



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

INPE-12288-RPQ/796/A

**DETECCIÓN DE ÁREAS DEFORESTADAS EN TIEMPO REAL:  
CONCEPTOS BÁSICOS, DESARROLLO Y APLICACIÓN DEL  
PROYECTO DETER**

Yosio Edemir Shimabukuro  
Valdete Duarte  
Maurício Alves Moreira  
Egídio Arai  
Bernardo Friedrich Theodor Rudorff  
Liana Oighenstein Anderson  
Fernando Del Bon Espírito Santo  
Ramon Moraes de Freitas  
Luigi Carli Marroni Aulicino  
Luis Eduardo Pinheiro Maurano  
Júlio Ricardo Lisboa de Aragão



**Coordinación general**

**Gilberto Câmara**

**División de Sensoriamento Remoto**

**João Viane Soares**

**División de Processamento Imagens**

**Antônio Miguel Monteiro**

**División de Generación de Imágenes**

**Flávio Reis**

**Programa Amazónico**

**Dalton de Morrison Valeriano**

## RESUMEN

Este informe presenta el procedimiento metodológico de un sistema de monitoreo y alerta de deforestación para identificar y mapear áreas de desmonte en formaciones de bosque tropical, denominado Proyecto de Detección de Áreas Deforestadas en Tiempo Real (\*DETER). EL proyecto se inserta en el contexto del monitoreo de la Amazonia brasileña por satélite que está en funcionamiento en el \*\*INPE, desde mayo de 2004. DETER es parte de las actividades del Plan de Acción para la Prevención y Control de la Deforestación en la amazonia brasileña, de responsabilidad del Grupo Permanente de Trabajo Interministerial (GPTI), coordinado por la Casa Civil. El objetivo de DETER es supervisar, de una manera operacional, la deforestación ocurrida, cada quince días, a través de imágenes de los satélites MODIS/TERRA y/o WFI/CBERS-2 que posee una resolución temporal alta. DETER tiene como base el Proyecto de Estimación de Deforestación de la Amazonia (PRODES), que estima la proporción anual de deforestación, desde la década de 70. Las informaciones de DETER fueron disponibilizadas en la Internet a partir de diciembre de 2004, y están siendo usadas en la implantación de un sistema de fiscalization eficaz, por parte del Gobierno Federal. Las áreas deforestadas, detectadas a lo largo del año, son presentadas cronológicamente, para mostrar la evolución de las actividades de la deforestación en la región Amazonica.

\* La palabra DETER significa en el vocabulário español DETENER, mas en esta traducción se mantubo la palabra DETER como sigla del Proyecto que esta siendo presentado en este trabajo.

\*\* INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais que en español corresponde a Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales

## **ABSTRACT**

This report presents the methodological procedure of a deforestation alert system, to identify and map deforested areas in tropical forest formations, denominated Detection of Deforested Areas in Real Time Project (DETER). The project is inserted in the context of the Brazilian Amazon Forest Monitoring by satellite, and is in operation, at INPE, since May of 2005. The DETER is part of the activities of the Action Plan to prevent and to control deforestation in the Brazilian Amazon, under the responsibility of the Interministerial Permanent Working Group, coordinated by Civil House. The objective of the DETER is to monitor, in an operational way, the deforestation observed, every fifteen days, using MODIS/Terra and/or WFI/CBERS satellite images, which have high temporal resolution. The DETER is based on the Amazon Deforestation Estimate Project (PRODES), which estimates the annual deforestation rate, since the seventies. The DETER information is available in the Internet, since December 2004, and is being used in the implementation of an efficient fiscalization system, by the Federal Government. The detected deforested areas, throughout the year, are presented, chronologically, to show the evolution of the deforestation activities in the Amazon Region.



