



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**  
**Coordenadoria Geral de Observação da Terra**  
**Programa Amazônia – Projeto PRODES**

**Metodologia para o Cálculo da Taxa Anual de**  
**Desmatamento na Amazônia Legal**

São Jose dos Campos, 30 de outubro de 2013

*Documento produzido por Gilberto Camara, Dalton Valeriano e João Viane em setembro de 2006. Revisado por Marisa da Motta em abril de 2010 e por Luis Maurano em outubro de 2013. Documento em constante alteração/revisão.*



1	Introdução .....	3
2	Hipóteses de trabalho adotadas .....	10
3	Procedimento de classificação/interpretação das imagens .....	11
3.1	Seleção das imagens orbitais.....	12
3.2	Preparação da base de dados e georeferenciamento das imagens .....	13
3.3	Modelo linear de mistura espectral .....	15
3.4	Segmentação das imagens frações-sombra e solo.....	18
3.5	Classificação das imagens fração-sombra ou solo segmentadas.....	19
3.6	Edição e mosaicagem .....	20
3.7	Interpretação das imagens e mapeamento dos desmatamentos .....	22
3.8	Resultado desta fase.....	25
4	Efeito da cobertura de nuvens.....	27
5	Cálculo da taxa de desmatamento .....	29
5.1	Determinação da estação seca .....	29
5.2	Estimativa proporcional para data de referência.....	30
5.3	Taxa Anual Projetada .....	36
6	Aspectos da metodologia revisados .....	36
7	Conclusões.....	37
8	Bibliografia Consultada .....	37



## 1 Introdução

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) começou a usar a tecnologia de sensoriamento remoto para mapear desmatamentos em florestas tropicais em meados dos anos 70. O primeiro mapa de desmatamento da Amazônia brasileira produzido pelo INPE foi para o ano de 1979. Em 1988 o INPE recebeu do Governo Brasileiro a missão de desenvolver e operar um sistema de monitoramento para calcular anualmente taxa de desmatamento para toda Amazônia Legal brasileira através de imagens de satélite.

Desde então o INPE realiza o inventário de perda de floresta primária através do mapeamento da dinâmica do desmatamento por **Corte Raso** com uso de imagens dos satélites da classe Landsat para calcular a taxa anual de desmatamento.

O processo de desmatamento por corte raso é aquele que resulta na remoção completa da cobertura florestal em um curto intervalo de tempo. Nesse processo, a cobertura florestal é totalmente removida e substituída por outras coberturas e usos (agrícola, pastagem, urbano, hidroelétricas, etc.).

O processo normalmente se inicia antes ou durante o período chuvoso que precede o corte de fato da floresta com o que é localmente denominado de “brocagem”. É o corte com foice ou machado das árvores menores e, principalmente, das lianas (cipós), para facilitar o corte das árvores de maior porte que se dará na próxima fase.

Durante a estação chuvosa essas plantas se degradam e com isso evita-se acidentes na fase de corte propriamente dito. As árvores de maior porte são derrubadas no início da estação seca. Fica a biomassa no solo, que é queimada basicamente entre julho e setembro. No final desse processo pode-se ou não agregar a biomassa remanescente em leiras para queimas subsequentes. Forma-se

a pastagem por semeadura de gramíneas africanas, que se dão bem na Amazônia porque resistem ao fogo. Esse foi o processo mais comum na região durante as décadas de 80 e 90.

Este levantamento é reconhecido nacionalmente e internacionalmente como **Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES)**. O projeto nunca foi interrompido, e em 2013, completa a marca de 25 anos fornecendo dados precisos sobre o desmatamento na maior floresta tropical do planeta.

A partir de 2002 o INPE passou a divulgar em seu site na internet, além da taxa de desmatamento anual, todas as imagens de satélite utilizadas no mapeamento e os mapas com polígonos de desmatamento gerados no projeto. Anualmente disponibilizamos para download aproximadamente 210 imagens do satélite Landsat 5/7/8 (ou similar), cada imagem é acompanhada do respectivo mapa que contem toda base de desmatamento pretérita. O site do projeto dispõe de aproximadamente 6.300 arquivos (mapas e imagens) que consomem 230 GBytes de dados.

Hoje os produtos do INPE sobre o estado da cobertura da terra na Amazônia fundamentam muitas decisões do governo brasileiro a respeito da gestão de terras na região em âmbito nacional e internacional. O governo utilizou a série temporal de taxas de desmatamento na Amazônia do PRODES para estabelecer uma linha de base e propor sua meta de redução voluntária de 80% até 2020. A proposta brasileira foi apresentada em 2009 na Conferência das Nações Unidas para Mudança Climática em Copenhague, o que promoveu o Brasil à condição de liderança no tema.

Foi com base nas reduções nas taxas de desmatamento na Amazônia registradas pelo PRODES a partir de 2005 e pelo fato que o país demonstrou capacidade de monitoramento desta dinâmica que o Reino da Noruega se dispôs a doar para o Brasil a partir de 2007 até um bilhão de dólares até 2015 para serem



utilizados em ações que visem o alcance de metas de redução de desmatamento na Amazônia.

É com base nos dados do PRODES que o governo a cada ano define os municípios do Bioma Amazônia regidos pelas normas do Decreto 6.321 de 21/12/2007, que instituem regras de acesso a créditos federais e impõem medidas de regularização fundiária e de redução de desmatamento para o restauro do acesso às linhas de crédito embargadas.

Este documento apresenta a metodologia adotada pelo INPE para realizar o cálculo da taxa de desmatamento por corte raso da Amazônia Legal, gerada anualmente pelo PRODES.

As estimativas geradas pelo PRODES baseiam-se em mapeamento anual de um grande conjunto de imagens do satélite Landsat 5/TM ou similares, cobrindo toda a extensão da Amazônia. O PRODES identifica áreas de corte raso, ou seja, retirada completa da cobertura florestal, maiores que 6,25 hectares (ha). Áreas sob impacto de exploração seletiva de madeira e áreas degradadas por incêndios florestais foram ignoradas desde os primeiros levantamentos, por ser menos evidente em estágios iniciais de degradação e por apresentarem pequenas dimensões e extensões, sendo de difícil detecção com os instrumentos e técnicas utilizadas naquele período. Para possibilitar a comparação das taxas ano a ano e manter a compatibilidade da série histórica desta taxa, o PRODES permanece mapeando apenas desmatamento por corte raso.

Inicialmente a metodologia para detecção dos polígonos de desmatamentos era feita por interpretação visual de aproximadamente 220 cenas do satélite Landsat 5/TM, coloridas, impressas em papel fotográfico na escala 1:250.000. Posteriormente estes polígonos eram digitalizados manualmente no Sistema de Informação Geográfica (SGI) desenvolvido pela Divisão de Processamento de Imagens (DPI) do INPE. Esta forma de atuação foi empregada durante o período 1988 a 2002 e recebeu o nome de PRODES Analógico. A figura 01 mostra o ambiente de produção dos dados do PRODES Analógico em meados dos anos 90.

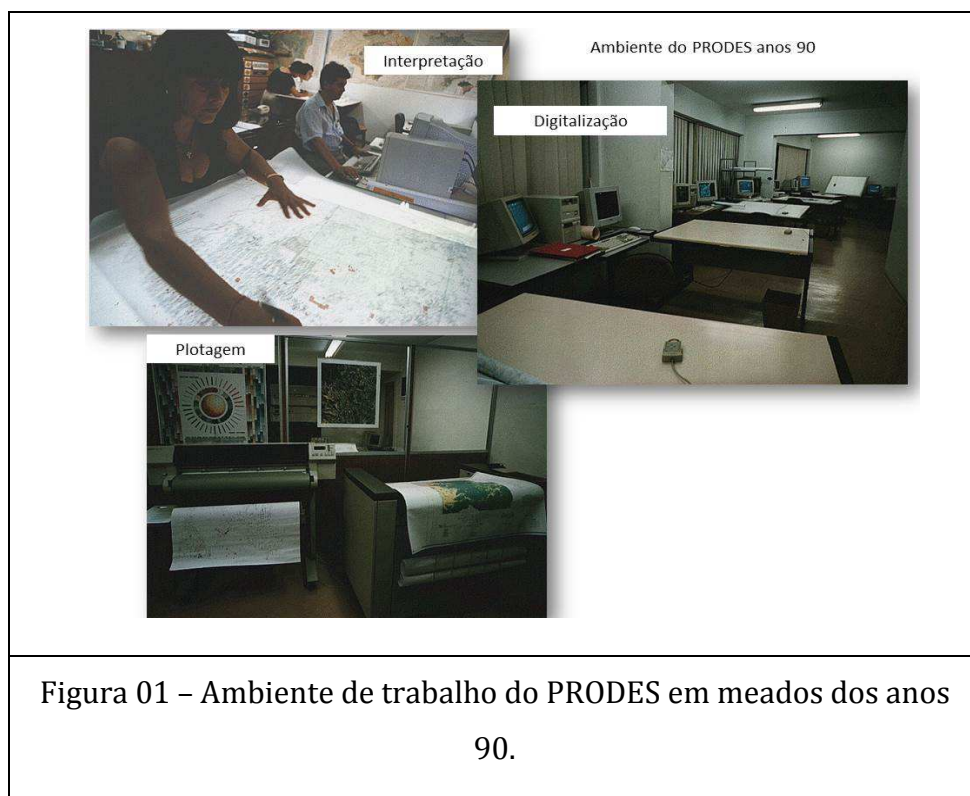


Figura 01 – Ambiente de trabalho do PRODES em meados dos anos 90.

Entre 2003 e 2005, o INPE passou a adotar o processo de interpretação via classificação digital assistida pelo computador para fazer a identificação das áreas desmatadas, que posteriormente seriam o “input” para o cálculo da taxa de desmatamento na Amazônia destes anos. Todo processamento das imagens de satélite, desde o seu georeferenciamento, classificação, edição e confecção do mapa final era feito pelo Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas (SPRING) também desenvolvido pela DPI. Esta fase do projeto ficou conhecida como PRODES Digital para distingui-la do processo anterior.

Com o surgimento do PRODES Digital, o INPE passou a divulgar na internet anualmente a taxa de desmatamento, os mapas vetoriais produzidos no mapeamento e as imagens de satélites utilizadas pelo projeto. Até então, esta informação era restrita e não acessível mesmo a outros órgãos do governo, o que teve graves conseqüências, pois reduziu muito a capacidade do governo e da sociedade em combater o desmatamento.

Após 2005, houve uma grande mudança na forma de gerenciar as informações do projeto. Todos os programas de monitoramento da alteração da cobertura florestal da Amazônia passaram a utilizar um novo sistema de informações geográficas chamado TerraAmazon.

Este sistema é construído baseado na biblioteca de classes e funções para desenvolvimento de aplicações geográficas desenvolvidas pelo INPE e seus parceiros, chamada TerraLib . Esta biblioteca está disponível na internet na forma de código aberto (“*open source*”) permitindo um ambiente colaborativo para o desenvolvimento de várias ferramentas de SIG.

