

## Projeto Radiografia da Amazônia: colorização e estratificação vegetal de dados SAR

Gilmar Peixoto de Oliveira  
Marcus Fabiano Silva Saldanha  
Antônio Henrique Correia

Diretoria de Serviço Geográfico- DSG  
Quartel General do Exército, Bloco F, 2º andar – SMU – Brasília-DF, Brasil  
{gilmar, saldanha, correia}@dsg.eb.mil.br

**Abstract.** The systematic mapping of the Amazon region have been presented as a great challenge for the Division of Geographical Service (DSG – Diretoria de Serviço Geográfico) of the Brazilian Army due to its large territorial extension and the difficulties it presents for the use of conventional techniques. In order to face this challenge and given the importance of the region to Brazil, the DSG is running the project known as "Radiography of the Amazon" (RAM). This project uses imaging technology of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), in the P and X bands, to overcome the problem caused by the presence of permanent clouds in the region. This project has generated a significant amount of images, which allows the description of geographical features of the canopy trees (X band) and at ground level (P band). These images, in the amplitude format, have been used to create grayscale image maps in the 1:50,000 scale. This cartographic material has the disadvantage of absence of color which affect the interpretation and identification of targets. Within this context was developed by DSG, a method of colorization and vegetation stratification, based on techniques of digital image processing to generate color synthetic images by adding the color attribute to the grayscale images generated by the SAR. This paper aims to present this methodology, some results obtained by its use in the RAM project and its potential to highlight information facilitating the interpretation of SAR data.

**Palavras chave:** Radar de Abertura Sintética, Amazônia, mapeamento sistemático, colorização de imagem, estratificação vegetal.

### 1. Introdução

A importância da análise do comportamento que a cobertura vegetal exerce no ambiente amazônico, bem como em outros biomas, advém da necessidade de sua preservação. Esta abordagem é necessária para proporcionar subsídios para que o governo e a sociedade possam definir estratégias de fiscalização e controle sobre o uso e ocupação desta região geográfica.

Com o intuito de fornecer o suporte necessário para apoio à tomada de decisão por parte dos órgãos governamentais e instituições ambientais a Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) do Exército Brasileiro está executando atualmente o mapeamento sistemático da Amazônia Legal, da área conhecida como “vazio cartográfico”. A solução tecnológica encontrada pela DSG, para superar o entrave relacionado à constante presença de nuvens existentes na região, que prejudica a obtenção de dados cartográficos, foi empregar a tecnologia de imageamento por radar de abertura sintética (SAR - *Sinthetic Aperture Radar*) polarimétrico aliado a técnicas interferométricas.

O sensor SAR adotado para o projeto foi o OrbiSAR que opera com duas frequências de comprimento de onda, a banda P e a banda X. Esta característica permite a obtenção de modelos digitais de superfície (MDS), que possibilita a descrição geográfica do relevo ao nível das copas das árvores (banda X), e a geração de modelos digitais de terreno (MDT), que possibilita obter o relevo ao nível do solo (banda P).

Além dos produtos destinados a descrição do relevo é gerada ainda nas duas bandas as imagens em tom de cinza no formato de amplitude. Estas imagens são ortorretificadas e usadas como insumo para a confecção de orto-cartaimagens prevista no projeto. As imagens usadas nesses produtos apresentam de forma geral um aspecto granuloso (característica inerente das imagens SAR) que associado ao fato de serem geradas em tons de cinza pode dificultar a interpretação das feições contidas na superfície mapeada. Uma alternativa para melhorar a interpretação visual das orto-cartaimagens é atribuição artificial, por meio de técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI), do atributo cor às imagens geradas pelo SAR.

Dentro do contexto apresentado, este trabalho tem por objetivo apresentar a metodologia de processamento desenvolvida e adotada pela DSG para obtenções de imagens SAR coloridas artificialmente para o Projeto Radiografia da Amazônia (RAM). Tal metodologia teve como ponto de partida a necessidade de estabelecer um padrão, similar às imagens geradas por sensores óticos, que permitisse ao interprete uma associação com a paisagem do ambiente amazônico. Além disso, a metodologia foi desenvolvida visando:

- Relacionar, extrair e classificar as principais tipologias vegetais em consonância com as classes da Especificação Técnica para a Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-EDGV);
- Permitir a simbolização, representação e classificação do uso e ocupação do solo em mapas e cartas nas escalas 1:50.000 e maiores.