## ÍNDICE

	Pág.
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	
<b>1-CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>13</b>
<b>2-CAPITULO 2 – FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1-Descripción de la Cuenca Amazónica</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2-Histórico del uso de imágenes de satélite en la Amazonia Legal</b> .....	<b>20</b>
<b>2.3-Creación del Proyecto DETER</b> .....	<b>22</b>
<b>2.4 -Sensor MODIS</b> .....	<b>23</b>
<b>2.4.1-Resolución radiométrica</b> .....	<b>24</b>
<b>2.4.2-Resolución espacial y temporal del MODIS</b> .....	<b>25</b>
<b>2.4.3-Datos MODIS aplicados a los estudios ecológicos en sistemas terrestres</b> .....	<b>28</b>
<b>2.5-Sensor WFI</b> .....	<b>30</b>
<b>3-CAPÍTULO 3 – MATERIAL y MÉTODO</b> .....	<b>33</b>
<b>3.1-Localización del área de estudio</b> .....	<b>33</b>
<b>3.2-Metodología</b> .....	<b>34</b>
<b>3.2.1-Creación del banco de datos georreferenciado</b> .....	<b>35</b>
<b>3.2.2-Selección de las imágenes MODIS</b> .....	<b>36</b>
<b>3.2.3-Georreferenciamiento de las imágenes MODIS</b> .....	<b>37</b>
<b>3.2.4-Clasificación de los datos MODIS</b> .....	<b>38</b>
<b>3.2.4.1-Modelo linear de Mixtura espectral</b> .....	<b>39</b>
<b>3.2.5-Imágenes fragmento</b> .....	<b>42</b>
<b>3.2.6-Classificación de la imagen fragmento suelo</b> .....	<b>43</b>
<b>3.2.6.1-Edición Matricial</b> .....	<b>45</b>
<b>4-CAPÍTULO 4 – RESULTADOS y DISCUSIONES</b> .....	<b>47</b>
<b>4.1-Resultado del procesamiento de las imágenes MODIS para el Estado de Rondônia</b> .....	<b>47</b>
<b>4.2-Resultado del alerta a nivel municipal</b> .....	<b>49</b>
<b>4.3-Resultado del alerta para toda la Amazonia Legal en el período de un año</b> ...	<b>51</b>
<b>CAPÍTULO 5 - CONSIDERACIONES FINALES</b> .....	<b>57</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>59</b>



## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
2.1 - Representación esquemática de la varredura del satélite MODIS, mostrando el aumento en el tamaño de los pixels con la variación del ángulo de visada. Fuente: adaptada de van Leeuwen et al. (1999).....	<b>26</b>
2.2 - Representación de la resolución nominal (IFOV) y de la representación de la resolución efectiva (EIFOV). Fuente: Material de aula, disponible en el site: <a href="http://www.dpi.inpe.br/~leila/ser437/pdi1-introd.PDF">www.dpi.inpe.br/~leila/ser437/pdi1-introd.PDF</a> .....	<b>27</b>
2.3 - Esquema del satélite CBERS para mostrar las larguras de las fajas de los sistemas sensores.....	<b>31</b>
2.4 – Sensor WFI y una imagen colorida mostrando la represa de Itaipu. Fuente: <a href="http://www.cbbers.inpe.br/pt/programas/cbbers1-2_cameras.htm">http://www.cbbers.inpe.br/pt/programas/cbbers1-2_cameras.htm</a> .....	<b>31</b>
3.1 –Mosaico de 12 a 27 de Agosto de 2003. R(MIR), G(NIR) e B(Red), para mostrar el área de estudio del Proyecto DETER .....	<b>33</b>
3.2 –Mosaico de imágenes MODIS de la Amazonia Legal, obtenidas entre las fechas de 12 a 27 de Agosto de 2003, con la superposición de la extensión de la deforestación total histórica proveniente del proyecto PRODES Digital y su respectiva leyenda.....	<b>35</b>
3.3 – Imágenes MODIS en el momento de la selección (A) y ampliada para análisis del porcentaje de nubes (B) .....	<b>36</b>
3.4 - Muestra la largura de la faja de una imagen diaria del MODIS, además de la <b>grade</b> conteniendo los límites de los Estados (línea roja) .....	<b>37</b>
3.5 - Imágenes fragmento de suelo, sombra y vegetación generadas a partir del mosaico MODIS del período de 22 de abril a 07 de Maio de 2004 .....	<b>43</b>
4.1 – Resultados de la segmentación por crecimiento de regiones (líneas amarillas) para el área útil del Estado de Rondônia .....	<b>47</b>
4.2- Resultado de la clasificación de la imagen fragmento suelo de Rondonia hecha por el clasificador ISOSEG, con ocho clases temáticas .....	<b>48</b>
4.3 – Mapa final obtenido para el Estado de Rondonia .....	<b>49</b>
4.4 – Mapa municipal de los municipios de la região da AML. Con destaque para el municipio de Altamira, PA .....	<b>50</b>
4.5 - Resultado del Alerta en el municipio de Altamira, para la fecha de 16/11/2004	<b>51</b>
4.6 – Mosaico MODIS con la máscara de las áreas de deforestación antiguas, color amarillo, áreas para ser clasificadas (rojo) (A), resultados de la clasificación	



para los tres períodos de observación (azul, rojo y negro) (B) y resultados  
sobrepuestos al mosaico MODIS (C) ..... **54**



