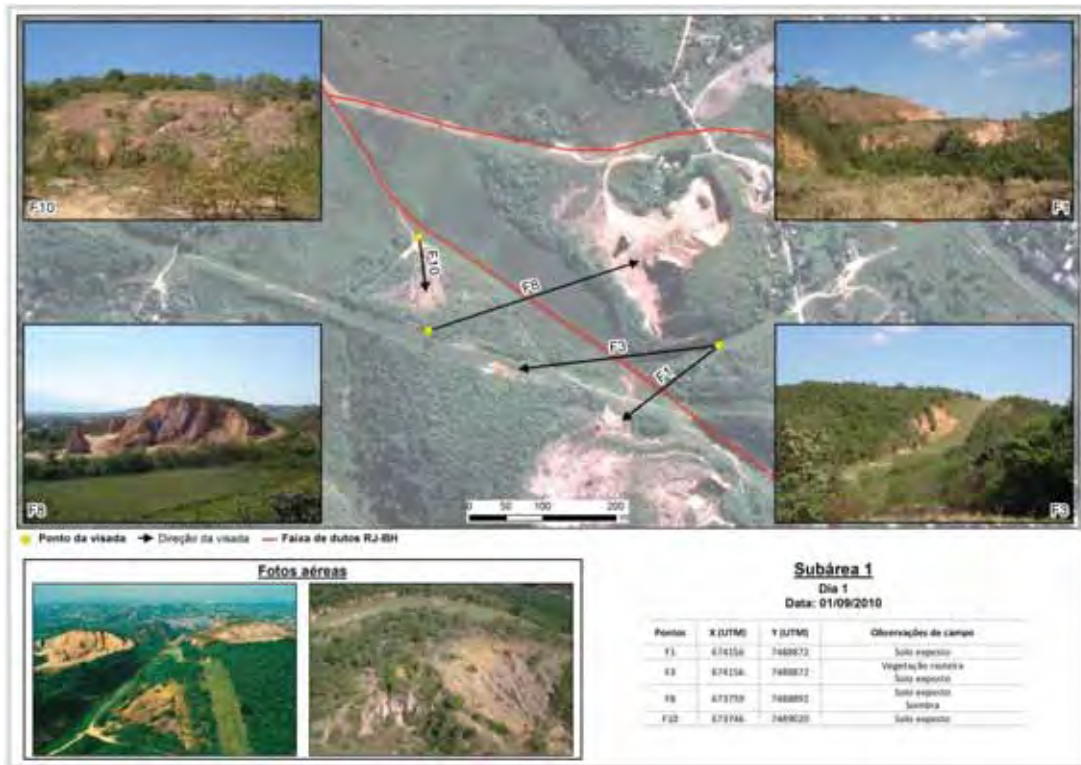


Figura 45 - Detalhes da subárea 2 visitada em campo.

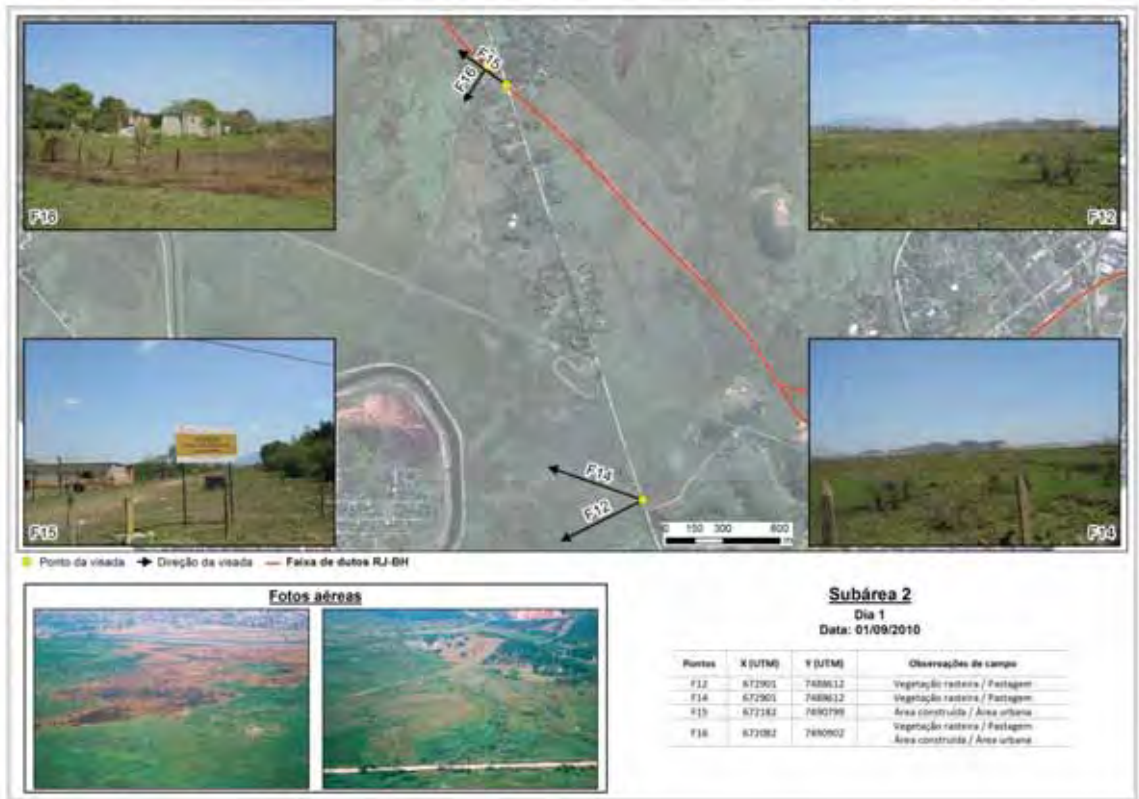




Figura 46 - Detalhes da subárea 3 visitada em campo.

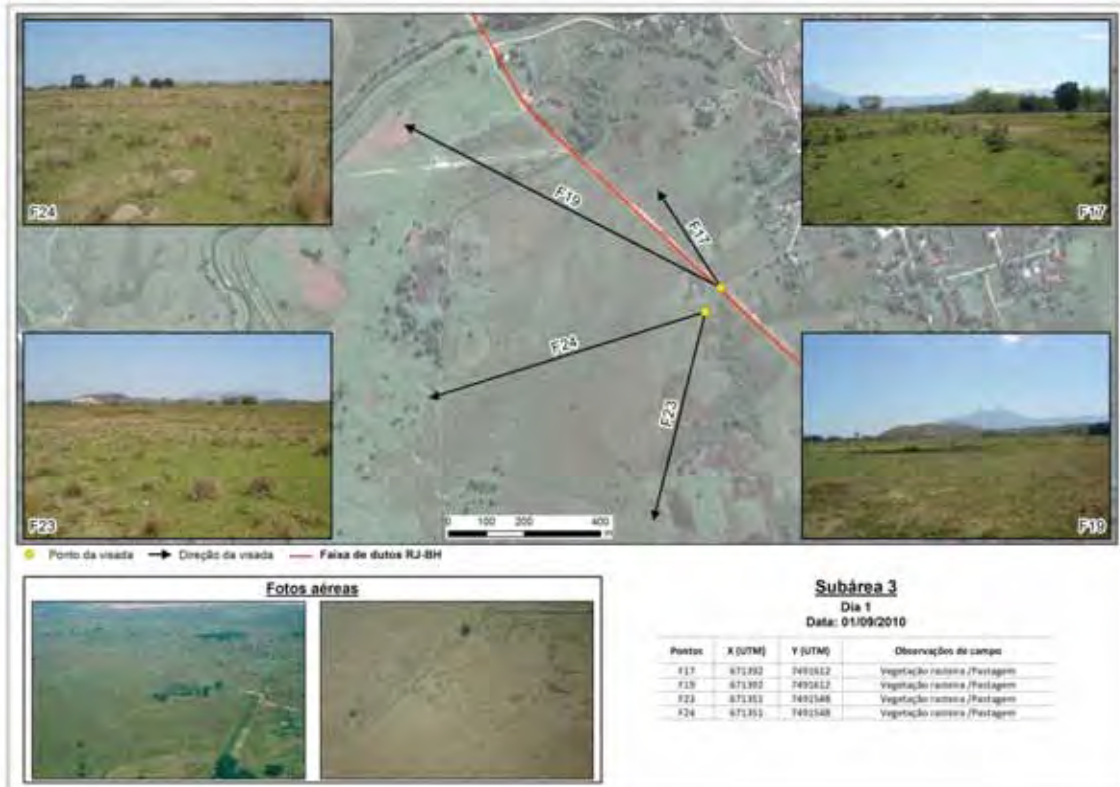


Figura 47 - Detalhes da subárea 4 visitada em campo.



Figura 48 - Detalhes da subárea 5 visitada em campo



Figura 49 - Detalhes da subárea 6 visitada em campo

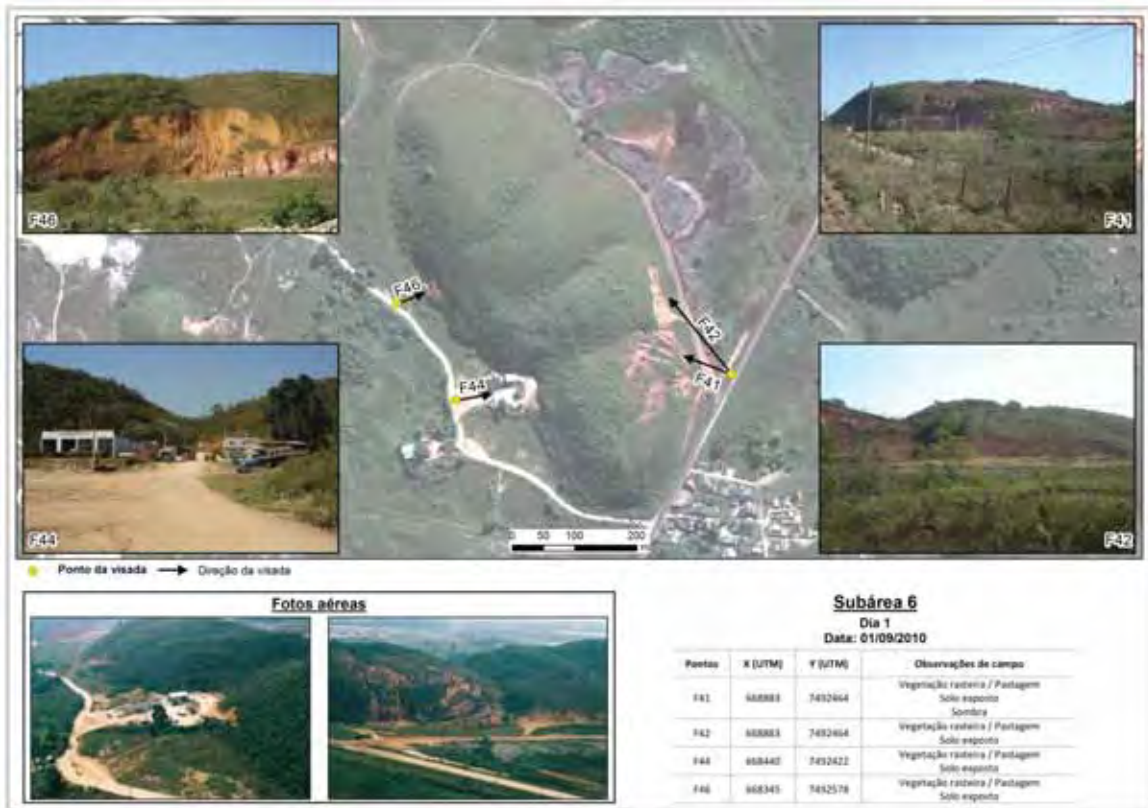


Figura 50 - Detalhes da subárea 7 visitada em campo.

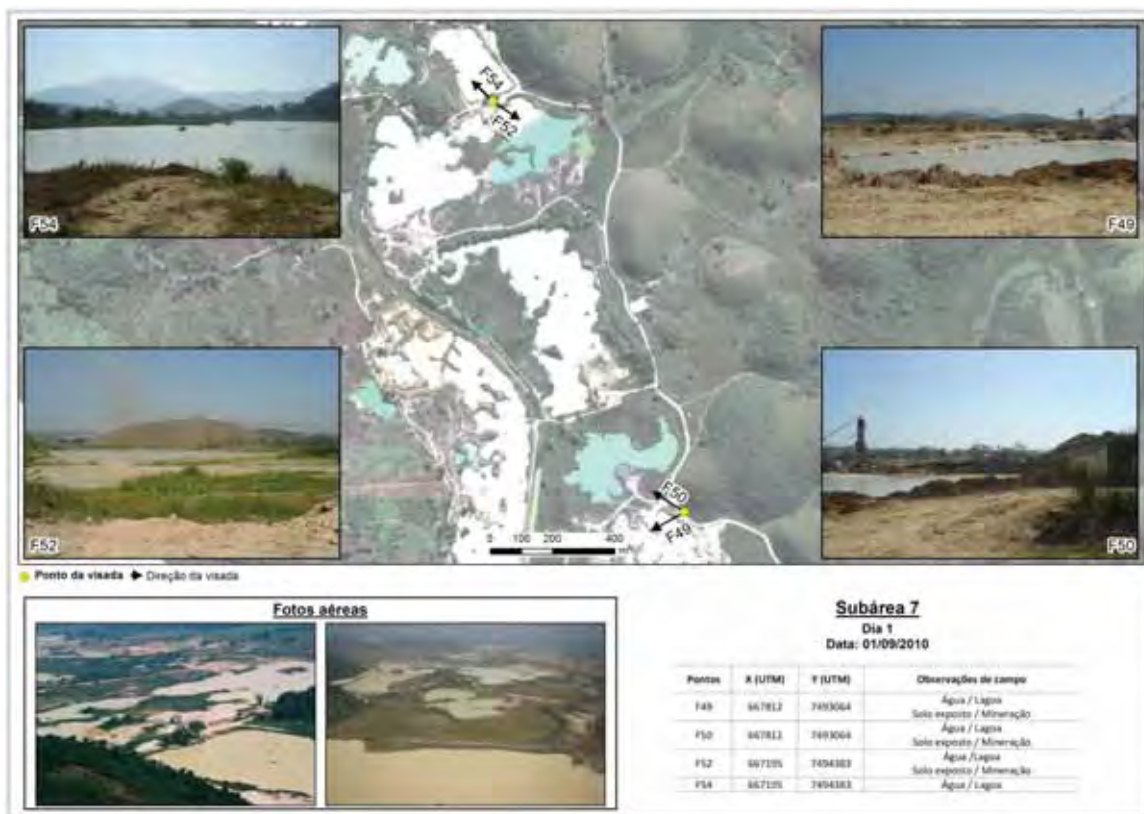


Figura 51 - Detalhes da subárea 8 visitada em campo.

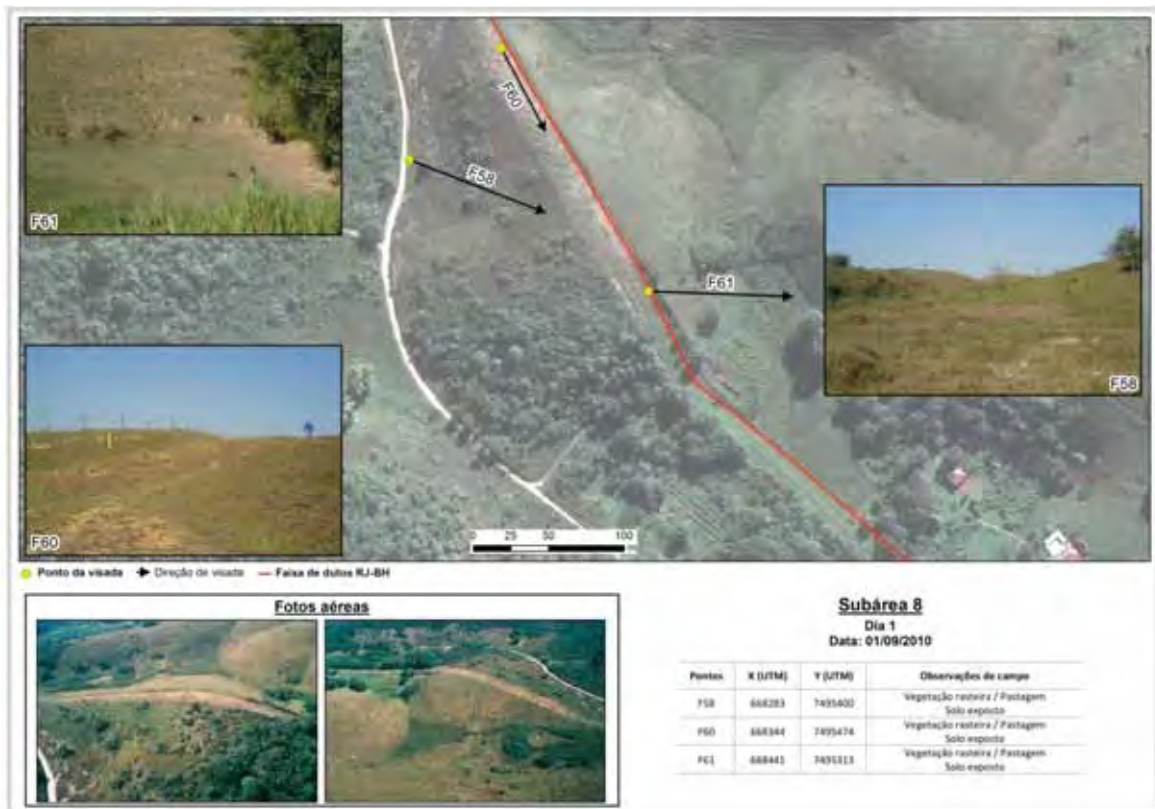


Figura 52 - Detalhes da subárea 9 visitada em campo

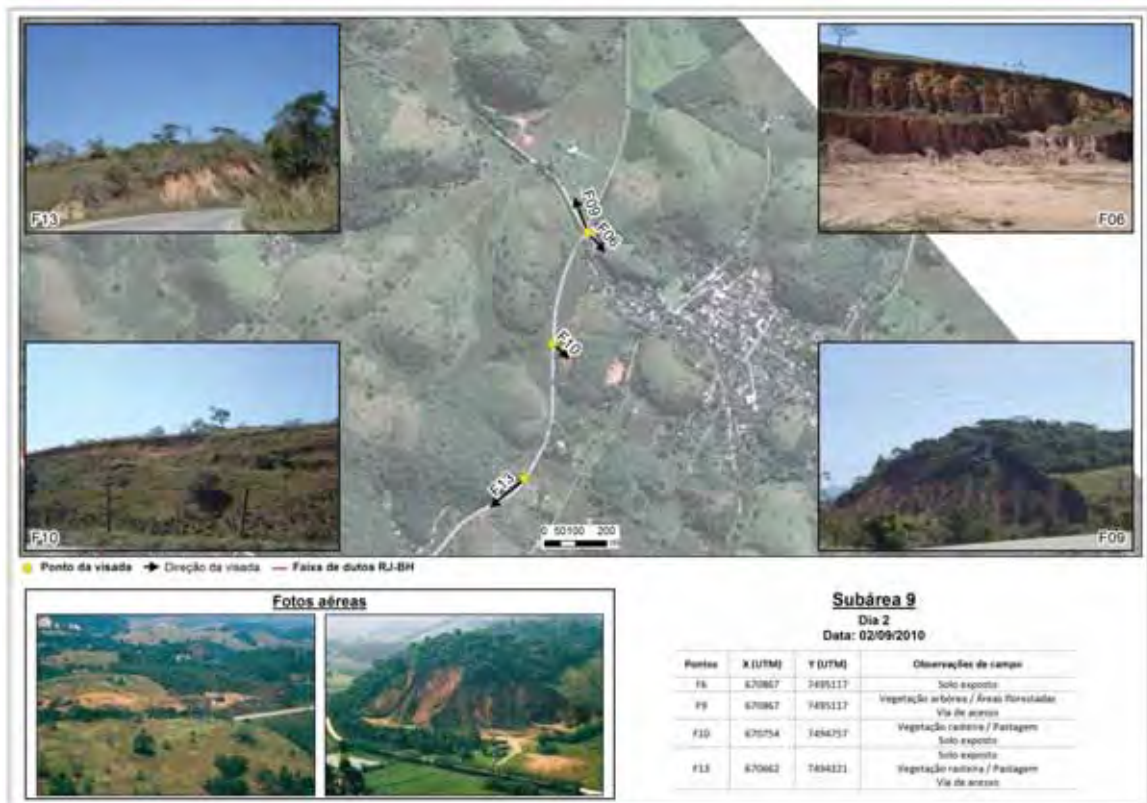


Figura 53 - Detalhes da subárea 9 visitada em campo

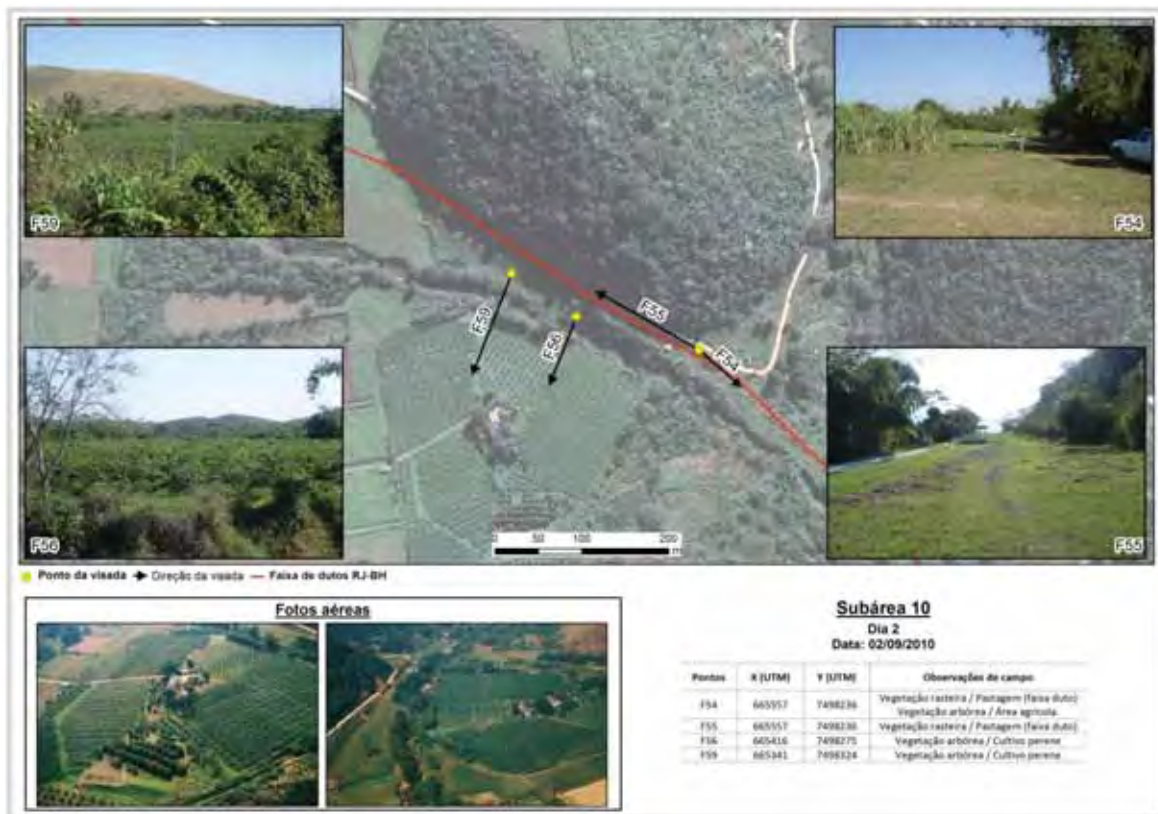




Figura 54 - Detalhes da subárea 11 visitada em campo

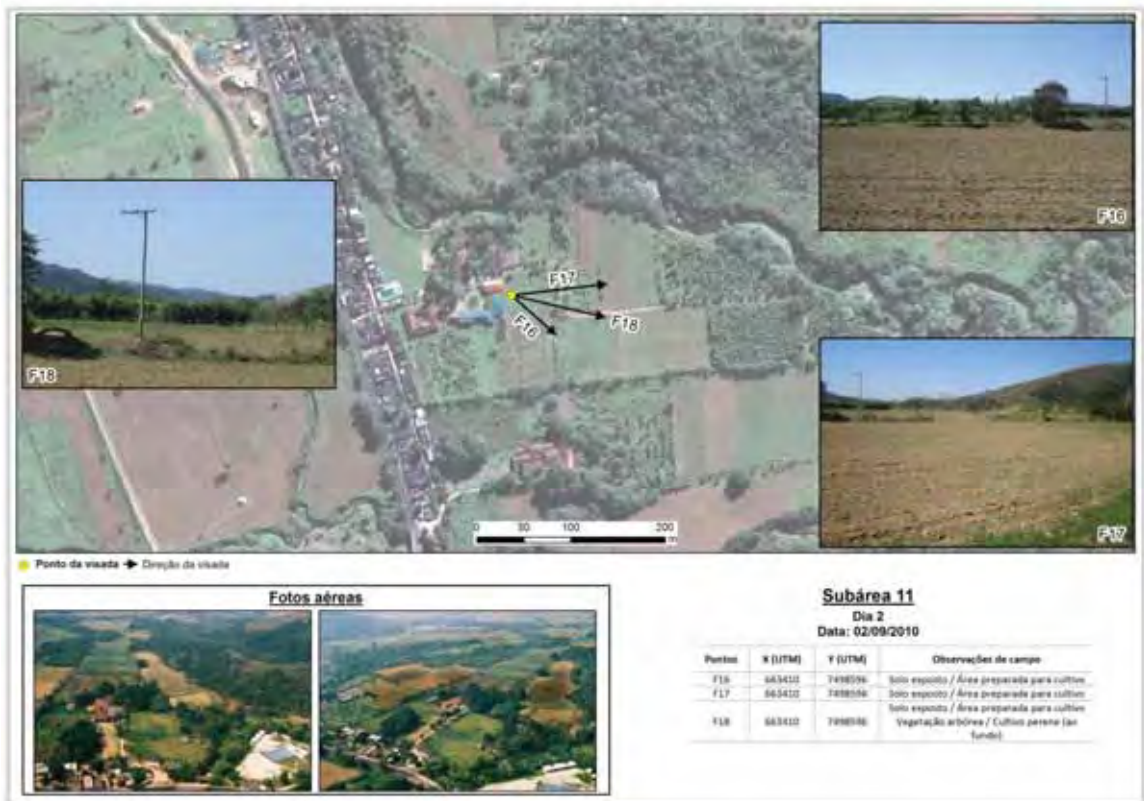


Figura 55 - Detalhes da subárea 12 visitada em campo.

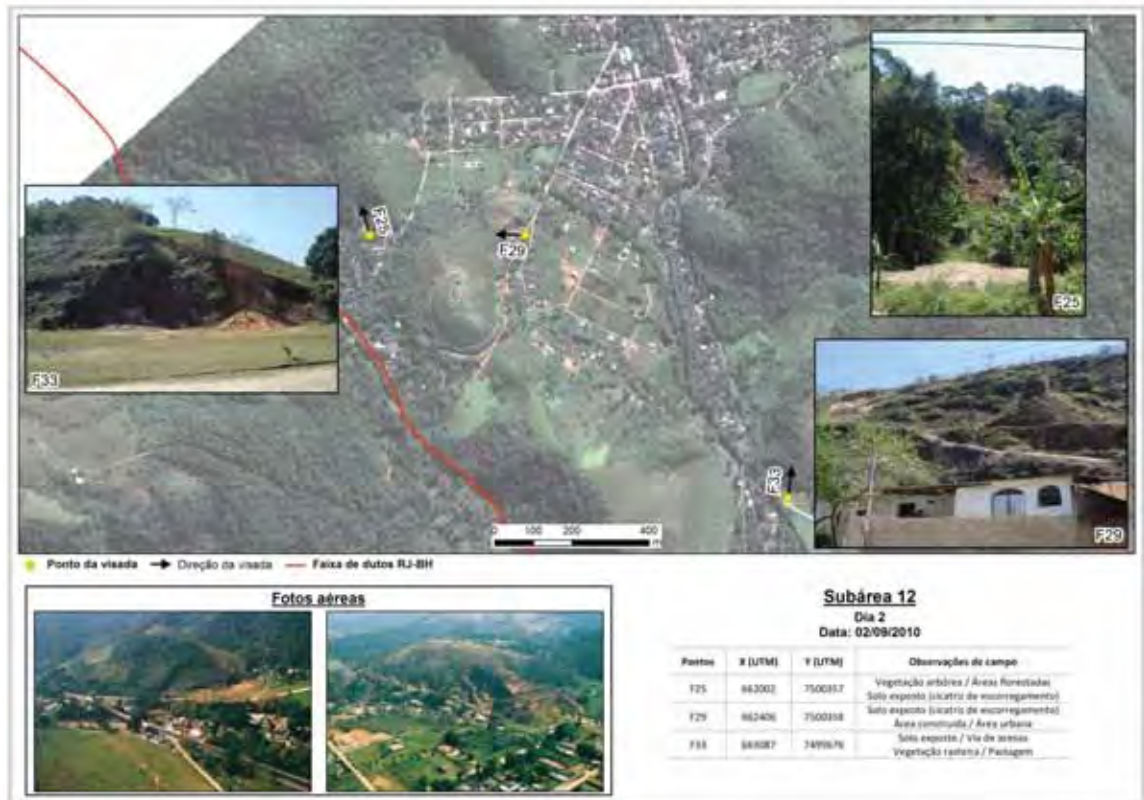


Figura 56 - Detalhes da subárea 13 visitada em campo.



Figura 57 - Detalhes da subárea 14 visitada em campo.