Uma das vantagens no uso desta tecnologia é permitir o desenvolvimento de uma nova geração de aplicações SIG com base nos avanços tecnológicos dos gerenciadores de banco de dados espaciais. A TerraLib está sendo desenvolvida pela DPI e Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologias Espaciais (FUNCATE).

A principal motivação do projeto TerraLib é a falta de uma biblioteca SIG pública ou comercial que atendam a diversidade de dados geográficos e algoritmos, especialmente quando vistos sobre os últimos avanços da ciência da informação geográfica e dos gerenciadores de bancos de dados. A ideia básica da TerraLib é explorar os avanços na tecnologia de banco de dados que já permitem a integração completa dos tipos de dados espaciais com os sistemas de gestão de base de dados (DBMS).

Para se obter esta integração foi obrigatório mudar completamente o desenvolvimento da tecnologia SIG que eram empregadas no PRODES, permitindo uma transição dos sistemas monolíticos utilizados até 2005 para uma nova geração de sistema de informação espacial.

Foi neste cenário que em 2005, iniciou-se o desenvolvimento do TerraAmazon. Este sistema permitiu um salto de qualidade nas ferramentas de software utilizadas no monitoramento do desmatamento, pois passou a gerenciar em uma plataforma única toda base de dados necessária para realizar o PRODES e posteriormente o DETER, DEGRAD/DETEX e TERRACLASS.

O TerraAmazon é um sistema que permite a interpretação assistida de imagens multi-temporais obtidas por múltiplos satélites, em um ambiente corporativo, distribuído e concorrente em uma base de dados TerraLib.

O TerraAmazon gerencia todo fluxo de trabalho do PRODES, armazenando aproximadamente 600 imagens dos satélites Landsat, Cbers, UK2-DMC ou Resourcesat para cada ano de trabalho. Realiza o georeferenciamento, pré-processamento e realce das imagens para posterior interpretação/edição humana, em um ambiente multi-tarefa, multi-processamento. O banco de dados armazena e gerencia aproximadamente 4 milhões de polígonos, além de toda base de imagens pretérita já gerada pelo sistema. A figura 02 mostra o ambiente de produção dos dados do PRODES no TerraAmazon em 2013.

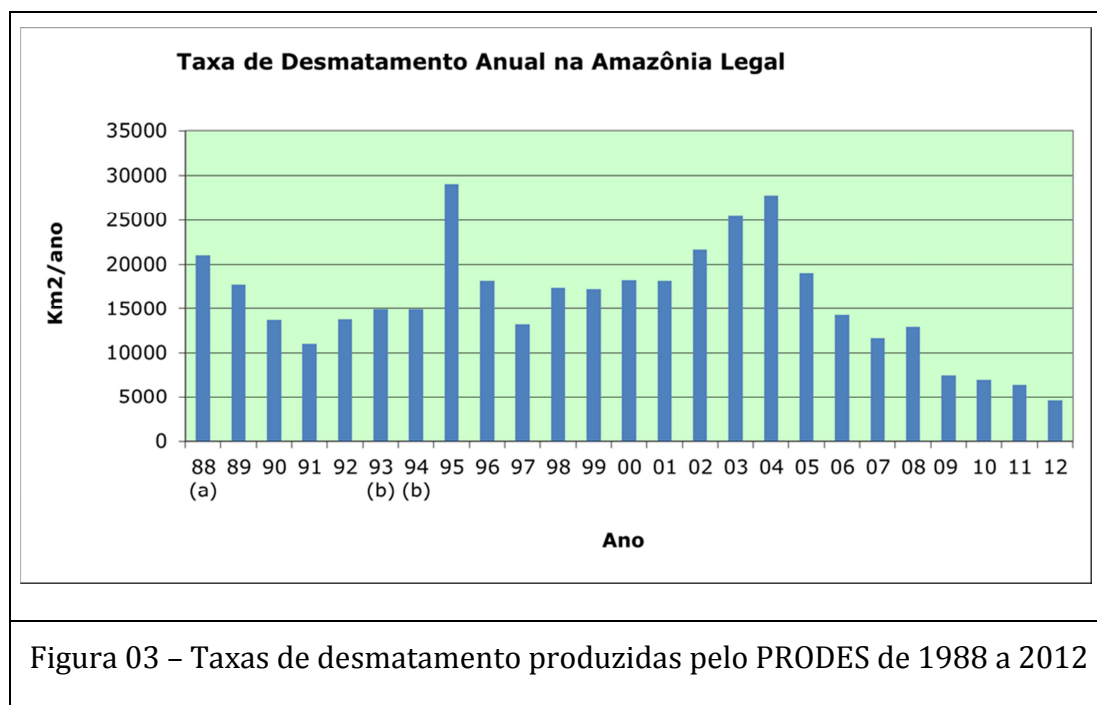


O projeto PRODES está inserido como ação do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) no Grupo Permanente de Trabalho Interministerial para a redução dos índices de desmatamento da Amazônia legal, criado por decreto presidencial de 3 de Julho de 2005. O GTPI é parte do Plano de Ação para a



Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia legal, lançado em 15 de março de 2004.

A figura 03 mostra a série histórica da taxa de desmatamento produzida pelo PRODES desde 1988.



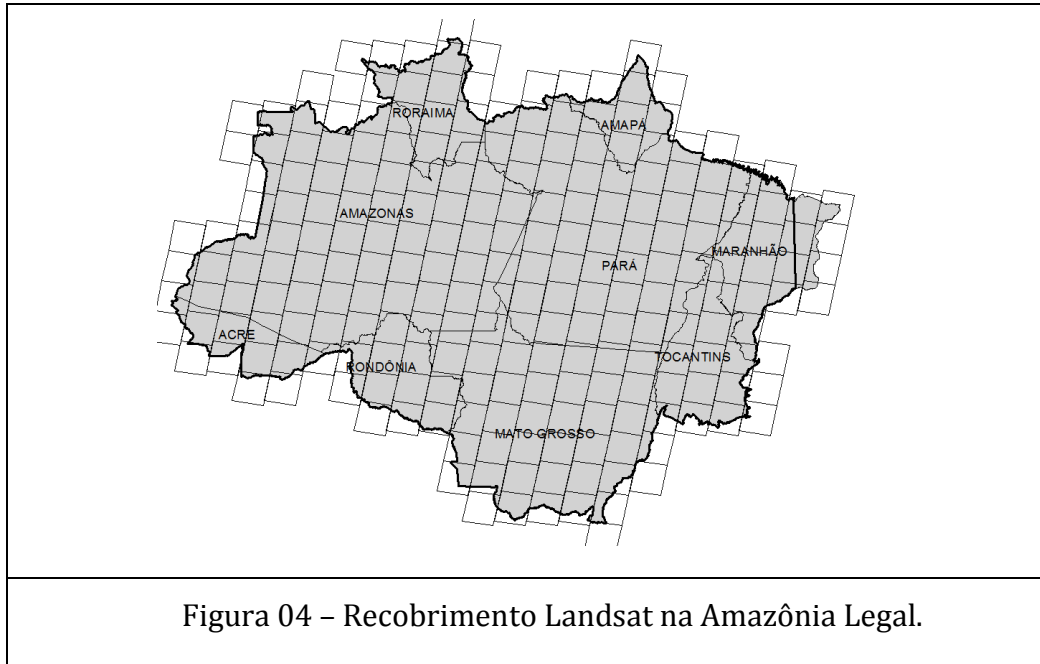
Este documento está dividido em oito seções. Na seção 2, descrevemos as hipóteses de trabalho adotadas no procedimento. Na seção 3, apresentamos o processo de processamento e interpretação das imagens. Na seção 4, discorremos sobre a estimativa de desmatamento na área coberta por nuvens e não observada no ano em curso. Na seção 5, mostramos como é feito o ajuste para estimar a taxa anual de desmatamento para uma data de referência e como é feito a projeção da taxa anual. Na seção 6, apresentamos os principais aspectos da metodologia que foram revisados. A seção 7 apresenta as conclusões e a seção 8 descreve a bibliografia consultada para apoiar a confecção deste documento.

## **2 Hipóteses de trabalho adotadas**

A metodologia do cálculo da taxa de desmatamento da Amazônia baseia-se em alguns pressupostos:

1. O PRODRES só identifica polígonos de desmatamento por corte raso (remoção completa da cobertura florestal) cuja área for superior a 6,25 ha.
2. As imagens utilizadas são da classe Landsat, ou seja, apresentam resolução espacial da ordem de 30 metros, 3 ou mais bandas espectrais. Podem ser utilizados imagens do satélite Landsat 5, 7 ou 8 da NASA/USGS (EUA), CBERS 2B do INPE/CRESDA (Brasil/China), UK2-DMC da DMC International Imaging (Reino Unido) e Resourcesat da ISRO (Índia).
3. Parte das imagens pode não ser analisada, devido a problemas de cobertura de nuvens ou de conflito entre o tempo necessário para processamento de todas as imagens e a data prevista para a divulgação da taxa. Neste caso, as imagens são selecionadas de forma a cobrir o máximo possível de áreas desmatadas no ano anterior.
4. A partir de 2005, com o surgimento do TerraAmazon, em casos de alta cobertura de nuvem, imagens de outros satélites (ou datas) podem ser usadas para compor a cena. O procedimento de análise é descrito na seção 3.
5. Numa imagem a ser analisada, pode haver áreas não-observadas, devido ao problema de cobertura de nuvens. Estas áreas deverão ser levadas em conta no procedimento de cálculo do incremento estimado para cada imagem, como descrito na seção 4.
6. O desmatamento ocorre apenas dentro da estação seca. Assim, para cada imagem do satélite Landsat, a estação seca foi estabelecida baseada em parâmetros climatológicos. Para fornecer uma taxa anualizada de desmatamento na imagem, os incrementos de desmatamento constatados em cada imagem precisam ser projetados para uma data de referência. Este processo é descrito na seção 5.

7. São necessárias aproximadamente 220 imagens do satélite Landsat para o total recobrimento da Amazônia Legal, conforme é mostrado na figura 04.



### 3 Procedimento de classificação/interpretação das imagens

- a) *Período 2002a 2004: Modelo Linear de Mistura, Segmentação, Classificação usando SPRING.*

A metodologia de interpretação de imagens consistia nas seguintes etapas: seleção de imagens com menor cobertura de nuvens e com data de aquisição a mais próxima o possível da data de referência para o cálculo de taxa de desmatamento (1º de agosto), georeferenciamento das imagens, transformação dos dados radiométricos das imagens em imagens de componente de cena (vegetação, solo e sombra) pela aplicação de algoritmo de mistura espectral para concentrar a informação sobre o desmatamento em uma a duas imagens, segmentação em campos homogêneos das imagens dos componentes solo e sombra, classificação não supervisionada e por campos das imagens de solo e de sombra, mapeamento das classes não-supervisionadas em classes informativas

(desmatamento do ano, floresta, etc), edição do resultado do mapeamento de classes e elaboração de mosaicos das cartas temáticas de cada Unidade Federativa. Estas etapas são detalhadas a seguir.