## **2. Tecnologia SAR**

A tecnologia SAR é constituída basicamente por um sistema eletrônico acoplado a uma aeronave ou plataforma orbital, que detecta e localiza regiões no ambiente terrestre por meio da utilização do espectro de radiofrequências.

O imageamento por radar consiste da emissão de pulsos de microondas a intervalos regulares sobre a região de interesse e a recuperação dos sinais de retorno (ecos) provenientes desta região, à medida que o sensor se desloca. A recepção do sinal de retorno pode ser feita utilizando-se a mesma antena emissora (sistemas monoestáticos) ou uma segunda antena (sistemas biestáticos) (Ulaby e Elachi, 1990). A porção da energia retroespalhada pelos diferentes alvos é registrada pela antena ao longo do deslocamento do vôo. O valor do nível de cinza (NC) do pixel na imagem é definido em função da amplitude do próprio retro espalhamento do sinal emitido.

Uma das principais características dos sensores SAR usados em imageamento é capacidade de emitir sinais polarizados. A polarização pode ser definida como a orientação segundo a qual oscila, no tempo, o vetor campo elétrico da onda eletromagnética. Geralmente a polarização dos sistemas de radar é linear, ou seja, a orientação do campo elétrico varia segundo uma linha reta, podendo ser horizontal ou vertical. Os sensores SAR de imageamento utilizam polarizações lineares paralelas, HH e VV, ou cruzadas, HV e VH (a primeira letra refere-se à polarização da radiação transmitida e a segunda à polarização da radiação recebida pela antena).

Outra característica importante para o uso do sensor vem da técnica interferométrica InSAR (*Interferometric SAR*). Essa técnica é baseada na análise de fase dos sinais de radar recebidos por duas antenas SAR localizadas em posições diferentes no espaço, ou por uma mesma antena em época e posição diferentes. A partir desses sinais podem ser geradas imagens de amplitude e fase, armazenadas como imagens complexas. Essas imagens são usadas para formar o par interferométrico, que por meio da técnica InSAR permite a reconstrução tridimensional do terreno iluminado pelo radar.

A onda do sinal é caracterizada pelo seu comprimento, amplitude e fase, sendo o comprimento de onda que estabelece o grau de penetrabilidade nos alvos. O sistema SAR empregado no projeto Radiografia da Amazônia opera na faixa das microondas nas bandas X e P, respectivamente com comprimentos de onda da ordem de 3,0 e 72,0 cm.

## **3. Metodologia de colorização e estratificação vegetal**

Esta seção descreve os insumos usados e os processamentos realizados para gerar as imagens coloridas do projeto RAM. Primeiro é feita uma descrição dos dados usados no processamento os quais pertencem a duas fontes distintas. Na sequência são apresentadas as técnicas de PDI que compõe a metodologia. Por fim é feita uma descrição detalhada da metodologia.

### **3.1. Insumos**

Basicamente são usados duas fontes de dados para realizar a colorização e estratificação vegetal. A primeira fonte é a classificação feita para o projeto RADAMBRASIL e serve como

referencia para realizar o processo de associação de classes realizado durante a aplicação da metodologia. A segunda fonte de dados tem origem no processamento polarimétrico e interferométrico realizado para obter os dados SAR do projeto RAM. Dessa segunda fonte são obtidos os dados que serão usados para gerar a classificação que definirá o processo de atribuição de cores as imagens SAR.

#### *Dado de referência*

Em virtude das características impostas pela região, tais como, baixo índice de ocupação humana, malha viária incipiente, inexistência de mapeamentos, grande extensão geográfica, dificuldades climáticas, dinâmica complexa da ação de fatores ambientais aliadas a falta de conhecimento específico nas áreas da botânica, biologia, fitobiologia e áreas afins, foi necessária a utilização de um substrato informativo produzido pelo projeto RADAMBRASIL para classificar a cobertura vegetal dentro dos padrões estabelecidos na ET-EDGV. Esta abordagem foi adotada devido à dificuldade de entender os padrões da vegetação da região amazônica, que segundo Leite é constituído por uma grande e complexa região florística caracterizada principalmente por famílias de dispersão pantropical.