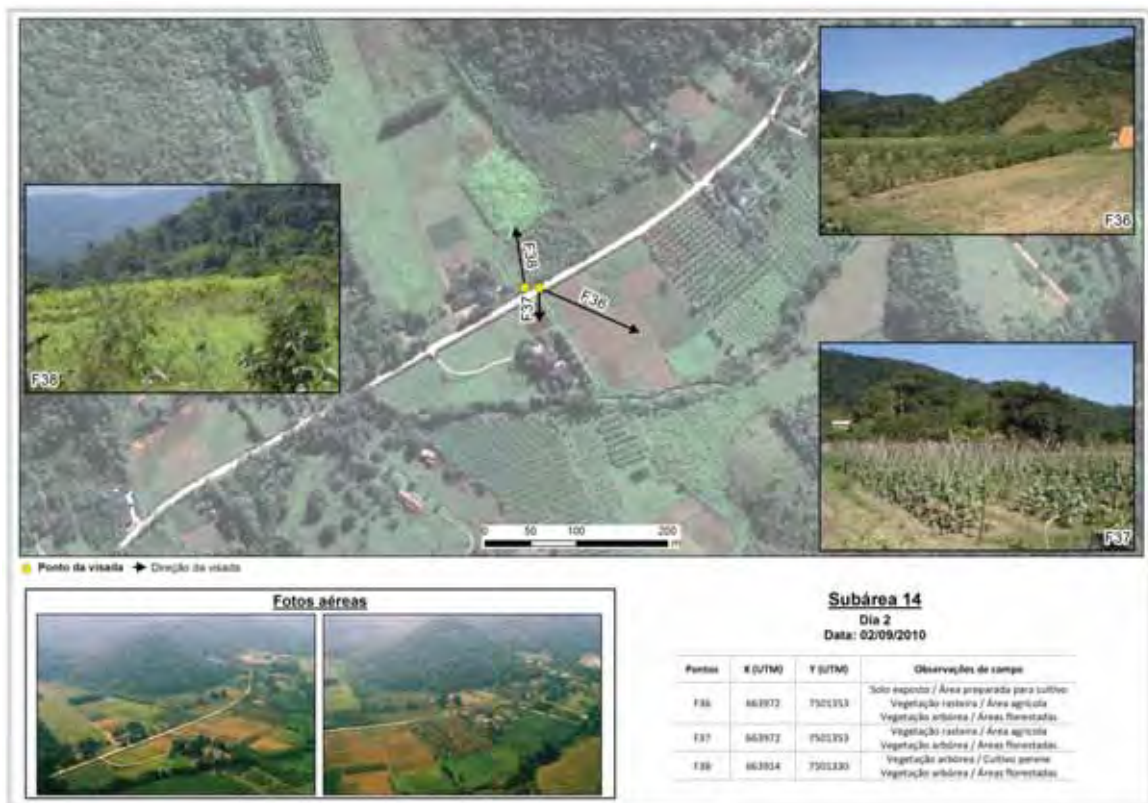


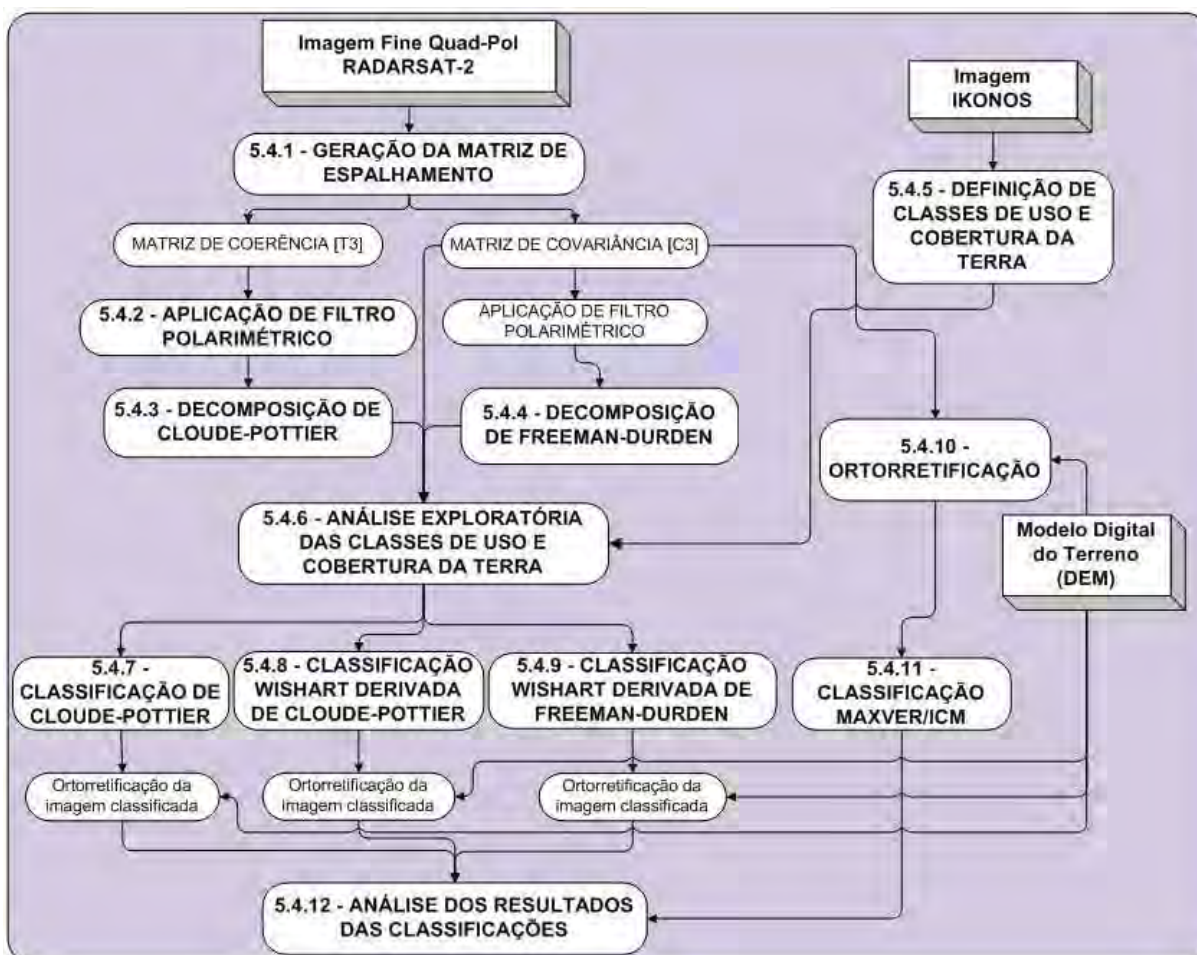
Figura 58 - Detalhes dos pontos aéreos coletados em helicóptero.



#### 5.4 – Processamentos aplicados à imagem RADARSAT-2

O fluxograma (Figura 59) apresenta os processamentos realizados nos dados Fine Quad-Pol do RADARSAT-2 em formato de matrizes de coerência e de covariância.

Figura 59 - Fluxograma de processamentos realizados nos dados RADARSAT-2 Fine Quad-Pol.



A sequência de procedimentos será apresentada conforme itens colocados na Figura 59. A geração da matriz de espalhamento permitiu obter as matrizes de segunda ordem (coerência e covariância). Com a matriz de coerência foi realizada a decomposição de alvos segundo o método proposto por CLOUDE e POTTIER (1997) e, a partir da matriz de covariância pode ser realizada a decomposição de alvos segundo o método proposto por FREEMAN e DURDEN (1998). Ambas as análises foram geradas após a aplicação do filtro polarimétrico.

Com a matriz de covariância sem a aplicação de filtro, foi realizada uma análise exploratória das classes de uso e cobertura da terra, baseada nas classes

definidas para este estudo. A análise exploratória foi útil para entender o comportamento dos alvos de acordo com as amostras, permitir a agregação das classes nos classificadores não supervisionados e treinar o classificador supervisionado utilizado nesta pesquisa.

Todos os resultados das classificações foram analisados com base no índice de concordância Kappa e serão apresentados no capítulo posterior.

#### **5.4.1 – Geração da matriz de espalhamento**

A partir da imagem RADARSAT-2, em formato *Single Look Complex* (SLC), foi gerada a matriz de espalhamento [S], e derivadas dela, como apresentado na seção 3.3, as matrizes de covariância [C4] e de coerência [T4]. Neste trabalho, foi adotado o princípio de reciprocidade (TOUZI et. al., 2004), que considera que a componente de espalhamento HV é igual à VH.

A geração das matrizes [C3] e [T3] foi realizada no SIG PCI® - Módulo PINGEST.

#### **5.4.2 – Aplicação de filtro polarimétrico**

A geração da imagem de covariância e de coerência foi acompanhada da aplicação do filtro polarimétrico de Lee (LEE et. al., 1999a), implementado no PCI® e PolSarPRO e recomendado para dados polarimétricos, principalmente antes da decomposição de alvos incoerentes, segundo TOUZI (2007). Este filtro reduz o ruído *speckle* enquanto preserva a informação espacial e polarimétrica da imagem (LEE et.al., 1999a).

Neste trabalho foram utilizados diferentes tamanhos de janelas de processamento (5x5, 7x7, 9x9). Após a filtragem, o resultado foi analisado estatisticamente, ao avaliar a relação sinal/ruído, que é a razão entre o nível do sinal original e do ruído, das imagens em intensidade. Esta relação (equação 10) quantifica o desempenho do filtro aplicado a partir de medidas de qualidade que consideram a média e a variância da imagem filtrada (SANT'ANNA, 1995). A fórmula para medir essa relação pode ser assim definida:

$$\text{Relação S/R} = \frac{1}{C_v^2} = \frac{\bar{X}^2}{S^2} \quad (10)$$

onde:  $\bar{X}^2$  se refere à média amostral elevada ao quadrado, que está relacionada à qualidade do sinal e  $S^2$  se refere à variância amostral, relacionada ao ruído presente na imagem. Para este cálculo, é escolhida uma área homogênea de onde são extraídos valores de média e desvio-padrão.

#### **5.4.3 – Decomposição de Cloude-Pottier**

A decomposição de Cloude-Pottier (CLOUDE e POTTIER, 1996) foi realizada no aplicativo POLSARPRO versão 4.2. O aplicativo gera a imagem [T3], realiza a filtragem de Lee para dados polarimétricos e exporta as imagens que representam os parâmetros entropia, anisotropia e ângulo alfa. Após esta fase, foi tratada no ENVI® e, baseada nas amostras coletadas, foram gerados planos H/α para cada uma das classes, utilizando as 8 zonas válidas e também, planos H/α para 16 classes, com anisotropia  $A > 0,5$  e  $A < 0,5$ .

#### **5.4.4 – Decomposição de Freeman-Durden**

A decomposição de Freeman-Durden particiona a resposta de cada *pixel* em três mecanismos de espalhamento: superficial ( $P_s$ ), *double-bounce* ( $P_d$ ) e volumétrico ( $P_v$ ). A saída é uma imagem com três canais, onde o valor de cada *pixel* representa o poder da contribuição de cada um dos três mecanismos de dispersão. Este particionamento foi realizado no SIG PCI®, no módulo PSFREDUR.

#### **5.4.5 – Definição das classes de uso e cobertura da terra**

A análise sobre a cobertura e uso da terra tem início com a definição das classes que atendem a pesquisa e estas necessitam de uma conceituação entre “cobertura” e “uso” da terra. ANDERSON et. al.(1976) considera que a cobertura da terra é constituída por elementos da natureza como vegetação (natural e plantada), água, gelo, rocha, areia e superfícies similares, além das construções criadas pelo homem. O uso da terra, segundo BIE et. al. (1996) é associado às atividades



conduzidas pelo homem e relacionadas a uma área específica com a intenção de obter produtos e benefícios, através do uso dos recursos naturais. Pode-se entender, portanto, que o termo “cobertura e uso da terra” é caracterizado pelos arranjos, atividades e insumos que as pessoas realizam em um tipo de cobertura da terra para produzir, mudar ou mantê-la (FAO, 2005).

As classes definidas para esta pesquisa foram baseadas nos trabalhos de ANDERSON et. al. (1976); BOSSARD et. al. (2000) e IBGE (2006) e estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Classes de uso e cobertura da terra de acordo com autores e níveis de classificação.

Autor	1º nível (cobertura)	2º nível (uso e cobertura da terra)	
<b>ANDERSON et. al. (1976)</b>	1. Urbano e área construída 2. Agricultura 3. Pastagem 4. Floresta 5. Água 6. Área alagada 7. Área árida 8. Tundra 9. Área permanentemente congelada	1.1 – Residencial 1.2 – Comercial e serviços] 1.3 – Industrial 1.4 – Transporte, comunicação e utilidades 1.5 – Industrial e comercial complexos 1.6 – Urbano misto 1.7 – Outro urbano 2.1 – Cultura e pastagem 2.2 – Vinícolas, horticulturas, etc. 2.3 – Culturas confinadas 2.4 – Outras culturas 3.1 – Pastagem herbácea 3.2 – Pastagem arbustiva 3.3 – Pastagem mista 4.1 – Florestas decíduais 4.2 – Floresta sempre verde 4.3 – Florestas mistas 5.1 – Córregos e canais 5.2 – Lagos	5.3 – Reservatório 5.4 – Baías e estuários 6.1 – Florestas em área alagada 6.2 – Área alagada não florestal 7.1 – Salinas secas 7.2 – Praias 7.3 – Áreas arenosas e outras praias 7.4 – Afloramento rochoso 7.5 – Pedreiras e cascalheiras 7.6 – Área de transição 7.7 – Área estéril 8.1 – Tundra arbustiva e herbácea 8.2 – Tundra herbácea 8.3 – Tundra com solo exposto 8.4 – Tundra úmida 8.5 – Tundra mista 9.1 – Campos de neves perenes 9.2 - Glaciais
<b>BOSSARD et. al. (2000)</b>	1. Áreas artificiais 2. Agricultura 3. Floresta e áreas semi-naturais 4. Áreas alagadas 5. Corpos d'água	1.1 – Fábricas urbanas 1.2 – Unidades industrial, comercial e transporte 1.3 – Lixões, mineração 1.4 – Áreas vegetadas e não agricultura (parques) 2.1 – Terra arável 2.2 – Cultivos permanentes 2.3 – Pastagens 2.4 – Áreas de agricultura heterogêneas	3.1 – Florestas 3.2 – Vegetação arbustiva e/ou herbácea 3.3 – Espaços abertos com pouca ou nenhuma vegetação 4.1 – Áreas alagáveis (planície de inundação, por exemplo) 4.2 – Áreas alagadas na costa (mangues) 5.1 – lagos, rios, reservatórios, canais 5.2 – Oceano e mar
<b>IBGE (2006)</b>	1. Áreas antrópicas não-agrícolas 2. Áreas antrópicas agrícolas 3. Áreas de vegetação natural 4. Água	1.1 - Áreas urbanizadas 1.2 - Áreas de extração mineral 2.1. Cultura temporária 2.2. Cultura permanente 2.3. Pastagem	2.4. Silvicultura 3.1. Floresta 3.2. Campestre 4.1. Corpos d'água continental

Baseando-se nos sistemas de classificação apresentados, as classes de uso e cobertura da terra definidas para esta pesquisa estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Classes cobertura (1º nível) e uso da terra (2º nível) adotadas nesta pesquisa.

	<b>Classes de cobertura da terra 1º nível</b>	<b>Classes de Uso da terra 2º nível</b>
1	<b>Vegetação arbórea</b>	<b>Áreas florestadas</b>
2		<b>Cultivo Perene</b>
3	<b>Vegetação rasteira</b>	<b>Área agrícola</b>
4		<b>Campo natural</b>
5		<b>Pastagem</b>
6	<b>Solo exposto</b>	<b>Solo preparado para cultivo</b>
7		<b>Mineração</b>
8		<b>Via de acesso</b>
9	<b>Área construída</b>	<b>Área urbana</b>
10	<b>Água</b>	<b>Rios, lagos</b>
11	<b>Sombra</b>	<b>Sombra</b>

Para avaliar a capacidade de discriminar as classes, partiu-se do segundo nível de detalhe (uso da terra). Para este nível, foram coletadas 169 amostras, com base na imagem IKONOS, na imagem do relevo sombreado e na imagem intensidade do RADARSAT-2, de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8 - Características das amostras de treinamento.

<b>CLASSES</b>	<b>Número de amostras (polígonos)</b>	<b>Número de <i>pixels</i></b>
Áreas florestadas	10	940
Cultivo Perene	11	370
Campo natural	16	483
Área agrícola	15	302
Pastagem	23	520
Solo preparado para cultivo	21	338
Mineração	10	213
Vias de acesso	9	9
Área urbana	19	430
Rios, lagos	24	503
Sombra	11	1623
<b>Total</b>	<b>169</b>	<b>5731</b>

As amostras de treinamento foram utilizadas para uma análise de toda a área de estudo e também de acordo com as sub-regiões definidas de acordo com a

declividade. Sendo assim, a distribuição das amostras de treinamento de acordo com as sub-regiões pode ser observada na Figura 60 e os dados dos polígonos são apresentados na Tabela 9.

Figura 60 - Distribuição das amostras de treinamento na área de estudo.

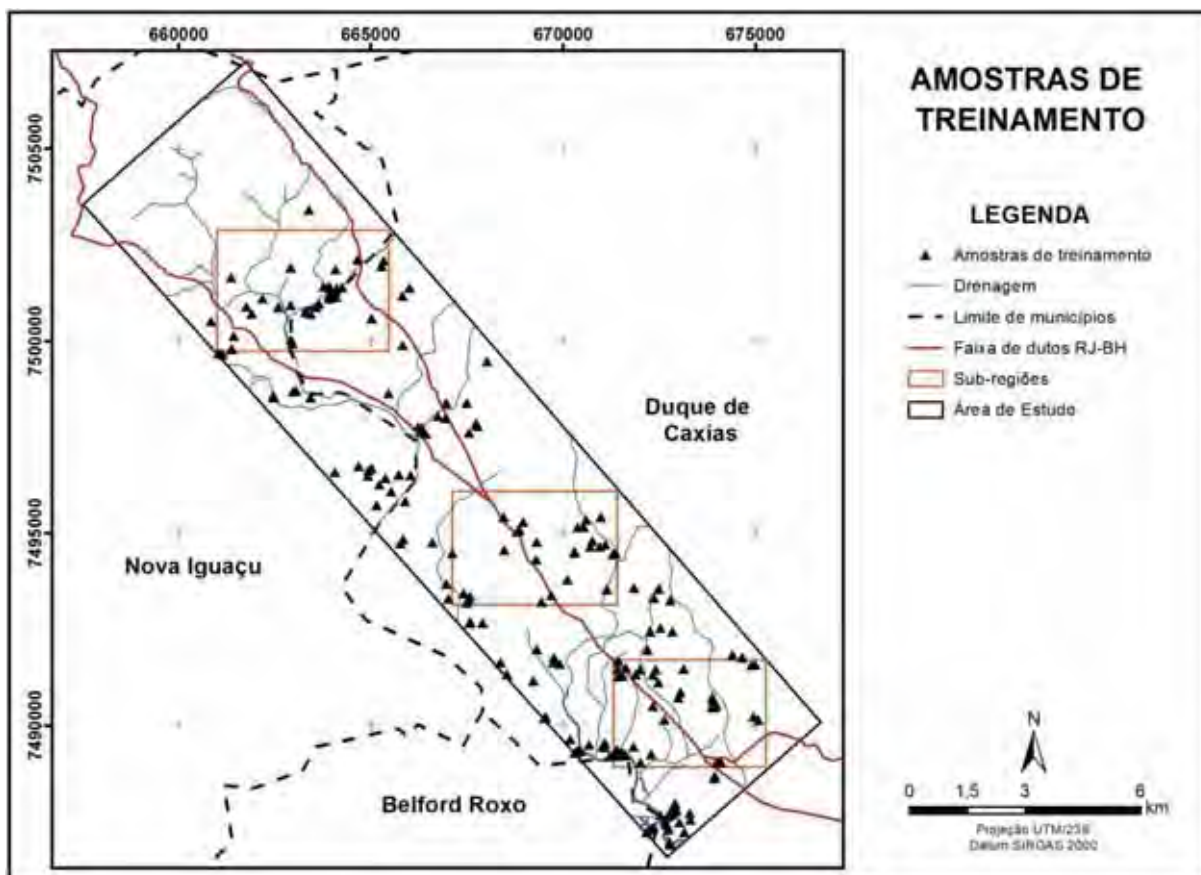


Tabela 9 - Número de amostras (polígonos) de treinamento de acordo com a sub-região.

CLASSES	Sub-região 1	Sub-região 2	Sub-região 3
Áreas florestadas	3	5	4
Cultivo Perene	5	0	0
Área agrícola	4	5	4
Campo natural	0	2	4
Pastagem	3	8	2
Solo para cultivo	3	0	3
Mineração	0	2	2
Vias de acesso	1	3	2
Área urbana	1	4	5
Rios, lagos	1	4	2
Sombra	6	0	0
<b>Total</b>	<b>27</b>	<b>33</b>	<b>28</b>

#### **5.4.6 – Análise exploratória das classes de uso e cobertura da terra**

A análise exploratória das classes de uso e cobertura da terra foi baseada na interpretação dos dados em sigma zero ( $\sigma^0$ ), que varia em função dos parâmetros do sensor e propriedades dos alvos, e representa o retroespalhamento captado pelo sensor SAR.

As etapas para a elaboração da imagem em sigma zero e análise das amostras baseada nesta imagem foram:

- 1 Geração da matriz de espalhamento;
- 2 Geração da matriz de covariância [C3];
- 3 Cálculo da imagem sigma zero para as polarizações HH, HV e VV (diagonal principal da matriz [C3]) dada pela equação (11):

$$dB=10*\log_{10} (DN) \quad (11)$$

onde DN é o número digital da imagem intensidade

- 4 Ortorretificação das imagens sigma zero nas polarizações HH, HV e VV;
- 5 Cálculo da média do valor de sigma zero para cada amostra (módulo VIMAGE do aplicativo PCI® Geomática);
- 6 Geração dos gráficos.

A análise exploratória das classes de uso e cobertura da terra incluiu também as análises dos parâmetros entropia, anisotropia, ângulo  $\alpha$  e também da proporção de contribuição de cada mecanismo de espalhamento (superficial, *double-bounce* e volumétrico) para cada classe.

Com esta análise inicial pode-se observar o comportamento dos alvos e definir pelo agrupamento ou separação de classes.

#### **5.4.7 – Classificação de Cloude-Pottier**

Para a classificação de dados polarimétricos complexos por decomposição de alvos de Cloude-Pottier, o algoritmo PSCLOPOT do PCI® se baseia na partição do espaço entropia, anisotropia e ângulo  $\alpha$ . O classificador calcula, primeiramente, os valores de 4 parâmetros (entropia -H, ângulo alfa- $\alpha$ , ângulo beta- $\beta$ , e anisotropia-A) para cada *pixel*. Se a extração dos quatro parâmetros ocasiona falha em um *pixel*,

a este é atribuído à classe 0 e é ignorada a partir de transformação. Para os demais *pixels*, baseado nos seus respectivos valores de  $H$  e  $\alpha$ , o classificador implementado no PCI® atribui cada *pixel* a uma das nove classes (oito válidas) definidas no plano  $H/\alpha$  (vide seção 3.5.3.2). Uma nova divisão é então efetuada, considerando-se duas classes de anisotropia:  $a$  (alta anisotropia) e  $b$  (baixa anisotropia)

Por conta das classes serem mutuamente exclusivas e cobrirem todo o espaço  $H-\alpha-A$ , existe apenas uma classe a ser atribuída a cada *pixel*. Se a classe corresponde à zona não válida, o *pixel* de saída terá a classe 0 (zero). De acordo com os limites dos parâmetros  $H, A$  e  $\alpha$ , são geradas 17 classes (16 válidas).

#### **5.4.8 – Classificações de Wishart**

A classificação de Wishart é um método semelhante à probabilidade de classificação supervisionada MaxVer, com o diferencial que a distância medida entre as classes é calculada para dados polarimétricos, supondo a distribuição de Wishart para os dados em formato de matriz de covariância [C3]. Esta classificação utiliza amostras fornecidas por outras classificações e no algoritmo implementado no PCI® pode-se partir da classificação de Cloude-Pottier ou da decomposição de alvos de Freeman-Durden.

##### **5.4.8.1 – Classificações de Wishart derivada de Cloude-Pottier**

A classificação e Wishart derivada da decomposição de Cloude-Pottier pode ser efetuada a partir de 8 classes definidas pelo plano  $H/\alpha$ , ou das 16 classes, quando a anisotropia é também considerada. No presente trabalho esta classificação foi efetuada em 16 classes utilizando o módulo *SAR Radar Analysis - PSSWIS* do aplicativo PCI®.

##### **5.4.8.2 – Classificações de Wishart derivada de Freeman-Durden**

Para a Wishart derivada da decomposição de Freeman-Durden, cada mecanismo de espalhamento dominante é dividido em três subclasses, gerando uma imagem classificada em nove classes. As três primeiras bandas estão relacionadas ao espalhamento do tipo superficial, as três seguintes, ao espalhamento do tipo *double-bounce* e as três últimas representam o espalhamento volumétrico. Este

processamento foi realizado no módulo *SAR Radar Analysis - PSSWIS* do aplicativo PCI®.

#### **5.4.9 – Ortorretificação das imagens**

A ortorretificação de todas as imagens foi realizada no módulo Orthoengine, do PCI® utilizando o modelo *Rational Function* que é uma modelagem matemática para correção geométrica que pode ser aplicada em imagens SAR. Esta técnica constrói a relação entre os *pixels* e as localizações no terreno baseada em efemérides e pontos de controle presentes nas imagens RADARSAT-2 (CHENG e TOUTIN, 2010).

Neste modelo são necessários os RPCs (*Rational Polynomial Coeficients*) da imagem RADARSAT-2, as imagens a serem ortorretificadas e o DEM. Os dados gerados foram projetados para Projeção UTM - datum WGS84 – zona 23 S e espaçamento de *pixel* nominal de 8 metros.

Uma vez que o processo de ortorretificação utilizando RPCs não apresenta erro residual médio, que avalia o deslocamento com relação a um referencial, a validação das imagens corrigidas foi realizada adotando um conjunto de procedimentos:

- a) Registro da carta topográfica CAVA (IBGE, 2010a), na escala 1:50.000, utilizando 16 pontos de controle e erro residual médio de 0,15 *pixel*;
- b) Comparação da carta topográfica registrada e imagem RADARSAT-2 ortorretificada (medidas de distância entre feições);
- c) Cálculo do erro médio entre medidas de distância da topográfica com relação imagem RADARSAT-2 de 1 metro;

Levando em consideração o erro de 0,15 *pixels* no registro da topográfica e o erro médio calculado a partir de distâncias da topográfica para a imagem RADARSAT-2 que foi de 1 metro, têm-se um erro cumulativo que não ultrapassa o valor aceitável pela literatura e que depende do tipo de utilização do usuário e área analisada (SPRING, 2006).

#### **5.4.10 – Classificação MaxVer-ICM**

Esta classificação combina o classificador de Máxima Verossimilhança (MaxVer) ao classificador contextual ICM (*Iterated Conditional Modes*). O algoritmo

ICM parte de uma classificação inicial (neste caso a classificação MaxVer) e a refina, substituindo a classe associada a cada *pixel* por aquela que maximiza a distribuição *a posteriori*, considerando-se o nível de cinza e as classes dos *pixels* vizinhos. Este classificador, implementado no aplicativo SPRING, foi utilizado nesta tese para a classificação das imagens em amplitude nas quatro polarizações.

O objetivo desta classificação foi comparar os resultados das classificações geradas a partir das imagens complexas (matrizes de coerência e covariância) que possuem informação de amplitude e fase, com as geradas a partir das imagens que contem somente a informação da amplitude do sinal.

#### 5.4.11 – Análise dos resultados das classificações

Para avaliar a concordância das classificações temáticas foi utilizado o índice de concordância *Kappa* (HUDSON e RAMM, 1987) e o valor de acurácia global, calculados utilizando as amostras de teste. O índice *Kappa* é gerado a partir da matriz de confusão e os valores são posteriormente comparados a uma Tabela de referência (Tabela 10) que avalia a qualidade das classificações (LANDIS e KOCH, 1977).

Tabela 10 - Índice de concordância Kappa e qualidade das classificações.

	<b>Valor do <i>Kappa</i></b>	<b>Qualidade da classificação</b>
Fonte:	< 0,01	Péssima
	0,01 a 0,20	Ruim
	0,21 a 0,40	Razoável
	0,41 a 0,60	Boa
	0,61 a 0,80	Muito Boa
	0,81 a 1,00	Excelente

Adaptado de LANDIS E KOCH (1977)

Além da avaliação utilizando o índice de concordância *Kappa*, as informações coletadas e observadas no trabalho de campo permitiram avaliar visualmente os resultados das classificações, uma forma qualitativa de análise.



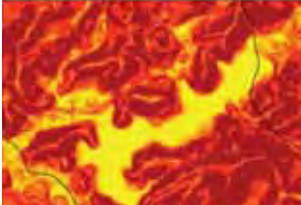


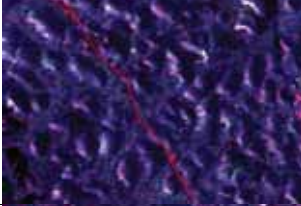
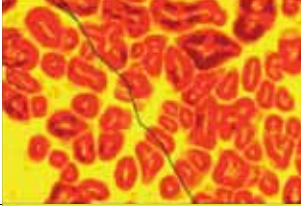
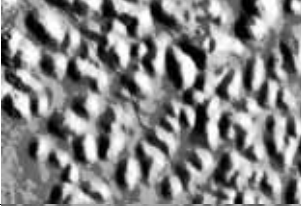

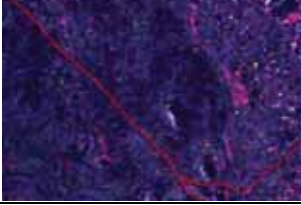
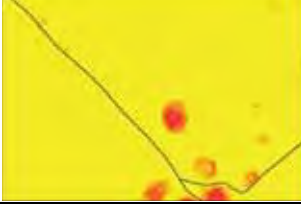
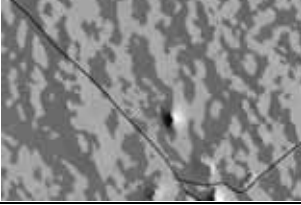


## 6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a análise dos resultados, a área de estudo foi dividida em sub-regiões de acordo com a declividade (Figura 61). As características das sub-regiões são:

- **Sub-região 1:** declividade maior que 20%, relevo fortemente ondulado a montanhoso, refere-se ao domínio de escarpas serranas; o duto corta a região em NE e SW e predomínio de sombra e vegetação preservada;
- **Sub-região 2:** declividade entre 12 e 20%, relevo suavemente ondulado a ondulado, que corresponde aos domínios de colinas isoladas e colinas dissecadas, morros e morrotes baixos;
- **Sub-região 3:** declividade entre 0 e 6%, com relevo de várzea, considerado plano e suavemente ondulado, que engloba as planícies aluviais e as planícies colúvio-alúvio-marinhas, com morros isolados.

Figura 61 - Características da área de estudo, de acordo com a declividade e imagem do relevo sombreado.

Sub-regiões	Imagem IKONOS	Imagem RADARSAT-2 RHH GHV BVV	Declividade	Imagem do relevo sombreado
1 Declividade Alta				
2 Declividade Moderada				
3 Declividade Baixa				

### 6.1 – Classes de uso e cobertura da terra nas sub-regiões

Nas sub-regiões definidas para esta pesquisa foram encontradas diferentes classes de uso e cobertura da terra, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Lista das classes de uso e cobertura encontradas em cada sub-região analisada.

Sub-região	Classes de uso e cobertura encontradas
1 Declividade alta	<p>Área florestada Cultivo perene Área agrícola Pastagem Solo preparado para cultivo Vias de acesso Área urbana Sombra</p>
2 Declividade média	<p>Área florestada Campo natural Área agrícola Pastagem Mineração Vias de acesso Área urbana Água</p>
3 Declividade baixa	<p>Área florestada Campo natural Área agrícola Pastagem Solo preparado para cultivo Mineração Vias de acesso Área urbana Água</p>

A classe *área florestada* aparece em todas as sub-regiões assim como as classes *área agrícola*, *pastagem*, *vias de acesso* e *área urbana*. Já a classe *cultivo perene* aparece apenas na sub-região 1, nos vales, entre declividades altas, pois o clima favorece as plantações e nas outras sub-regiões, *cultivos perenes* se tornam dificultados por conta das áreas sujeitas a alagamentos.

A classe *sombra*, por exemplo, aparece nitidamente na sub-região 1, onde a declividade maior ocasiona efeitos inerentes ao processo de aquisição da imagem SAR, e o sombreamento é o mais evidente. Nas demais regiões, não ocorrem áreas desta classe.

Para a classe *água* foi possível adquirir amostras consistentes apenas nas sub-regiões 2 e 3. Na sub-região 1, a difícil coleta desta classe não permitiu amostra para comparação assim como as classes *mineração* e *campo natural* que não aparecem em altas declividades.

## 6.2 – Avaliação da relação sinal/ruído

Para avaliação da relação sinal/ruído das imagens em intensidade filtradas foram delimitadas áreas homogêneas nas imagens polarizações HH, HV e VV, e calculados os valores para a análise da relação sinal/ruído, conforme apresentado Tabela 12.