### **3.1 Seleção das imagens orbitais**

Em consulta ao acervo disponível no sitio da Divisão de Geração de Imagens (DGI) do INPE em Cachoeira Paulista, eram selecionadas imagens Landsat 5/TM ou similar, do ano de interesse (correspondentes geralmente aos meses de julho, agosto e setembro), com cobertura mínima de nuvens e melhor visibilidade, além de uma adequada qualidade radiométrica.

As imagens de satélite disponíveis na DGI são normalmente processadas com introdução de correções de sistema, nível de correção geométrica igual a 6 (reamostragem por vizinho mais próximo) e são fornecidas em projeção UTM. A figura 05 mostra uma cena do Landsat 5/TM selecionada no acervo da DGI para ser utilizada no PRODES.

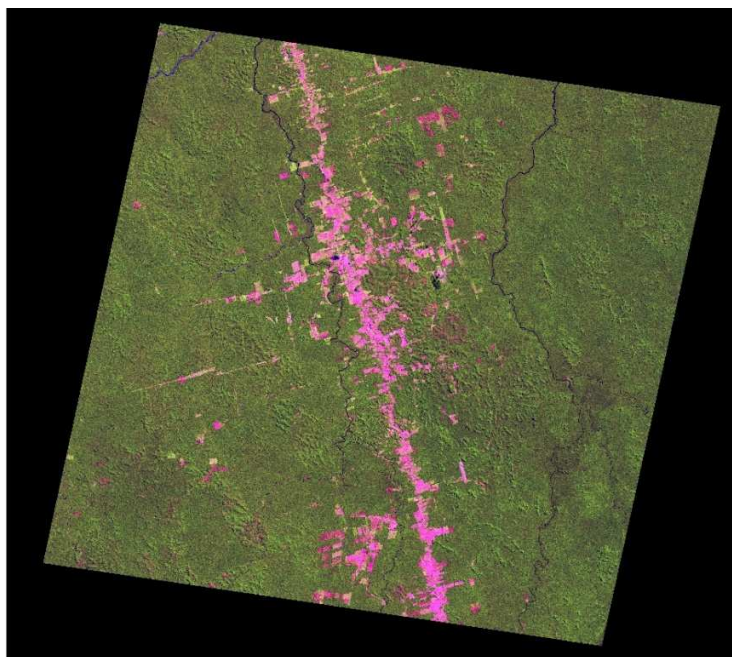


Figura 05 – Imagem Landsat 5 em geotiff (Cena 227/65 de 01/07/2002)  
Composição colorida RGB 5,4,3, disponível no acervo da DGI.

### 3.2 Preparação da base de dados e georeferenciamento das imagens

O módulo IMPIMA do sistema SPRING era utilizado nesta fase para converter as imagens fornecidas pela DGI em formato geotiff para o formato GRIB (Gridded binary), formato este utilizado pelo SPRING naquela época. É conveniente ressaltar era mantida a resolução espacial original do satélite utilizado.

A partir da criação da estrutura dos bancos de dados e dos respectivos projetos (Tabela 1) importava-se a imagem a ser processada no SPRING. Para cada imagem de um determinado ano, um novo banco de dados SPRING necessitava ser criado. Estes bancos continham os planos de informação para as categorias “imagem” e “carta temática”, representando respectivamente, as diversas bandas



espectrais e/ou imagens-sintéticas e as cartas-tema de interesse. O final do processo resultava em aproximadamente 220 banco de dados.

Dentre os temas definidos como legenda tinham-se as classes: floresta, não-floresta (áreas previamente identificadas nas imagens com base no Mapa de Vegetação do IBGE como constituída de vegetação com fisionomia diversa da florestal como Savana Arbórea-Arbustiva [Cerrado], Savana Gramíneo-Lenhosa [Campo Limpo de Cerrado], Campinarana, etc), extensão desmatada (acumulado dos desmatamentos dos anos anteriores), desmatamento do ano do mapeamento, hidrografia e nuvem.

Na Tabela 1 pode-se observar que tanto o nome do banco de dados, quanto o nome do projeto procuram referenciar o ano do levantamento e as informações da órbita/ponto de cada imagem Landsat investigada, permitindo ainda visualizar as categorias e modelos dos dados/informações de entrada.

TABELA 1- Exemplo de estrutura dos bancos de dados e dos projetos

<b>NOME DO BANCO</b> "ano do levantamento_projeto_sgi_órbita_ponto_data"			
<b>NOME DO PROJETO</b> "ano do levantamento_projeto_sgi_órbita_ponto_data"			
<b>CATEGORIA</b>	<b>MODELO</b>	<b>PI</b>	<b>CLASSES</b>
Imagem	Imagem	3 Bandas sintéticas	
CartaTema	Temático	Classificação	floresta, não-floresta, desmatamento-total (extensão) desmatamento (incremento do ano), nuvem, hidrografia.

No início, o georeferenciamento das imagens era feito registrando-se as imagens de satélite com cartas topográficas escanerizadas na escala 1: 100.000, através da aquisição de pontos de controle. No registro, associam-se as coordenadas da imagem (linha, coluna) com as coordenadas geográficas (latitude, longitude) das cartas topográficas. O SPRING pode reconhecer imagens Landsat 5 ou similar com correção geométrica de sistema e tratá-las de modo especial durante o registro.



Nas várias áreas da Amazônia, onde não existem cartas na escala de 1:100.000 foram utilizadas como referência, aquelas cartas disponíveis, na escala 1:250.000 editadas pelo IBGE ou DSG, órgãos responsáveis pela cartografia nacional. É importante destacar que essa forma de registro imagem x carta foi empregado apenas para o georeferenciamento inicial do ano-base (no caso, 1997), ficando as imagens dos anos subseqüentes devidamente registradas pelo tipo imagem x imagem do ano anterior. Posteriormente ao registro, era feita a importação das imagens para a estrutura dos projetos criados, conforme mencionado em item anterior.

A partir de 2005, adotou-se o georeferenciamento usando como base as imagens ortoretificadas do satélite Landsat 5/7 ano 2000 produzidas pelo projeto Geocover da NASA (<https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid>) e não mais o registro imagem x imagem do ano anterior.

### 3.3 Modelo linear de mistura espectral

O modelo linear de mistura espectral (MLME) visa estimar a proporção dos componentes solo, vegetação e sombra, para cada pixel, a partir da resposta espectral nas diversas bandas do Landsat TM, gerando as imagens-fração solo, vegetação e sombra. O modelo de mistura espectral pode ser escrito como:

$$r_i = a * vege_i + b * solo_i + c * sombra_i + e_i$$

onde  $r_i$  é a resposta do pixel na banda  $i$  da imagem Landsat TM;  $a$ ,  $b$  e  $c$  são proporções de vegetação, solo e sombra (ou água) que compõem o pixel;  $vege_i$ ,  $solo_i$  e  $sombra_i$  correspondem as respostas espectrais de cada uma dessas componentes citadas;  $e_i$  é o erro de estimação intrínseco para cada banda  $i$ . As bandas 3, 4 e 5 do Landsat TM estão sendo utilizadas, formando um sistema de equações lineares que pode ser resolvido utilizando o método dos Mínimos Quadrados Ponderados. Após a aplicabilidade do modelo de mistura, são resultantes três bandas sintéticas, representando as proporções de vegetação, de solo e de sombra existente em cada pixel da imagem que são mostradas nas figuras 06, 07 e 08.

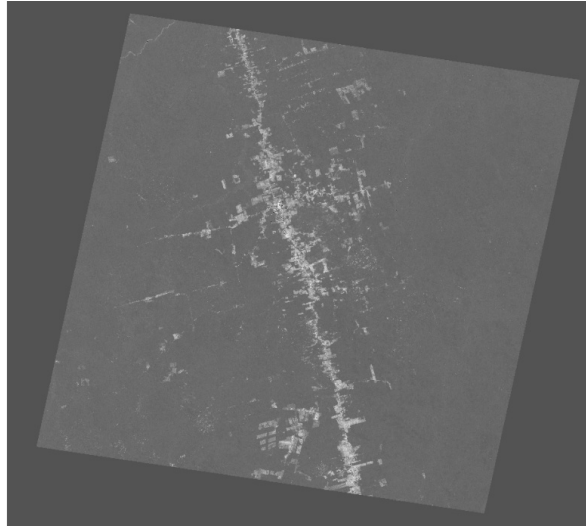


Figura 06 – Imagem da Componente Solo

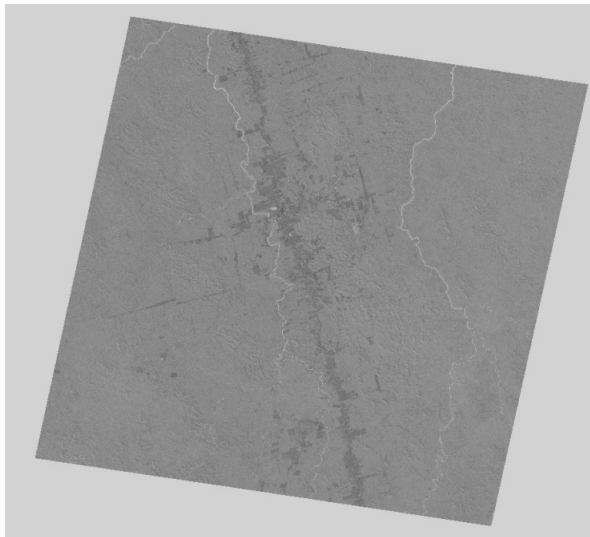


Figura 07 – Imagem da Componente Sombra



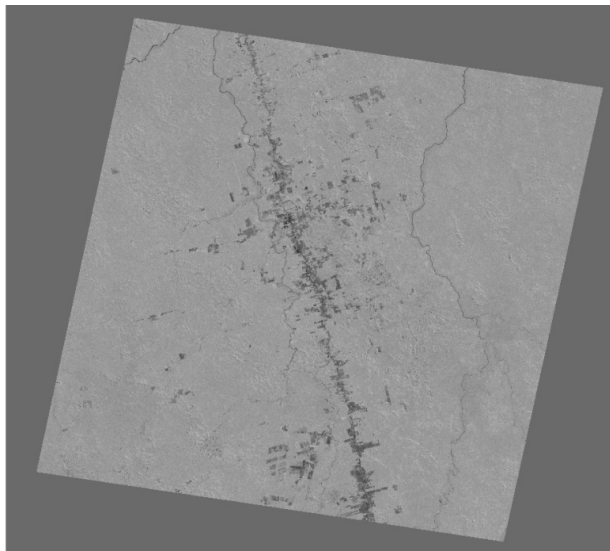


Figura 08 – Imagem da Componente Vegetação

Particularmente, em função dos alvos investigados neste trabalho, a imagem-fração sombra ou solo, tem sido geralmente utilizada no processo de identificação das áreas desmatadas. Essa indicação de qual imagem-fração utilizar para dar seqüência no procedimento é fruto da experiência do foto-intérprete ou do analista em reconhecer a complexidade temática da área de estudo. Geralmente áreas de transição/contacto entre as formações florestais e aquelas de cerrado (lato sensu), por exemplo, são tratadas a partir de imagens-fração solo.