Desta forma a fonte cartográfica em formato vetorial no formato *shapefile* do projeto RADAMBRASIL, fornecida pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA), contendo seis classes de vegetação, foi generalizada em duas classes a fim de atender as necessidades do projeto RAM (Tabela 1).

Tabela 1 – Generalizações das classes de vegetação do projeto RADAMBRASIL para atender as necessidades do projeto RAM.

<b>RADAMBRASIL</b>	<b>RAM</b>
Floresta Ombrófila Densa Sub-Montana Dossel Emergente	Floresta
Floresta Ombrófila Densa Aluvial Dossel Uniforme	
Floresta Ombrófila Aberta Sub-Montana com cipó+vegetação Secundária	
Floresta Ombrófila Densa Aluvial Dossel emergente+Formação Pioneiras com influência fluvial e / ou lacustre – arbustiva sem palmeiras	
Campinarana Florestada sem palmeiras	Campinarana
Campinarana Florestada com palmeiras+Campinarana Gramíneo – lenhosa sem palmeiras	

A generalização realizada em ambiente de sistema de informação geográfica (SIG) gerou a imagem classificada para ser utilizada como verdade para a associação das classes geradas durante a aplicação da metodologia.

#### *Dados SAR polarimétricos e interferométricos*

Além do dado de referência gerado a partir do projeto RADAMBRASIL a metodologia emprega diversos insumos oriundos dos processamentos SAR polarimétricos e interferométricos realizados pela DSG no projeto RAM.

*a. Imagem de coerência interferométrica da banda P:* A imagem de coerência usada possui resolução radiométrica de 8 bits. A imagem é obtida pela estimação do módulo da correlação complexa entre as duas imagens que originam o interferograma. Por apresentar baixos valores de coerência associados às áreas de forte presença de ruído de fase (como por exemplo, em áreas de florestas), pode ser considerada como uma medida de qualidade dos interferogramas gerados. A imagem de coerência tem grande importância para a interferometria de duas passagens, pois qualquer mudança na geometria ou umidade do alvo, entre as passagens, ocasiona o efeito de decorrelação temporal (pixels com baixa coerência), não sendo possível realizar a medida de diferença de fase. Outra aplicabilidade das imagens de coerência no projeto é a utilização das mesmas em classificações de cobertura da terra (Gaboardi, 2002) pelo fato de possibilitar a discretização de áreas de florestas;

*b. Ortoimagem da banda X (formato de amplitude):* Esta imagem possui resolução radiométrica de 16 bits e é adquirida pelo sensor com a polarização HH. A imagem na banda X é formada pela interação dos sinais do SAR com a superfície ao nível da copa das árvores, pois seus comprimentos de onda estão entre 2,75 cm e 5,20 cm (10,9 GHz a 5,75 GHz);

*c. Ortoimagens da banda P (formato amplitude):* Da mesma forma que a imagem da banda X, estas imagens possuem resolução radiométrica de 16 bits. Sua aquisição pelo sistema SAR, entretanto são realizadas nas polarizações HH, HV, VH e VV. Apesar de serem adquiridas as quatro combinações de polarizações somente três delas, HH, HV e VV são usadas na metodologia. As imagens na banda P são formadas pela interação dos sinais do SAR com o terreno ao nível do solo, pois seus comprimentos de onda estão entre 77,0 cm e 133,0 cm (0,39 GHz a 0,225 GHz);

*d. MDS:* Esse modelo é gerado a partir do processamento interferométrico dos dados oriundos da banda X e representa numericamente, em formato matricial, a altitude da superfície ao nível da copa das árvores (vegetação mais densa);

*e. MDT:* Esse modelo é gerado a partir do processamento interferométrico dos dados oriundos da banda P e representa numericamente, em formato matricial, a altitude da superfície ao nível do solo.