Tabela 12 - Dados estatísticos para cálculo da relação sinal/ruído em região homogênea das imagens filtradas com filtro Lee e diferentes tamanhos de janela.

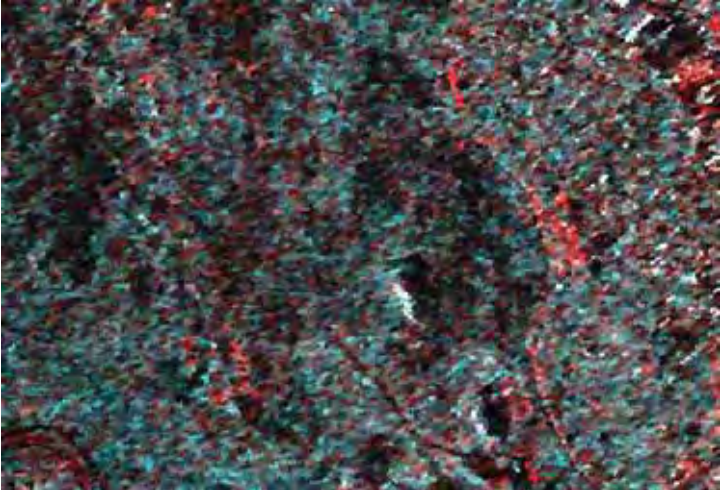
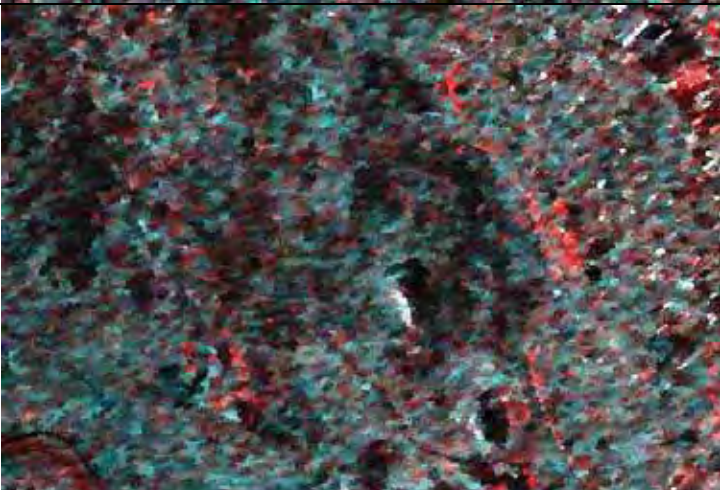
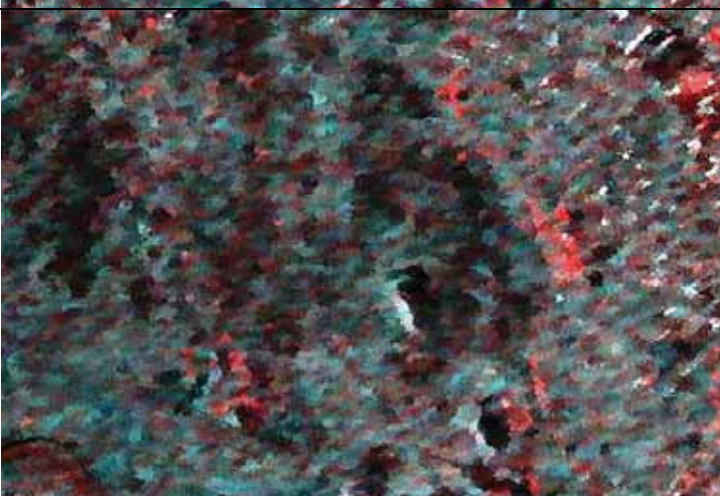
Parâmetros estatísticos	Polarização HH	Polarização HV	Polarização VV
<b>JANELA 5X5</b>			
Sinal/Ruído	<b>3,02</b>	<b>0,26</b>	<b>1,16</b>
<b>JANELA 7X7</b>			
Sinal/Ruído	<b>7,04</b>	<b>0,35</b>	<b>2,11</b>
<b>JANELA 9X9</b>			
Sinal/Ruído	<b>13,26</b>	<b>0,64</b>	<b>4,21</b>

As polarizações possuem comportamento diferenciado com relação ao sinal-ruído. As polarizações HH e VV normalmente apresentam maior informação enquanto as polarizações HV e VH são mais ruidosas, e com menores valores da relação sinal-ruído. Ao analisar o tamanho da janela de filtragem também pode ser observado que quanto maior a janela de processamento, maior a relação sinal-ruído, conseqüentemente menor o *speckle* presente na cena.

No entanto, a redução do *speckle* pode aumentar o efeito “borrado”, uma vez que qualquer aplicação de filtro pressupõe alguma degradação e perda de informação na imagem. Por isso, além da avaliação estatística também foi observado e analisado o aspecto visual da imagem após a filtragem.

A Figura 62 apresenta uma região da imagem (composição colorida HH-R/HV/G-VV-B) de acordo com o tamanho de janela de filtragem aplicada.

Figura 62 - Resultado visual (HHR-HVG-VVB) da aplicação de filtro polarimétrico Lee, com diferentes tamanhos de janela de processamento.

<b>Polarizações/janela filtro</b>	<b>Imagem Intensidade RADARSAT-2 (composição colorida HHR-HVG-VVB)</b>
<b>Filtro Lee Janela 5x5 pixels</b>	 A colorized radar image showing a dense, noisy texture. The colors are primarily dark green and blue, with scattered red and white pixels. The overall appearance is grainy and noisy.
<b>Filtro Lee Janela 7x7 pixels</b>	 A colorized radar image showing a dense, noisy texture. The colors are primarily dark green and blue, with scattered red and white pixels. The overall appearance is grainy and noisy.
<b>Filtro Lee Janela 9x9 pixels</b>	 A colorized radar image showing a dense, noisy texture. The colors are primarily dark green and blue, with scattered red and white pixels. The overall appearance is grainy and noisy.

Apesar da relação sinal/ruído ter sido maior nas polarizações filtradas com janela de 9x9, foi observado que os filtros com janelas menores apresentavam menor alteração na textura da imagem e efeito menos “borrado”.

Como forma de estabelecer uma opção coerente, qualitativa e quantitativamente, optou-se por realizar os processamentos com as imagens filtradas com janela 5x5 e 7x7 e avaliar esta diferença nos resultados obtidos com as classificações.

A imagem filtrada com janela de 5x5 *pixels* preservou alguns detalhes, conforme observado na Figura 62, que mostra a imagem gerada a partir da imagem [C4], a imagem filtrada com janela 5x5 *pixels* e a imagem filtrada com janela 7x7 *pixels*, de acordo com as sub-regiões adotadas neste trabalho.

### **6.3 - Decomposição de alvos de Cloude-Pottier**

As Figuras 63 e 64 apresentam as imagens  $\alpha$ , H e A e seus histogramas, derivadas da filtragem da matriz de coerência com filtros de janelas 5x5 e 7x7, respectivamente. Os valores de máximo, mínimo, média e desvio padrão de cada um desses parâmetros são apresentados na Tabela 13.

A distribuição dos *pixels* da área de estudo no plano H/ $\alpha$  é apresentada na Figura 63a e 64a para a filtragem com janela 5x5 e na Figura 63b e 64b para a filtragem com janela 7x7.

Através desses gráficos e tabela pode-se observar que, como era de se esperar, a variabilidade dos valores é menor quando a janela 7x7 é utilizada. Este efeito do aumento da janela fica bem evidente quando observamos a dispersão dos *pixels* no plano H/ $\alpha$ , apresentado na Figura 65. Se, por um lado, o aumento da janela de filtragem diminui o ruído e, conseqüentemente, a dispersão dos dados, por outro lado pode dificultar a discriminação dos alvos menos representativos na imagem.

Tabela 13 - Parâmetros estatísticos das imagens □, entropia e anisotropia.

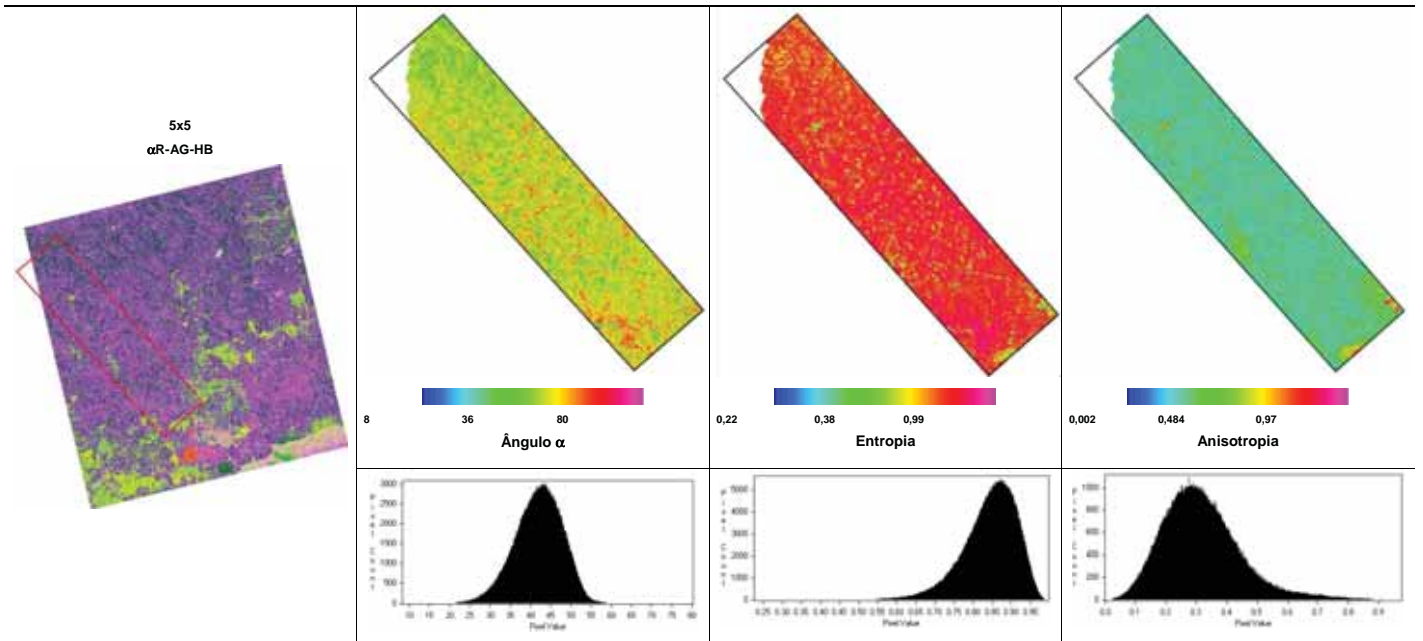
Imagens	Parâmetros	Filtro 5x5	Filtro 7x7
$\alpha$	Mínimo	$8^0$	$14,7^0$
	Máximo	$80^0$	$71,2^0$
	Média	$41,1^0$	$41,6^0$
	Desvio padrão	$5,96^0$	$4,68^0$
Entropia	Mínimo	0,22	0,42
	Máximo	0,99	0,99
	Média	0,83	0,87
	Desvio padrão	0,074	0,05
Anisotropia	Mínimo	0,002	0,0006
	Máximo	0,97	0,91
	Média	0,26	0,19
	Desvio padrão	0,11	0,09

Pode-se observar que os valores do ângulo  $\alpha$  distribuem-se em torno de  $41^0$ , mostrando que grande parte dos mecanismos que atuam na região em estudo é volumétrica. Entretanto, a grande variabilidade de  $\alpha$  ( $8^0 < \alpha < 80^0$  para a janela 5x5 e  $14,7^0 < \alpha < 71,2^0$  para a janela 7x7), indica a presença também dos espalhamentos superficiais e de *double-bounce*, demonstrando a heterogeneidade dos alvos.

Os altos valores de entropia indicam que, para a maior parte da área de estudo, existe mais de um mecanismo de espalhamento. Os valores de baixa entropia, que coincidem nos locais com baixos valores de  $\alpha$ , ocorrem principalmente para as regiões de escarpa, no entorno da sub-região 1, e colinas dissecadas, por conta dos efeitos de encurtamento e inversão de rampa.

Segundo LEE e POTTIER (2009), a anisotropia pode ser uma fonte de discriminação de alvos quando a entropia é maior que 0,7. Como, no caso da área de estudo, grande parte dos valores de entropia é alto, a anisotropia pode aumentar a capacidade de distinguir diferentes tipos de espalhamento.

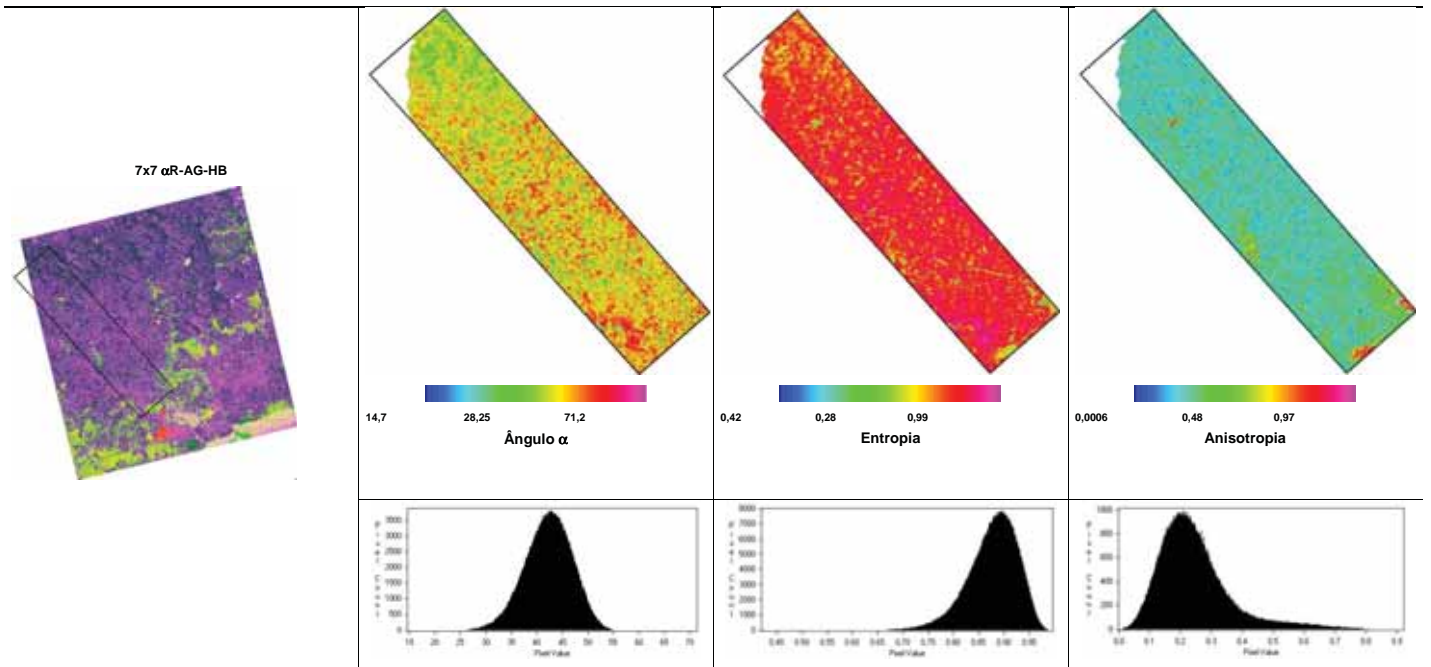
Figura 63 - Imagem IKONOS e composição colorida  $\alpha$ -R, A-G e H-B. Imagens dos parâmetros ângulo  $\alpha$ , entropia e anisotropia geradas a partir de imagem filtrada com janela de 5x5 pixels e respectivos histogramas de frequência de



pixels.

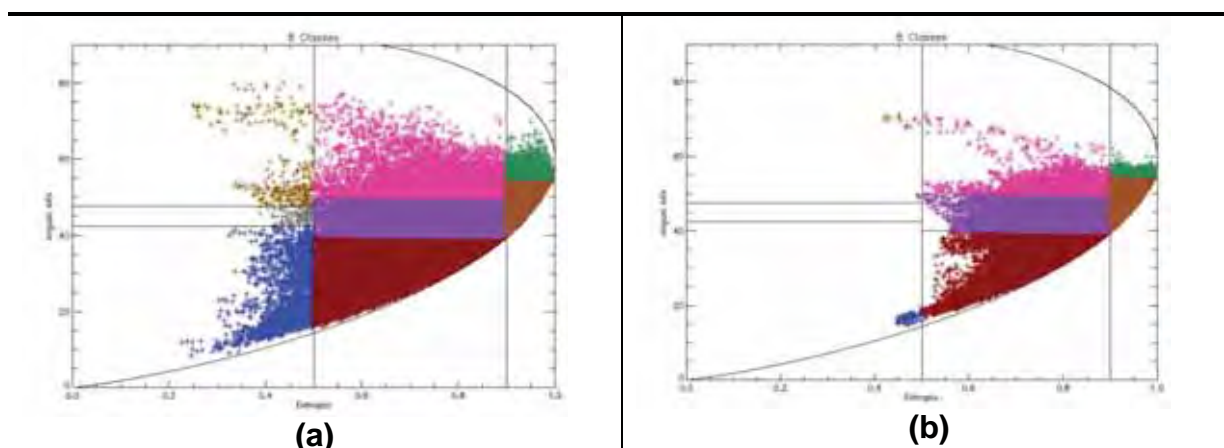


Figura 64 - Imagem IKONOS e composição colorida  $\alpha$ -R, A-G e H-B. Imagens dos parâmetros ângulo  $\alpha$ , entropia e anisotropia geradas a partir de imagem filtrada com janela de 7x7 pixels e respectivos histogramas de frequência de pixels.



A partir dos *pixels* da área de estudo também foram gerados planos  $H/\alpha$  para avaliar o comportamento, baseado nos tipos de espalhamento e na aleatoriedade dos alvos. A Figura 65 apresenta o comportamento de todos os *pixels* da área de estudo, nas oito classes definidas pelo plano  $H/\alpha$ , geradas a partir da imagem filtrada com janelas 5x5 e 7x7.

Figura 65 - Distribuição dos *pixels* da área de estudo no plano  $H/\alpha$  a partir de imagens filtradas com janelas de (a) 5x5 e (b) 7x7.

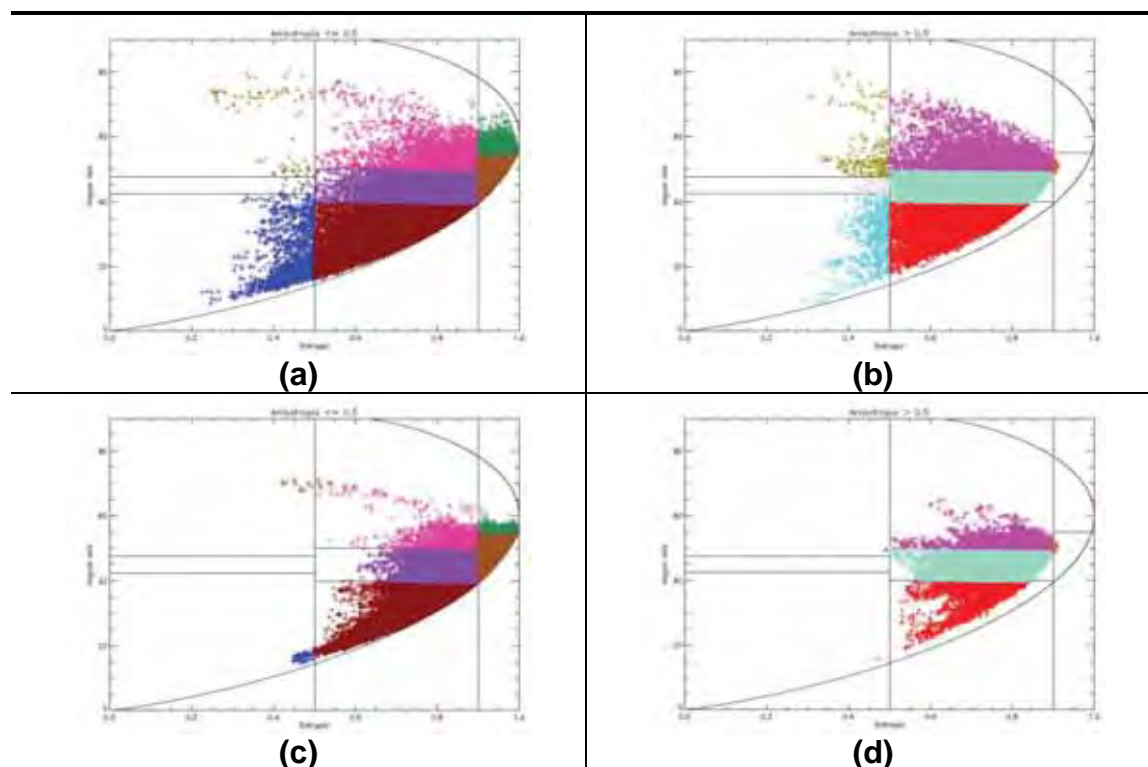


Fica evidente que a filtragem altera a dispersão dos valores de  $H/\alpha$  (Figura 65b) e que os alvos se comportam de forma aleatória. Quando a janela da filtragem é de 5x5 (Figura 65a) o comportamento é o mesmo, porém a dispersão é maior.

Para entender melhor a dispersão das classes no plano  $H/\alpha$ , também foram gerados planos para cada uma das amostras a partir das imagens filtradas 5x5 e 7x7 (Figura 72) e, como a entropia nos dois casos é alta, optou-se também por analisar os alvos com anisotropia maior e menor que 0,5 (Figuras 73 e 74).

As Figuras 66(a) e 66(c) apresentam a dispersão dos valores dos *pixels* da área de estudo no plano  $H/\alpha$  para valores de alta anisotropia, nas janelas de 5x5 e 7x7 respectivamente, e as Figuras 66(b) e 66(d) a dispersão para valores de baixa anisotropia nestas mesmas janelas. Pode-se observar, principalmente pelas figuras correspondentes à janela 7x7, que as principais zonas são as 5 e 6, às quais correspondem aos espalhamentos volumétricos e superficiais de média a alta entropia. A zona 2 somente se torna evidente para altas anisotropias.

Figura 66 - Planos H/ $\alpha$  para imagens filtradas: (a) 5x5 e  $A < 0,5$ ; (b) 5x5 e  $A > 0,5$ ; (c) 7x7 e  $A < 0,5$  e (d) 7x7 e  $A > 0,5$ .



#### 6.4 – Decomposição de Freeman-Durden

A decomposição de Freeman-Durden gera três imagens que representam os diferentes tipos de espalhamento (superficial, *double-bounce* e volumétrico). Assim como a técnica de Modelo Linear de Mistura Espectral (SHIMABUKURO e SMITH, 1995) muito utilizada para imagens óticas, as imagens resultantes da decomposição de Freeman-Durden estão apresentadas na Figura 67, para imagens filtradas com janela 5x5 e na Figura 68, para imagens filtradas com janela 7x7.

A informação em cada imagem gerada pela Decomposição de Freeman-Durden indica a contribuição de determinado espalhamento na imagem. No caso do espalhamento superficial, por exemplo, as superfícies com textura mais suave apresentam cor clara, indicando alta resposta deste tipo de alvo, representada na área de estudo por regiões de solo exposto e clareiras abertas. No caso da imagem *double-bounce*, são as áreas com estruturas complexas, presentes principalmente em áreas urbanas que apresentam tonalidade clara e, na imagem do espalhamento volumétrico, as áreas com presença de vegetação densa apresentam maior resposta nesta decomposição.

Figura 67 -- Imagens resultantes do processo de decomposição de alvos de Freeman-Durden para imagens filtradas com janela 5x5 e frequência de *pixels* para a área de estudo: (a) espalhamento superficial; (b) espalhamento *double-bounce*; (c) espalhamento volumétrico e (d) composição colorida superficial R, *Double-bounce-G* e volumétrico-B.

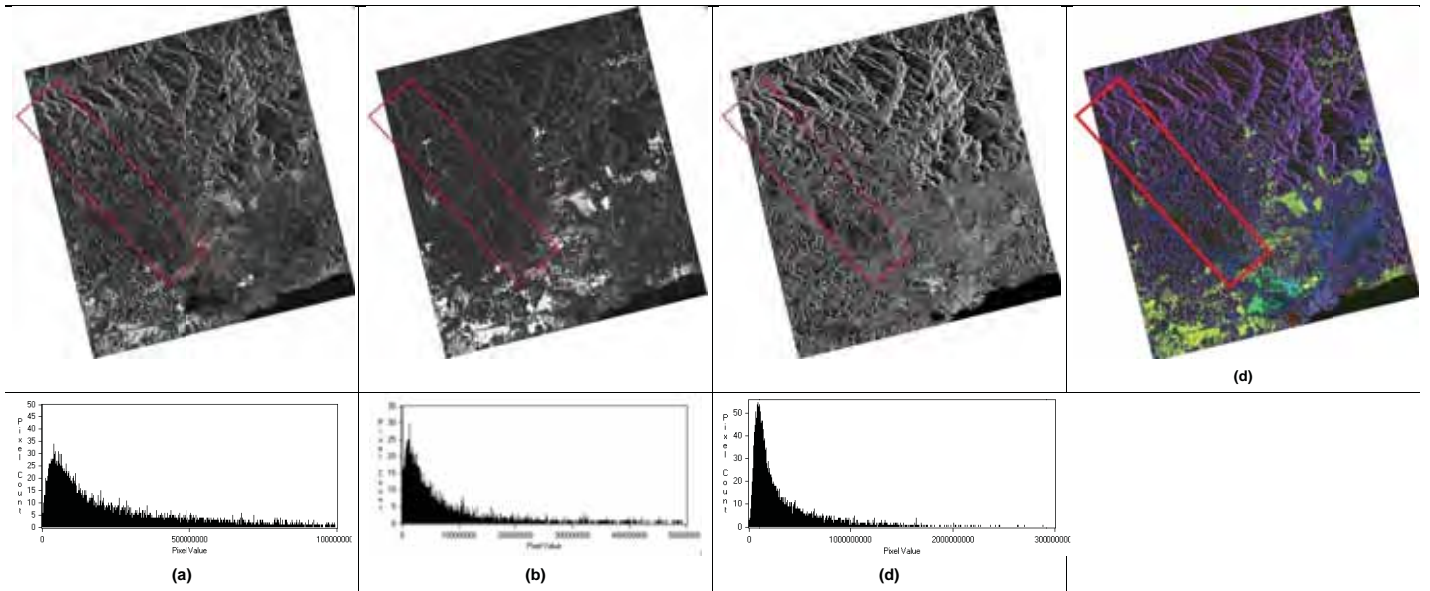
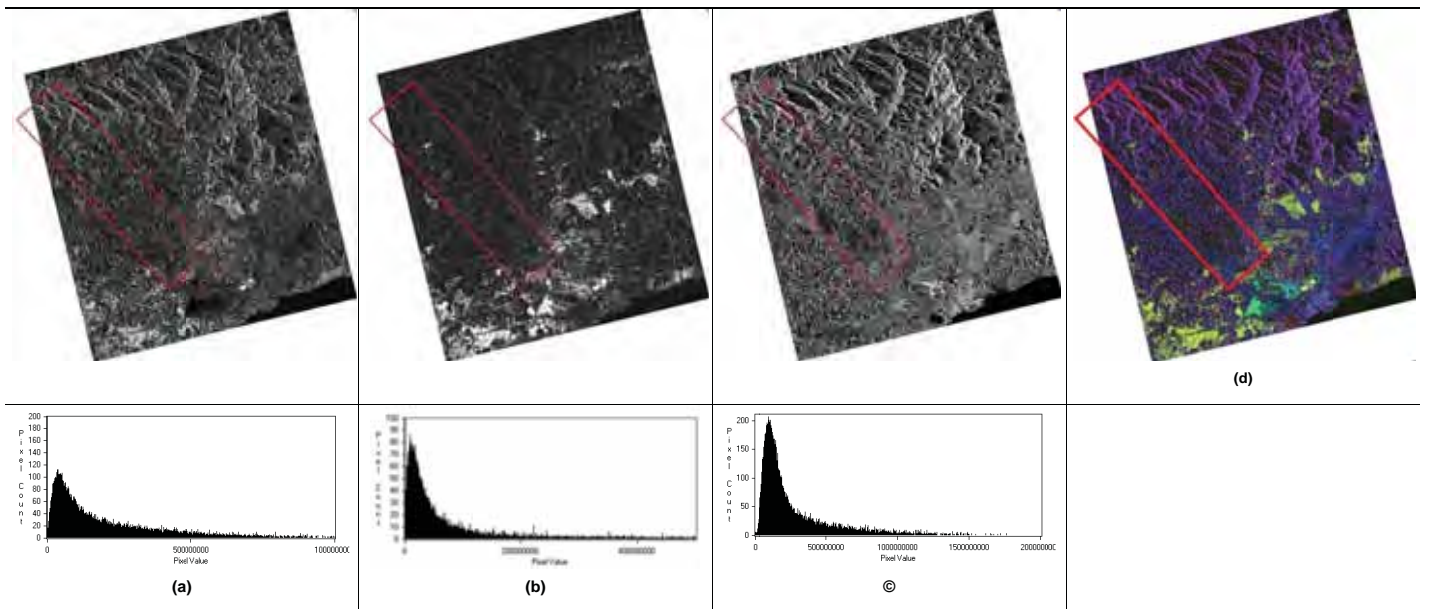


Figura 68 – Imagens resultantes do processo de decomposição de alvos de Freeman-Durden para imagens filtradas com janela 7x7 e frequência de pixels para a área de estudo: (a) espalhamento superficial; (b) espalhamento *double-bounce*; (c) espalhamento volumétrico e (d) composição colorida superficial-R, *double-bounce*-G e volumétrico-B.



## **6.5 – Análise exploratória das amostras das classes de uso e cobertura da terra**

Nesta seção será feita uma análise exploratória das amostras das classes de uso e cobertura da terra para dados em sigma zero (sem a aplicação de filtros) e parâmetros das decomposições de alvos (imagens filtradas com janelas 5x5 e 7x7 pixels).

### **6.5.1 – Análise exploratória das amostras segundo o parâmetro sigma zero ( $\sigma^0$ )**

A Figura 69 apresenta os valores de sigma zero ( $\sigma^0$ ) para as polarizações HH, HV e VV, para cada classe e para as três sub-regiões definidas de acordo com as características do relevo. Os valores apresentados representam o valor médio de (calculados a partir da média ponderada da intensidade das amostras) para a classe analisada. As barras de erro representam o desvio padrão das médias das amostras.

Para a polarização HH (Figura 69a) pode-se dizer que, de uma forma geral, as classes possuem o mesmo comportamento nas diferentes sub-regiões. Porém, a classe *vias de acesso* apresenta variação da sub-região 2 para as demais e isto se deve ao fato de que as amostras nas sub-regiões 1 e 3 foram de áreas asfaltadas enquanto na sub-região 2, em vias vicinais, sem pavimentação. A variação da classe *vias de acesso* também é observada para a polarização VV (Figura 69c).