Em áreas com dominância de faciações da floresta tropical a caracterização do desmatamento é melhor definida em imagem-fração sombra, visto que áreas florestadas apresentam significativo percentual dessa componente sombra, em função dos vários estratos que compõem a estrutura de uma floresta e a irregularidade do dossel, contrastando com uma baixa quantidade de sombra no caso de áreas com ocorrência de derrubada florestal.

Ao final dessa fase, as imagens-sintéticas geradas pelo MLME para serem empregadas para a etapa classificatória eram reamostradas para 60 metros, por razões de otimização do tempo de processamento digital e minimizando o espaço

em disco - limitações encontradas naquela época - sem perda do conteúdo informativo compatível com a escala de apresentação final, que é de 1:250.000.

### **3.4 Segmentação das imagens frações-sombra e solo**

A segmentação de imagem é uma técnica de agrupamentos de dados, na qual somente as regiões espacialmente adjacentes e de características espectrais semelhantes podem ser agrupadas. Para realizar o processo de segmentação é necessário definir dois limiares: a) o limiar de similaridade, valor mínimo estabelecido pelo intérprete, abaixo do qual duas regiões são consideradas espectralmente similares e agrupadas em uma única região; b) o limiar de área mínima, dado em número de pixels, para que uma região seja individualizada. No projeto as imagens fração-sombra ou fração-solo derivadas do MLME eram segmentadas pelo método de crescimento de regiões, utilizando os limiares de similaridade 8 e de área 16, pré-estabelecidos através de vários experimentos em trabalhos sobre uso e cobertura da terra realizados na Amazônia (figura 09).

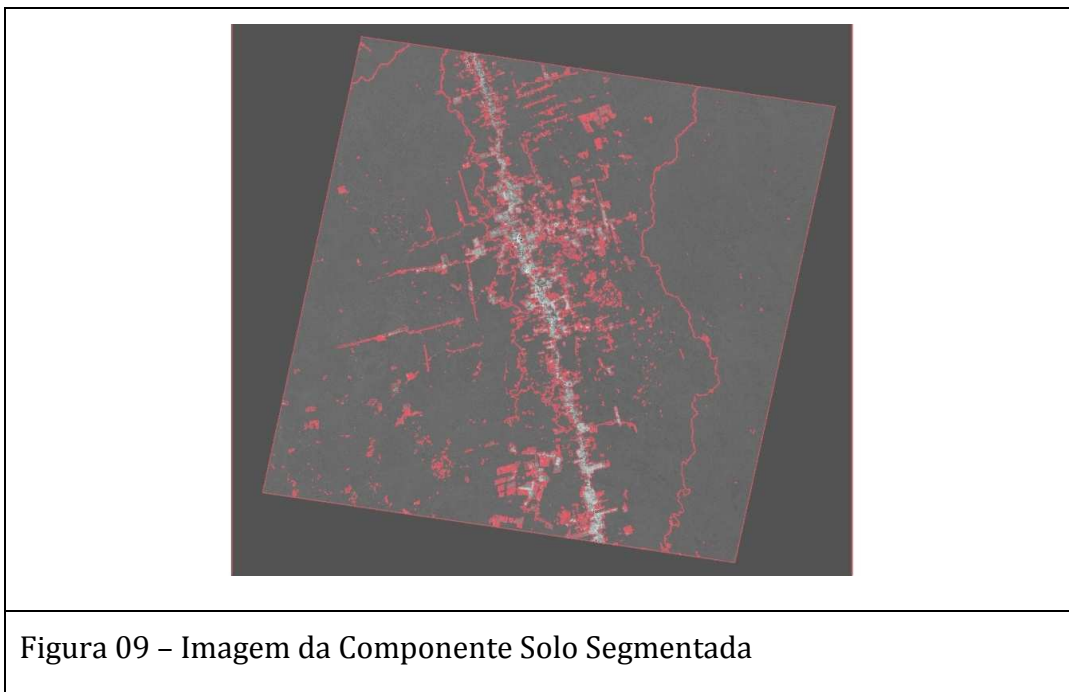


Figura 09 – Imagem da Componente Solo Segmentada

### 3.5 Classificação das imagens fração-sombra ou solo segmentadas

Uma vez realizada a segmentação nas imagens sintéticas derivadas do MLME selecionadas, tornava-se necessário como fase seqüencial de operação, a criação de um arquivo de contexto e extração de regiões, antes da fase de classificação propriamente dita. Nesse arquivo de contexto ficam armazenadas as informações: a) tipo de classificação por regiões; b) bandas ou imagens utilizadas; e c) imagem segmentada. Na fase de extração das regiões um algoritmo extrai os atributos estatísticos (médias e matrizes de covariância) do conjunto de regiões definido pela segmentação. Após isso, iniciava-se o processo classificatório, cujas imagens-fração (sombra ou solo) segmentadas são tratadas por um algoritmo de classificação não-supervisionado de agrupamento de dados (ISOSEG), onde a discriminação de classes tem como base os atributos estatísticos de região, dentro de certos limiares de aceitação pré-determinados iguais a 95% ou 90%, conforme a complexidade da paisagem investigada. Os temas resultantes da classificação foram então associados às classes definidas anteriormente no banco de dados, cujo resultado da identificação e do mapeamento das áreas desflorestadas pode ser apresentado no formato raster ou vetorial (figura 10).

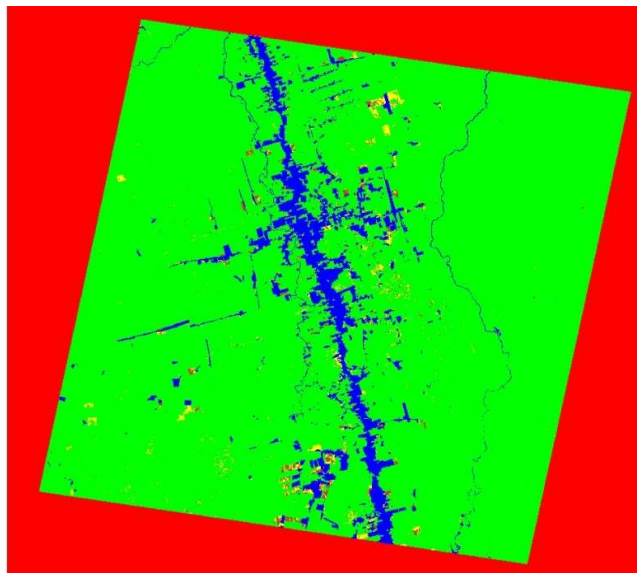


Figura 10 – Imagem Classificada

A figura 11 apresenta tela do SPRING com imagem segmentada e posteriormente classificada.

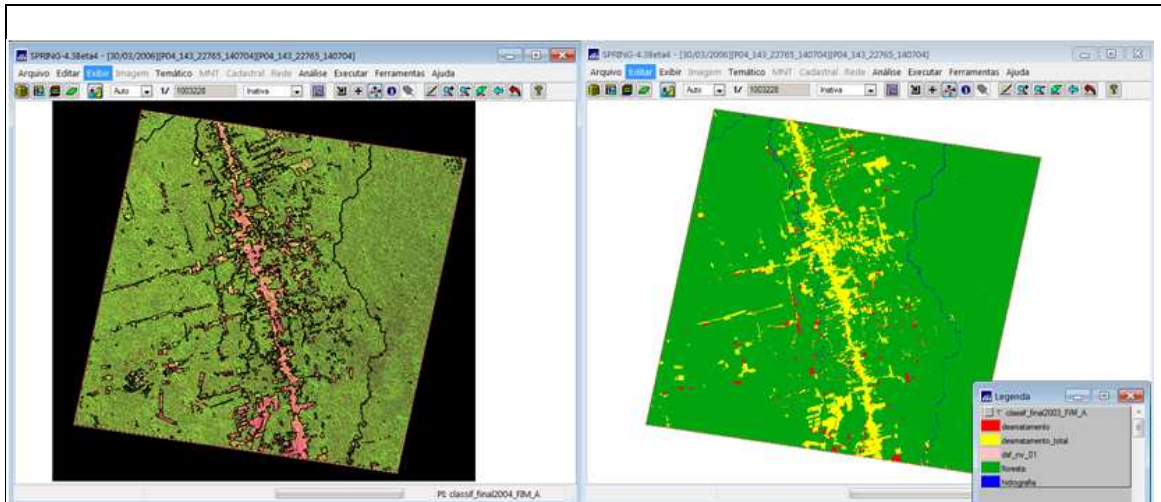


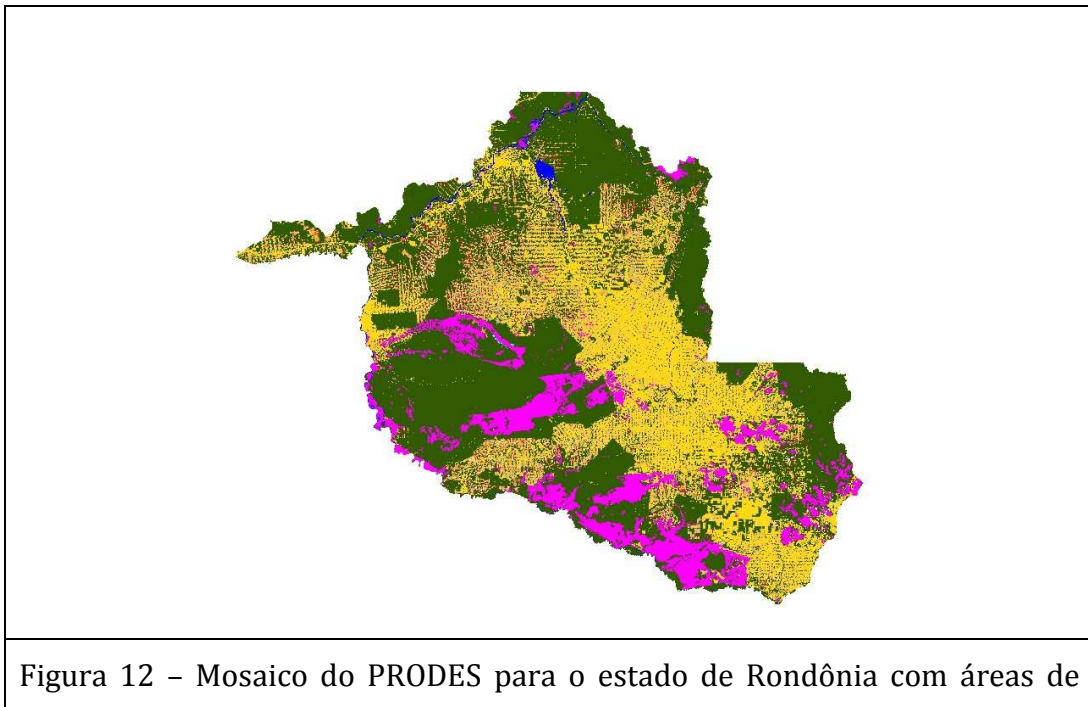
Figura 11 – Imagem segmentada e classificada no SPRING