### **3.2. Técnicas de PDI empregadas**

As técnicas de PDI aplicadas na execução da metodologia visam adquirir uma quantidade substancial de dados (captação de dados) a partir dos insumos de entrada. Além disso, também são usadas para melhorar o aspecto visual do resultado final da imagem colorida.

#### *Operação de Principais Componentes*

A análise de Principais Componentes (APC) é uma aplicação de uma transformação linear aos dados da imagem para transladá-los e rotacioná-los em um novo sistema de coordenadas de modo a maximizar a sua variância. Esta técnica é útil para aumentar o conteúdo de informação, isolar componentes de ruído e reduzir a dimensionalidade de ruído de dados.

#### *Classificação Isodata*

O método de classificação isodata é, provavelmente, o mais conhecido e é descrito como um meio de interpretação de imagens de sensoriamento remoto assistida por computador. O algoritmo de classificação identifica padrões típicos nos níveis de cinza. Esses padrões são classificados efetuando-se visitas de reconhecimento a alguns poucos exemplos escolhidos para determinar sua interpretação. Em razão da técnica usada nesse processo, os padrões são geralmente referidos como *clusters* (Eastman, 1994). Neste tipo de classificação, as classes são determinadas pela análise de agrupamentos (análise de *clusters*). Este tipo de classificação apresenta a vantagem de não requerer um conhecimento prévio da área de estudo e como desvantagem o pouco controle sobre a separação e a determinação das classes.

#### *Algebra de Imagens*

Operações realizadas pixel a pixel, por meio de uma regra matemática definida pelo operador de PDI em duas ou mais imagens de uma mesma área geográfica. As imagens devem possuir o mesmo número de linhas e colunas o mesmo tamanho de pixel e devem estar no mínimo co-registradas. Pode ser entendida como sinônimo de “Matemática de Bandas”.

#### *Classificação por Árvore de Decisão*

A classificação elaborada a partir de uma árvore de decisão procura encontrar uma forma de dividir o universo fornecido em várias classes seguindo o caminho organizado pelos sucessivos testes (nós de decisão) até que o classificador interprete, defina e contemple apenas uma classe.

#### *Fusão de Imagens*

A fusão de imagens pode ser entendida como o aproveitamento de informações produzidas por diferentes sensores, combinando imagens de diferentes características espectrais e espaciais, produzindo uma imagem com melhor resolução espacial do que a imagem multispectral original. Na presente metodologia o uso da Fusão de Imagens tem por finalidade obter uma imagem de alta resolução colorida com determinados alvos realçados. A técnica de Fusão de Imagens pode aplicar

diversas transformações para obter seu objetivo. Para a metodologia de colorização foi adotada a transformação denominada por *Gram-Schmidt Spectral Sharpening* (Laben e Brower, 1998).

#### *Ajuste de Histogramas (Realce de Imagens)*

São ajustes efetuados por meio de funções matemáticas com o objetivo de destacar certas informações espectrais, melhorar e realçar a qualidade visual de uma determinada imagem de forma a facilitar sua interpretação.

#### *Mosaico de Imagens*

É a junção de duas ou mais imagens em um único arquivo com o propósito de, entre outros, ampliar a área de trabalho, estabelecer e verificar a conexão entre as feições de duas ou mais cenas. No caso da metodologia o mosaico foi utilizado para sobrepor a cor dos corpos d'água no refinamento da imagem colorida.

### **3.3. Descrição da metodologia**

O esquema com a sequência de processamento que deve ser realizado para obter a colorização e a estratificação vegetal dos dados SAR é apresentado na Figura 1.