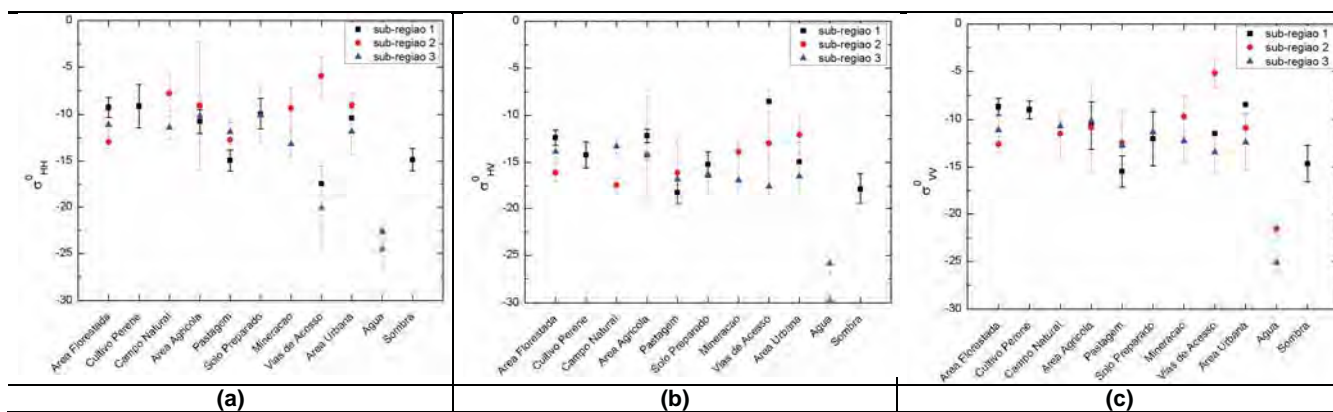
As amostras de *água* para as sub-regiões 2 e 3 possuem comportamento diferente, principalmente nas polarizações VV e HV. Isto se deve pelo posicionamento das amostras, em lagoas turvas de mineração, na sub-região 2 e no leito de um rio de margem dupla, na sub-região 3.

As áreas de *campo natural*, presentes apenas nas sub-regiões 2 e 3, apresentaram variações de  $\sigma^0$  nas polarizações HV e HH, devido ao fato dos campos naturais estarem presentes sobre diferentes tipos de solo. Na sub-região 3, os solos mais argilosos retêm maior quantidade de água e se tornam mais escuros nas imagens HH, quando comparados com os solos da sub-região 2, quando os campos naturais estão localizados entre vales e solos mais arenosos que retém pouca quantidade de água.

Exceto pelas classes *água*, *vias de acesso* e *campo natural* mencionadas acima, as demais classes não possuem valores médios de sigma zero

estatisticamente diferentes, ao nível de confiança de 95%, nas três sub-regiões. Por este motivo, as análises a seguir serão efetuadas para todas as amostras coletadas na área de estudo, conforme Figura 60, e independente da condição do relevo que se encontram. No capítulo de resultados as sub-regiões serão utilizadas para observar os resultados obtidos com os diferentes classificadores.

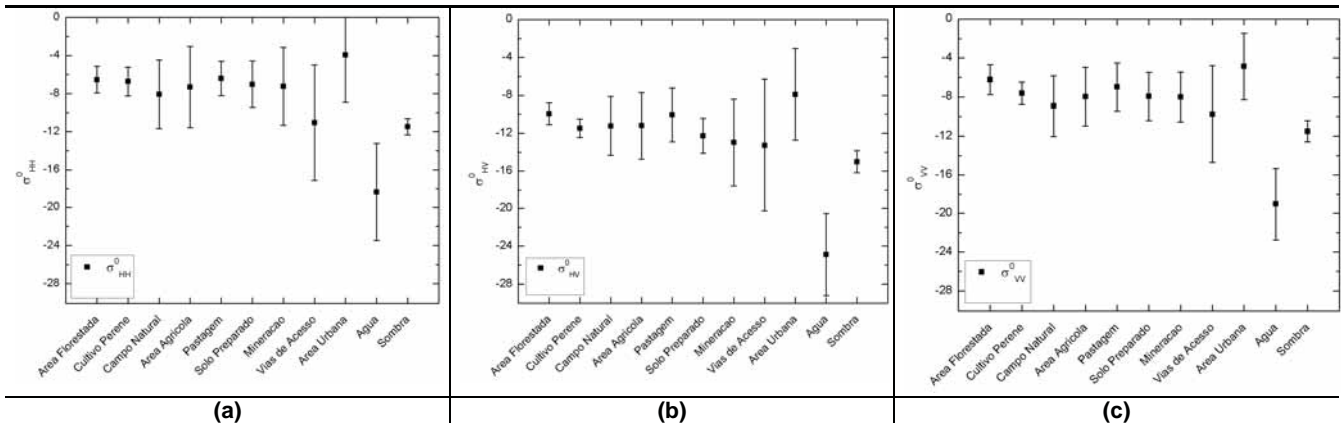
. Figura 69 - Valores de  $\sigma^0$  para cada classe nas polarizações HH (a), HV (b) e VV (c) de acordo com as sub-regiões definidas para a pesquisa.



Na Figura 70 são apresentados, para cada classe, os valores de  $\sigma^0$  calculados para as polarizações HH, HV e VV, considerando o total de 169 amostras. A barra de erro neste gráfico representa o desvio-padrão das médias das amostras.



Figura 70 - Análise dos valores de  $\sigma^0$  para as polarizações HH (a), HV (b) e VV (c) considerando todas as amostras definidas na área de estudo.



Quando todo o conjunto de 169 amostras é analisado, pode-se perceber que a classe *água* pode ser diferenciada quando analisadas as polarizações HV (Figura 70b) e VV (Figura 70c). Na polarização HH (Figura 70a) ocorre certa confusão com a classe *vias de acesso* e pode estar relacionado à quantidade de amostras localizadas em lagoas de mineração, com grande concentração de areia o que pode ter gerado a confusão entre estas classes.

Todas as demais classes parecem pertencer a um mesmo grupo e a separação também se torna difícil. Uma outra forma de se fazer uma análise exploratória das amostras seria analisar os parâmetros de decomposição de alvos de Cloude-Pottier (ângulo alfa, anisotropia, entropia), que será apresentada no item 6.5.2, e de Freeman-Durden (espalhamentos superficial, *double-bounce* e volumétrico), apresentada no item 6.5.3.

### **6.5.2 – Análise exploratória das amostras segundo decomposição de alvos de Cloude-Pottier**

Baseado nos parâmetros ângulo alfa, anisotropia e entropia, foram gerados gráficos com os valores médios para cada parâmetro e classe. Os desvios-padrões foram obtidos a partir das médias ponderadas resultantes (Figura 71).

Ao ser analisado o parâmetro ângulo alfa (Figura 71a e 71b), não fica evidente nenhuma separação entre as classes analisadas. As variações nos valores apresentados apenas diferem para a classe campo naturais (valores mais altos) e mineração (valores mais baixos). Mesmo assim, esta diferença não é significativa para agrupar ou separar classes e, para este parâmetro, a confusão acontece entre todas as classes analisadas.

Ao se analisar os valores de entropia (Figuras 71e e 71f) pode-se observar que a maioria das classes possui alta entropia. Segundo CLOUDE e POTTIER (1996), a anisotropia pode ser útil quando ocorrem altos valores de entropia. Através da análise das Figuras 71c e 71d, pode-se observar que os valores do parâmetro anisotropia indicam uma separação entre as classes água e área urbana das demais, muito embora exista uma confusão entre estas duas classes.

Figura 71 - Médias e desvios padrões das amostras para cada classe dos parâmetros ângulo alfa, anisotropia e entropia a partir de imagens filtradas com janela 5x5 (a, c, e) e 7x7 (b, d, f).

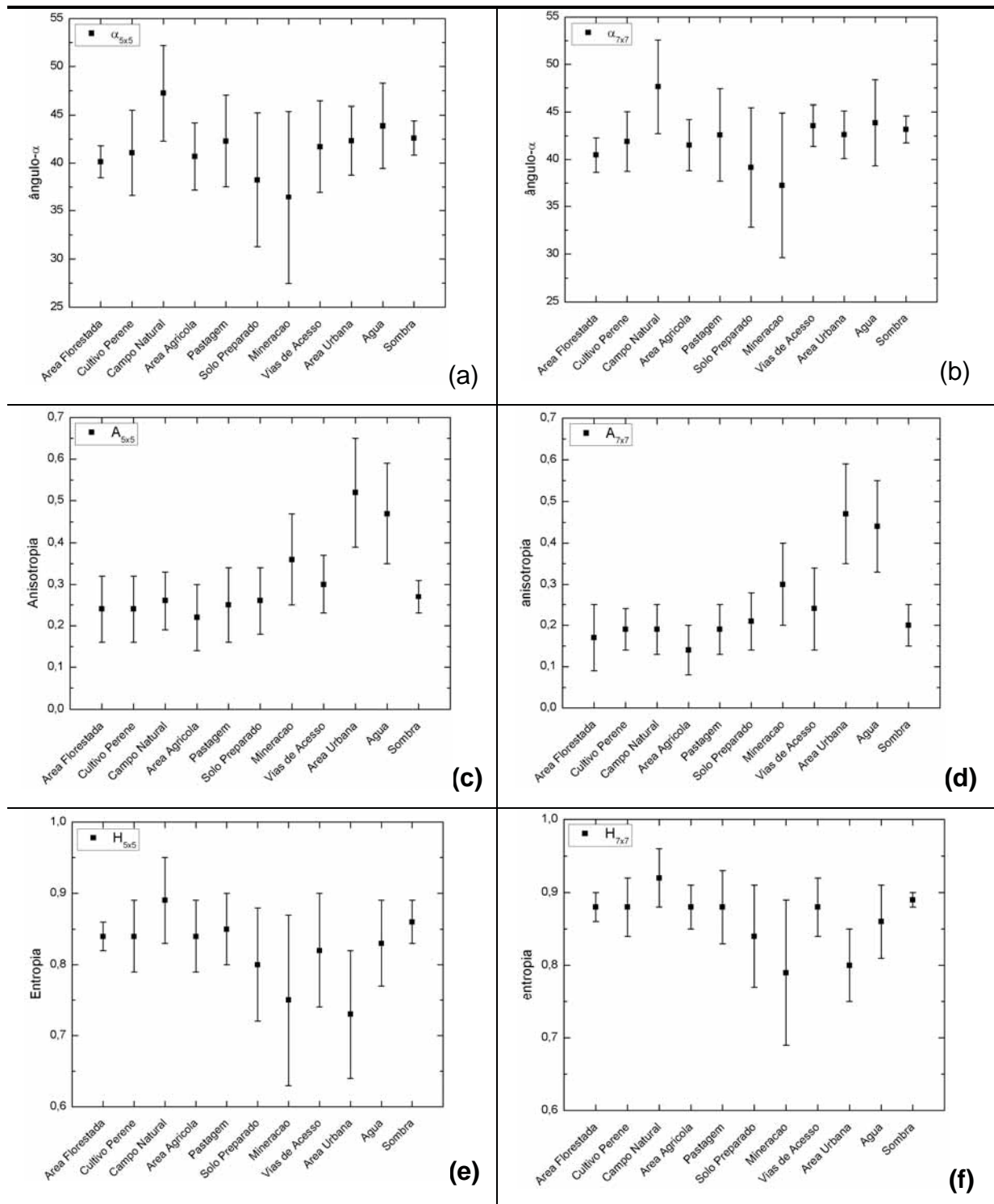


Figura 72 - Distribuição do plano H/α das amostras com as imagens filtradas com janelas de 5x5 e 7x7 pixels. ( Amostras representam as classes: (a): de área florestada;(b): cultivo perene; (c): campo natural; (d): área agrícola; (e): pastagem; (f): solo preparado para cultivo; (g): mineração; (h): vias de acesso; (i): área urbana; (j): água e (l): sombra.

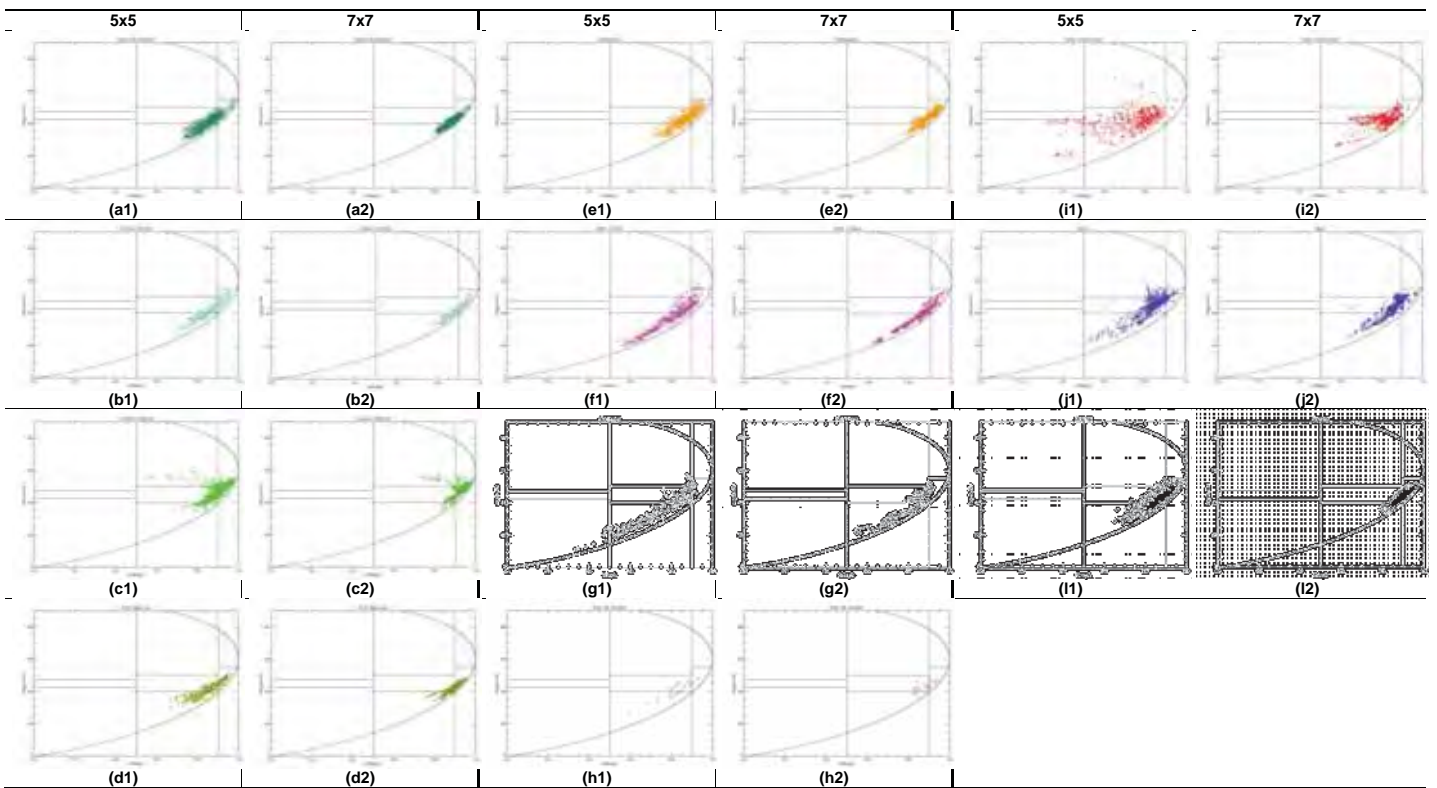


Figura 73 - Distribuição do plano H/α das amostras com a imagem filtrada com janela de 5x5 pixels e anisotropia maior e menor que 0,5. Amostras representam as classes: (a): de área florestada;(b): cultivo perene; (c): campo natural; (d): área agrícola; (e): pastagem; (f): solo preparado para cultivo; (g): mineração; (h): vias de acesso; (i): área urbana; (j): água e (l): sombra.

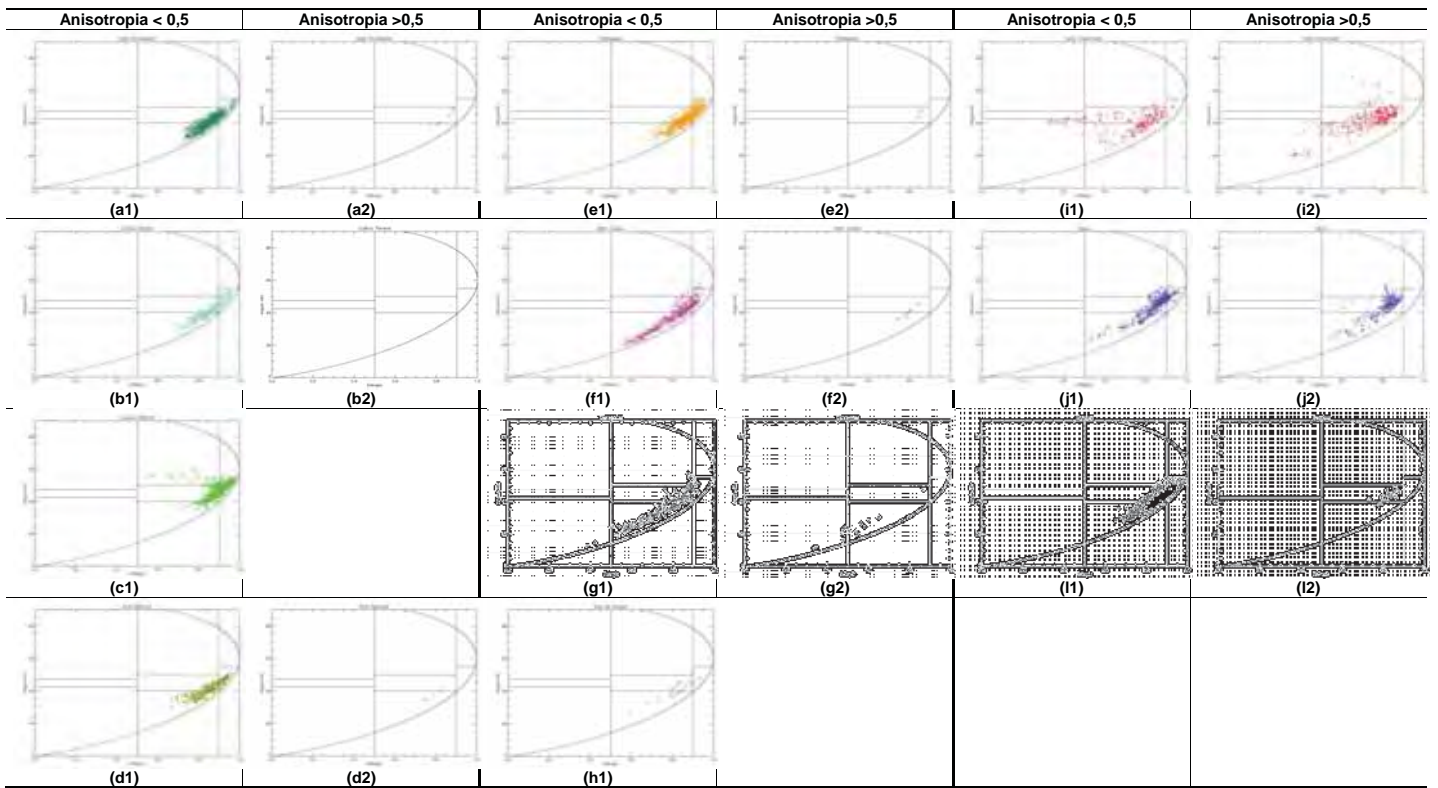
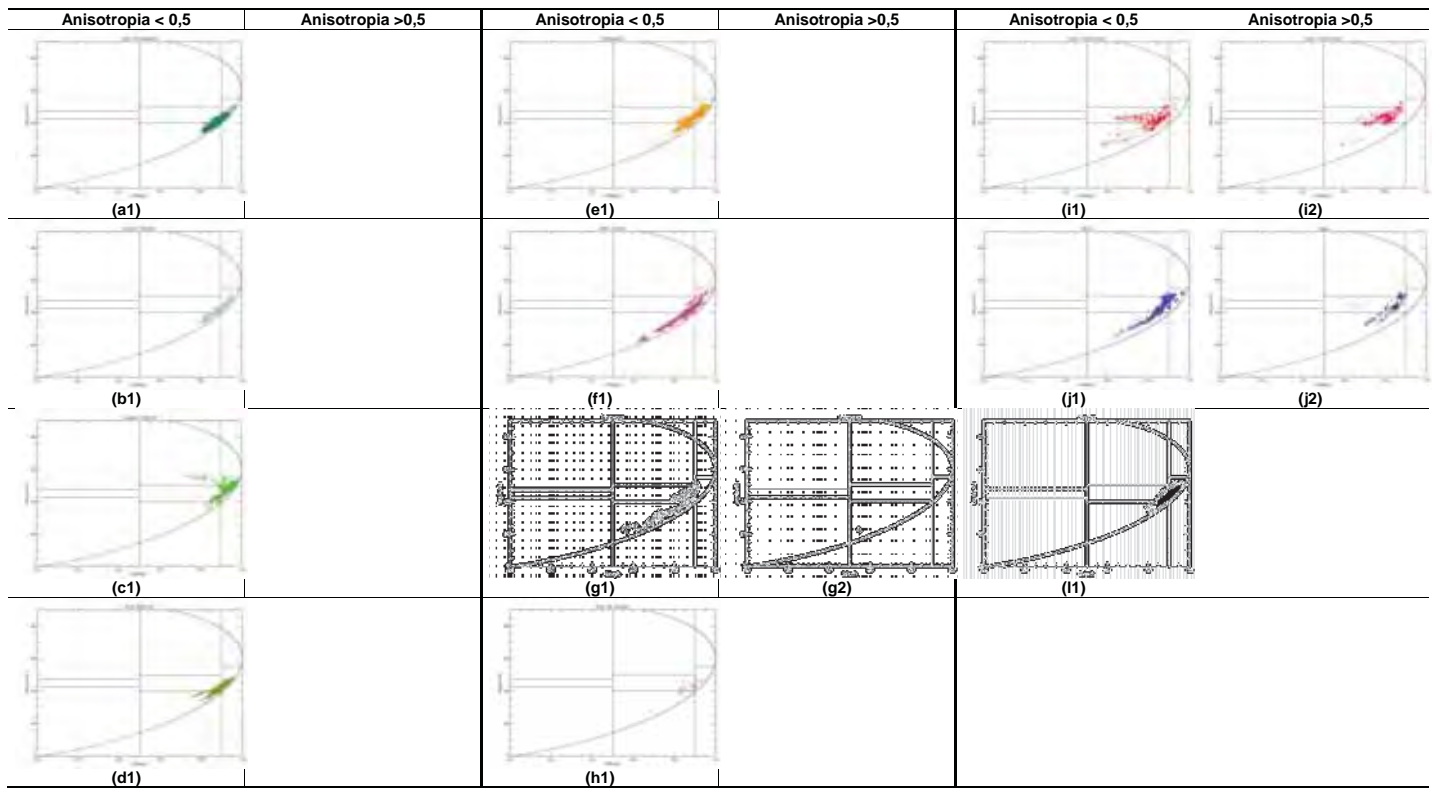


Figura 74 - Distribuição do plano H/α das amostras com a imagem filtrada com janela de 7x7 pixels e anisotropia maior e menor que 0,5. Amostras representam as classes: (a): de área florestada;(b): cultivo perene; (c): campo natural; (d): área agrícola; (e): pastagem; (f): solo preparado para cultivo; (g): mineração; (h): vias de acesso; (i): área urbana; (j): água e (l): sombra.

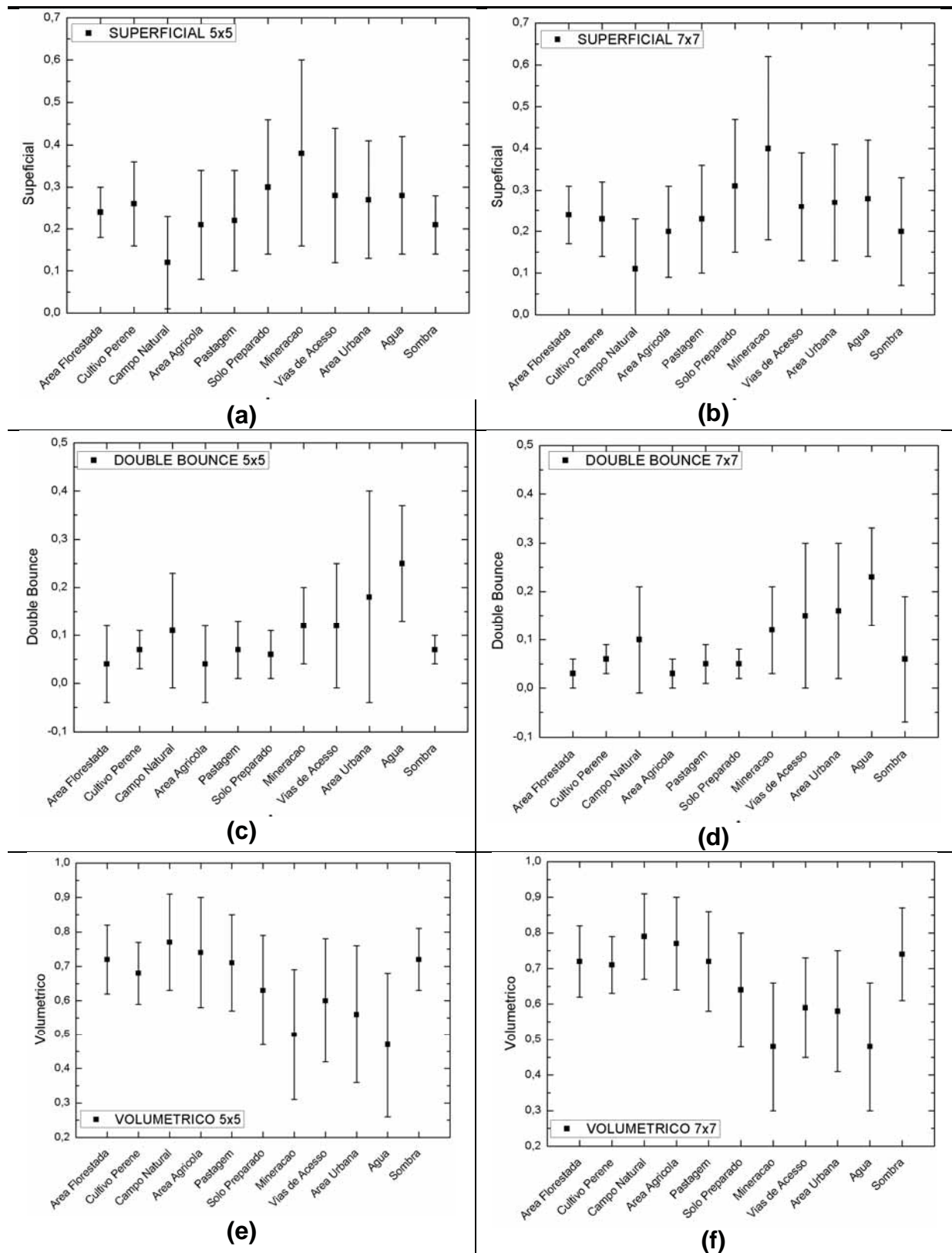


Ao analisar as Figuras 72, 73 e 74, pode-se observar a dificuldade para a separação visual das classes adotadas nesta pesquisa, pois a os *pixels* pertencentes às diferentes classes estão situados em zonas semelhantes e que não representam diretamente o tipo do alvo. Além disto, pode-se observar pela Figura 74 que quando se considera a anisotropia na imagem filtrada com filtro 7x7, e divide-se os planos  $H/\alpha$  para valores de anisotropia maiores e menores de 0,5, apenas as classes água e área urbana possuem uma maior representatividade nos dois planos. A classe mineração também ocorre com as duas anisotropias, mas com representatividade menor.

### ***6.5.3 – Análise exploratória das amostras segundo decomposição de alvos Freeman-Durden***

Para analisar as amostras de acordo com os tipos de espalhamento apresentados pela decomposição de Freeman-Durden foram calculados os valores médios da contribuição de cada espalhamento para cada uma das amostras. A Figura 75 apresenta, para cada classe, a média global das amostras e os desvios padrões das médias das amostras, representados pelas barras de erro.

Figura 75 - Média e desvio padrão das amostras para cada classe de acordo com os mecanismos de espalhamento a partir de imagens filtradas com janela 5x5 e 7x7. (a) e (b) superficial; (c) e (d) *double-bounce* e (e) e (f) volumétrico.





## **6.6 – Definição das classes de uso e cobertura da terra baseada nas análises exploratórias**

Esta etapa constitui em analisar os resultados das decomposições de Freeman-Durden e Cloude-Pottier, e informações obtidas dos dados em sigma zero para verificar o possível agrupamento ou separação entre os níveis das classes de uso e cobertura da terra (Tabela 7), de acordo com o comportamento dos alvos.

Como os resultados observados a partir da imagem filtrada com janela de  $7 \times 7$  pixels apresentaram menor dispersão, o que pode significar melhor poder de separação entre alvos, foi considerado apenas os produtos gerados a partir dessas imagens para o agrupamento de classes.

As Figuras 76, 77, 78, 79 e 80 apresentam uma análise entre diferentes métodos aplicados, considerando 21 combinações entre valores de sigma zero (HH, HV e VV), diferentes parâmetros de Cloude-Pottier (anisotropia, ângulo  $\alpha$  e entropia) e a contribuição dos mecanismos de espalhamento (superficial, volumétrico e *double-bounce*). Os dados foram combinados entre as diferentes técnicas (valores de sigma zero, decomposição de Cloude-Pottier e decomposição de Freeman-Durden) e não somente entre os parâmetros de uma mesma técnica.

Analisando o comportamento das amostras sobre os dados em sigma zero da imagem HH, combinados com parâmetros de decomposição de alvos, observado na Figura 76, pode-se observar a separação da classe água das demais. A classe campo natural também foi separada quando analisados, principalmente, os parâmetros espalhamento superficial, ângulo  $\alpha$  e entropia (Figuras 76a, 76e e 76f). O mesmo acontece com a classe mineração, observado nas Figuras 76a e 76c, quando os espalhamentos volumétrico e superficial a diferenciam das outras. Nas Figuras 76a, 76c e 76f, as classes estão mais separadas entre si, porém as amostras de área florestada, cultivo perene e pastagem se confundem, impedindo qualquer tentativa de separação.

O mesmo comportamento observado na Figura 76, para dados em sigma zero da imagem HH, pode ser confirmado para os dados em sigma zero das imagens HV e VV, mostrado nas Figuras 77 e 78. Em todos os casos, seria possível separar as seguintes classes: água, mineração, campo natural e área urbana.

Figura 76 - Análise comparativa das amostras entre dados em sigma zero e parâmetros da decomposição e Freeman-Durden e Cloude-Pottier. (a) HH e superficial; (b) HH e *double-bounce*; (c) HH e volumétrico; (d) HH e anisotropia; (e) HH e ângulo  $\alpha$  e (f) HH e entropia.