### 3.6 Edição e mosaicagem

Uma vez realizada a classificação de uma imagem por esse procedimento não supervisionado, tornava-se necessário fazer uma pré-auditoria do mapeamento resultante. Essa etapa é denominada de “edição”, realizada por um foto-intérprete, com a tarefa de analisar minuciosamente (diretamente na tela do computador tendo como plano de fundo, para comparabilidade, a imagem original em composição colorida) os polígonos temáticos gerados pela operação conjunta de segmentação e classificação de determinada imagem-fração. Os polígonos mapeados são aceitos ou reclassificados em outras categorias de uso da terra, baseado na experiência desse foto-intérprete, que avalia padrões e aspectos de contexto, além de, caso necessário, contar com dados históricos derivados do PRODES Analógico. Essa atividade de redefinição temática de polígonos é realizada em escala 1:100.000, de forma a preservar o detalhamento dos contornos do(s)

segmento(s) que define(m) determinada classe. A fase de edição de temas, especialmente a ocorrência de nuvens e/ou de áreas de não-floresta, eram normalmente editadas visualmente na tela do computador. Com a implementação do algoritmo de edição matricial no SPRING, observa-se maior eficiência no processo de edição feita pelo foto-intérprete. Nesta edição matricial, a obtenção dos dados vetoriais, correspondentes aos polígonos editados, são obtidos através da aplicação do procedimento de conversão das informações do formato raster para vetorial.

Uma vez realizada a edição, cada imagem temática (carta-tema) é ordenada num banco específico, segundo as órbitas/pontos referenciais do satélite, para compor o mosaico da Amazônia Legal. Nesse processo de composição do mosaico, os PI de entrada que são as cartas-tema têm sua resolução espacial transformada em 90 metros, para uma apresentação final de toda a Amazônia brasileira na escala de 1:2.500.000, pela grande quantidade de informações geradas na escala original do trabalho interpretativo. No caso do mosaico de cada Estado que compõe a Amazônia Legal, os PIs dos projetos carta-tema mantêm a resolução de 60 metros, porém a escala de apresentação é de 1: 500.000 (Figura 12).



floresta (verde), desmatamento (amarelo), áreas de não floresta (magenta) e hidrografia (azul).

*b) Período pós 2005: Interpretação visual diretamente na tela do computador usando TerraAmazon*

Em 2005 o INPE substituiu o uso da metodologia de MLME e classificação das imagens a partir das frações solo e vegetação utilizada no SPRING até então e passou a utilizar o TerraAmazon como base tecnológica e a interpretar as imagens de forma visual delimitando os polígonos diretamente na tela do sistema.

As atividades de seleção das imagens de entrada e seu georeferenciamento seguem, em linhas gerais, as descritas nos itens 3.1 e 3.2 acima.


### **3.7 Interpretação das imagens e mapeamento dos desmatamentos**

Após o georeferenciamento de cada imagem a ser utilizada no PRODES, a mesma é ingestada para o banco de dados geográficos gerenciado pelo TerraAmazon. Este banco armazena e manipula todas as imagens necessárias para o projeto em uma base de dados única e uniforme para toda Amazônia Legal, eliminando assim a necessidade que havia no ambiente SPRING de se trabalhar com um banco de dados para cada imagem a ser processada. Ou seja, para cada ano era necessário manipular aproximadamente 220 bancos de dados separadamente.

Em uma única base estão sistematizados os dados (polígonos e imagens) do programa de monitoramento da Amazônia do INPE, permitindo assim agilidade no processo de análise, edição e produção de informação gráfica e tabular. O TerraAmazon, além de oferecer ferramentas de edição e consulta próprias de um Sistema de Informação Geográfica, permite que sejam criados algoritmos de consistência, que impedem que polígonos espúrios sejam gerados, analisando conjuntamente dados vetoriais e tabulares.

Para início do mapeamento de determinado ano, o mapa de desmatamento do PRODES do ano anterior é utilizado como um marco de referência das áreas já desmatadas. Este mapa contendo o desmatamento dos anos anteriores, juntamente com as áreas de não-floresta e de hidrografia, geram uma máscara que contém todas as áreas de corte raso já detectadas no passado. Esta máscara é usada para eliminar a possibilidade de que desmatamentos antigos sejam identificados, mapeados e contados novamente.

A identificação de desmatamento é feita através da foto-interpretação da imagem Landsat (ou similar) através da delimitação dos novos polígonos diretamente na tela do computador, considerando apenas a porção da imagem que supostamente ainda possui cobertura florestal. A identificação do padrão de alteração da cobertura florestal para corte raso é feita com base nos três principais elementos para a foto-interpretação: tonalidade, textura e contexto, seguindo esta padronização:

<b>Imagem Landsat TM de 2011</b>	<b>Crítérios para Interpretação Visual</b>	<b>Cobertura da terra</b>	<b>Tipo de desmatamento</b>
	<p>Tonalidade magenta/avermelhada ou verde muito claro (esmaecido). Forma regular, textura lisa, limites bem definidos entre o polígono com solo exposto e a floresta.</p>	<p>Predomínio de solo exposto ou pastagem em formação.</p>	<p>Corte Raso</p>

As figuras 13, 14 e 15 mostram a sequência para delimitar um novo desmatamento nesta metodologia.

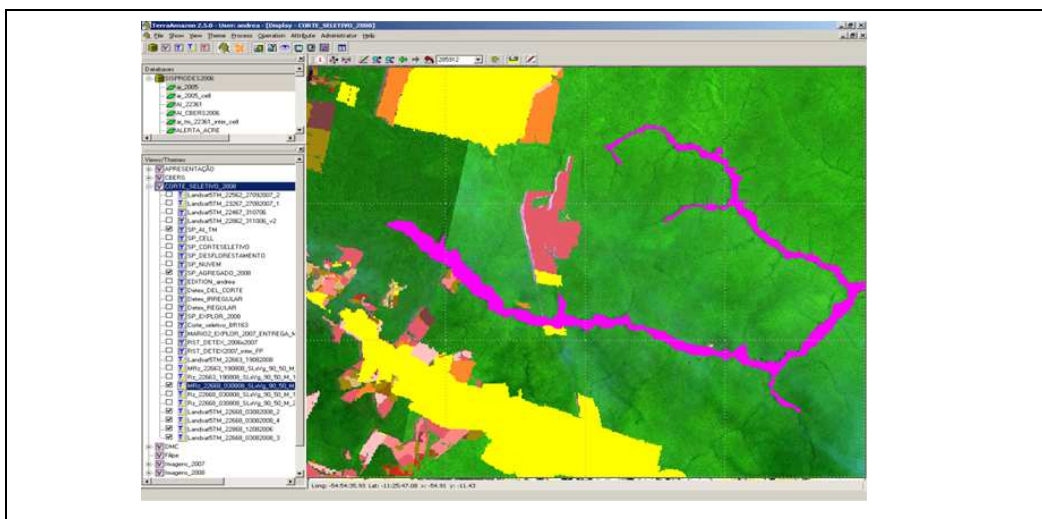


Figura 13 – A máscara do PRODES 2010 com os desmatamentos antigos já detectados (amarelo e tons de marrom) e áreas de não-floresta (magenta), sobreposta à composição colorida do Landsat de 2010.

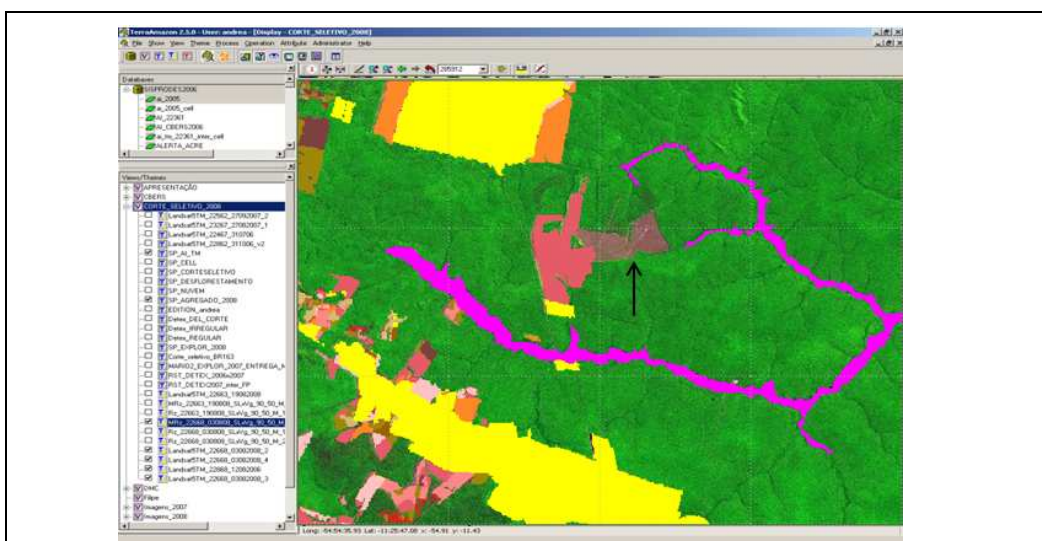


Figura 14 – A máscara do PRODES 2010 é então sobreposta à imagem em composição colorida do Landsat de 2011. A seta mostra área com evidência de novo desmatamento por corte raso que inexistia na imagem do ano de 2010 e conseqüentemente na máscara.



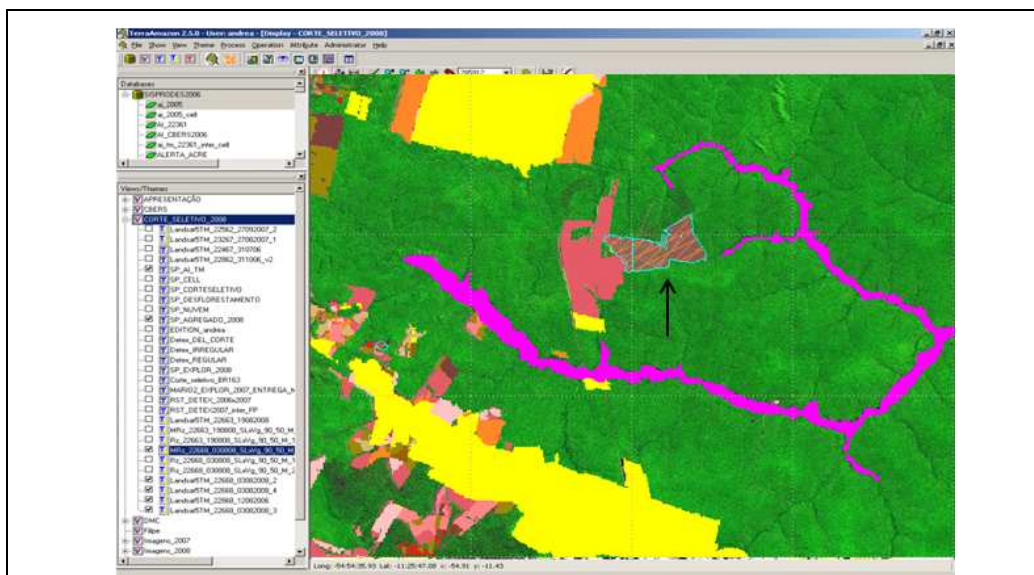


Figura 14 – A área com evidência de novo desmatamento por corte raso em 2011 é delimitada diretamente na tela do computador através de funções para edição vetorial disponíveis no TerraAmazon. Este polígono será considerado integrante da máscara no PRODES 2011, impossibilitando desta maneira que ele seja mapeado novamente nos anos subsequentes.