O primeiro passo da metodologia é realizar o carregamento e obtenção dos insumos usados na metodologia. Estes são constituídos por dados oriundos do processamento SAR e da classificação do projeto RADAMBRASIL. São três os insumos primários: a imagem no formato de amplitude na polarização HH da Banda X, denominado por B1; a imagem no formato de amplitude na polarização HV da Banda X, denominado por B2; e a classificação do Projeto RADAMBRASIL, denominado por B5. Já os insumos secundários são dois e são obtidos a partir da derivação de dados do processamento aplicando técnicas PDI. O primeiro é obtido a partir da realização de uma subtração entre os MDS e MDT, e tem por objetivo obter as informações sobre a diferença de altura de vegetação. Esta informação é armazenada em uma imagem chamada diferença de altura (DH) e denominada na metodologia por B3. O segundo é obtido por uma transformação por componentes principais, seguida por um processo de classificação não supervisionada. A transformação por componentes principais é feita sobre os dados da Banda P formados pelas imagens no formato de amplitude com polarização HH, HV e VV e a imagem de coerência. O resultado desta transformação constituído por quatro componentes denominados PC1, PC2, PC3 e PC4, atribuí a maior variação de informação para as primeiras componentes. Os dados resultantes da transformação são então submetidos a uma classificação não supervisionada usando-se o algoritmo Isodata, para o qual são adotadas oito classes e oito iterações. O resultado desta classificação contendo as oito classes sem rótulos recebe a denominação de B4.

O segundo passo é a realização de uma classificação com os dados constituídos pelas Bandas 1 a 5 a partir de regras pré-definidas para obtenção das classes previstas pela ET-EDGV. Para isso, foi desenvolvida pela DSG uma Árvore de Decisão com regras baseadas nos valores de tons de cinza dos insumos. A aplicação destas regras permite obter, a cada nó de decisão da árvore, a separação das informações contidas nas bandas que caracterizam as classes e sua associação às cores usadas para representá-las, conforme definido na ET-EDGV. Durante a classificação por meio da árvore de decisão são criadas nos passos intermediários várias classes com o mesmo nome e com a mesma atribuição de cor. Devido à necessidade de obter uma classificação final para a estratificação vegetal, que é usada em outros processos da cartografia, se faz necessário reunir estas classes em uma única classe. Desta forma, logo após a classificação é realizada uma combinação de classes.

O terceiro passo da metodologia é realizar a fusão da imagem colorida classificada e combinada com baixa resolução com os dados da imagem em formato de amplitude da Banda P de alta resolução, com 16 bits de resolução radiométrica. O resultado desta fusão é a imagem denominada Imagem Base formada por três bandas, que podem ser associados aos canais RGB para formar uma imagem colorida. Paralelamente a fusão é preparada a imagem denominada Imagem Sombreada, resultante da transformação envolvendo a imagem da Banda X na polarização HH. O sombreado é

gerado adotando-se para a fonte de iluminação um ângulo de elevação igual a 75° com um azimute de 0°.

O quarto passo é a realização de uma álgebra de mapas envolvendo a Imagem Base e a Imagem Sombreada. A álgebra consiste em somar a Imagem Base, com valores de tons de cinza multiplicados por um valor igual 0,55, com a Imagem sombreada, com valores de tons de cinza multiplicados por um valor igual a 0,45. A imagem resultante de tal processo, composta por três bandas, é então submetida a um ajuste de histograma que tem por finalidade realçar as feições.