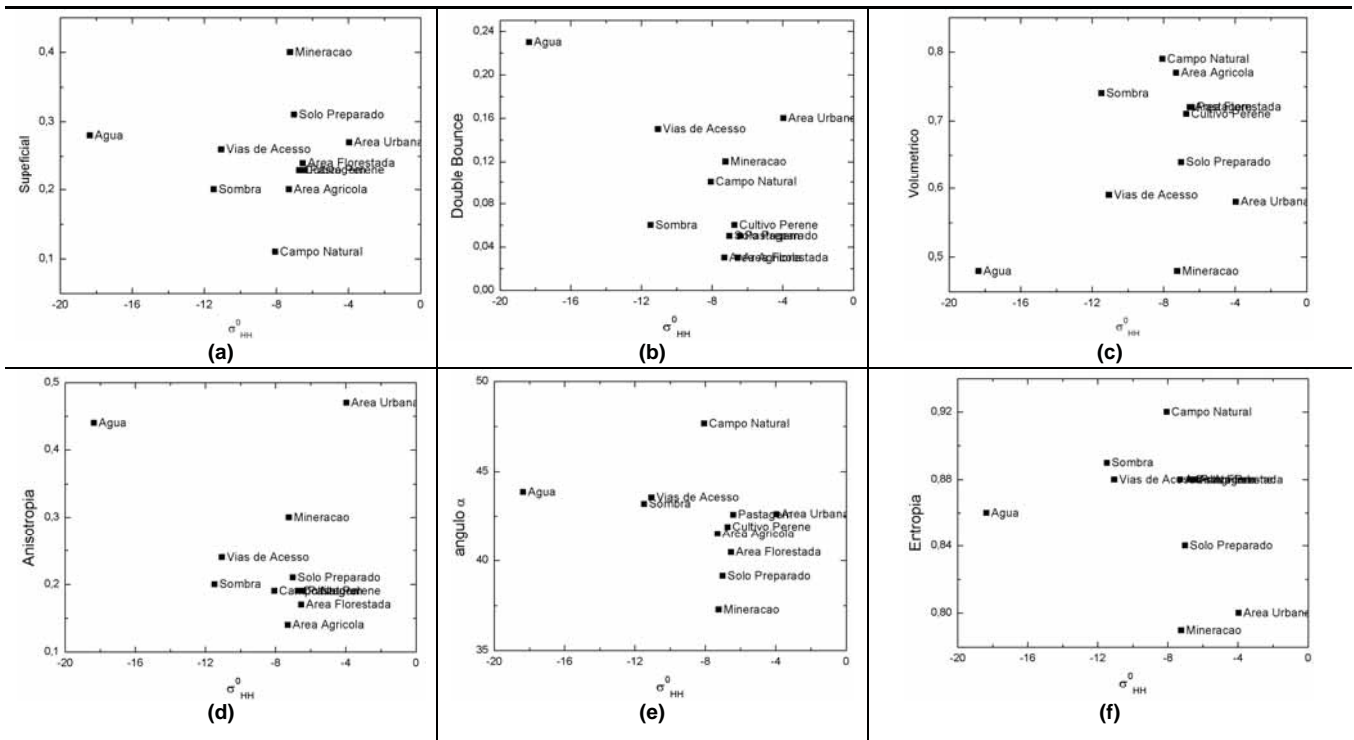


Figura 77 - Análise comparativa das amostras entre dados em sigma zero e parâmetros da decomposição e Freeman-Durden e Cloude-Pottier. (a) HV e superficial; (b) HV e *double-bounce*; (c) HV e volumétrico; (d) HV e anisotropia; (e) HV e ângulo  $\alpha$  e (f) HV e entropia.

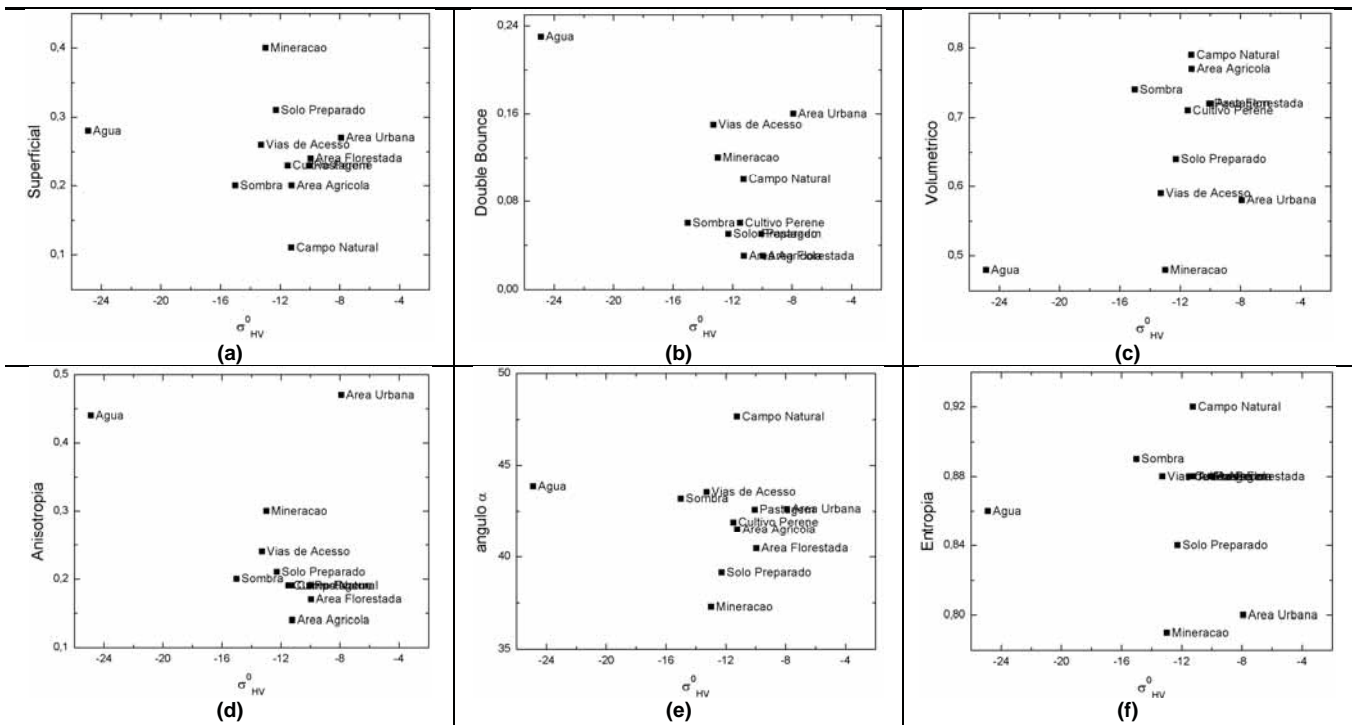


Figura 78 - Análise comparativa das amostras entre dados em sigma zero e parâmetros da decomposição e Freeman-Durden e Cloude-Pottier. (a) VV e superficial; (b) VV e *double-bounce*; (c) VV e volumétrico; (d) VV e anisotropia; (e) VV e ângulo  $\alpha$  e (f) VV e entropia.

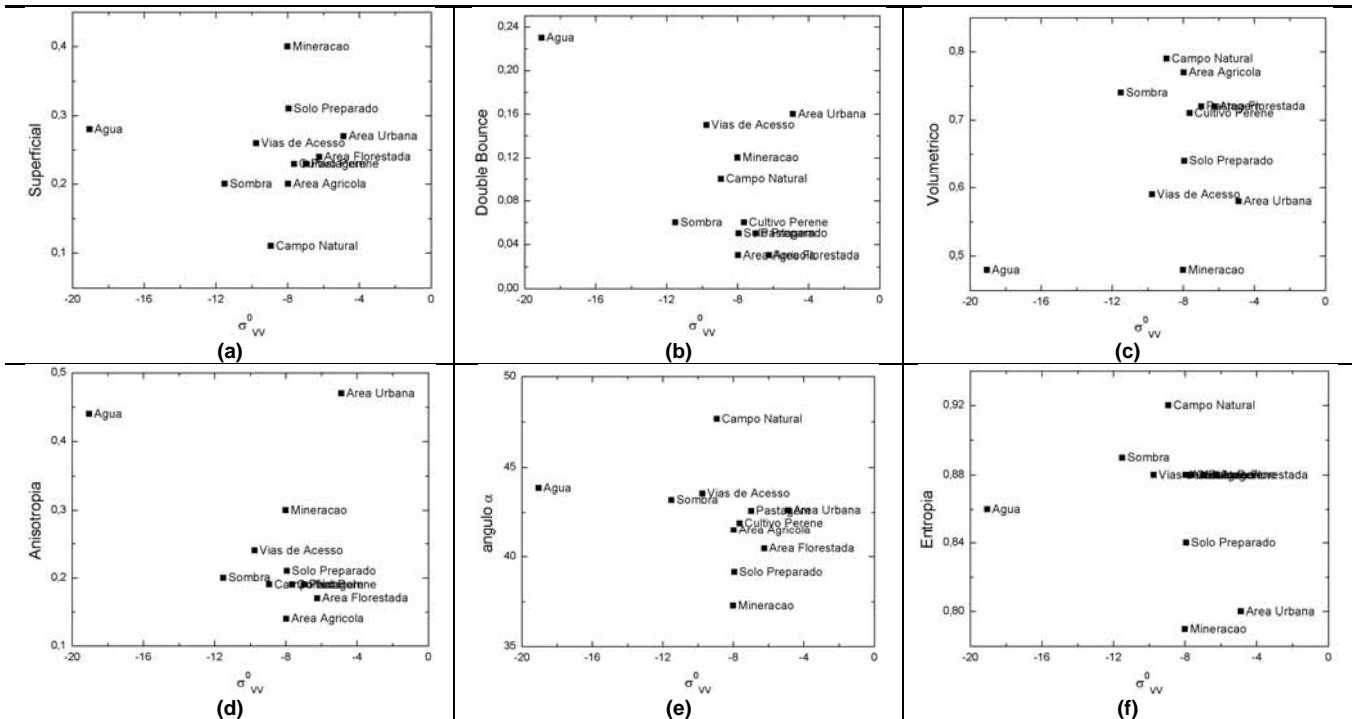


Figura 79 - Análise comparativa das amostras entre e parâmetros da decomposição e Freeman-Durden e Cloude-Pottier. (a) anisotropia e superficial; (b) ângulo  $\alpha$  e superficial; (c) entropia e superficial; (d) anisotropia e *double-bounce*; (e) ângulo  $\alpha$  e *double-bounce* e (f) entropia e *double-bounce*.

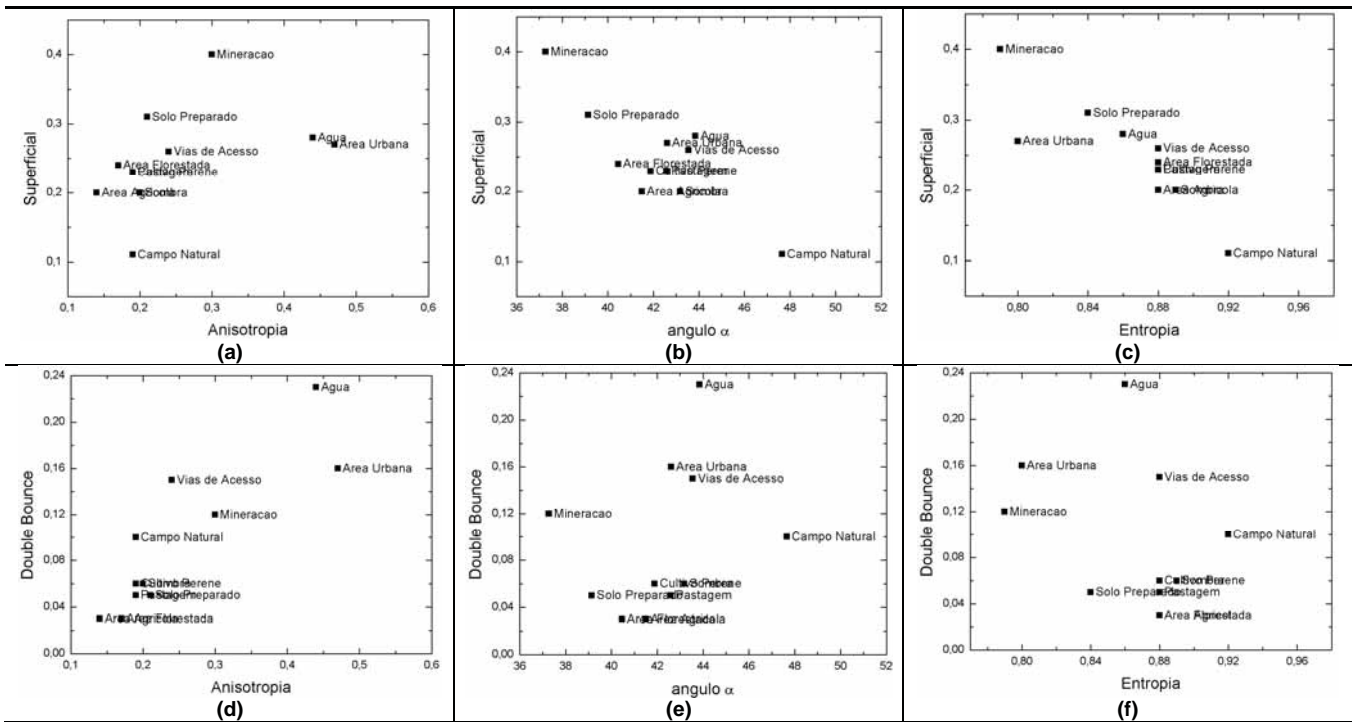
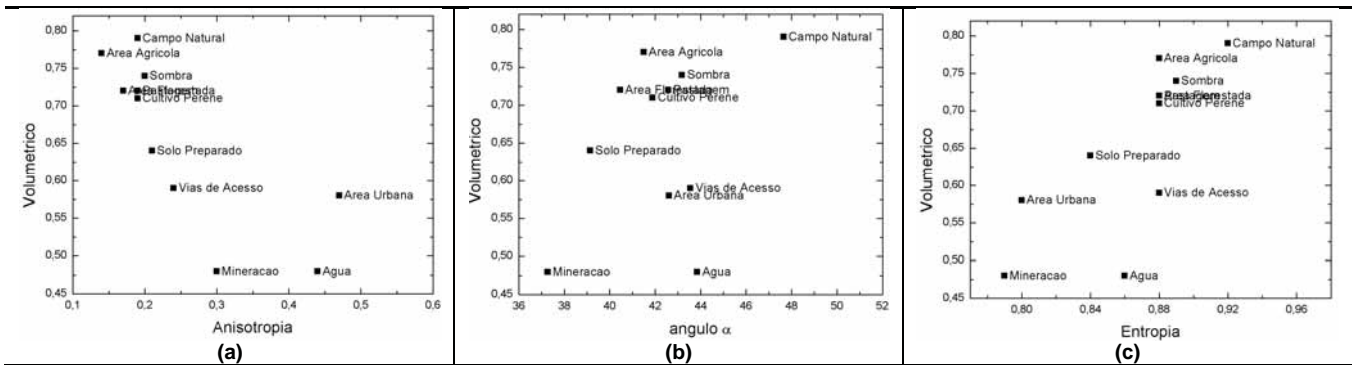


Figura 80 - Análise comparativa das amostras entre e parâmetros da decomposição e Freeman-Durden e Cloude-Pottier. (a) anisotropia e volumétrico; (b) ângulo  $\alpha$  e volumétrico e (c) entropia e volumétrico.



As classes mineração e campo natural puderam ser diferenciadas quando são avaliados os parâmetros espalhamento superficial e ângulo alfa (Figura 79b). Quando ocorre baixa contribuição do espalhamento superficial em valores de ângulos  $\alpha$  e entropia altos, a classe campo natural também se sobressai (Figura 79a, 79b e 79c). Quando ocorre o contrário (alta contribuição do espalhamento superficial e baixos valores de ângulo  $\alpha$ , entropia e anisotropia), a classes mineração se distingue das demais (Figura 79a, 79b e 79c).

A classe de solo preparado para cultivo, que apresentava confusão com as outras classes de vegetação e área agrícola, apresenta separação quando são utilizados parâmetros de espalhamento superficial e volumétrico, com os derivados da decomposição de Cloude-Pottier (Figura 79a, 79b e 79c).

Quando se analisa os parâmetros derivados das decomposições, a combinação dos valores da contribuição do espalhamento *double-bounce* com os valores dos parâmetros anisotropia, ângulo  $\alpha$  e entropia permitiram uma melhor separação entre as classes (Figura 79d, 79e e 79f), quando comparados com os outros tipos de espalhamento (Figura 79a, 79b e 79c e 80).

Ao analisar o comportamento das amostras com relação aos parâmetros de decomposição e sigma zero e, de acordo com a Tabela 7 (seção 5.4.5), as classes de uso da terra (2º nível) apresentaram separação que, no entanto, não é uniforme para todas as classes. Como não é recomendado mesclar níveis de classes por uma questão hierárquica, a partir desta fase serão consideradas apenas as classes de cobertura da terra: vegetação arbórea; vegetação rasteira; solo exposto; área construída; água e sombra, que representam o nível 1, de cobertura da terra.

## **6.7 – Resultados das classificações**

### **6.7.1 - Classificações derivadas da decomposição de Cloude-Pottier**

#### **6.7.1.1 – Classificação de Cloude-Pottier**

Conforme discutido na seção 5.4.3, baseada na partição dos valores dos parâmetros H, A e  $\alpha$ , são geradas 17 classes (16 válidas), conforme Tabela 14. Nesta tabela são identificadas, na segunda coluna, as oito zonas do plano H/ $\alpha$  correspondentes a cada classe, assim como a sua anisotropia (alta ou baixa). Deste modo, a classe 3, por exemplo, corresponde à quarta zona com anisotropia alta (zona 4a) e a classe 11, à quarta zona com anisotropia baixa (zona 4b). Devido às

restrições dos valores de entropia para espalhamentos superficiais, nenhum *pixel* deve ser classificado como classe 17. Por isso a imagem classificada com base nos parâmetros H- $\alpha$ -A possui 16 classes.

Tabela 14 - Valores de entropia, ângulo alfa e anisotropia para cada classe gerada na classificação de Cloude-Pottier.

Número da classes	Zona	Entropia mínima	Entropia máxima	Ângulo $\alpha$ mínimo	Ângulo $\alpha$ maximo	Anisotropia mínima	Anisotropia máxima
1	1a	0.9	1.0	55.0	90.0	0.5	1.0
2	2a	0.9	1.0	40.0	55.0	0.5	1.0
3	4a	0.5	0.9	50.0	90.0	0.5	1.0
4	5a	0.5	0.9	40.0	50.0	0.5	1.0
5	6a	0.5	0.9	0.0	40.0	0.5	1.0
6	7a	0.0	0.5	47.5	90.0	0.5	1.0
7	8a	0.0	0.5	42.5	47.5	0.5	1.0
8	9a	0.0	0.5	0.0	42.5	0.5	1.0
9	1b	0.9	1.0	55.0	90.0	0.0	0.5
10	2b	0.9	1.0	40.0	55.0	0.0	0.5
11	4b	0.5	0.9	50.0	90.0	0.0	0.5
12	5b	0.5	0.9	40.0	50.0	0.0	0.5
13	6b	0.5	0.9	0.0	40.0	0.0	0.5
14	7b	0.0	0.5	47.5	90.0	0.0	0.5
15	8b	0.0	0.5	42.5	47.5	0.0	0.5
16	9b	0.0	0.5	0.0	42.5	0.0	0.5
17	3	0.9	1.0	0.0	40.0	0.0	1.0

A classificação em 16 classes para a imagem filtrada com janela 5x5 é apresentada na Figura 81, e para a janela 7x7 na Figura 82. Nas duas imagens classificadas, a classe com maior representatividade é a classe 13 (54% da área para a janela 5x5, e 83% para a 7x7), seguida pela classe 5 (24% da área para a janela 5x5, e 9% para a 7x7), às quais correspondem à Zona 6 com alta e baixa anisotropia, respectivamente. Os *pixels* das demais zonas encontram-se espalhados ao longo da imagem, muitas vezes não representando um alvo específico. A partir deste resultado, as classes geradas pelo classificador foram agrupadas nas seis classes de cobertura da terra, conforme análise efetuada na seção 6.5.



Figura 81 - Resultado da classificação de Cloude-Pottier aplicada à imagem da matriz de coerência filtrada com janela de 5x5 pixels e histograma das classes para a área de estudo.

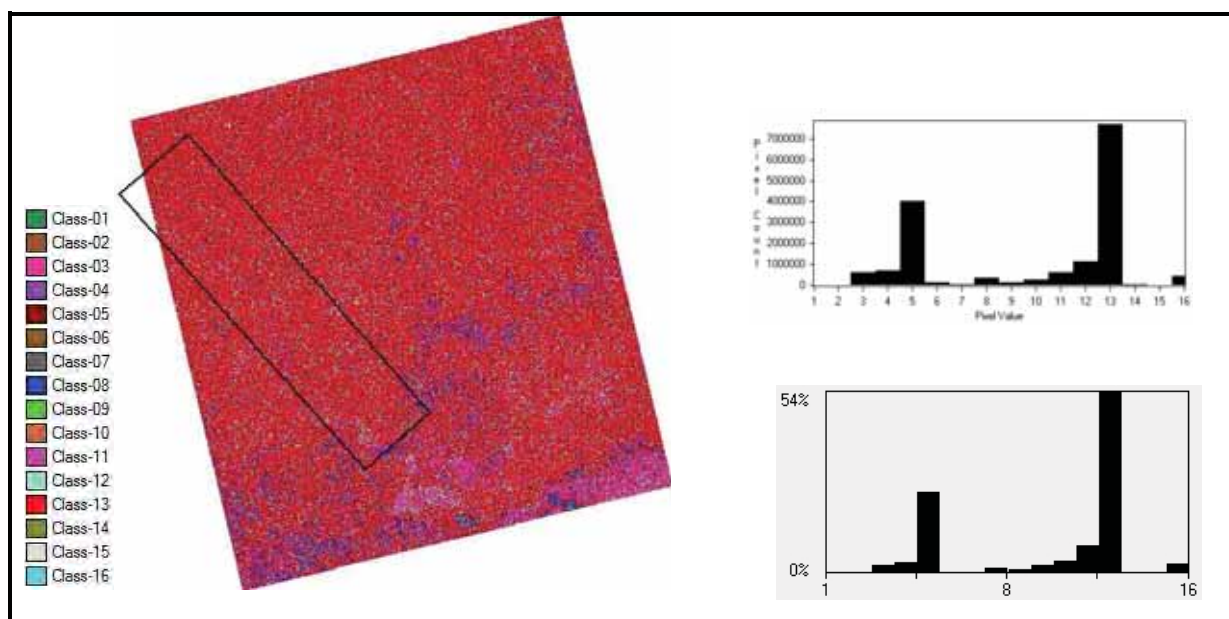
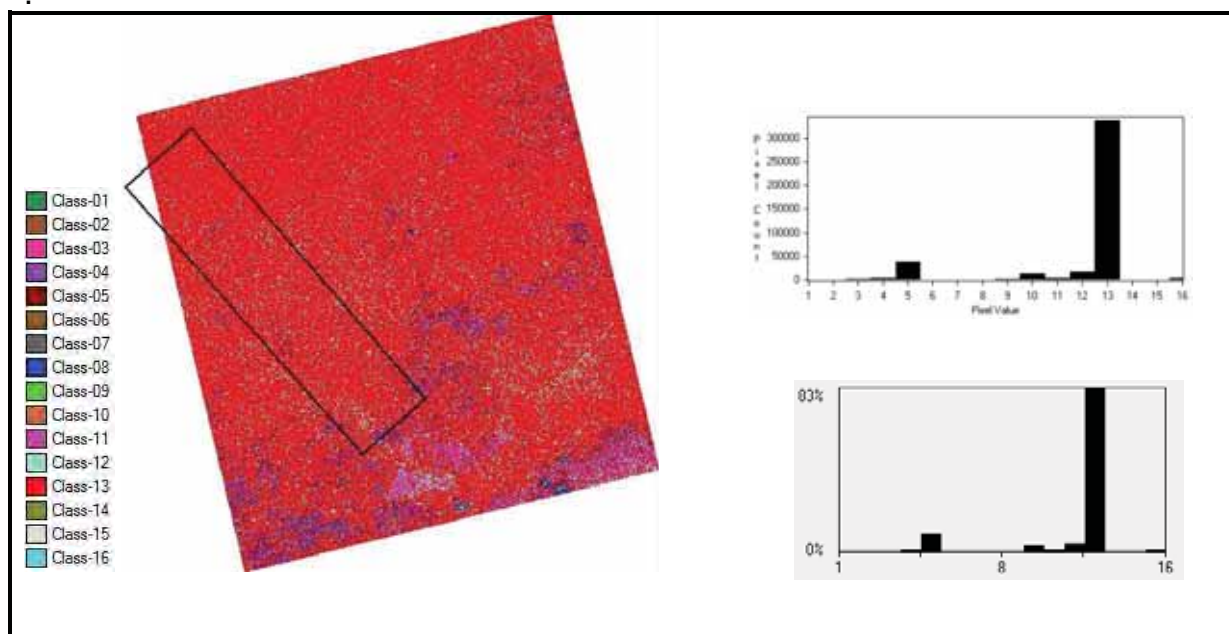


Figura 82 - Resultado da classificação de Cloude-Pottier aplicada à imagem da matriz de coerência filtrada com janela de 7x7 pixels e histograma das classes para a área de estudo.



Os picos nas classes 13 e 5 apresentados nas Figuras 81 e 82 indicam superfície aleatória com alta e baixa anisotropia, respectivamente, situados na zona 6, característica de superfície aleatória. No entanto, a imagem possui predomínio de espalhamento volumétrico, ocasionada pelos altos valores de entropia e valores

médios de ângulo alfa, ocasionados pelo aumento da rugosidade e efeitos de propagação no dossel.

#### 6.7.1.1.1 – Agregação das classes CP para classes de cobertura da terra

Para efetuar a agregação das classes para a classificação de Cloude-Pottier, fez-se primeiramente uma análise da distribuição das amostras das seis classes de cobertura da terra, no plano H/ $\alpha$  (seção 6.4.2) e a análise da porcentagem dos *pixels* de cada conjunto de amostras quando comparadas à imagem classificada CP, além de uma análise visual. As porcentagens de ocorrência nas imagens classificadas a partir da imagem filtrada com janela 5x5 são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Porcentagem de ocorrência das amostras de cobertura da terra para as 16 classes geradas pela classificação de Cloude-Pottier com janela 5x5 *pixels*.

Classes definidas pela Classificação CP 5x5		Amostras de cobertura da terra					
		Vegetação arbórea	Vegetação rasteira	Solo exposto	Área construída	Água	Sombra
Porcentagem das amostras nas classes geradas (%)	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	1.33	1.90	3.45	11.42	11.20	2.13
	4	1.95	3.24	2.91	10.49	9.20	4.02
	5	25.12	21.82	25.09	39.63	39.00	23.29
	6	0.00	0.00	0.00	3.03	0.00	0.00
	7	0.00	0.00	0.00	0.47	0.00	0.00
	8	1.25	0.55	5.64	7.69	2.20	1.00
	9	0.94	0.87	0.00	0.47	1.60	0.44
	10	2.26	2.77	1.45	0.47	0.80	2.32
	11	1.87	7.83	4.18	3.03	7.00	3.08
	12	6.32	11.07	5.09	1.86	7.00	8.98
	13	57.10	47.83	45.45	16.78	20.80	53.42
	14	0.00	0.40	0.00	0.23	0.00	0.00
	15	0.00	0.00	0.00	0.47	0.00	0.00
	16	1.87	1.74	6.73	3.96	1.20	1.32

Obs.: Em verde a combinação entre a análise visual e a maior frequência e, em amarelo, a amostra com maior frequência que, visualmente não representou a melhor opção para agregação.

A agregação de classes, para CP\_5x5 foi baseada na maior porcentagem de ocorrência, com exceção da classe 9 que, apesar de possuir maior porcentagem de

amostras de água foi atribuída à vegetação arbórea para evitar uma superestimativa de água na área de estudo. Para as classes que não havia amostras, como foi o caso das classes 1 e 2, a análise foi visual e baseada nos parâmetros entropia e ângulo alfa.

A classe 13, com maior ocorrência na área de estudo, concentrou também a maior proporção de amostras. Desta forma, poderia ser atribuída a esta classe diferentes coberturas e, o critério de proporção auxiliou, mas não evitou a confusão entre as classes.

Para a agregação de classes da classificação CP\_7x7, a Tabela 16 apresenta as classes definidas pelo classificador e as porcentagem de amostras presentes nas classes geradas.

Tabela 16 - Porcentagem de ocorrência das amostras de cobertura da terra para as 16 classes geradas pela classificação de Cloude-Pottier. Com janela 7x7 pixels.

Classes definidas pela Classificação de CP		Amostras de cobertura da terra					
		Vegetação Arbórea	Vegetação Rasteira	Solo Exposto	Área Construída	Água	Sombra
Porcentagem das amostras nas classes geradas (%)	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	0,08	0,90	1,11	7,31	6,26	0,26
	4	0,40	0,65	0,93	9,67	5,66	0,46
	5	6,75	9,80	11,69	46,46	38,38	12,01
	6	0,00	0,00	0,00	0,47	0,00	0,00
	7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	8	0,00	0,00	4,27	5,90	2,22	0,07
	9	0,16	0,65	0,00	0,00	0,20	0,52
	10	1,93	4,74	1,11	0,94	1,82	2,74
	11	0,80	3,76	2,23	1,42	5,86	1,04
	12	2,49	7,35	5,38	5,19	9,09	4,70
	13	87,22	71,81	69,20	18,40	29,49	78,20
	14	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00
	15	0,00	0,00	0,00	0,24	0,00	0,00
	16	0,16	0,16	4,08	4,01	1,01	0,00

Obs.: Em verde a combinação entre a análise visual e a maior frequência e, em amarelo, a amostra com maior frequência que, visualmente não representou a melhor opção para agregação.

As classes 1 e 2 não possuíam amostras em sua ocorrência porém, baseado na anisotropia, optou-se por escolher entre as classes área construída ou água e, por possuir poucos *pixels* representados e devido ao efeito visual, foram selecionada a amostras de água. Apenas a classe 12, com maior ocorrência da classe água, não

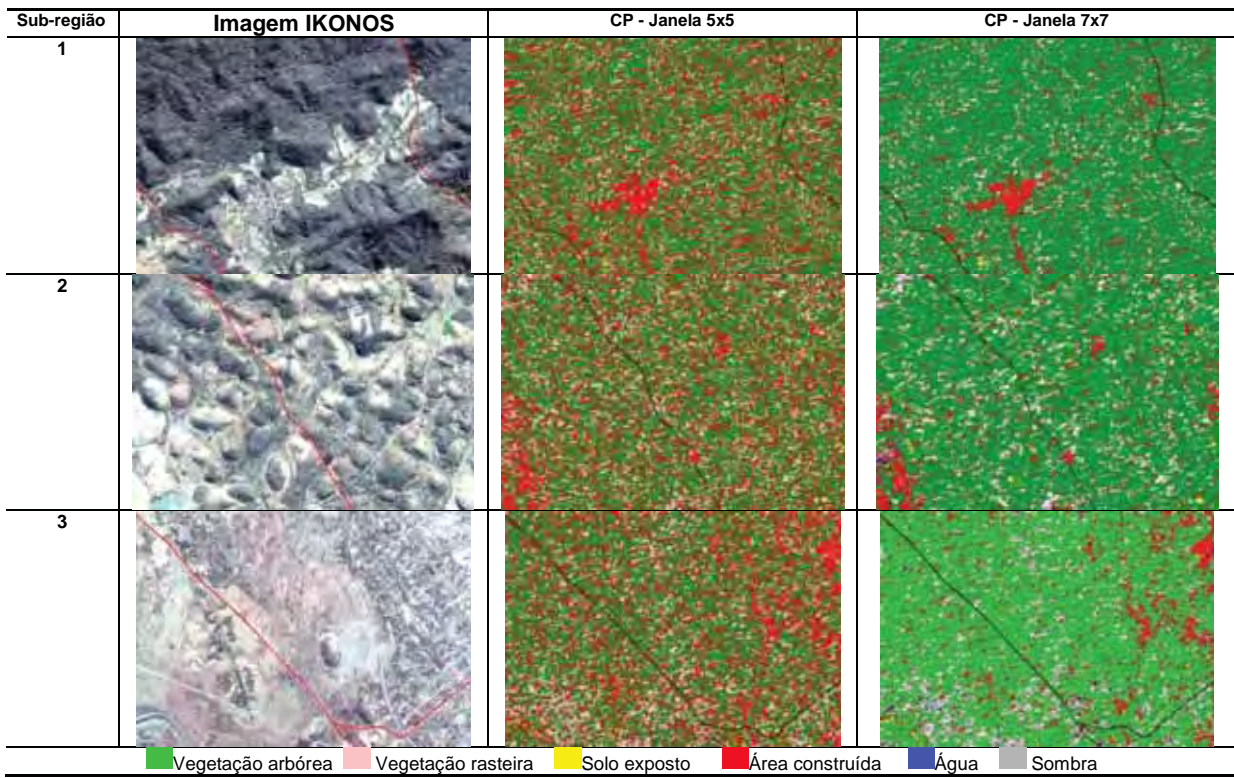
representava visualmente a área de estudo e por isso foi atribuída à classe vegetação rasteira. A classe sombra não foi atribuída a nenhuma das classes da CP por este não diferenciar esta classe das demais.