### 3.8 Resultado desta fase

Esta fase produz dois resultados: (a) Os mapas digitais por órbita/ponto do satélite Landsat e mosaicos por estado, que são colocados na Internet para análise e conhecimento do governo e da sociedade; (b) Uma planilha com os seguintes dados para cada órbita/ponto, separados por estado:

- Pathrow: órbita-ponto de cada imagem;
- State: estado da federação coberto;
- Cod: identifica o recorte sem nuvens (ou com o mínimo possível) de uma das imagens usadas para processar a cena toda. A união dos recortes compõe a imagem toda;

- Julnday: dia juliano da imagem observada;
- Fstarea: área de floresta remanescente na imagem;
- Dfsarea: área desmatada na imagem observada anteriormente;
- Increm: incremento no desmatamento constatado na imagem;
- Fstclds: área de floresta coberta por nuvens na imagem Ft;
- dfcld\_01: área desmatada, coberta por nuvens no ano anterior;
- dfcld\_02, dfcld\_03, dfcld\_04,dfcld\_05, dfcld\_06, dfcld\_07: área desmatada, coberta por nuvens nos (dois, três, quatro, cinco, seis e sete) anos anteriores à data de observação.
- Dfcld\_out: área de desmatamento registrada em 2004, porém já existente em 2003 ou em anos anteriores. Este dado não é considerado na estimativa anual porque não é considerado um dado do ano corrente. Apesar de não entrar no cálculo da estimativa anual, a área desmatada é incorporada aos arquivos shape que representam os desmatamentos acumulados até o momento (chamado de máscara PRODES).

A Tabela 2 mostra um exemplo dos resultados desta fase, onde são listadas algumas imagens com maior incremento do desmatamento em 2004 (km<sup>2</sup>).

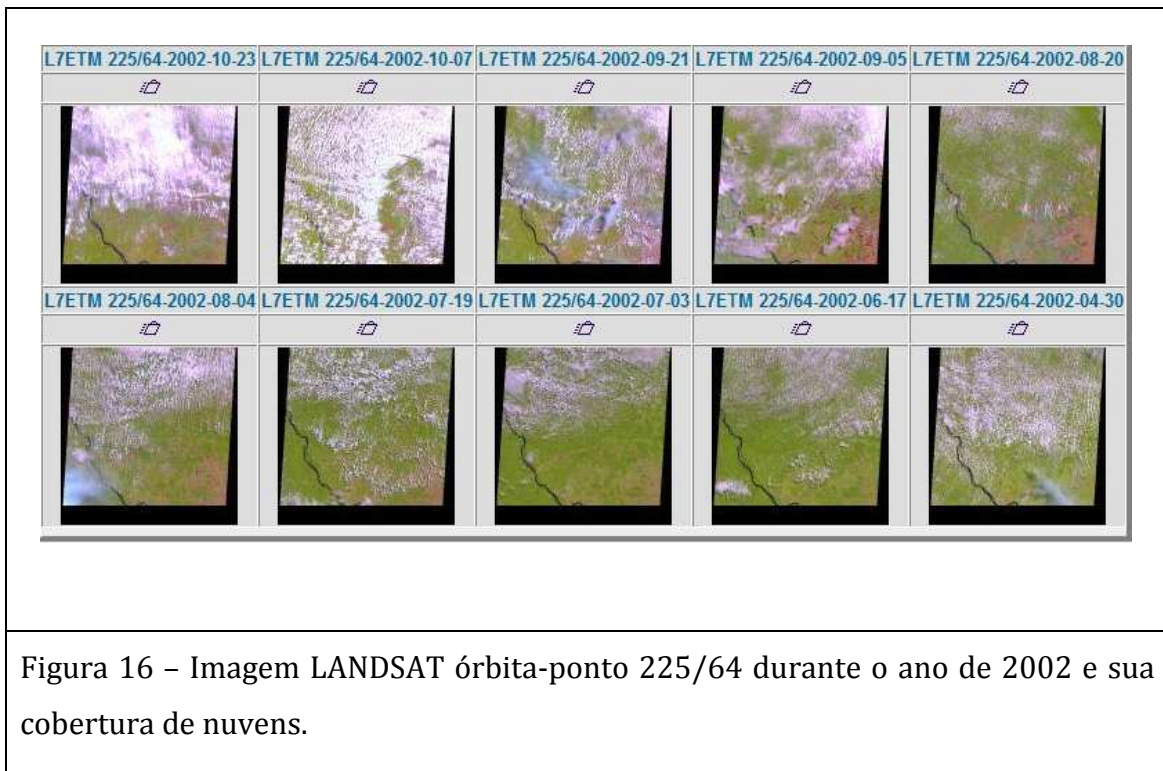
TABELA 2 – Exemplo de dados para cálculo da taxa

pathrow	state	codigo	julnday	fstarea	dfsarea	increm	fstclds	dfcld_01	dfcld_02	---	dfcld_07	dfcld_out
22466	PA	1	223	12215	11969	830	559	19	0	...	0	29
22765	PA	1	197	5778	378	82	9	0	0	...	0	5
22765	PA	2	197	17990	2226	546	80	0	0	...	0	25
22768	MT	1	213	13397	8472	897	201	0	0	...	0	83
22769	MT	1	228	11465	7660	893	0	0	0	...	0	85
22867	MT	1	204	14115	5482	673	0	0	0	...	0	5
22867	MT	2	204	4045	1070	177	0	0	0	...	0	0
22967	MT	1	211	19977	5753	669	0	0	0	...	0	27
22969	MT	1	211	7205	1572	103	0	0	0	...	0	60
22969	RO	1	211	1876	1615	51	0	0	0	...	0	23
23267	RO	1	215	15130	8537	866	295	1	0	...	0	443

Os cálculos posteriores (descritos nas seções 4 e 5) são realizados com base nesta planilha.

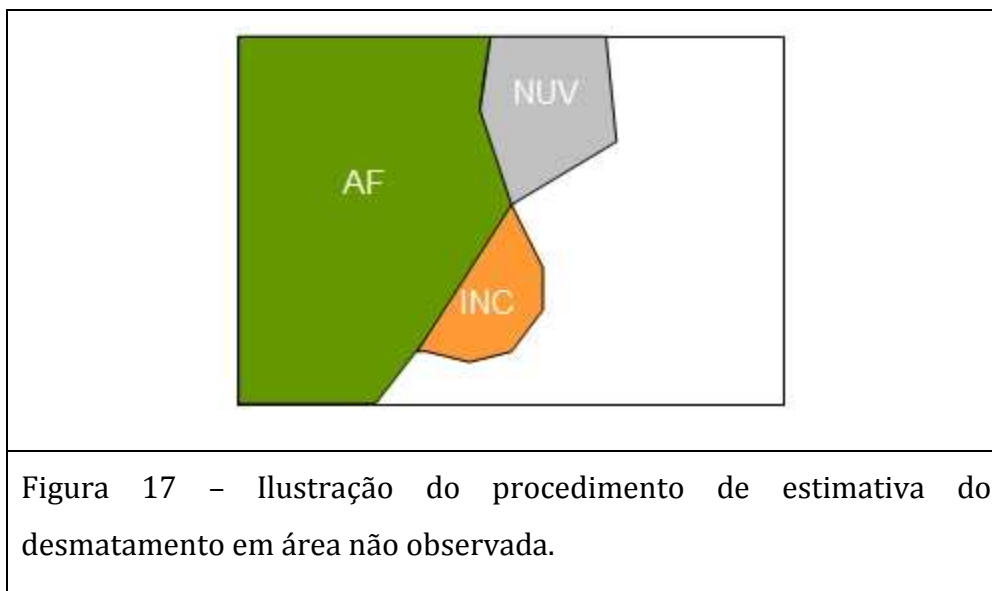
#### 4 Efeito da cobertura de nuvens

Em muitas áreas da Amazônia, é impossível obter imagens sem cobertura de nuvens pelo menos parcial. Nestes casos, o INPE procura selecionar a imagem com menor cobertura de nuvens dentro da estação seca. Por exemplo, tome-se o caso da imagem 225/64, que cobre a chamada Terra do Meio no estado do Pará, durante o ano de 2002. Como mostra a figura 16, no período de 30/04/2002 a 23/10/2002, esta região esteve parcial ou totalmente coberta por nuvens. O INPE escolheu para processar a imagem do dia 03/07/2002, cuja cobertura de nuvens estava mais restrita a uma única região da imagem.



Após o processamento da imagem como descrito na seção 3, é feita a estimativa da área desmatada sob nuvens. Esta estimativa supõe que a proporção

de desmatamento na área não-observada é a mesma da área de floresta observada na imagem. O procedimento é ilustrado na Figura 17.



Na Figura 17, sendo AF a área de floresta remanescente, INC o incremento constatado na imagem, e NUV a área não observada, o incremento estimado sob nuvens ( $inc\_nuv$ ) é calculado como a proporção do desmatamento observado multiplicado pela área de nuvens. O incremento total ( $inc\_tot$ ), usado no cálculo da taxa de desmatamento, é considerado como a soma do incremento observado com o incremento estimado sob nuvem, mais as parcelas de desmatamentos observados sobre a ocorrência de nuvens por um ou mais anos. Assim,

$$inc\_nuv = NUV * (INC / (AF + INC))$$

$$inc\_tot = INC + inc\_nuv + parcelas\_dsf$$

$$parcelas\_dsf = (dfcld\_01/2 + dfcld\_02/03 + dfcld\_03/04 + \dots + dfcld\_07/8)$$

onde cada parcela é calculada em função do número de anos que a área ficou coberta por nuvens, mais o ano corrente. Assim, se uma área ficou coberta por nuvens por 2 anos e no ano corrente foi possível observar o desmatamento ( $dfcld\_02$ ), o valor observado é dividido por 3 anos, não onerando o ano corrente.