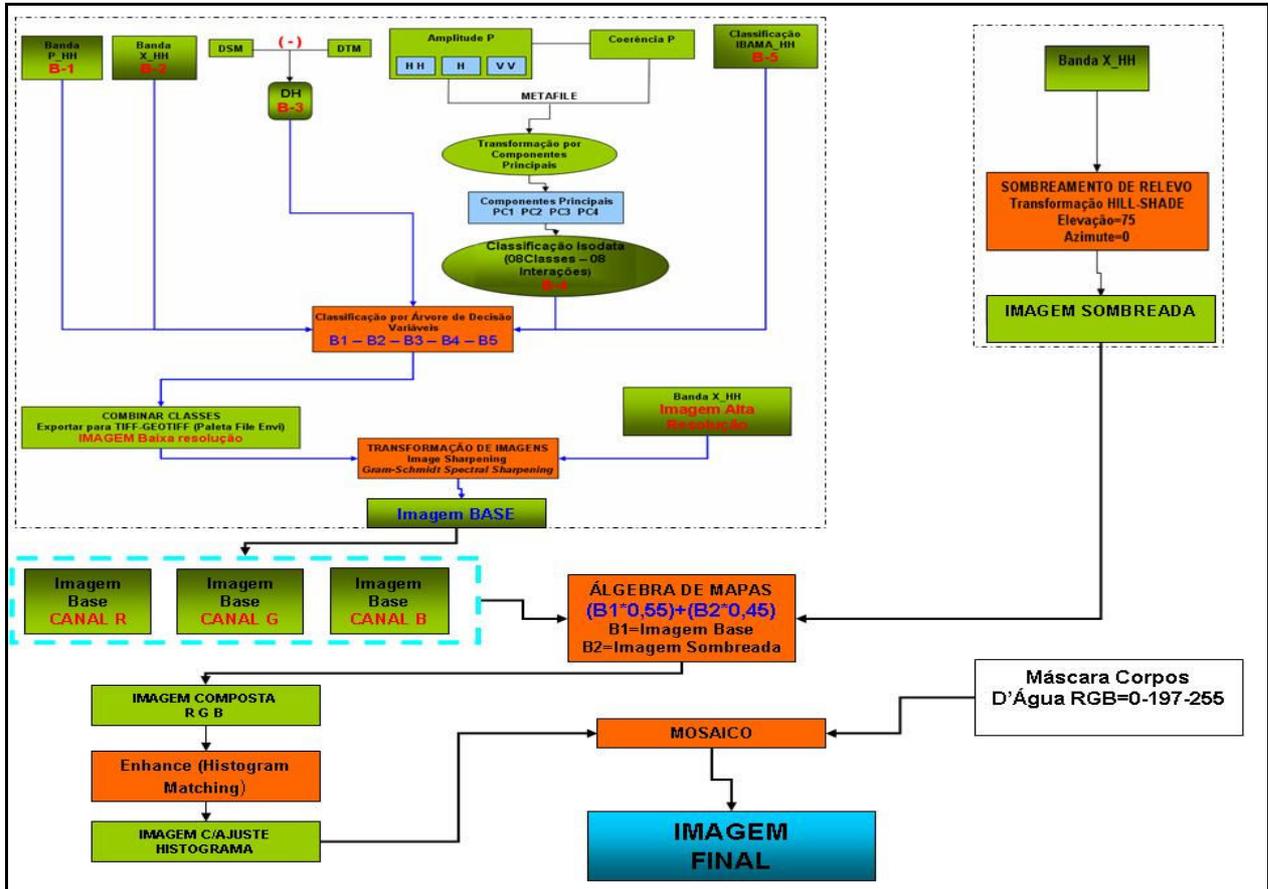


Fig. 1 – Fluxo de processamento da metodologia de colorização e estratificação vegetal.

O quinto e último passo consiste em realizar um mosaico da imagem realçada com a imagem de máscara dos corpos d’água. Este processo tem por finalidade sobrepor as massas d’água, que por ventura possam existir, sobre a imagem com histograma ajustado. Cabe ressaltar que os corpos d’água rebem a cor azul conforme preestabelecido na ET-EDGV. O resultado final do processo é a imagem colorida artificialmente, onde as classes de vegetação e cobertura do solo previsto para o projeto podem ser identificadas visualmente.

#### 4. Aplicação e resultados

A fim de mostrar a potencialidade da aplicação da metodologia descrita neste trabalho é apresentado o resultado de seu uso em uma região que esta sendo mapeada pelo Projeto RAM. A região geográfica pertence ao município de Barcelos, no estado do Amazonas, e está localizada entre as longitudes 63°15’30”W e 62°59’30”W, e latitudes 0°14’30”S e 0°30’30”. Os dados SAR usados neste trabalho foram obtidos em março 2009 e processados em novembro 2010. A Figura 2 apresenta os insumos primários e secundários usados, bem como, a imagem final resultado da aplicação da metodologia de colorização e estratificação vegetal.