As classes que predominavam nas imagens classificadas CP\_5x5 e CP\_7x7 eram a 13 e 5 que correspondem à classe 6 do plano H/ $\alpha$  (Figuras 81 e 82). A maioria das amostras possuiu alta ocorrência nestas classes e, apesar de caracterizar superfícies aleatórias, a classe 13 foi agregada à vegetação arbórea, pois qualquer outra atribuição ocasionaria superestimativa das demais classes de cobertura com menor ocorrência, o mesmo efeito citado na CP\_5x5. Para a classe 5 foi adotado o critério de maior frequência.

Na Figura 83, pode-se observar o resultado visual da agregação da classificação de Cloude-Pottier para as três sub-regiões tendo, como referência, a imagem Ikonos. Nesta classificação não foi observada a classe sombra e pode-se notar a superestimativa de vegetação arbórea, ocasionada pela confusão na classe 13. Pode-se apenas identificar as áreas construídas na sub-região 1 e, em parte na sub-região 3, além de áreas de vegetação rasteira espalhadas pelas sub-regiões mas sem permitir relação direta com a referência visual da imagem Ikonos. Na sub-região 2, com a presença de lagos de extração de areia, a água não foi diferenciada dos demais alvos. De uma forma geral estes resultados não conseguiram representar as classes de cobertura presentes na área de estudo devido à alta confusão e superestimativa de área urbana (CP\_5x5) e vegetação arbórea (CP\_7x7).

As imagens classificadas para toda a área de estudo são apresentadas na Figura 93, seção 6.7, onde é feita uma comparação entre todas as classificações.

Figura 83 - Sub-regiões e linha do duto sobre imagem Ikonos e resultados da agregação da classificação Cloude-Pottier.



### 6.7.1.2 – Resultados da classificação de Wishart derivada de Cloude-Pottier

Para a classificação de Wishart derivada de Cloude-Pottier, o número de classes pode variar de 1 a 16. Para este estudo, foram geradas as 16 classes a partir de imagem filtrada com janela 5x5 (Figura 84) ou com janela 7x7 (Figura 85). Os histogramas apresentados nestas figuras referem-se à área de estudo.

Pode-se observar por estas figuras que houve uma reclassificação de *pixels* para as classes pertencentes às zonas vizinhas, acarretando em uma maior distribuição e frequência das classes na área de estudo. Para a classificação com janela 5x5 as classes mais representativas em ordem de maior ocorrência são as classes 11, 10 e 12, correspondendo às zonas 4, 2 e 5, respectivamente. A zona 4 é caracterizada por espalhamentos múltiplos e média entropia, ocasionado pelo efeito do dossel ou ainda pela presença de aglomerados urbanos. As zonas 2 e 5 possuem alta e média entropia, respectivamente, caracterizadas pelo espalhamento da vegetação.

Para a classificação com janela 7x7 há um aumento significativo na representatividade das classes, ocorrendo as classes 1, 11, 9, e 13, que correspondem às zonas 1, 4 e 6. As zonas 1 e 4 são caracterizadas por alta e média entropia, de estruturas complexas, enquanto a zona 6 possui espalhamento superficial, com média entropia.

Figura 84 - Classificação de Wishart derivada de Cloude-Pottier aplicada à imagem da matriz de covariância filtrada com janela de 5x5 pixels e frequência das classes

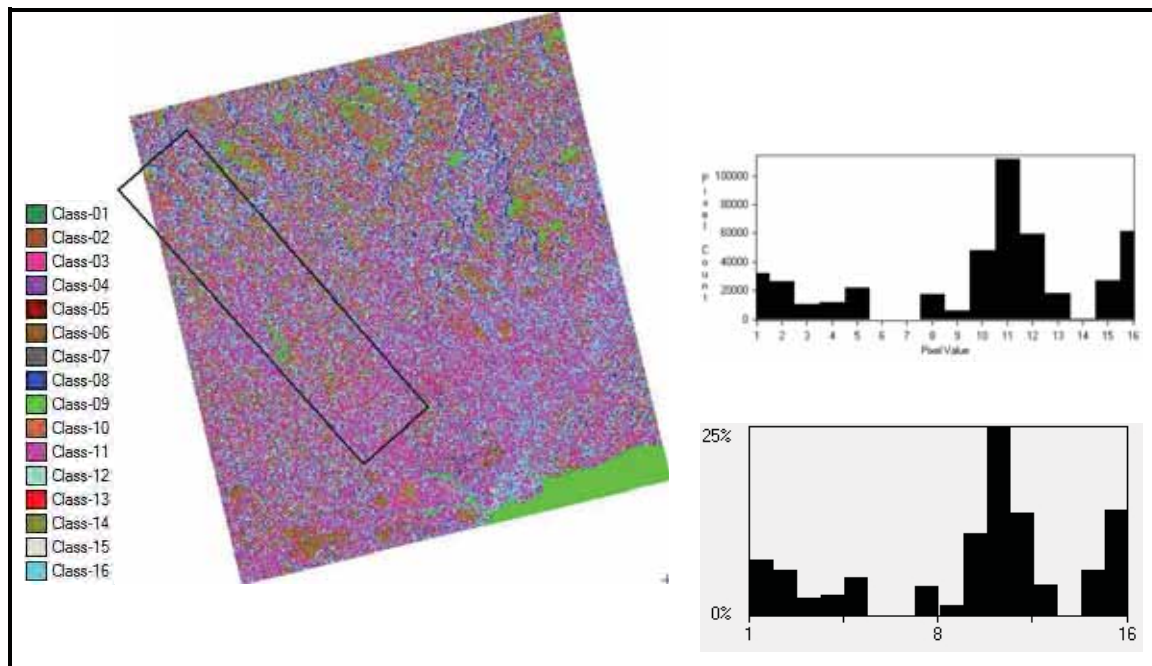
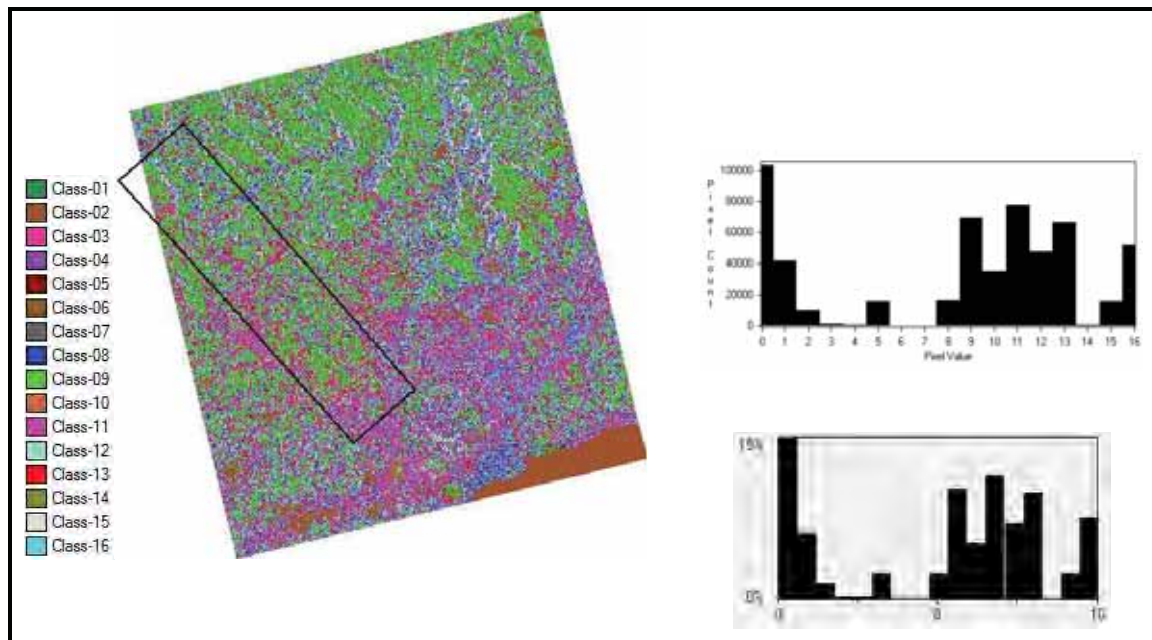


Figura 85 - Classificação de Wishart derivada de Cloude-Pottier aplicada à imagem da matriz de covariância filtrada com janela de 7x7 pixels e frequência das classes.



Ao analisar a área de estudo pode-se dizer que a classificação de Wishart derivada de Cloude-Pottier, quando comparada à classificação de Cloude-Pottier, representa melhor a área de estudo devido aos diferentes tipos de espalhamentos presentes. As áreas de vegetação possuem estruturas complexas com dossel variado, e abruptos contatos entre agropecuária e floresta. Além disto pode-se observar que a Baía de Guanabara (canto sudeste da imagem) foi melhor delimitada quando comparada com a classificação de Cloude-Pottier.

#### **6.7.1.2.1 – Agregação das classes da classificação de Wishart derivada de Cloude-Pottier para classes de cobertura da terra**

Assim como para a classificação CP, a decisão sobre a agregação de classes para a classificação CP\_WIS\_5x5 foi efetuada através da análise visual e da porcentagem de ocorrência das amostras de cobertura da terra nas 16 classes (Tabela 17). Baseado nos valores apresentados, as classes 1, 8 e 15 não foram agregadas de acordo com a maior frequência das amostras e sim, de acordo com a representatividade e conhecimento da área de estudo. Nas demais classes, o critério de porcentagem foi aceito. Para a classe 11, que apresentou grande porcentagem de ocorrência de várias amostras de cobertura da terra, foi adotado o critério de porcentagem devido à alta confusão que outras classes poderiam ocasionar. Porém, nesta agregação foi possível ter todas as classes de cobertura da terra representadas.



Tabela 17 - Porcentagem de ocorrência das amostras de cobertura da terra para as 16 classes geradas pela classificação de Wishart derivada de Cloude-Pottier com janela 5x5.

Classes definidas pela Classificação de CP_WIS 5x5		Amostras de cobertura da terra					
		Vegetação arbórea	Vegetação rasteira	Solo exposto	Área construída	Água	Sombra
Porcentagem das amostras nas classes geradas (%)	1	2.44	10.34	12.14	3.72	0.60	16.33
	2	3.51	10.19	5.00	10.93	0.80	11.28
	3	1.83	2.91	5.71	13.72	0.00	0.00
	4	2.82	2.68	3.57	4.42	0.00	0.99
	5	9.92	3.14	4.46	2.79	0.00	0.49
	6	0.00	0.00	0.00	0.70	0.00	0.00
	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	8	2.67	0.23	0.00	10.23	0.00	0.00
	9	0.00	1.99	0.36	4.65	94.04	9.18
	10	2.21	12.18	11.96	8.14	4.17	47.20
	11	24.35	28.51	23.21	16.51	0.20	3.70
	12	14.43	17.78	16.79	4.19	0.20	7.83
	13	4.89	3.45	5.00	0.00	0.00	2.65
	14	0.00	0.00	0.18	4.42	0.00	0.00
	15	8.85	1.23	2.32	9.77	0.00	0.00
	16	22.06	5.36	9.29	5.81	0.00	0.37

Obs.: Em verde a combinação entre a análise visual e a maior frequência e, em amarelo, a amostra com maior frequência que, visualmente não representou a melhor opção para agregação.

A imagem CP\_WIS\_7x7 teve suas classes agregadas de forma diferente que a CP\_WIS\_5x5 e a Tabela 18 apresenta a porcentagem de ocorrência das amostras nas 16 classes.

Ao contrário da CP, esta classificação teve maior distribuição de classes o que exigiu conhecimento da área para a agregação. Às classes 1, 8, 11 e 15 foram atribuídas classes de cobertura que visualmente representavam melhor a área de estudo e não causariam superestimativa. Para as demais classes, foi adotado o critério matemático, de maior porcentagem de ocorrência. A classe solo exposto não foi atribuída a nenhuma classe na CP\_WIS\_5x5.

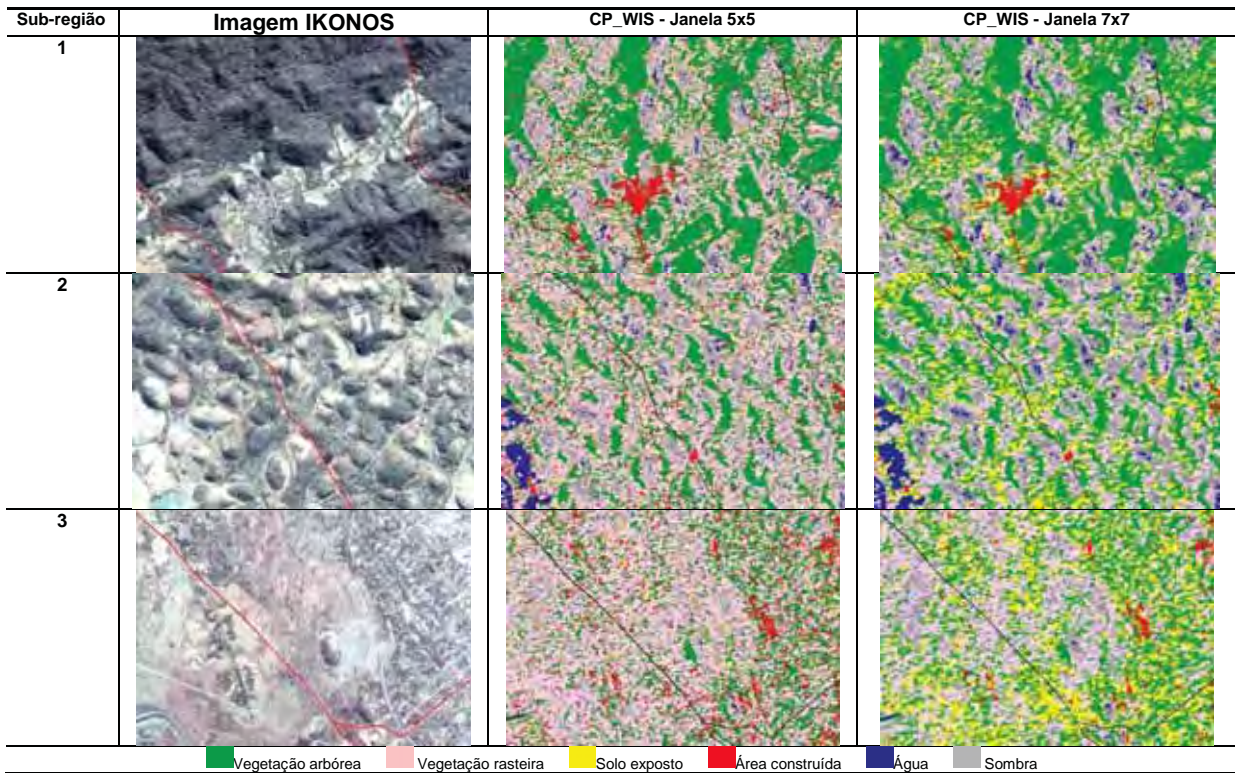
Tabela 18 - Porcentagem de ocorrência das amostras de cobertura da terra para as 16 classes geradas pela classificação de Wishart derivada de Cloude-Pottier com janela 7x7.

Classes definidas pela Classificação de CP_WIS 7x7		Amostras de cobertura da terra					
		Vegetação Arbórea	Vegetação Rasteira	Solo Exposto	Área Construída	Água	Sombra
Porcentagem das amostras nas classes geradas (%)	1	10,00	11,34	13,57	2,79	0,20	4,19
	2	0,00	3,83	2,32	3,95	96,22	15,40
	3	0,08	0,31	0,89	6,05	0,00	0,00
	4	0,00	1,07	0,54	3,02	0,00	0,00
	5	7,71	1,46	6,96	6,28	0,20	0,00
	6	0,00	0,00	0,00	0,93	0,00	0,00
	7	0,00	0,00	0,00	0,70	0,00	0,00
	8	4,27	0,00	0,00	6,98	0,00	0,00
	9	1,98	17,55	17,86	13,49	2,19	66,30
	10	4,81	13,64	8,21	0,93	0,60	7,46
	11	14,05	16,09	17,14	14,42	0,00	0,31
	12	8,17	14,64	11,25	12,09	0,60	5,05
	13	26,72	17,16	13,39	2,79	0,00	1,29
	14	0,00	0,00	0,36	3,02	0,00	0,00
	15	1,22	0,46	0,00	13,72	0,00	0,00
	16	20,99	2,45	7,50	8,84	0,00	0,00

Obs.: Em verde a combinação entre a análise visual e a maior frequência e, em amarelo, a amostra com maior frequência que, visualmente não representou a melhor opção para agregação.

O resultado visual da agregação de classes para a classificação de Wishart derivada de Cloude-Pottier é apresentado na Figura 86 para as três sub-regiões. As imagens classificadas para toda a área de estudo são apresentadas na Figura 94, na seção 6.7.

Figura 86 - Sub-regiões e linha do duto sobre imagem Ikonos e resultados da agregação da classificação de Wishart derivada de Cloude-Pottier.



No caso da classificação CP\_WIS as classes vegetação arbórea e área urbana foram bem discriminadas na sub-região 1 porém, as classes água e vegetação rasteira foram superestimadas. Nesta mesma sub-região, a classe sombra, não detectada na CP apresentou confusão com a classe água para as duas classificações. No caso da CP\_WIS\_7x7 também houve superestimativa da classe solo exposto que não foi encontrada na CP\_WIS\_5x5.

A delimitação das áreas com maior reflexão especular, como é o caso dos corpos d'água, foi melhor e mais coerente com o encontrado na área de estudo, como observado na sub-região 2. A classe sombra foi superestimada nesta sub-região mas, no entanto, as áreas de vegetação rasteira (CP\_WIS\_5x5) e de solo exposto (CP\_WIS\_7x7) representaram melhor visualmente a área de estudo.

Na sub-região 3, onde ocorrem grandes extensões de campo natural, a CP\_WIS\_5x5 delimitou contornos até então não detectados, principalmente no limite do campo com áreas urbanas e ocorrência de vegetação arbórea (no centro da figura). A classificação CP\_WIS\_7x7 já demonstrou maior confusão desta área com solo exposto.

Visualmente, a classificação de CP\_WIS apresentou melhores resultados que a CP, pois baseada na distância de Wishart, as classes podem mudar de zona (plano  $H/\alpha$ ) e aumentar sua separação quando comparadas aos resultados da CP. Porém, de acordo com LEE et. al. (2004) quando se utiliza o classificador estatístico de Wishart derivado da decomposição de Cloude-Pottier, a estabilidade na convergência dos *pixels* não é boa e a preservação das características dos espalhamentos não é garantida.

### **6.7.2 – Classificações derivadas da decomposição de Freeman-Durden**

A decomposição de Freeman-Durden preserva a natureza dos espalhamentos, gerando uma imagem de acordo com a variação da natureza dos alvos, o que facilita a diferenciação de algumas das classes de cobertura da terra. A Figura 87 apresenta os resultados da decomposição de Freeman-Durden para as sub-regiões, gerados a partir da imagem filtrada com filtro polarimétrico de janela 5x5 e 7x7 *pixels*.

Figura 87 - Sub-regiões, linha do duto, imagem IKONOS e resultados da decomposição de Freeman-Durden (R-superficial; G-double-bounce; B-volumétrico) geradas a partir da imagem filtrada com janelas de 5x5 e 7x7 pixels.

Sub-região	Imagem IKONOS	Janela 5x5	Janela 7x7
1			
2			
3			

R-superficial; G-double-bounce; B-volumétrico (magenta-sup+vol; ciano-vol + db; amarelo-sup +db)

Na sub-região 1, as áreas de relevo fortemente ondulado aparecem na tonalidade ciano e azul, indicando espalhamento do tipo volumétrico e *double-bounce*, característicos de áreas com vegetação densa. As áreas com aglomerados urbanos estão nas cores amarelas e verdes, típicas de espalhamento *double-bounce* e superficial. Nas demais áreas há confusão entre o espalhamento superficial, nas áreas onde ocorreu inversão e encurtamento de rampa, e o espalhamento volumétrico devido às áreas de vegetação preservada.

A sub-região 2, de relevo ondulado e morros e morrotes com topos preservados ou com presença de vegetação, ocorre certa distribuição de espalhamento superficial que pode ser atribuído às áreas de pasto. Na porção SW desta sub-região, a área de mineração apresenta comportamento semelhante ao de áreas urbanas, com predomínio de espalhamento superficial e *double-bounce*. Este fato pode estar relacionado à presença de areia morros de areia próximos às lagoas, e grande presença de equipamentos, instalações para permitir a extração. As lagoas também possuem alta turbidez e se assemelham às áreas de solo exposto, por isso o espalhamento superficial evidente.

A área plana e característica de várzea da sub-região 3 possui a ocorrência de aglomerados urbanos e grandes extensões de campo natural. Nas áreas urbanas houve o predomínio do espalhamento do tipo superficial e *double-bounce*, característicos deste tipo de alvo. Nas áreas planas, onde ocorrem os campos naturais, há certa confusão entre espalhamento superficial e volumétrico, que está relacionado às diferentes fisionomias deste tipo de vegetação que é entremeado por áreas de vegetação mais densa. Nesta região ocorrem campos, pastos, solos expostos e esta variação foi identificada pelo método.

Não foi observada variações visuais significativas das decomposições geradas a partir da imagem filtrada com janelas de 5x5 ou 7x7 *pixels*.

Devido ao fato da decomposição de Freeman-Durden considerar os tipos de espalhamento presentes na área estudada, os resultados são coerentes com o comportamento dos alvos e também variaram de acordo com o relevo. Apesar deste método de decomposição ser mais indicado para áreas planas, as áreas de relevo foram bem discriminadas.

### 6.7.2.1 – Classificação de Wishart derivada de Freeman-Durden

Nesta classificação, em uma primeira etapa são reconhecidos os tipos de espalhamento e posteriormente, com a distribuição de Wishart, a imagem pode gerar até 30 classes para cada tipo de espalhamento. No caso do algoritmo implementado no aplicativo PCI®, são geradas 3 classes para cada tipo de espalhamento. As classes 1, 2 e 3 representam áreas onde o espalhamento superficial é dominante; as classes 4, 5 e 6 indicam áreas onde o espalhamento *double-bounce* é dominante, e as classes 7, 8 e 9 onde o espalhamento volumétrico é dominante.

A classificação de Wishart derivada de Freeman-Durden é apresentada na Figura 88, para imagem filtrada com janela de 5x5 e na Figura 89, para imagem filtrada com janela de 7x7. Nestas figuras as classes onde os espalhamentos superficial, de *double-bounce* ou volumétrico são dominantes são apresentadas em tons de azul, amarelo e verde, respectivamente.

Os resultados da classificação de Wishart derivada de Freeman-Durden indicam a dominância dos mecanismos de espalhamento volumétrico (classes 7, 8 e 9), seguido pelo espalhamento superficial (classes 1, 2 e 3), tanto para imagem filtrada com janela 5x5, quanto para aquela filtrada com janela 7x7.

Figura 88 - Classificação de Wishart derivada de Freeman-Durden aplicada à imagem da matriz de covariância filtrada com janela de 5x5 pixels e frequência das classes.

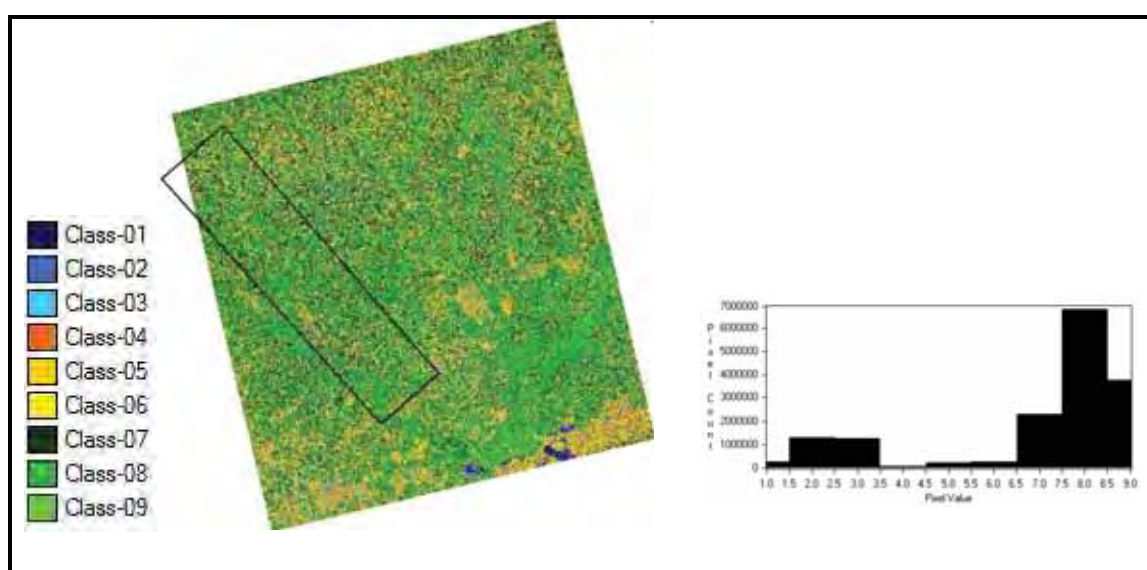
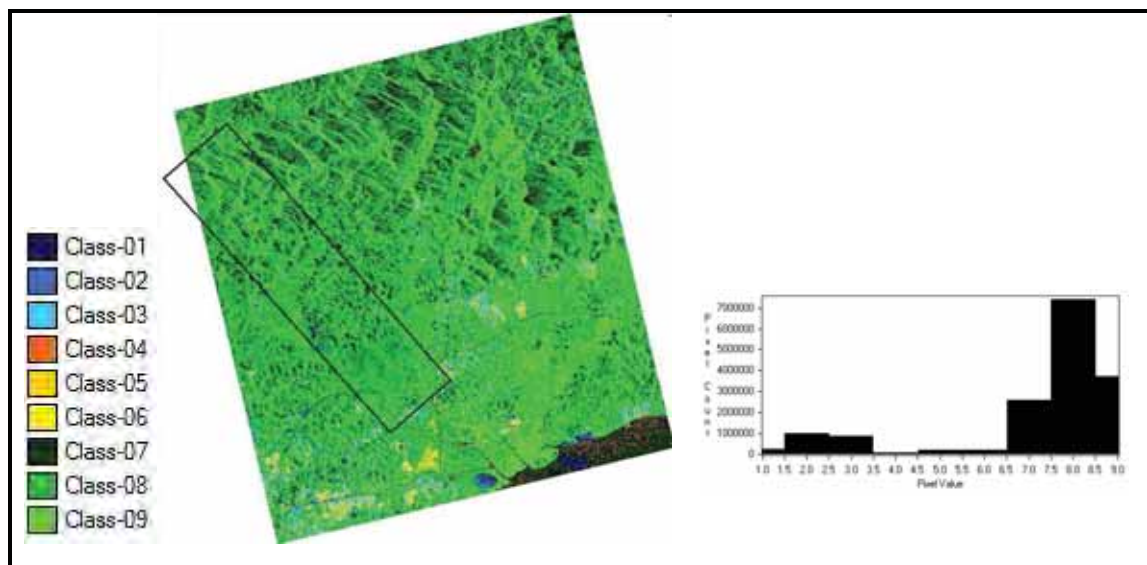


Figura 89 - Classificação de Wishart derivada de Freeman-Durden aplicada à imagem da matriz de covariância filtrada com janela de 7x7 pixels e frequência das classes.



#### 6.7.2.1.1 – Agregação de classes de Wishart derivada de Freeman-Durden

A decisão sobre a agregação de classes realizada para a classificação FD\_WIS\_5x5 é apresentada na Tabela 19.

Com menor quantidade de classes e representando os tipos de mecanismos de espalhamento dominantes na área, as três primeiras classes foram atribuídas à água, solo exposto e área construída, respectivamente, com espalhamento superficial evidente. As classes 4, 5 e 6 foram agregadas às classes água construída e água, com comportamento de espalhamento do tipo *double-bounce* e as classes 7, 8 e 9, foram atribuídas às classes de vegetação e sombra, onde o espalhamento volumétrico pode representar estes alvos.

Em todos os casos, a agregação da FD\_WIS\_5x5 necessitou apenas o critério matemático, onde foram observadas as porcentagens das amostras nas classes geradas. A grande concentração de amostras na classe 8 evidencia certa confusão entre os espalhamentos pois se trata de uma classe onde o volumétrico é o mecanismo mais encontrado.



Tabela 19 - Porcentagem de ocorrência das amostras de cobertura da terra para as 9 classes geradas pela classificação FD\_WIS\_5x5.

Classes definidas pela Classificação FD_WIS 5x5		Amostras de cobertura da terra					
		Vegetação Arbórea	Vegetação Rasteira	Solo Exposto	Área Construída	Água	Sombra
Porcentagem das amostras nas classes geradas (%)	1	0.00	0.54	4.82	5.81	29.22	3.57
	2	8.09	9.89	23.75	9.30	1.39	8.87
	3	7.40	2.68	4.46	10.47	0.00	0.12
	4	0.00	0.00	0.00	0.00	14.91	0.06
	5	0.38	1.30	1.25	6.05	0.20	0.25
	6	0.15	0.08	0.71	4.42	0.00	0.00
	7	1.22	11.72	5.36	8.37	53.68	56.81
	8	53.82	65.29	46.25	27.91	0.60	30.19
	9	28.93	8.51	13.39	27.67	0.00	0.12

Obs.: Em verde a combinação entre a análise visual e a maior frequência das classes.

Para a agregação da FD\_WIS\_7x7, a Tabela 20 apresenta os valores de porcentagem das amostras nas classes geradas por este classificador. Assim como na FD\_WIS\_5x5 a ocorrência das amostras evidencia o tipo de espalhamento dominante nas classes. No entanto, a classe 9 possuía maior porcentagem de amostras em área construída mas, por uma decisão baseada no comportamento visual e no tipo de espalhamento dominante nesta classe, foi atribuída à classe vegetação arbórea.

Desta forma, as duas agregações (FD\_WIS\_5x5 e FD\_WIS\_7x7) apresentaram o mesmo comportamento.

Tabela 20 - Porcentagem de ocorrência das amostras de cobertura da terra para as 9 classes geradas pela classificação FD\_WIS\_7x7.