Para `dfcld_01` considera-se 2 anos, `dfcld_02` considera-se 3 anos e assim sucessivamente até o máximo de 7 anos de cobertura por nuvens.

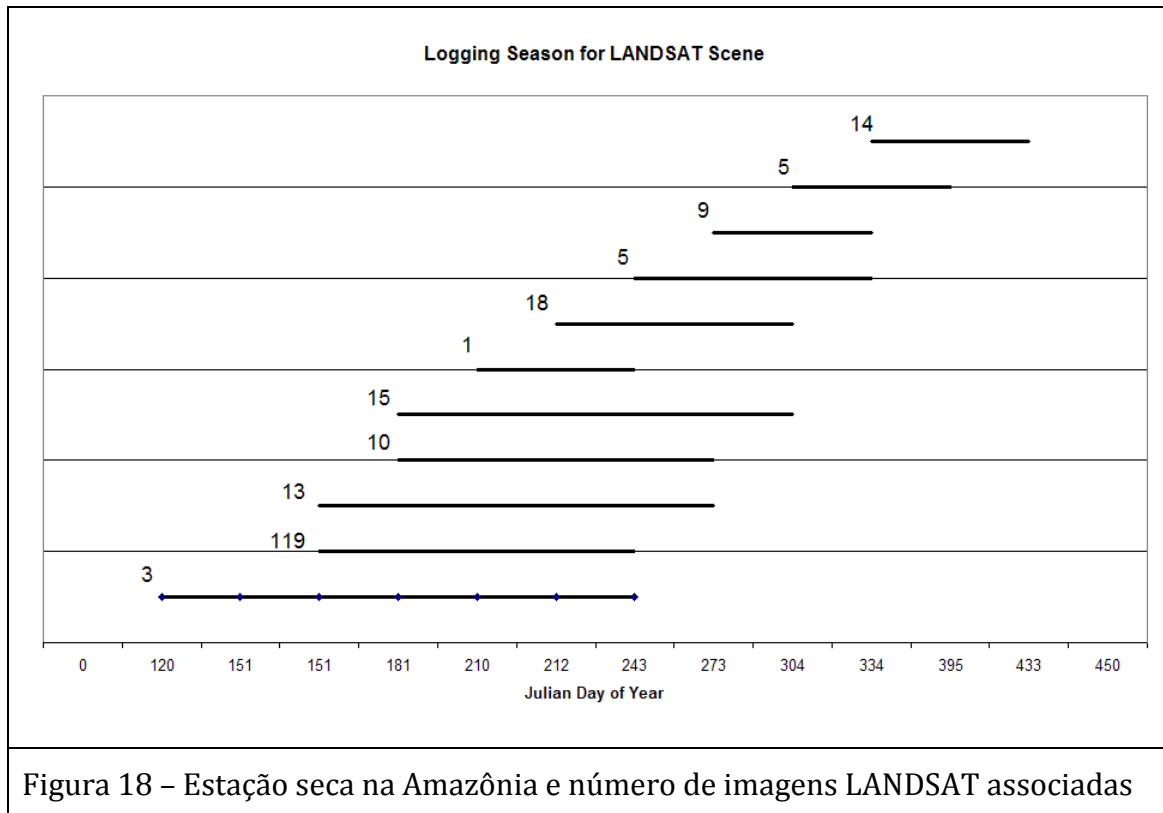
Como exemplo, os dados na imagem órbita ponto 224/66, onde em 2004 foram identificados 12215km<sup>2</sup> de área de floresta remanescente, um incremento de 830 km<sup>2</sup>, uma área de nuvens de 559 km<sup>2</sup>, e uma área de desmatamento sobre nuvens por 1 ano de 19km<sup>2</sup>. O incremento total estimado foi de 875 km<sup>2</sup>.

Quando a melhor imagem selecionada tem muitas nuvens, a parte sem cobertura é processada e imagens de outros satélites de datas próximas são usadas para interpretar a parte coberta por nuvens. Os cálculos de `inc_nuv` são feitos para cada parte usada para compor a imagem processada final. Quando isto acontece, os anos anteriores são também recortados com o mesmo recorte usado para processar tal imagem para não afetar o cálculo das estimativas. Na Tabela 2 o recorte (área interpretada) é indicado pela coluna `cod`. Este procedimento foi adotado a partir de 2005 com o objetivo de reduzir ainda mais as incertezas ocasionadas por nuvens.

## **5 Cálculo da taxa de desmatamento**

### **5.1 Determinação da estação seca**

Para o cálculo da taxa de desmatamento, o primeiro passo é estabelecer qual é a estação seca associada à imagem. Na Figura 18, estão mostradas as diferentes estações seca climatologicamente definidas para a Amazônia, com os respectivos dias de início e fim. Note-se que a grande maioria das imagens está associada a uma estação seca que começa no dia juliano 151 (31/maio) até o dia juliano 242 (29/agosto). Estas imagens correspondem à região do Mato Grosso, Rondônia e Sul do Pará.



## 5.2 Estimativa proporcional para data de referência

O passo seguinte é fazer a compensação temporal de todos os incrementos, para uma mesma data de referência. Considerando o grande número de imagens cuja estação seca está entre os meses de junho e setembro (ver figura acima), tomou-se a data de 1/agosto (dia juliano 211) como data de referência para o cálculo das taxas anualizadas.

O procedimento detalhado do cálculo da taxa dependerá das datas de aquisição da imagem no ano em análise e nos dois anos anteriores. Para ilustrar o procedimento, tomou-se o exemplo no qual as duas datas de aquisição das imagens estão dentro da estação seca (vide Figura 19). Os demais casos são calculados de maneira similar.

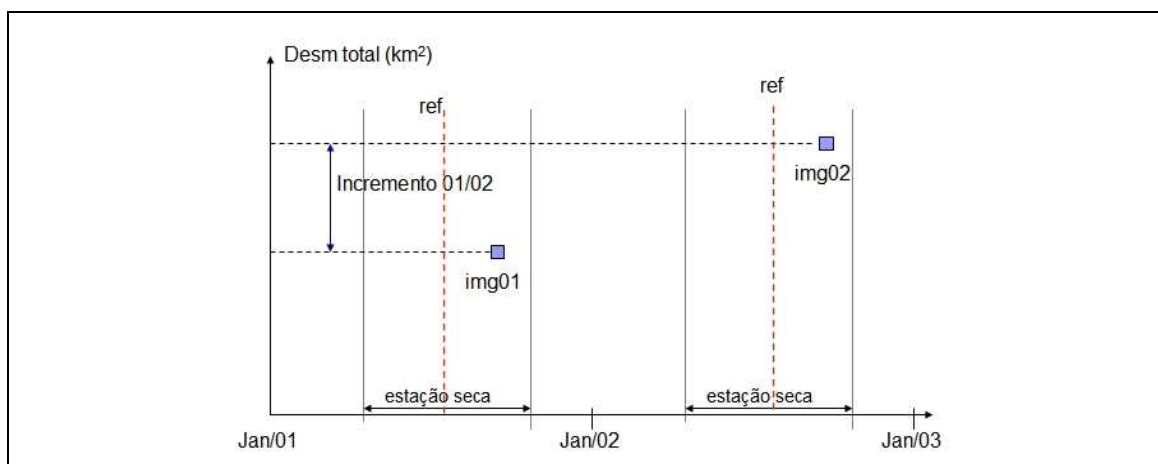
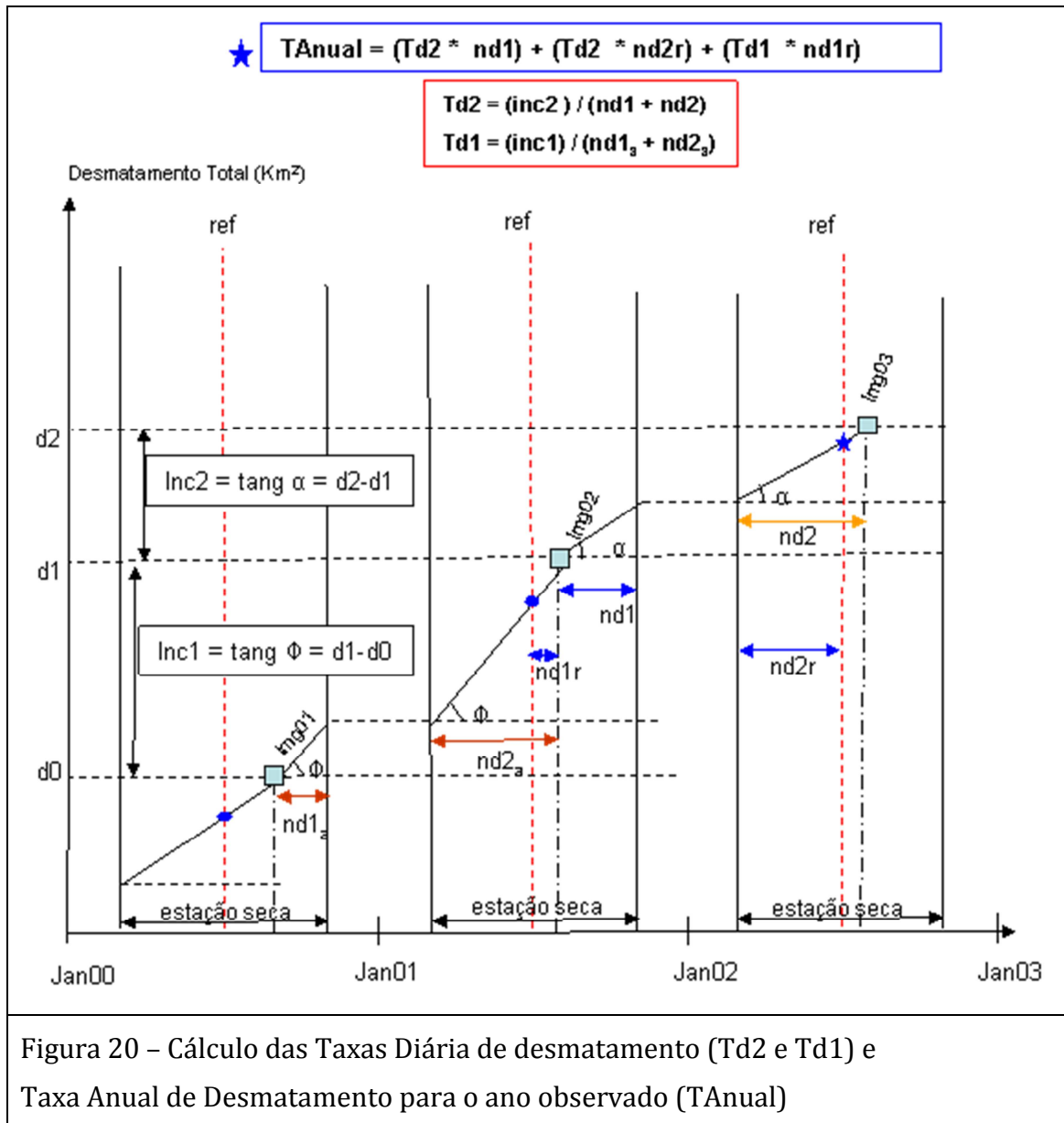


Figura 19 – Cálculo da taxa anual de desmatamento – passo 1: localização das imagens em relação à estação seca (*ref* é a data de referência).