## LISTA DE TABELAS

	<b>Pág.</b>
2.1 - Características generales del MODIS para el sensoriamiento remoto de la superficie terrestre .....	<b>24</b>
2.2 - Resoluciones radiométricas del sensor MODIS para las bandas de estudio de la superficie terrestre .....	<b>25</b>
2.3 - Comparación entre las resoluciones espaciales de los sensores ETM <sup>+</sup> y MODIS .....	<b>27</b>
2.4 - Tipos de cambios en la cobertura detectada por el producto MODIS 250m .....	<b>30</b>
3.1 – Niveles de procesamiento del MODIS .....	<b>38</b>
4.1 – Fechas de adquisición de imágenes MODIS durante el período de 12 meses (Agosto/2003 a Agosto/2004) .....	<b>52</b>
4.2 – Resultados del alerta para el período de Agosto de 2003 a Agosto de 2004 .....	<b>52</b>



## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN

La Amazonia Legal abarca los estados de Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondonia, Roraima, Tocantins y parte del estado de Maranhão, correspondiendo a una área de aproximadamente 5 millones de km<sup>2</sup>. De este total, el área con fisonomía forestal ocupa aproximadamente 4 millones de km<sup>2</sup>.

El monitoreo de las áreas de bosque de la amazonia Legal, realizado por el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE), revela proporciones de deforestación que varían entre 1 y 3 x 10<sup>6</sup> ha.año<sup>-1</sup> en el periodo de 1991-1999 y la pérdida de aproximadamente 6 x 10<sup>7</sup> ha (más de medio millón de Km<sup>2</sup>) de bosques hasta 2000. Esa deforestación resulta de un proceso de ocupación de la Amazonia, a partir de la segunda mitad del siglo XX y se asocia a la expansión de la frontera agrícola y el establecimiento de sistemas de circulación vial y polos de desarrollo. A los daños y perjuicios ambientales causados por la deforestación, se sobreponen los serios problemas sociales, como la concentración fundiaria, la baja fijación de agricultores en el campo, la precaria urbanización y los conflictos sociales acompañados de mayor o menor grado de violencia. La expansión de la frontera agrícola y la deforestación en la Amazonia Legal están íntimamente relacionadas al contexto de la reorganización de la agricultura brasileña, seguida por la industrialización acelerada que empieza en la década de 50 y, más recientemente, con los esfuerzos de adaptación de Brasil a la globalización de la economía. En ese contexto, varios factores podrían haber contribuido a las altas proporciones de deforestación, entre los cuales, la disponibilidad de capitales público y privados, la dinámica de la población, la organización de los sistemas de producción y condiciones físicas variadas.

Desde el punto de vista de política pública, el análisis de la deforestación hecho a través del Proyecto PRODES (Analógico o Digital) todavía es insuficiente para proporcionar una base para la acción gubernamental, porque los resultados son anuales y, muchas veces, de acción informativa, o sea, cuando los hechos ya ocurrieron. Como los datos son agregados por el estado y publicados un año después de la ocurrencia de los eventos de la deforestación, los gobiernos federales y estatales no pueden atenciparse a la dinámica de cambio de uso de la tierra en la Amazonia. De esta manera, será necesario complementar los datos de PRODES con otras iniciativas que permiten al Estado brasileño una acción preventiva de combate a las actividades ilícitas de deforestación.

El Proyecto DETER busca atender la falta de informaciones predictivas, una vez que éste se desarrolló con base en el empleo de imágenes de sensor MODIS que presenta una alta resolución temporal, lo que permite así, hacer el monitoreo casi en tiempo real, de las actividades antrópicas en el bosque. En otras palabras, para establecer un sistema de alarma de deforestación.

MODIS es el instrumento principal de Sensoriamento Remoto de la Tierra del programa Earth Observing System (EOS). EOS tiene como meta colocar en la órbita terrestre una serie de satélites de órbita polar y media inclinación y se extenderá por un periodo de por lo menos 15 años. La primera plataforma de EOS es el satélite Tierra (EOS SER-1), lanzado en 1999, en una órbita polar, sol sincrónica, descendiendo en el periodo de la mañana (ES). En 2002, la plataforma Aqua (EOS PM-1) se lanzó en una órbita polar, sol sincrónica, ascendiendo en el periodo de la tarde (PM). Ambos satélites están con el sensor MODIS cuyas características se describen en la sección 2.2. Las imágenes MODIS permiten lograr estudios multidisciplinarios de los procesos de la tierra, océano y atmósfera y sus interacciones. La potencialidad del uso de los datos MODIS, como indicador de la deforestación en la Amazonia, está relacionada con la alta repetitividad temporal, la amplia largura de la faja (2330 km) y la disponibilidad de bandas tanto para la interpretación de cambios del uso de la tierra, cuanto para la detección de quemadas.