A análise comparativa das imagens em amplitude na polarização HH da banda X, em tons de cinza, e a imagem final, colorida artificialmente, apresenta um ganho significativo para as atividades que se baseiam na interpretação visual das feições do terreno. Enquanto na imagem em tons de cinza a distinção das classes de vegetação é confusa pela dificuldade de localizar as transições entre as classes, na imagem colorida esta dificuldade é amenizada e em alguns casos até mesmo deixa de existir.

Outro fato que é beneficiado com a aplicação da técnica diz respeito ao realce do traçado de feições lineares, naturais e artificiais, tais como, cursos d'água, caminhos e estradas. Estas feições, em imagens em tons de cinza apresentam certa dificuldade para serem localizadas em ambientes de floresta. Já na imagem colorida artificialmente é possível identificá-las das demais permitindo sua discretização, o que facilita a sua aquisição nos processos cartográficos.

Além da melhoria para a visualização de feições lineares, a metodologia de colorização e estratificação vegetal também podem agregar informações a outras feições de área que não esteja diretamente ligada ao tipo de vegetação, tais como área sujeita a inundação e solo exposto. Estes tipos de feição nas imagens em tons de cinza são de difícil identificação e podem gerar erros de interpretação.

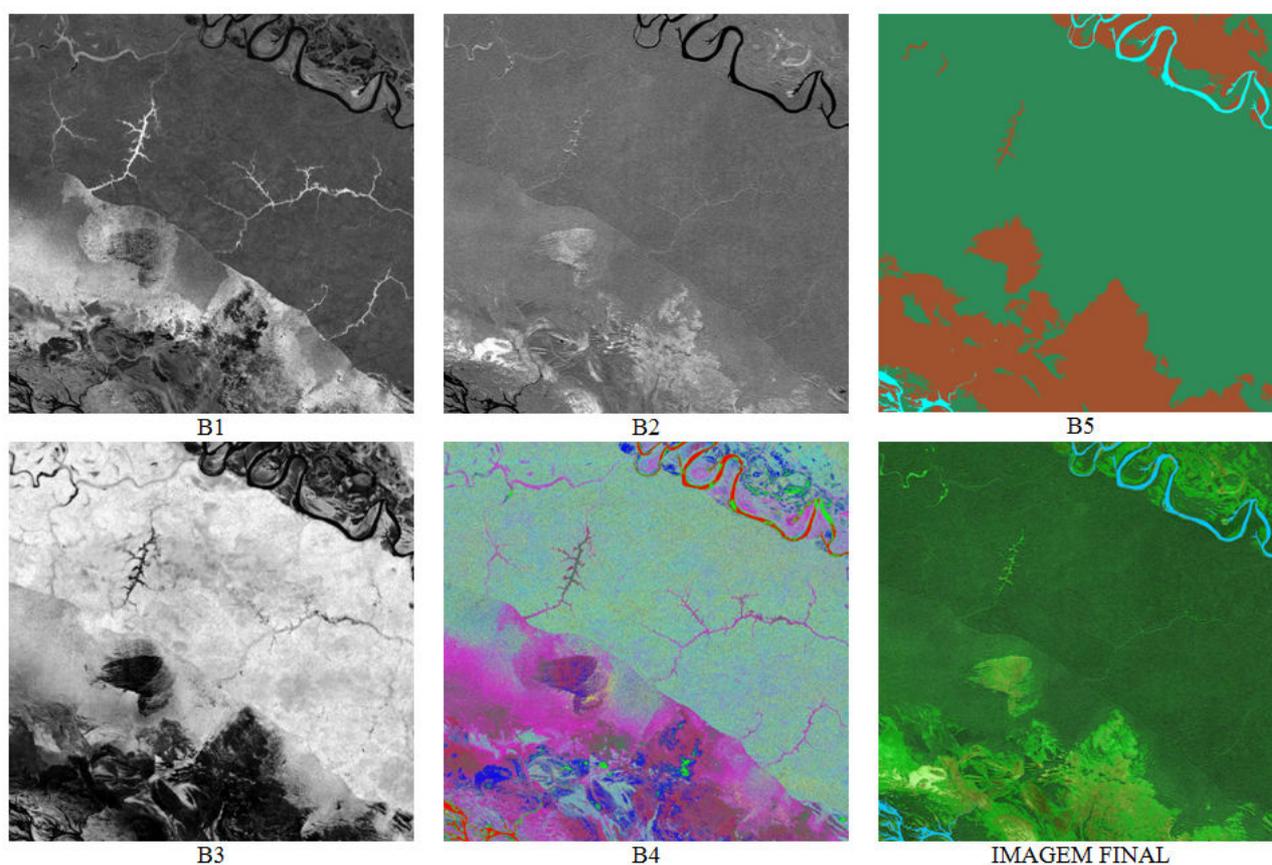


Figura 2 – Insumos primários, secundários usados pela metodologia e resultado final: B1 - imagem no formato de amplitude na polarização HH da banda P; B2 - imagem no formato de amplitude na polarização HH da banda X; B5 - classificação do Projeto RADAMBRASIL; B3 – imagem de diferença de altura (DH) entre os MDS e MDT; B4 – classificação não supervisionada usando o Isodata; e, IMAGEM FINAL – resultado da aplicação da metodologia de colorização e estratificação vegetal.

Entretanto cabe ressaltar, que apesar dos ganhos mostrados com a aplicação da metodologia o trabalho de campo para a perfeita identificação das classes é imprescindível, em virtude da principalmente complexa estrutura de ocupação do solo da região e das limitações que a imagem de radar pode oferecer. Dessa forma, o processamento das imagens SAR deve ser acompanhado de

visitas ao campo para atestar a veracidade final das informações, trabalho previsto dentro do escopo do projeto e que já esta sendo executado pela DSG.