Classes definidas pela Classificação FD_WIS 7x7		Amostras de cobertura da terra					
		Vegetação Arbórea	Vegetação Rasteira	Solo Exposto	Área Construída	Água	Sombra
Porcentagem das amostras nas classes geradas (%)	1	0,00	0,31	6,25	1,63	25,45	3,27
	2	7,63	6,05	24,11	10,00	0,40	4,81
	3	2,98	0,08	1,61	10,47	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,00	0,00	7,16	0,00
	5	0,00	0,92	1,25	2,09	0,00	0,06
	6	0,00	0,00	0,00	3,49	0,00	0,00
	7	1,30	13,56	8,39	12,56	65,61	70,12
	8	57,02	70,50	47,32	26,28	1,39	21,69
	9	31,07	8,58	11,07	33,49	0,00	0,06

Obs.: Em verde a combinação entre a análise visual e a maior frequência e, em amarelo, a amostra com maior frequência que, visualmente não representou a melhor opção para agregação.

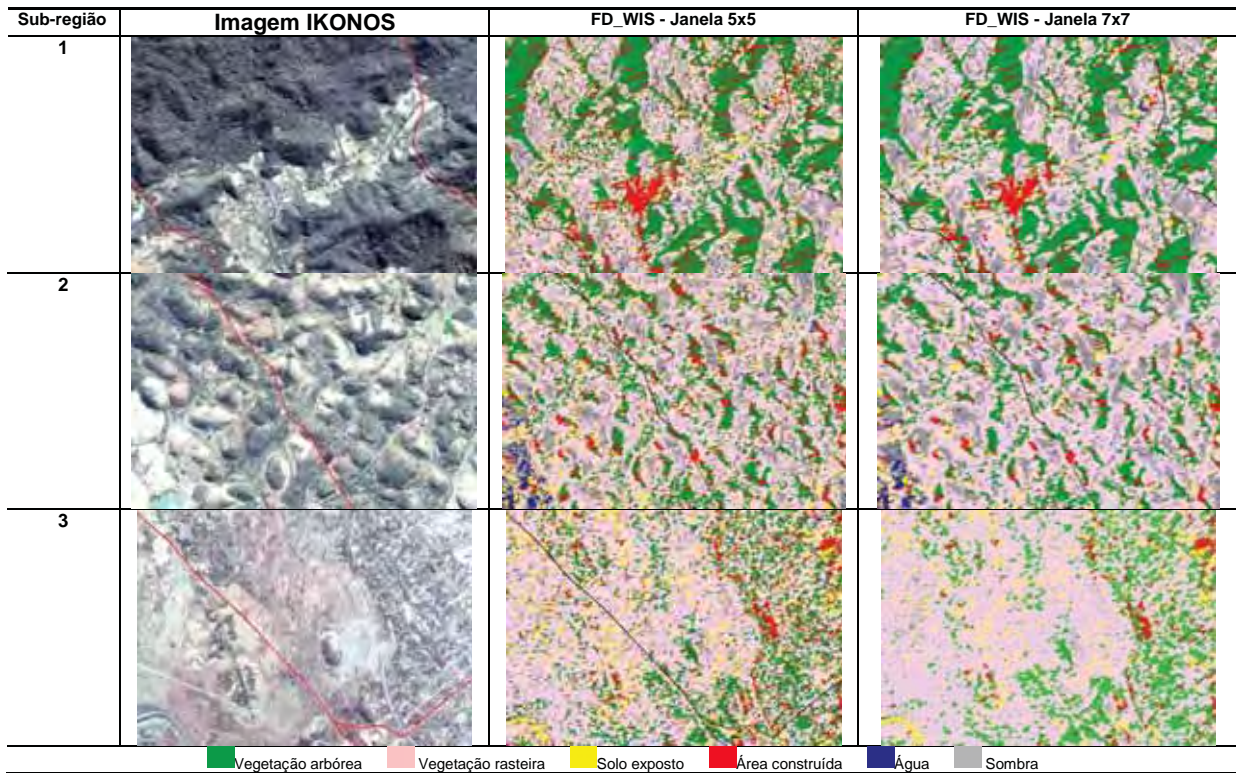
A Figura 90 apresenta o resultado visual das classificações FD\_WIS\_5x5 e FD\_WIS\_7x7 para as três sub-regiões da área de estudo. A imagem classificada para toda a área de estudo é apresentada na Figura 97, na seção 6.7.

O resultado das classificações FD\_WIS\_5x5 e FD\_WIS\_7x7 na sub-região 1 apresentou confusão entre áreas de sombra e vegetação rasteira. Este fato está relacionado aos efeitos do processo de aquisição de imagens SAR que geraram encurtamento da rampa e deixaram os *pixels* saturados, com mesmo comportamento das áreas com espalhamento superficial. Nesta mesma região, apesar da área construída ter sido bem discriminada, foi superestimada pelo mesmo motivo da vegetação rasteira.

Na sub-região 2 este classificador também apresentou confusão entre as classes sombra e vegetação rasteira e a superestimativa de área construída também se deve aos efeitos do imageamento.

Nas áreas planas da sub-região 3, os alvos foram bem diferenciados e teve a melhor caracterização visual da área de estudo, quando preserva as áreas de vegetação rasteira que dominam nesta sub-região. No entanto, as classes de área construída e sombra foram superestimadas, muitas vezes, confundindo com a classe solo exposto.

Figura 90 - Sub-regiões e linha do duto sobre imagem Ikonos e resultados da agregação da classificação de Wishart derivada de Freeman-Durden.



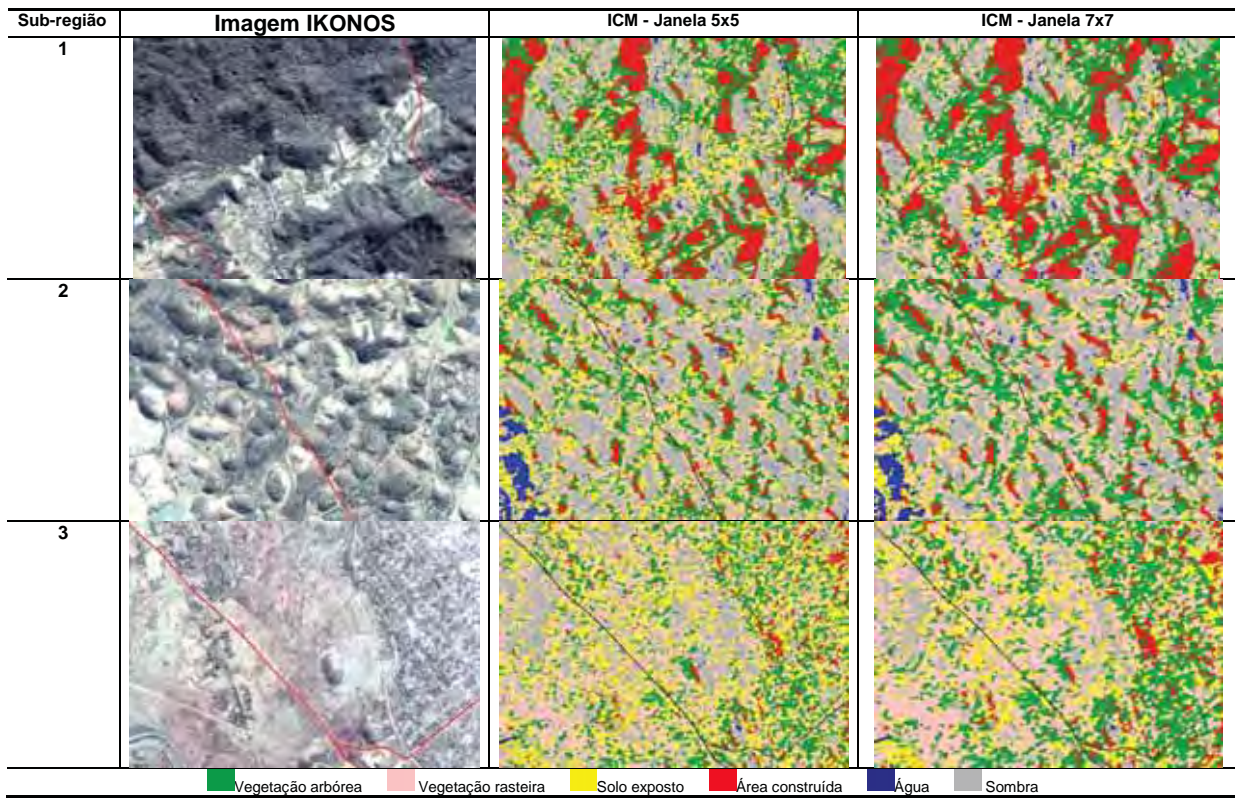
### 6.7.3 – Classificação MaxVer-ICM

Nesta seção é apresentado o resultado da classificação supervisionada MaxVer-ICM, em que somente as informações de amplitude são utilizadas. No caso deste classificador não houve o processo de agregação por ser supervisionado. As amostras utilizadas para a agregação foram aqui utilizadas para gerar os resultados e auxiliar o classificador. Na Figura 91 são evidenciados os resultados da classificação para as sub-regiões, das imagens ICM\_5x5 e ICM\_7x7.

Ao observar a Figura 91, ocorre uma superestimativa da classe área construída em todas as sub-regiões. Este resultado está relacionado, principalmente na sub-região 1, aos efeitos de imageamento SAR e que saturam os *pixels*, deixando-os com o mesmo comportamento de áreas construídas e solo exposto e também é observado na sub-região 2, em menor proporção. Ao observar o tamanho da janela de filtragem, pode-se dizer que a superestimativa é menor quanto menor for o seu tamanho, pois aumentando a janela o efeito borrado é maior e o arraste e saturação dos *pixels* aumentam de tamanho.

Na sub-região 2 a água é bem delimitada porém também ocorre superestimativa das áreas de sombra. As áreas de sombra também se confundem com solo exposto e vegetação rasteira na sub-região 3, mais plana, com campos naturais que podem causar tal confusão. Nestas áreas, o contorno no centro da figura com a diferenciação das classes de vegetação rasteira e vegetação arbórea ficou evidente.

Figura 91 - Sub-regiões e linha do duto sobre imagem Ikonos e resultados da agregação da classificação MaxVer-ICM.



## 6.8 – Análise comparativa dos resultados das classificações

Após a agregação, os resultados das classificações foram avaliados e comparados entre si. Uma das análises foi a visual e a outra foi baseada no coeficiente de concordância *kappa* e da exatidão global. As Figuras 92 a 95 apresentam os resultados das classificações da área de estudo com a filtragem de janelas 5x5 e 7x7, respectivamente.

Como era esperada, a aplicação da filtragem com uma janela maior acarreta um aspecto mais suave nos resultados das classificações que, no caso da CP não correspondeu visualmente à heterogeneidade da área de estudo. Na Figura 93a é possível observar, além da superestimativa de área construída, a atribuição da classe de vegetação arbórea em grande parte da área de estudo e poucas ocorrências de vegetação rasteira, solo exposto e água, que teve sua resposta confundida com área construída. Ao analisar a Figura 93b observa-se que apesar de superestimar a vegetação arbórea, o classificador CP\_7x7 não superestima a área construída mas a confunde com água. Novamente as classes vegetação rasteira, solo exposto e água possuem pouca representação nos resultados CP. Em nenhuma das classificações a classe sombra foi discriminada.

No caso das classificações CP\_WIS, apresentadas nas Figuras 94a e 94b, a heterogeneidade da área foi bem representada pelos resultados obtidos. As áreas de vegetação arbórea foram bem diferenciadas na CP\_WIS\_5x5 e superestimadas na CP\_WIS\_7x7. Por consequência, as áreas de vegetação rasteira ficaram em maior evidência na CP\_WIS\_5x5. Ao contrário da CP, esta classificação diferencia as áreas onde o relevo ocasionou a saturação e confusão de *pixels*, ao norte da área. As áreas com presença de corpos d'água foram bem representados nas duas classificações CP\_WIS, mas na CP\_WIS\_7x7 houve uma superestimativa desta classe. Já com a classe área construída ocorreu o contrário: a CP\_WIS\_5x5 superestimou enquanto a CP\_WIS\_7x7 apresentou a melhor definição desta classe para a área de estudo. As classes sombra e solo exposto apresentaram boa distribuição na área e nos resultados da CP\_WIS\_5x5 houve superestimativa de sombra enquanto na CP\_WIS\_7x7, a superestimativa foi observada para a classe solo exposto.

Figura 92 - Resultado visual das classificações para a área de estudo (a) CP\_5x5 e (b) CP\_7x7.

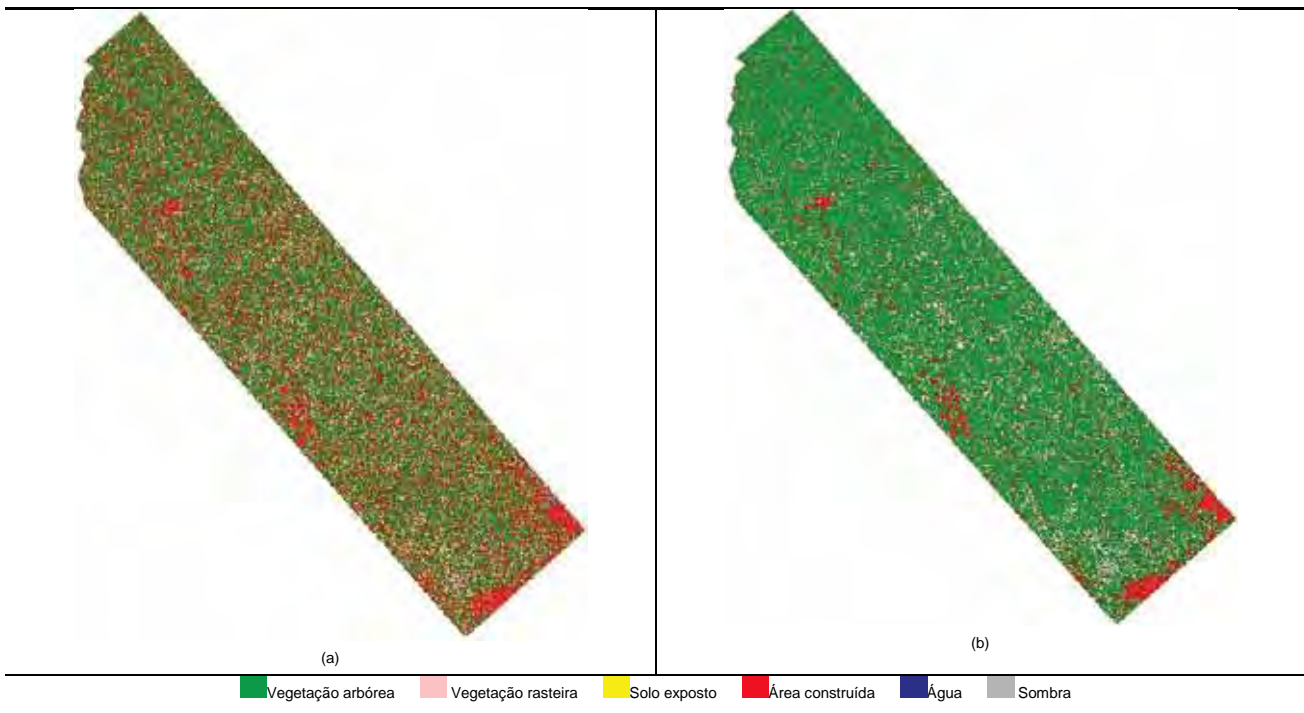


Figura 93 - Resultado visual das classificações para a área de estudo (a) CP\_WIS\_5x5 e (b) CP\_WIS\_7x7.

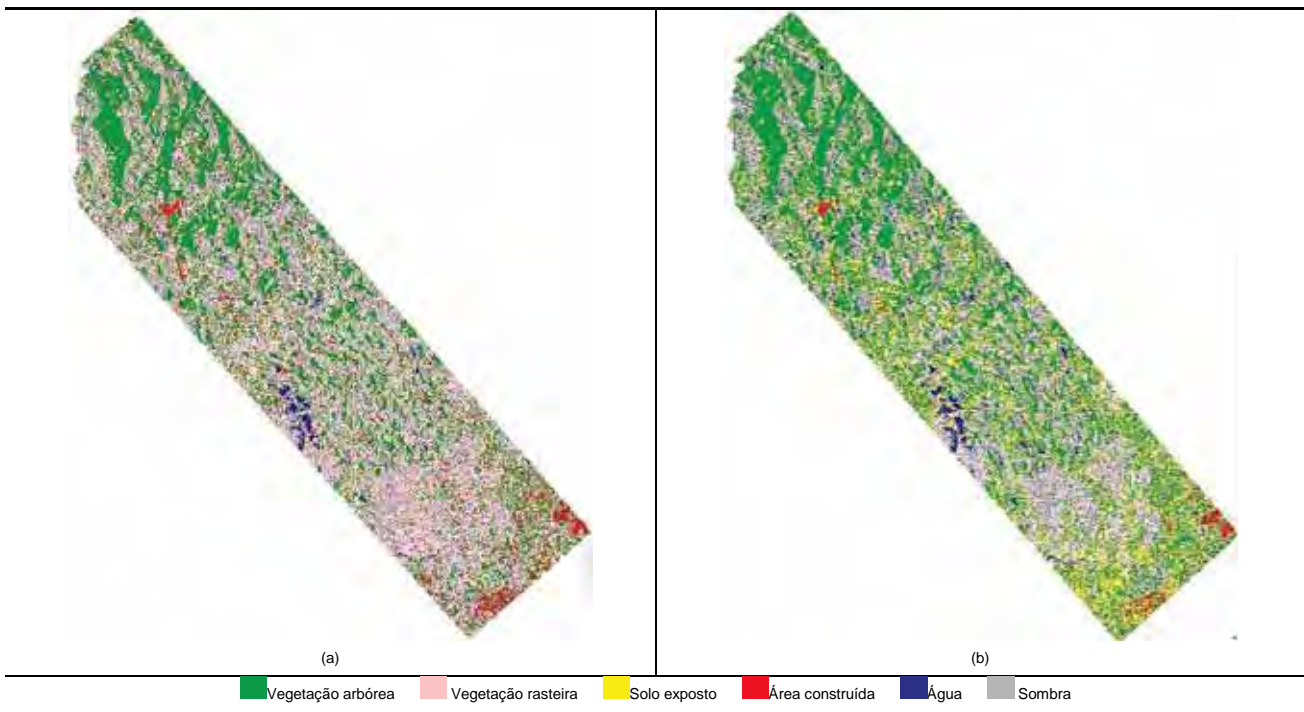




Figura 94 - Resultado visual das classificações para a área de estudo (a) FD\_WIS\_5x5 e (b) FD\_WIS\_7x7.

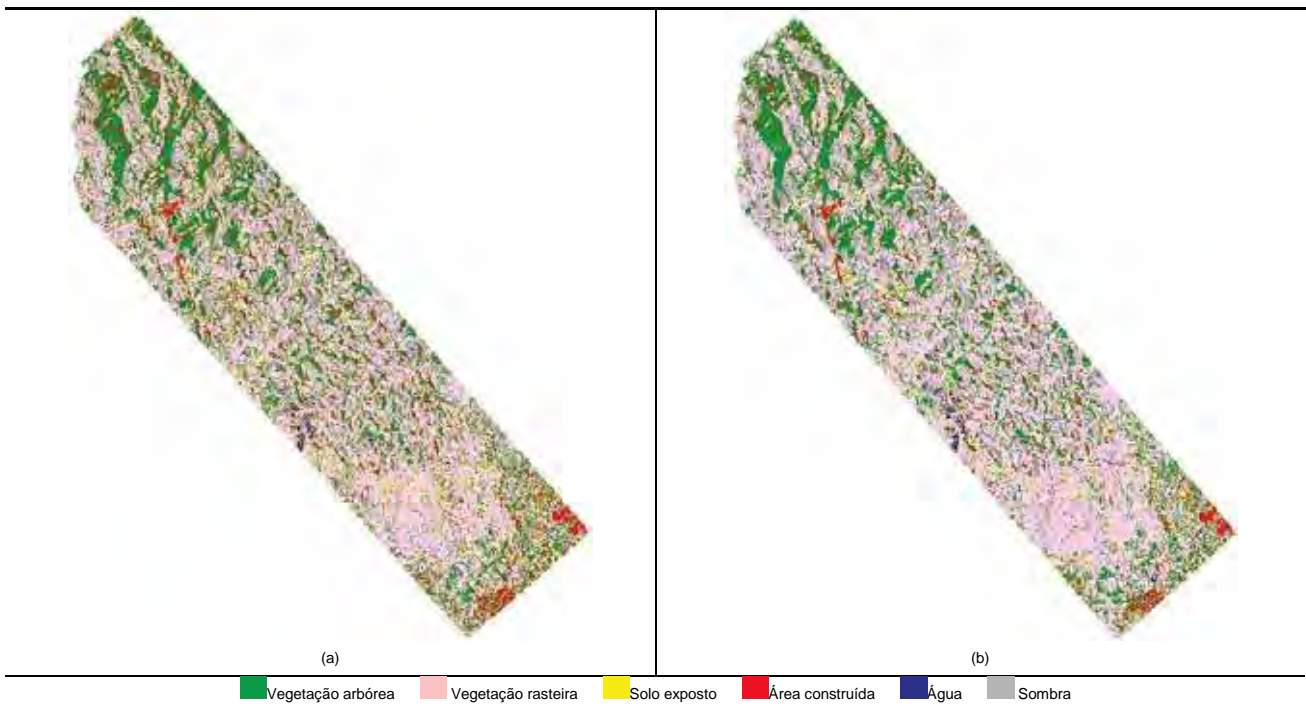
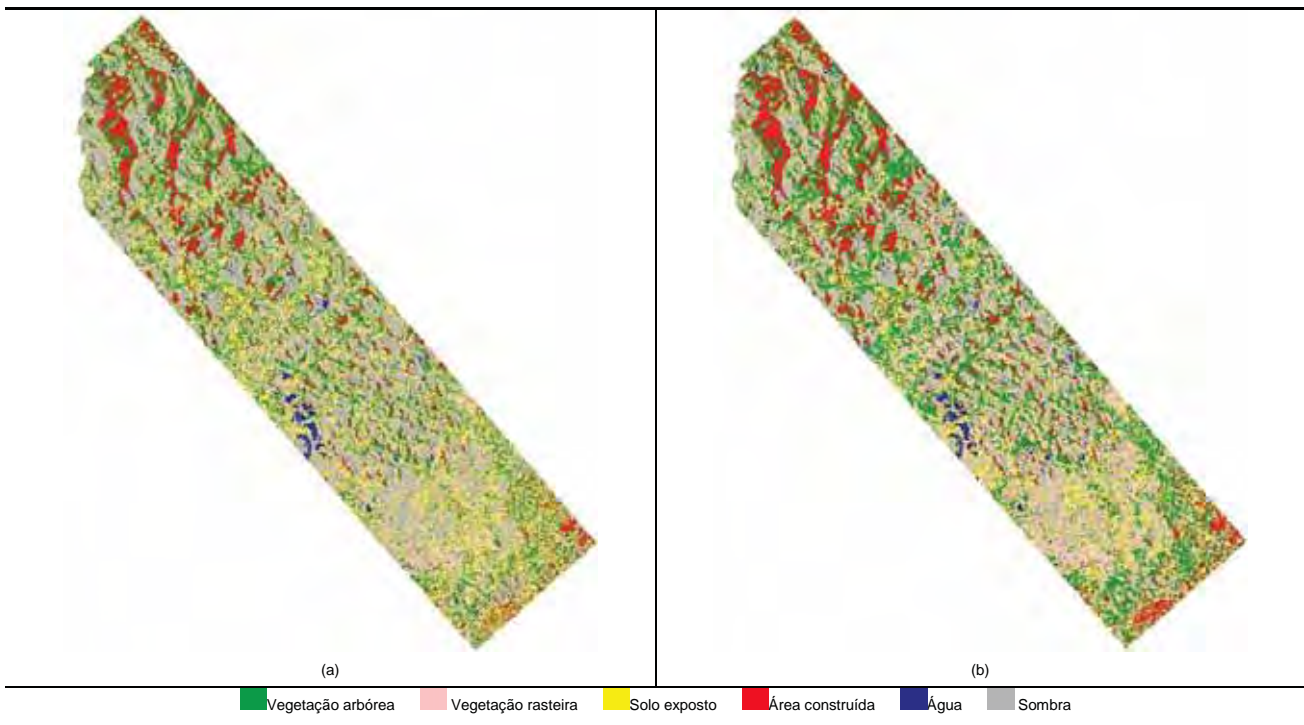


Figura 95 - Resultado visual das classificações para a área de estudo (a) ICM\_5x5 e (b) ICM\_7x7.



Para os resultados apresentados na Figura 94, das classificações FD\_WIS, as classes também representaram a heterogeneidade da área de estudo. As classes de vegetação foram bem representadas nas áreas mais planas e com relevo ondulado, porém nas áreas de relevo fortemente ondulado, as áreas de vegetação arbórea foram subestimadas devido ao efeito do relevo. Com resultados bastante parecidos visualmente (Figura 95a e 95b), a FD\_WIS\_5x5 possui, como diferença, a menor ocorrência da classe sombra quando comparado à FD\_WIS\_7x7. As áreas de solo exposto e área urbana apresentam menor ocorrência e dispersão na FD\_WIS\_7x7, devido ao efeito de suavização que a janela de tamanho maior causa na imagem.

Por fim, ao analisar visualmente as classificações ICM\_5x5 e ICM\_7x7, (Figura 95a e 95b) que possuem comportamento semelhante, percebe-se a superestimativa da classe área construída, que foi encontrada nas regiões onde o encurtamento de rampa e inversão do relevo foram gerados durante o imageamento. Nas duas imagens classificadas houve superestimativa também da classe solo exposto e sombra. A classe água foi bem discriminada, com poucas áreas de confusão na ICM\_5x5 e ICM\_7x7. A vegetação rasteira foi confundida, em sua maioria, com a sombra, devido provavelmente ao comportamento do campo natural, onde as áreas desta classe seriam mais expressivas.

Os resultados globais das classificações também foram comparados através do coeficiente de concordância *kappa* e da exatidão global. A Tabela 21 apresenta os valores de exatidão global e do coeficiente de concordância *kappa* para todas as classificações.

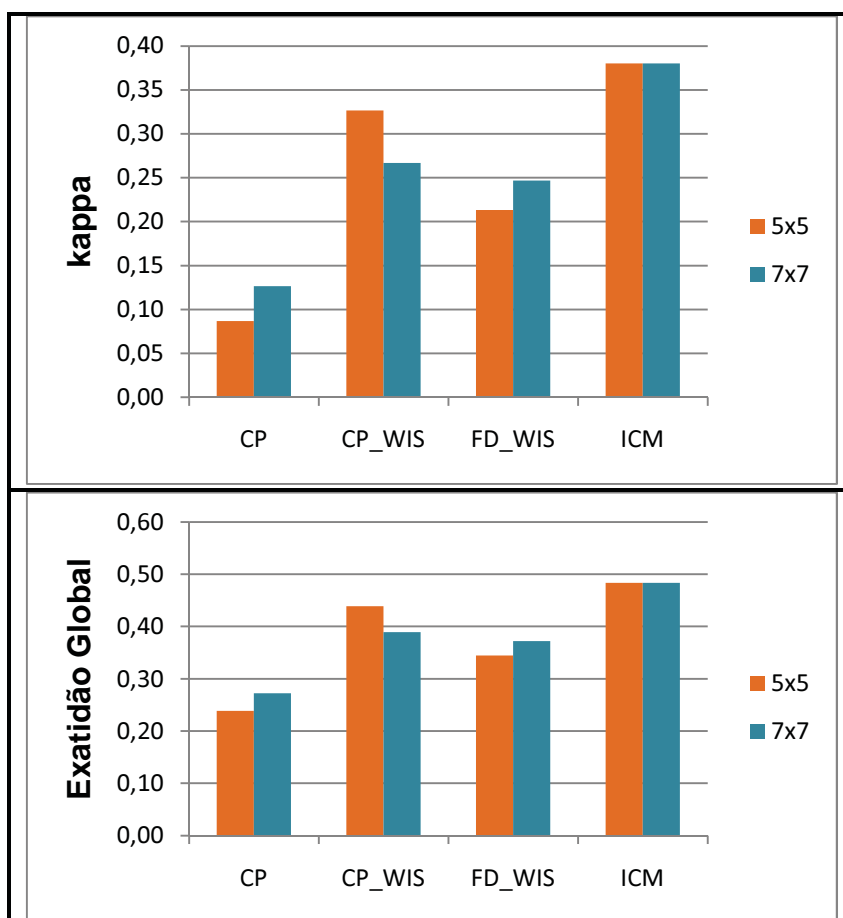
Tabela 21 - Valores de exatidão global, kappa e qualidade da classificação para todas as classificações geradas.

<b>Classificação</b>	<b>Exatidão Global</b>	<b><i>kappa</i></b>	<b>Qualidade da classificação</b>
CP_5x5	0.24	0.09	Ruim
CP_7x7	0.27	0.13	Ruim
CP_WIS5x5	0.44	0.33	Razoável
CP_WIS7x7	0.39	0.27	Razoável
FD_WIS5x5	0.34	0.21	Razoável
FD_WIS7x7	0.37	0.25	Razoável
ICM_5x5	<b>0.48</b>	<b>0.38</b>	Razoável
ICM_7x7	<b>0.48</b>	<b>0.38</b>	Razoável

Os valores de exatidão global e *kappa*, apresentados na Tabela 21, foram gerados com base nos 30 pontos de teste definidos aleatoriamente para as seis classes de cobertura da terra. Totalizando 180 pontos para análise, percebe-se que a qualidade das classificações geradas passou de ruim (CP) para razoável (CP\_WIS, FD\_WIS e ICM) tendo, como melhores resultados aqueles gerados pela classificação ICM seguidos pela CP\_WIS e FD\_WIS. Dentre os classificadores não-supervisionados, aqueles que utilizaram técnica de decomposição de alvos aliado à probabilidade de Wishart obtiveram melhores resultados que o classificador que considerou apenas a decomposição e alvos (CP).

Apesar de alterar visualmente os resultados dos classificadores, foi observado que estatisticamente a aplicação do filtro não alterou a semelhança estatística dos pares das imagens classificadas de CP, CP\_WIS e FD\_WIS. A Figura 96 apresenta a variação do coeficiente de concordância *kappa* e exatidão global, de acordo com os resultados das classificações.

Figura 96 - Valores de *kappa* e exatidão global das classificações realizadas com janela 5x5 e 7x7.



Ao observar as matrizes de confusão de todas as classificações, apresentadas na Tabela 22, pode-se inferir que as classes que apresentaram maior confusão foram vegetação arbórea e vegetação rasteira para todas as classificações. A classe água foi mais bem classificada na ICM e CP\_WIS e isso é observado no resultado visual da classificação. A classificação CP não identifica áreas com diferenças de relevo enquanto a CP\_WIS já conseguiu separar as áreas sombreadas das demais. O classificador MaxVER-ICM superestimou a classe sombra, que foi melhor classificada na CP\_WIS. A classe área construída foi melhor delimitada na classificação CP\_WIS e ICM mas, no entanto, a ICM superestimou esta classe na área onde ocorre efeitos do relevo e o comportamento é semelhante às outras áreas urbanas e porque não foram coletadas amostras na região onde o relevo apresentou deslocamentos. Na CP\_WIS, esta confusão entre as classes já ocorreu com o solo exposto, que foi melhor caracterizado pela FD\_WIS 7x7.

Pode-se dizer que, para este estudo, a análise exploratória das amostras nos dados FineQuadPol do RADARSAT-2 foi bastante importante, porém os resultados gerados ficaram restritos apenas às classes de cobertura da terra.

Tabela 22 - Matrizes de confusão das classificações geradas neste trabalho.