Na figura acima, a diferença entre o desmatamento total das duas imagens é o incremento entre as duas datas. Como o número de dias entre as duas imagens depende de fatores como a cobertura de nuvens, a diferença de data pode ser menor ou maior que um ano. Esta diferença tem de ser compensada para o cálculo da taxa. Assim, o segundo passo é o cálculo da taxa diária de desmatamento e a taxa anual, como mostra a Figura 20. Para o cálculo da taxa diária, divide-se o incremento observado pelo número de dias da estação seca entre as duas imagens.



O cálculo da taxa de desmatamento anual é estimado como:

$$T_{Anual} = (Td2 * nd1) + (Td2 * nd2r) + (Td1 * nd1r) \quad ,$$

onde:

- Td2 - taxa de desmatamento diária entre a imagem do ano analisado e a imagem do ano anterior.





- Td1 - taxa de desmatamento diária entre a imagem do ano anterior e a imagem do ano precedente.
- nd2 - número de dias de estação seca entre o início da estação seca e a imagem do ano.
- nd2r - número de dias de estação seca entre o início da estação seca e a data de referência.
- nd1r - número de dias da estação seca entre a data de referência e a imagem do ano anterior.
- nd1 - número de dias de estação seca entre a imagem do ano anterior e o final da estação seca
- nd1<sub>a</sub> - número de dias de estação seca entre a imagem do ano precedente e o fim da estação seca
- nd2<sub>a</sub> - número de dias de estação seca entre o início da estação seca e a imagem do ano anterior

As Tabelas 3 e 4 mostram um exemplo de estimativa de taxas.

TABELA 3 – Dados de entrada - cena 22466

	pathrow	state	cod	julnday	fstarea	dfsarea	increm	fstclds	dfcld_01	dfcld_02	...	dfcld_07	dfcld_out
2004	22466	PA	1	223	12215.29	11969.00	829.87	558.74	18.53	0	...	0	28.53
2003	22466	PA	1	236	13661.41	11153.48	776.79	84.65	36.78	0	...	0	0
2002	22466	PA	1	209	13923.80	10402.36	751.13	635.83	0.00	0	...	0	0

TABELA 4 – Estimativa de Taxas de Desmatamento - cena 22466

	PathRow	Sta	Scld	Jul2	Jul1	Jul0	StClim	EndClim	Rate	Increm	CorrInc	...
2004	22466	PA	1	223	236	209	151	242	916.75	829.87	874.68	...
2003	22466	PA	1	236	209	214	151	242	619.79	776.79	799.73	...
2002	22466	PA	1	209	214	164	151	242	831.66	751.13	783.67	...
...	InclstYear	CorrLstYear	PercRate	PercClds	DRate2	nd2r	nd1r	DRate1	nd1			
...	776.79	799.73	5	5	10.93	61	7	6.66	26			
...	751.13	783.67	-23	3	6.66	61	32	8.91	0			
...	1078.83	1078.83	6	4	8.91	61	29	7.54	4			



Observe que o primeiro passo é corrigir o incremento na imagem de 2004 para levar em conta a área coberta por nuvens. O incremento total estimado de acordo com o procedimento apontado na seção 4, é 874.87 km<sup>2</sup>. Com estes dados, pode-se calcular os parâmetros da equação anterior, mostrados na Tabela 4. Como se verifica, a taxa estimada para 2004 é de 916.75 km<sup>2</sup>. Esta taxa é superior ao incremento constatado (829 km<sup>2</sup>) porque a estimativa anual leva em consideração a incremento corrigido em função das nuvens existentes na imagem. Os dados apresentados na Tabela 4 são descritos como:

- Pathrow - órbita-ponto de cada imagem;
- State - estado da federação coberto;
- Cod - identifica o recorte com o mínimo de nuvens possível de uma das imagens usadas para processar a cena toda. A união dos recortes compõe a imagem toda;
- Jul2 - dia juliano da imagem observada (ano corrente ex. 2004)
- Jul1 - dia juliano da imagem do ano anterior (ex.2003)
- Jul0 - dia juliano da imagem do ano precedente (ex. 2002)
- StClim - Início da estação seca para a cena
- EndClim - Fim da estação seca para a cena
- Rate - taxa anual estimada pela formula apresentada acima (TAnnual)
- Increm - incremento no desmatamento constatado na imagem
- CorrIncr - incremento corrigido em função das nuvens
- IncLstYear - incremento constatado no ano anterior
- CorrLstYear - incremento corrigido no ano anterior
- PerRate - indica a diferença em porcentagem entre Rate e CorrIncr
- PerClds - indica a diferença em porcentagem entre Increm e CorrIncr
- DRate2 - taxa diária do ano corrente



- nd2r - número de dias de estação seca entre o início da estação seca e a data de referência do ano corrente
- nd1r - número de dias de estação seca entre a data de referência e a imagem do ano anterior
- nd1 - número de dias de estação seca entre a imagem do ano anterior e o final da estação seca
- Drate1 - taxa diária do ano anterior
- ndnxtY: número de dias entre a data de referência e a data de passagem da imagem. Este intervalo será computado apenas no cálculo da taxa do ano seguinte. Observe que o incremento pode ser maior que a taxa estimada, porque a taxa é projetada para a data de referência.

A taxa anual total estimada é dada pelo somatório das taxas estimadas das imagens processadas. Para minimizar o possível efeito das nuvens na estimativa anual total, optou-se por considerar apenas o incremento para as imagens que obedecem as regras 1 e 2 descritas abaixo.

Regra 1: seleciona as imagens com grande diferença entre *incr* e *CorrIncr* corrigido pelo efeito de nuvens no ano corrente ou no ano anterior.

$(\text{perClds1} > 100\% \text{ e } \text{incr1} > 50 \text{ km}^2) - \text{ano corrente ou}$

$(\text{perClds0} > 100\% \text{ e } \text{incr0} > 50 \text{ km}^2) - \text{ano anterior}$

Regra 2: A regra 2 é aplicada após a regra 1 e seleciona as imagens com grande diferença entre taxa calculada no ano (sem a parcela do ano anterior  $\text{Drate1} * \text{ndr1}$ ) e o incremento corrigido.

$100 * [(\text{RATE} - \text{Drate1} * \text{ndr1}) - \text{CorrIncr}] / \text{CorrIncr} > 50\%$

Os parâmetros de corte usados são 100% para nuvens e 50% para taxa.

### 5.3 Taxa Anual Projetada

A taxa anual projetada é um resultado intermediário que estima o valor de desmatamento em função de um conjunto significativo de imagens. Este valor é calculado em função das taxas de pares de imagens em dois anos consecutivos, e dos dados efetivamente processados no ano anterior.

TABELA 5 – Projeção de Taxas Anuais

	#IMGS Pairs	RATE-Pairs Km2	#IMGS good	RATE -good (Km2)	#IMGS regra 1 e 2	INCR-regra 1 e 2 (Km2)	Sum (Km2) RATE+INCR	#IMGS Total	ProjRATE Total-Km2
2005	94	17174							18831
2004	94	24279	164	24849	52	1773	26622	216	26622

Analisando a tabela para o par 2004-2005, temos que para as mesmas 94 imagens, a taxa estimada para 2004 é de 24279 km<sup>2</sup> e para 2005 é 17.174 km<sup>2</sup>. Do total (216) de imagens processadas em 2004, as estimativas para 52 imagens foram descartadas pelas regras 1 e 2 descritas acima. Para essas 52 imagens usou-se o incremento observado no lugar das taxas estimadas (1.773 km<sup>2</sup>). Assim a taxa projetada em 2005 para as 216 imagens é de 18.831 km<sup>2</sup> ( $17.174 \times 26.622 / 24.279$ ). A mesma regra de três é usada para o cálculo das taxas projetadas por estado.

## 6 Aspectos da metodologia revisados

Para melhorar a metodologia do cálculo da taxa de desmatamento, foi necessário revisar os problemas da extrapolação para áreas embaixo de nuvens e do uso de imagens coletadas antes da data de referência. Considerando o histórico climatológico da Amazônia, para minimizar o problema das nuvens, foi necessário analisar um número muito maior de imagens e refazer a metodologia para permitir a inclusão de informação parcial de uma imagem.

A idéia é processar apenas as partes de cada imagem que estejam livres de nuvens. Isto implica que para compor a área equivalente a uma cena Landsat podem ser utilizadas mais de uma imagem (inclusive de satélites diferentes). O

objetivo é reduzir tanto a extrapolação para a área sob nuvens, quanto a incerteza associada a não termos imagens próximas à data de referência.

## **7 Conclusões**

Este documento apresentou o procedimento para cálculo da taxa de desmatamento da Amazônia revisado em 2005. Este procedimento é resultante de décadas de experiência do INPE no uso de imagens de sensoriamento remoto e de análise destas imagens para o monitoramento da perda de floresta primária na Amazônia Legal por corte raso.

Hoje o INPE fornece ao governo e à sociedade brasileira toda a informação temática produzida pelo PRODES sobre a localização e extensão dos eventos de desmatamento na Amazônia Legal através da divulgação dos resultados pela Internet no site [www.obt.inpe.br/prodes](http://www.obt.inpe.br/prodes).

## **8 Bibliografia Consultada**

Shimabukuro, Y.E.; Mello, E.M.K.; Moreira, J.C.; Duarte, V. Segmentação e classificação da imagem sombra do modelo de mistura para mapear desflorestamento na Amazônia. São José dos Campos: INPE, 1997. 16 p. (INPE-6147-PUD/029).

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Monitoramento da Cobertura Florestal da Amazônia por Satélites. 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/04.28.13.43>>. Acesso em: 27.set.2013

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Monitoramento da Cobertura Florestal da Amazônia por Satélites: Sistemas Prodes, Deter, Degrad e Queimadas 2007-2008. 2008. Disponível em: <[http://www.obt.inpe.br/prodes/Relatorio\\_Prodes2008.pdf](http://www.obt.inpe.br/prodes/Relatorio_Prodes2008.pdf)>. Acesso em: 27.set.2013

SHIMABUKURO, Y. E.; DUARTE, V.; MOREIRA, M. A.; ARAI, E.; RUDORFF, B. F. T.; ANDERSON, L. O.; ESPÍRITO-SANTO, F. D. B.; FREITAS, R. M.; AULICINO, L. C. M.; MAURANO, L. E.; ARAGÃO, J. R. L. Detecção de áreas desflorestadas em tempo real: Conceitos básicos, desenvolvimento e aplicação do projeto DETER. São José dos Campos: INPE, 2005. 63 p. (INPE-12288-RPQ/796). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1912/2005/04.01.16.28>>. Acesso em: 26 set. 2013.