## 5. Conclusões

A metodologia apresentada para a geração de imagens coloridas artificialmente para o Projeto RAM apresenta grandes perspectivas de uso devido à aparência visual do resultado obtido ser de fácil associação com os tons de cores encontrados na região. Além disso, a estratificação vegetal obtida durante o processamento é passível de edição, permitindo o uso de diversas cores e o agrupamento de classes, o que agrega grande versatilidade para a confecção de cartas temáticas.

Apesar do uso da metodologia melhorar significativamente o poder de discretização dos alvos contidos na imagem SAR, na banda X com polarização HH no formato de amplitude, o trabalho de campo se faz altamente necessário e imprescindível para confirmar as informações adquiridas em gabinete.

Finalmente, pode-se dizer que os resultados obtidos por meio do desenvolvimento e aplicação da metodologia apresentada são de grande significância para o mapeamento da região amazônica. Isto se deve porque o processamento realizado possibilita a partir de dados de SAR e de informações obtidas no Projeto RADAMBRASIL, a geração um produto que permite representar a região de forma como ela é vista numa imagem ótica colorida tradicional. Esta possibilidade é de grande valor uma vez que fornece as ferramentas adequadas para as analistas ambientais e instituições públicas encarregadas de criar políticas de preservação para a região.

## 5. Referencias bibliográficas

CENSIPAM, 2008. Subprojeto Cartografia Terrestre. **Documento de Referência do Acordo de Cooperação Técnica nº 03/2008, de 26 de fevereiro de 2008, celebrado entre o CENSIPAM, o Comando do Exército, o Comando da Marinha, o Comando da Aeronáutica, e o Serviço Geológico do Brasil.**

CONCAR - Comissão Nacional de Cartografia, 2009. Especificações Técnicas para Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-EDGV). Disponível em <<http://www.concar.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 15 mar. 2011.

Eastman, J. R. **IDRISI: Exercícios tutorais**. Editor da versão em português, Heinrich Hasenack. Porto Alegre, UFRGS - Centro de Ecologia, 1994. 109p.

Gaboardi, C. **Utilização de imagem de coerência SAR para classificação do uso da terra: Floresta Nacional do Tapajós**. 2002. 137 p. (INPE-9612-TDI/842). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2002.

Laben, C. A., Brower, B. V. **Process for Enhancing the Spatial Resolution of Multispectral Imagery Using Pan-Sharpning**. US Patent 6.011.875. 1998.

Ulaby, F. T.; Elachi, C. **Radar polarimetry for geoscience applications**. Norwood, Massachusetts: Artech House, 1990. 364 p.