CLASSIFICAÇÕES	5X5								7X7							
	CP	arborea	rasteira	solo	construida	agua	sombra	Total	CP_7x7	arborea	rasteira	solo	construida	agua	sombra	Total
CP	CP_5x5	arborea	rasteira	solo	construida	agua	sombra	Total	CP_7x7	arborea	rasteira	solo	construida	agua	sombra	Total
	arborea	20	15	14	11	8	16	84	arborea	30	24	27	19	12	26	138
	rasteira	0	7	7	4	9	3	30	rasteira	0	6	0	1	2	4	13
	solo	2	0	3	2	1	0	8	solo	0	0	1	0	0	0	1
	construida	8	8	6	13	12	11	58	construida	0	0	1	10	14	0	25
	agua	0	0	0	0	0	0	0	agua	0	0	1	0	2	0	3
	sombra	0	0	0	0	0	0	0	sombra	0	0	0	0	0	0	0
	Total	30	30	30	30	30	30	180	Total	30	30	30	30	30	30	180
CP_WIS	CP_WS_5x5	arborea	rasteira	solo	construida	agua	sombra	Total	CP_WS_7x7	arborea	rasteira	solo	construida	agua	sombra	Total
	arborea	5	3	5	13	0	0	26	arborea	11	5	7	16	0	0	39
	rasteira	15	21	14	9	2	12	73	rasteira	11	7	9	2	1	4	34
	solo	1	1	3	0	0	0	5	solo	2	12	3	10	0	0	27
	construida	1	0	0	7	1	0	9	construida	0	0	1	2	0	0	3
	agua	0	0	2	0	25	0	27	agua	0	0	2	0	24	3	29
	sombra	8	5	6	1	2	18	40	sombra	6	6	8	0	5	23	48
	Total	30	30	30	30	30	30	180	Total	30	30	30	30	30	30	180
FD_WIS	FD_WS_5x5	arborea	rasteira	solo	construida	agua	sombra	Total	FD_WS_7x7	arborea	rasteira	solo	construida	agua	sombra	Total
	arborea	4	4	3	13	0	0	24	arborea	6	4	3	12	0	0	25
	rasteira	21	22	14	7	2	13	79	rasteira	17	21	16	11	2	7	74
	solo	2	0	6	3	2	1	14	solo	0	0	4	1	0	0	5
	construida	1	0	2	6	0	0	9	construida	1	0	0	6	0	0	7
	agua	0	0	1	0	8	0	9	agua	1	0	3	0	8	1	13
	sombra	2	4	4	1	18	16	45	sombra	5	5	4	0	20	22	56
	Total	30	30	30	30	30	30	180	Total	30	30	30	30	30	30	180
ICM	ICM_5x5	arborea	rasteira	solo	construida	agua	sombra	Total	ICM_7x7	arborea	rasteira	solo	construida	agua	sombra	Total
	arborea	3	2	4	10	0	0	19	arborea	7	8	5	6	0	0	26
	rasteira	9	14	6	3	1	1	34	rasteira	11	9	9	4	0	1	34
	solo	5	4	7	5	0	0	21	solo	1	3	7	9	0	0	20
	construida	2	0	1	9	0	0	12	construida	2	0	0	11	0	0	13
	agua	0	0	1	0	25	0	26	agua	0	0	2	0	24	0	26
	sombra	11	10	11	3	4	29	68	sombra	9	10	7	0	6	29	61
	Total	30	30	30	30	30	30	180	Total	30	30	30	30	30	30	180

## 7 – CONCLUSÕES

Com as técnicas adotadas nesta pesquisa, foi possível avaliar as potencialidades dos dados polarimétricos Fine QuadPol do RADARSAT-2 para o mapeamento de cobertura da terra em um trecho da faixa de dutos Rio de Janeiro – Belo Horizonte. Como a pesquisa respondeu ao objetivo principal, as conclusões serão detalhadas de acordo com os objetivos específicos, estabelecidos no capítulo 1. Embora os objetivos tenham sido definidos considerando classes de uso e cobertura da terra, os resultados obtidos mostraram que não foi possível detalhar as classes no nível 2, de uso e cobertura. Sendo assim, as conclusões que se seguem levam em consideração somente o nível 1, referente às classes de cobertura da terra.

### **A) Comportamento das classes de cobertura da terra de acordo com o plano $H/\alpha$ gerado a partir da decomposição de Cloude-Pottier**

A análise das imagens  $\alpha$ , H e A permitiu analisar a aleatoriedade dos mecanismos de espalhamento.

A área de estudo apresentou-se com valores altos de entropia, característicos de área de vegetação e localizadas nas escarpas e colinas dissecadas da área (sub-região 1), e por este motivo a anisotropia foi utilizada para que pudesse permitir uma maior separabilidade entre as classes. As áreas de baixa entropia foram encontradas em locais planos, como a região de mineração, sub-região 2.

A dispersão dos dados no plano  $H/\alpha$  foi observada nos resultados gerados a partir das imagens filtradas com janelas maiores. A análise exploratória baseada na decomposição de Cloude-Pottier auxiliou na definição das classes de cobertura da terra e se tornou uma importante ferramenta para avaliar o comportamento dos alvos.

### **B) Analisar o comportamento das classes de cobertura da terra de acordo com a decomposição de Freeman-Durden**

As imagens geradas a partir da decomposição de Freeman-Durden fornecem a contribuição de cada tipo de espalhamento (superficial, *double-bounce* e volumétrico) e auxiliaram na caracterização da área de estudo. As análises baseadas nas imagens serviram para diferenciar as classes de cobertura da terra e

para auxiliar na definição de amostras para o classificador de Wishart. Os resultados do classificador de Wishart derivado de Freeman-Durden representaram a heterogeneidade de classes existentes na área de estudo e indicam a potencialidade deste método de decomposição e produtos gerados a partir dele.

### **C) Influência da aplicação de filtro polarimétrico nos resultados das classificações e decomposições**

Os resultados das classificações indicaram que o tamanho da janela utilizada na filtragem influenciou o desempenho e o resultado visual dos classificadores, porém foram considerados estatisticamente iguais.

Em alguns casos, como a classificação de Cloude-Pottier e Wishart derivada de Freeman-Durden, a janela de 7x7 *pixels* ocasionou valores de kappa e exatidão global mais altos que as com janela 5x5 *pixels*. Na classificação de Wishart derivada de Freeman-Durden, ocorreu o contrário, janelas menores com valores de kappa mais altos. Para o classificador ICM, os valores de kappa e exatidão global foram os mesmos.

Baseada nesta variação, não foi possível determinar a influência do tamanho das janelas nos resultados dos classificadores.

### **D) Capacidade dos diferentes classificadores na discriminação das classes de cobertura da terra sobre diferentes condições geomorfológicas**

A separação da área de estudo em sub-regiões permitiu verificar os resultados das classificações para cada uma das diferentes condições de relevo. Os resultados do mapeamento em diferentes condições geomorfológicas foi dificultado nas áreas com relevo fortemente ondulado (sub-região 1) apresentando confusões entre classes devido aos efeitos gerados durante o processo de aquisição de imagens SAR, que persistiram nas áreas com relevo ondulado (sub-região 2). Nas áreas de relevo plano, que incluem além da sub-região 3 e áreas planas da sub-região 1 e 2, a identificação das classes foi mais coerente com a heterogeneidade da área de estudo.



### **E) Contribuição dos dados polarimétricos para a identificação das classes de cobertura da terra.**

A polarimetria dos dados Fine QuadPol do RADARSAT-2 foi determinante para a análise das amostras e definição das classes de cobertura da terra adotadas neste trabalho e os resultados dos classificadores também indicam potencialidades quanto à utilização destes dados.

Os dados polarimétricos permitiram uma razoável separabilidade das classes de cobertura da terra e, apesar dos resultados estatísticos demonstrarem que os dados em amplitude apresentaram melhores valores de kappa, visualmente, os resultados dos classificadores que utilizaram informações polarimétricas não devem ser desconsiderados.

## 8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Esta pesquisa teve, como contribuição, a avaliação de imagens RADARSAT-2, modo Fine QuadPol como subsídio ao mapeamento de cobertura da terra em faixas de dutos. Sabendo que os dutos atravessam diferentes tipos de paisagem, optou-se por selecionar uma área com representatividade em formas de relevo. Sendo assim, a contribuição está voltada ao trio “radar-cobertura da terra-relevo” para monitorar faixas de dutos.

Além da contribuição científica, esta pesquisa possui a contribuição direcionada para a empresa que monitora os dutos e, levando em consideração os resultados encontrados e ainda considerando que a tese não é conclusiva e suscita novas ideias e caminhos a serem trilhados tem-se, como novas linhas de pesquisa e exploração científica, os seguintes assuntos que deverão ser abordados em trabalhos futuros:

- Utilização de outros modos de aquisição das imagens RADARSAT-2;
- Testes com outros sensores que atuam em outra frequência com os mesmos objetivos;
- Utilização de técnicas de interferometria e polarimetria SAR (POLInSAR) para a caracterização de uso e cobertura e preservar as variações do relevo;
- Aplicação de técnicas de fusão de imagens de radar com imagens óticas de alta ou média resolução.

## 9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, S.; TOUTIN, T.; PIETRONITO, A.; BRUGMAN, M. Using ortho rectified SAR imagery acquired over rugged terrain for thematic application in glacier hydrology. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.23, n.1, pp.76-80, mar, 1997.

ALBERGA, V. A study of land cover classification using polarimetric SAR parameters. In: *International Journal of Remote Sensing*, vol. 28, n<sup>o</sup> 17, September 2007, p. 3851-3870.

ALI, Z.; KROUPNIK, G.; MATHARU, G.; GRAHAM, J.; BARNARD, I.; FOX, P.; RAIMONDO, G. RADARSAT-2 space segment design and its enhanced capabilities with respect to RADARSAT-1. **Canadian Journal of Remote Sensing**, vol. 30, n. 3, pp. 235-245, 2004.

ALMEIDA, F. F. M. D. The system of continental rifts bordering the Santos Basin Brazil. In: *Suplemento da Academia Brasileira de Ciências*. São Paulo, 1976. **Anais** v.48, p.15-26.

ALMEIDA-FILHO, R.; ROSENQVIST, A.; SHIMABUKURO, Y. E.; SANTOS, J. R. Evaluation and perspectives of using multitemporal L-band SAR data to monitor deforestation in the Brazilian Amazônia. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 2, n. 4, pp. 409-412, 2005.

ALMEIDA-FILHO, R.; ROSENQVIST, A.; SHIMABUKURO, Y. E.; SILVA-GOMEZ, R. Detecting deforestation with multitemporal L-band SAR imagery: a case study in western Brazilian Amazônia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 6, pp. 1383-1390, 2007.

ANDERSON, J.R.; HARDY, E.E.; ROACH, J.T.; WITMER, R.E. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. In: **Geological Survey Professional Paper 964**. A revision of the land use classification system as presented in U.S. Geological Survey Circular 671. United States Government Printing Office, Washington, 41p., 1976. Disponível em <http://landcover.usgs.gov/pdf/anderson.pdf> . Acessado em setembro de 2010.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Autorizações de operações concedidas a dutos**. Disponível em: [http://www.anp.gov.br/doc/petroleo/OleodutosETerminais/Lista\\_de\\_Dutos.xls](http://www.anp.gov.br/doc/petroleo/OleodutosETerminais/Lista_de_Dutos.xls) Acessado em fevereiro de 2009.

ASI – Agenzia Spaziale Italiana. **COSMO-SkyMed System Description e User Guide**, 95pp., 2008.

BIE, C. A. J. M.; LEEUWEN, J. A. V.; ZUIDEMA, P. A. **The land use database: a knowledge-based software program for structured storage and retrieval of user-defined land use data sets: user's reference manual**. Version 1.04 for MS-DOS. Enschede, Holanda. 1996. Disponível em:  
<<http://ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/LM/SUSLUP/Luse/Manual/chap2.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2009.

BOERNER, W.M.; MORISAKI, J.J. Basics of SAR Polarimetry: In EUROPEAN CONFERENCE ON SYNTHETIC APERTURE RADAR, 5., 2004, Ulm, Germany. **Proceedings...** Ulm: DLR, 2004. CD-ROM.04.

BOSSARD, M.; FERANEC, J.; OTAHEL, J. CORINE land cover technical guide – Addendum 2000. **Technical Report**, nº40, European Environment Agency, 2000.

CÂMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M., GARRIDO J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers e Graphics**, v 20, n 3, May-Jun 1996, p. 395-403.

CARDOSO, L.C.S. **Logística do Petróleo: transporte e armazenamento**. Rio de Janeiro: Interciência, 192p., 2004.

CCRS – Canadian Centre for Remote Sensing. **Applications Potential for RADARSAT-2**. J. van der Sanden e S. Ross (eds), Ottawa, Canada, 117p., 2001.

CCRS – Canadian Centre for Remote Sensing. **Conceitos fundamentais do radar imageador: nível básico**. Canadá, 91p., 1997.

CHENG, P.; TOUTIN, T. Automated high accuracy geometric correction and mosaicking without GCP. In: **GEOInformatics**, vol. 13, n.5, 2010.

CLOUDE, S. R.; POTTIER, E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n.2, pp. 498-518, 1996.

CLOUDE, S. R.; POTTIER, E. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n.1, p. 68-78, 1997.

CORREIA, A. H. **Projeto, desenvolvimento e avaliação de classificadores estatísticos pontuais e contextuais para imagens SAR polarimétricas.** (INPE-7178-TDI/679). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 271 p., 1999.

CPRM - Companhia de Recursos Minerais. **Projeto Rio de Janeiro.** Rio de Janeiro. 2000. Disponível em: <ftp://ftp.cprm.gov.br/pub/>. Acesso em: 15 ago. 2008.

CSA – Canadian Space Agency – **RADARSAT** website [on line] <http://radarsat.space.gc.ca/>. Abr. 1999.

DALLEMAND, J.F.; LICHTENEGGER, J.; RANEY, R.K.; SCHUMANN, R. **Radar imagery: theory and interpretation: lecture notes.** Rome: FAO/ESA, 1993 (RSC Series 67).

DE BIASE, M. A carta clinográfica: os métodos de representação e sua confecção. **Revista de Geografia**, v.6, p.45-60, 1993.

DIERKING, W. Quantitative roughness characterization of geological surfaces and implications for radar signature analysis. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol.37, nº 5, p. 2397-2412, 1999.

DLR – German Aerospace Center. Cluster applied Remote Sensing - **TerraSAR-X ground Segment: basic product specification document.** Issue 1.5 (TX-GS-DD-3302), 103p., 2008.

DOBSON, M. C. Forest information from Synthetic Aperture Radar. **Journal of Forestry**. n. 98, pp. 41-43, 2000.

DSG – Diretoria do Serviço Geográfico – Ministério do Exército do Brasil – Departamento de Engenharia e Comunicações. **Carta topográfica CAVA – 1:50.000.** 1966.

ESA – European Space Agency - **Information on ALOS PALSAR products for ADEN users.** Issue 1 – revision 1, 15p., 2007a.

ESA – European Space Agency - **Access to ENVISAT data.** EOEP-GSOP-EOPG-TN-06-0001, 68p., 2007b.

ESA – European Space Agency. POLSARPRO 4.2. Germany, 2007c.

ESRI – GIS and Mapping Software. ArcGIS 9.3. USA, 2008.

FAO – Food and Agriculture Organization of United Nations. Land Cover Classification System: classification concepts and user manual. Software version 2. 212p., 2005.

FOX, P.A.; LUSCOMBE, A.P.; THOMPSON, A.A. RADARSAT-2 SAR modes development and utilization. Canadian **Journal of Remote Sensing**, Technical Note, vol. 30, n.3, pp.258-264, 2004.

FREEMAN, A.; DURDEN, S. L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 3, pp. 963-973, 1998.

FREITAS, C.C.; FRERY, A.C.; CORREIA, A.H. The polarimetric G distribution for SAR data analysis. **Environmetrics**, vol.16, pp.13-31, 2005.

FREITAS, C.C.; SOLER, L.S.; SANT'ANNA, J.S.; DUTRA, L.V.; SANTOS, J.R.; MURA, J.C.; CORREIA, A.H. Land use and land cover mapping in the Brazilian Amazon using polarimetric airborne P-band SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol. 46, n.10, pp. 2956-2970, 2008.

FRERY, A. C., MÜLLER, H. J., YANASSE, C. C. F. SANT'ANNA, S. J. S. A model for extremely heterogeneous clutter. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 1997, vol. 35, pp. 648-659.

FRERY, A. C.; CORREIA, A. H.; FREITAS, C. C. Classifying multifrequency fully polarimetric imagery with multiple sources of statistical evidence and contextual information. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 10, pp. 3098-3109, 2007.

GABOARDI, C. **Utilização de imagem de coerência SAR para classificação do uso da terra: Floresta Nacional do Tapajós**. São José dos Campos, 139 p. (INPE-9612-TDI/842). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002.

GEIPOP – Ministério dos Transportes. **Anuário Estatístico de 1999**. 2001.

GEOMATICA **OrthoEngine**. User Guide. Canadá, 184p., 2005.

GLOBESAR Program – Recursos Educacionais para Sensoriamento de radar. CD-ROM. Canadá Centre for Remote Sensing, Canadá, 2001.

GONZALEZ, R. C., WOODS, R. E. **Processamento de Imagens Digitais**. Editora Edgard Blücher, 2000. 509 p.

GUIDICINI, G. ; IWASA, O.Y. **Ensaio de correlação entre pluviosidade e escoamento em meio tropical úmido**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, 1976. 48p. (Publicação IPT – 1080).

HEILBRON, M. ET. AL. A Orogênese Brasileira no Segmento Central da Faixa Ribeira, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v.25, n.4. 1995.

HELLMAN, M. **SAR polarimetry tutorial**. Rennes: Epsilon Nought, 2001. 109 p. Disponível em: <<http://www.fpk.tu-berlin.de/~anderl/epsilon/polarimetrytutorial.pdf>>. Acesso em: outubro, 2008.

HENDERSON, F.M.; LEWIS, A.J. **Principles e Applications of imaging radar**. Manual of Remote Sensing, John Wiley e Sons, Inc., 1998, 866p.

HUDSON, W. D.; RAMM, C. W. Correct formulation of the *kappa* coefficient of agreement. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 53, n. 4, pp.421-422, 1987.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual Técnico de Uso da Terra. **Manuais Técnicos em Geociências**, Rio de Janeiro, nº7, 2ªed., 2006.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapas online**, 2010a. Disponível em: [ftp://geoftp.ibge.gov.br/MDE/Projeto\\_RJ25/ASCII/](ftp://geoftp.ibge.gov.br/MDE/Projeto_RJ25/ASCII/). Acesso em novembro de 2010a.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Dados do Censo 2010 publicados no Diário Oficial da União do dia 04/11/2010. Disponível em: [http://www.censo2010.ibge.gov.br/dados\\_divulgados/index.php](http://www.censo2010.ibge.gov.br/dados_divulgados/index.php). Acesso em dezembro de 2010b.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Estações de superfície automática**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/automaticas.php>> . Acesso em dezembro de 2010.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. SPRING: Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas. **Manual de ajuda**, 2006.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2010. Disponível em: [http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com\\_contentview=articleid=6608:valor-economico-sp-superavit-primario-com-e-sem-petroleo-ecatid=159:clippingitemid=75](http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_contentview=articleid=6608:valor-economico-sp-superavit-primario-com-e-sem-petroleo-ecatid=159:clippingitemid=75)

ITT - Visual Information Solutions. Envi 4.5. Boulder, USA. 2008.

JAXA – Japan Aerospace Exploration Agency – User **Handbook**. NDX-070015. Japan, 143p., 2006.

KOEPPEL, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra** Fondo de Cultura Económica. 1948. 478 p.

KUPLICH, T. M. Estudos florestais com imagens de radar. **Espaço e Geografia**, vol. 6, n.1, pp.65-90, 2003.

KUPLICH, T. M. Temporal, spatial, spectral and polarisation characteristics of the SAR backscatter from regenerating tropical forests. Doctoral Thesis of Philosophy, Department of Geography, Faculty of Science, University of Southampton, 216p., 2001.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, n.1, pp. 159-174, 1977.

LANGHAM, E.J. RADARSAT – Canada's Program for Operational Remote Sensing. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol 8, n.1, p.29-37, 1982.

LEE, J.S.; DU, L.; SCHULER, D.L.; GRUNES, M.R. Statistical analysis and segmentation of multi-look SAR imagery using partial polarimetric data. **INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM**, 1995, Firenze, Italy. Proceedings... New York: IEEE, 1995, Jul. 1422–1424, 1995.



LEE J.S.; GRUNES; M.R.; DE GRANDI, G., Polarimetric SAR speckle filtering and its impact on terrain classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 37, n.5, p.2363–2373, September 1999a.

LEE, J. S.; GRUNES, M.R.; AINSWORTH, T.L.; LI-JEN DU; SCHULER, D.L.; CLOUDE, S.R. Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex Wishart classifier. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 37, n. 5, p. 2249–2258, September 1999.

LEE, J. S.; SCHULER, D. L.; AINSWORTH, T. L. Polarimetric sar data compensation for terrain azimuth slope variation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 38, n. 5, p. 2153-2163, September 2000.

LEE, J. S., M. R. GRUNES, T. L. AINSWORTH, L.J. DU, D. L. SCHULER, AND S. R. CLOUDE. "Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex Wishart classifier", **IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing**, 37, no. 5, pp. 2249-2258, 1999a.

LEE, J.S.; GRUNES, M.R.; GRANDI, G. Polarimetric SAR Speckle Filtering and its Implication of classification. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol. 37, n.5, pp.2363-2373, 1999b.

LEE, J.S.; POTTIER, E. **Polarimetric Radar Imaging from basic applications**. CRC Press – Taylor & Francis Group, 398p., 2009.

LEWIS, A.J.; HENDERSON, P.M.; COLCOMB, D.W. 1998. Radar fundamentals: the geoscience perspective. In: LEWIS, A.J. e HENDERSON, F.M. *Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radar*. 3<sup>rd</sup> ed. New York: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1998. 866p.

LILLESAND, T.M. e KIEFER, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. Madison: John Wiley e Sons, 1994.

LIU, W.T.H. *Aplicações de sensoriamento remoto*. Campo Grande: Ed. UNIDERP, 908p., 2006.

LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDÍZIO. E; MORAN, E. Change detection techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v.25, n.12, P.2365-2407, 2004.

MDA – MacDonald, Dettwiler and Associates Ltda. Geospatial Services. **RADARSAT-2 Brochure**. 6p., 2008.

MERCANTE, E.; ANTUNES, J.F.G.; ROCHA, J.V.; LAMPARELLI, R.A.C.L.; ZULLO Jr., J. Integração de dados de sensoriamento remoto e Sistemas de Informação Geográfica para análise de trajetos de um gasoduto. In: XII Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, **Anais**, Goiânia, pp.2717-2723, 2005.

MMA – Ministério do Meio Ambiente –Secretaria de Biodiversidade e Florestas – **PORTALBio** – Biomas brasileiros. Disponível em < <http://www.mma.gov.br/sitio/index.php?ido=conteudo.montaeidEstrutura=72eidMenu=3646>> Acesso em novembro de 2008.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 250p., 2001.

MOTT, H. **Remote Sensing with Polarimetric radar**. John Wiley e Sons, Inc. 309p., 2007.

MURA, J.C.; FREITAS, C.C.; DUTRA, L.V.; SANT´ANNA, S.J.S.; GAMA, F.F. **Fundamentos de Polarimetria**, Apostila de aula, 80p., 2008.

NASA - National Aeronautics and Space Administration. Applied Sciences Directorate. **Geocover**. Disponível em: <<https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>> Acessado em janeiro de 2007.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto**: princípios e aplicações. São Paulo, 1992, Ed. Edgard Blücher, 308p.

O´ROURKE, D. e CONNOLLY, S. Just oil? The distribution of environmental and social impacts of oil production and consumption. In: **Annu. Rev. Environmental Resources**, vol 28, pp.587-617, 2003.

OLIVEIRA, W.J. **Avaliação Ambiental de projetos dutoviários**. Material divulgado em Curso PRH-015, janeiro, 2008.

OLIVEIRA, W.J.; PEREIRA JUNIOR, E.R.; FONSECA, R.A.A.; ROCHA, M.A.; SOARES, L.F. Engenharia de Avaliação Ambiental no Processo de Concepção de Projetos de Dutos da Petrobras – Estudo de Caso do Gasoduto Cacimbas (ES) / Catu (BA). In: **Rio Pipeline Conference e Exposition**, Rio de Janeiro, 2005 (IBP1322\_0)

PARADELLA, W.R. Análise da geometria de visada e ângulo de incidência de imagem RADARSAT-2 da região do duto ORBEL. **Comunicação pessoal** durante defesa de qualificação. 2009.

PARADELLA, W.R.; CECARELLI, I.C.R.; LUIZ, S.; OLIVEIRA, C.G.; COTTINI, C.P.; OKIDA, R. Produção de carta topográfica através da estereoscopia de alta resolução do RADARSAT-2 integrada com dados TM-LANDSAT 5: uma avaliação para terrenos planos na Floresta Nacional de Tapajós (PA). **Revista Brasileira de Geociências**, v.33, n.2, pp.99-110, 2003.

PARADELLA, W.R.; SANTOS, A.R.; VENEZIANI, P.; CUNHA, E.S.P. Radares imageadores nas Geociências: Status e Perspectivas. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, **Anais**, Goiânia. pp.1847-1854, 2005.

PARASHAR, S. LANGHAM, E.; McNALLY, J.; AHMED, S. RADARSAT mission requirements and concept. **Canadian Journal of Remote Sensing**, vol. 19, n.4, nov/dez, 1993, pp. 280-288.

PCI – Geomatics. Geomatica v10.1. Ontário, Canadá, 2007.

PCI – Geomatics. SPW 10.01. Ontário, Canadá, 2008.

PEREIRA JUNIOR, E.R.; MEDEIROS, D.S.; AMARAL, F.P.; HURTADO, S.N.; OLIVEIRA, W.J. Avaliação Ambiental de Alternativas de Traçado de Dutos Terrestres – Análise Espacial de Mapas Temáticos e Utilização de um Método Quantitativo. In: **Rio Pipeline Conference e Exposition**, Rio de Janeiro, 2007.

PETROBRAS – Petróleo do Brasil. Produtos. Disponível em [http://www2.petrobras.com.br/portugues/ads/ads\\_Produtos.html](http://www2.petrobras.com.br/portugues/ads/ads_Produtos.html). Acesso em novembro de 2008.

RADARSAT International – RADARSAT Illuminated – your guide to products and services. 99p., 2007.

RICCOMINI, C. **O rift continental do Sudeste do Brasil**. (Tese de Doutorado). Instituto de Geociências/ USP, São Paulo. 1989.

RIEDEL, P. S (Coord.) PROJETO PETROBRAS. **Relatório Parcial 2: Avaliação de produtos de sensoriamento remoto e técnicas de detecção de mudanças para o monitoramento de riscos antrópicos em faixas de dutos. Estudo de caso: Duto ORBEL.** 131p., 2010.

RIZZINI, C.T. **Tratado de Fitogeografia do Brasil: aspectos ecológicos, sociológicos e florísticos.** Âmbito Cultural Edições Ltda., 2ª. Ed, 747p., 1997.

RSI - Research Systems Inc.. The Environment for Visualizing Images - ENVI. Boulder, CO, USA, 2005.

SAATCHI, S. S.; SOARES, J. V.; ALVES, D. S. Mapping deforestation and land use in Amazon rainforest by using SIR-C imagery. **Remote Sensing of Environment.** v. 59, pp. 191-202, 1997.

SANT'ANNA, S.J.S.; FREITAS, C.C.; LACAVA, J.C.S.; FERNANDES, D. Seleção de janelas de processamento para um filtro polarimétrico. In: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, **Anais**, CD-ROM, Belo Horizonte, 2003, pp.2263-2272.

SANT'ANNA, S. J. S. Avaliação do desempenho de filtros redutores de "speckle" em imagens de radar de abertura sintética. 209 p. **Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto** - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1995.

SANT'ANNA, S. J. S.; DUTRA, L. V.; FREITAS, C. C.; BINS, L. S.; GOMES, A. R.; MURA, J. C. Introdução ao processamento de imagens de radar. In: **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis. 2007. 205 p. (INPE-14786-PUD/185).

SCHOWENGERDT, R.A. **Remote sensing, models and methods for image processing.** Academic Press, 522p. 1997.

SILVA, A.Q. **Avaliação de imagens SAR no mapeamento de crostas lateríticas do depósito N1, Província Mineral de Carajás, Pará.** 2010. 233p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2010,

SILVA, W. F. Imagens polarimétricas em banda L do SAR-R99B e do MAPSAR (simuladas) para distinguir culturas agrícolas. São José dos Campos, 145 p. (INPE-

14821-TDI/1261). **Dissertação** (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007.

SINDICOM - Sindicato Nacional das Empresas Distribuidoras de Combustíveis e de Lubrificantes. Notícias. Ano 7, nº19, dezembro de 2010. Disponível em: <[http://www.sindicom.com.br/pub\\_sind/media/sindicom19\\_baixa\\_13\\_12\\_2010.pdf](http://www.sindicom.com.br/pub_sind/media/sindicom19_baixa_13_12_2010.pdf)>. Acesso em dezembro/2010.

SINDICOM – Sindicato Nacional das Empresas Distribuidoras de Combustíveis e de Lubrificantes. Disponível em: <<http://www.sindicom.com.br>>. Acesso em dezembro/2010a.

SOARES, J.V. **Introdução aos Sensores Remotos**: Apostila de Aula. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 94p., 1997.

SPRING – Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas. Manual de ajuda on-line. Release 5.1. 2006.

TAIOLI, F. **Recursos energéticos**.(p.471-489)In: Decifrando a Terra. Org. TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M.C.M.; FAIRCHILD, T.R.; TAIOLI, F. São Paulo: Oficina de Textos, 2001, 558p.

TOUTIN, T. Intégration de données multi-source: comparaison de méthodes géométriques. **International Journal of Remote Sensing**, v.6, n.5,p.2795-2811, mar, 1995.

TOUTIN, T.; RIVARD, B. Value Added Radarsat products for Geoscientific Applications. **Canadian Journal of Remote Sensing**. Research Note. V. 23, n. 1, march, pp.63-70, 1997.

TOUZI, R. Target Scattering Decomposition in Terms of Roll-Invariant Target Parameters. **IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing**, vol. 45, nº1, 2007, p. 73 – 84.

TOUZI, R.; BOERNER, W. M.; LEE, J. S.; LUENEBURG, E. A review of polarimetry in the context of synthetic aperture radar: concepts and information extraction **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, n.3, pp. 380-407, Jan 2004.

ULABY, F. e ELACHI, C. **Radar Polarimetry for Geoscience Applications**, Artech House, 1990. 364p.

ULABY, F. T.; MOORE, R. K.; FUNG, A. K. Microwave remote sensing: active and passive, vol. II, Boston, USA: Artech House, 1982. p. 816-833.

ULABY, F.T.; MOORE, R.K.; FUNG, A.K. **Microwave remote sensing**: active and passive: radar remote sensing and surface scattering and emission theory. 2.ed. Norwood MA: Artech House, . v. 2, 1097p., 1986.

VAN DER SANDEN. Radar remote sensing to support tropical forest management. 1997. 331 p. Doctoral Thesis - Proefschrift Wageningen University, 1997. Disponível em: < <http://library.wur.nl/WebQuery/wda/lang?dissertatie /nummer=2359#>>. Acesso em: 25 jan 2010.

WEYDAHL, D.J. Backscatter changes of urban features using multiple incidence angle RADARSAT images. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.28, n.6, pp.782-793, 2002.

WOODHOUSE, I.H. **Introduction to microwave remote sensing**. Taylor e Francis, 370p., 2006.