Por esta razón, los objetivos de este informe es describir la metodología de creación del Proyecto DETER, basado en el conocimiento adquirido en la ejecución de las actividades del Proyecto PRODES (Estimativa de la Deforestación en la Amazonia Legal) y para presentar los resultados de la alarma de deforestación realizada de Agosto de 2003 a Agosto de 2004.

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

#### 2.1. Descripción de la Cuenca Amazónica

Las informaciones presentadas a continuación fueron extraídas de la tesis de Doctorado de João Carreiras (Carreiras, 2005). La Cuenca Amazónica es una inmensa área con aproximadamente 6.800.000 km<sup>2</sup>, distribuyéndose principalmente entre Brasil, Perú, Bolivia, Colombia, y Ecuador, y en menor extensión para Venezuela y Guyana, incluyendo todos los afluentes del Río Amazonas (por ejemplo Río Tapajós, Río Madeira, Río Tocantins) (Goulding et al., 2003). Una de las características más importantes de esta área es su capacidad de reciclar la evapotranspiración, siendo que entre 63% y 73% de la precipitación anual es evapotranspirada, y aproximadamente 50% reciclada en el área a través de la precipitación (Salati, 1985; Marengo y Nobre, 2001).

La temperatura media varía entre 25,8 °C durante la época de lluvias (Mayo-Septiembre), y 27,9 °C en la época seca (Octubre-Abril) (Junk e Firch, 1985). Debido a la gran extensión de la AML, la duración de la época de lluvias y de la época de seca, pueden tener algunas oscilaciones. La precipitación anual es del orden de los 2250 mm, variando, además, considerablemente, entre los 1500 mm en el norte y sur, y los 3000 mm en el área noroeste (Goulding et al., 2003).

La Amazonia Legal (AML), unidad administrativa de Brasil, localiza entre 5° N y 20° S (latitud) y 44° W y 75° W (longitud), incluye la totalidad de los estados de Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins, y parcialmente el estado de Maranhão (al oeste de los 44° W meridianos), totalizando 5.000.000 km<sup>2</sup> aproximadamente (IBGE, 2000). Con excepción de la región Sur del estado de Mato Grosso, integrada a la cuenca del Río Paraguay, y parte del estado de Maranhão, perteneciendo a la cuenca del Río Parnaíba, el área restante de AML esta incluida en la cuenca del Río Amazonas'.

En terminos generales, la mayoría de la AML está ocupada por bosque tropical perenifolia, y en proporción menor por un tipo de la sabana, denominado de cerrado (savannah) (Skole y Tucker, 1993). El bosque tropical perenifolia incluye esencialmente tres clases de vegetación: bosque tropical perenifolia, *stricto sensu*, el bosque tropical semi-perenifolia, y el bosque tropical semi-caducifolia (IBGE, 1988). El bosque tropical perenifolia, *stricto sensu*, está en áreas muy húmedas, normalmente con precipitación

anual superior a 3000 mm; son formaciones compuestas por **foliosas** perenifólias en diversos escalones, pudiendo alcanzar 50 m, siendo el substrato esparcido compuesto esencialmente por herbáceas. El bosque tropical semi-perenifólia esta distribuido por áreas menos húmedas, con precipitación anual entre 2000 y 3000 mm; son formaciones dispuestas en tres niveles de cobertura, compuestos por **foliosas** perenifólias y caducifólias, éstas últimas presentes, sobre todo, en la parte superior del **dossel**. El bosque tropical semi-caducifólia se distingue del anterior por la presencia de una proporción mayor de especies caducifólias. El cerrado (savannah) es un ecosistema de tipo sabana, inserido, sobre todo, en la parte sur y este de la AML, compuesto por **foliosas** semi-caducifólias o perenifólias, normalmente en suelos bien drenados y pobre de nutrientes, en una região dónde la temperatura média anual varía entre 20-26 °C, y la precipitación anual entre 1250-2000 mm, con marcada influencia de la época seca del invierno del austral (mayo a septiembre) (Silva y Pegaron, 2002). En general se reconoce cinco tipos estructurales de cerrado (savannah) (Oliveira-Filho y Ratter, 2002): el cerradon (grande cerrado) - dominado por la vegetación arbórea (8-12 altura de m), con un porcentaje que cubre entre 50% y 90%; savannah (*sensu stricto*) - dominado por los árboles y arbustos (3-8 altura de m), pero con la cobertura más esparcida (superior a 30%); el campo cerrado - constituido por los árboles y arbustos dispersos, pero con alta densidad de vegetación herbácea; campo sucio - dominado por la vegetación herbácea, con pequeños arbustos y los árboles dispersados; y el campo limpio - siendo distinguido del anterior por no poseer ni arbustos ni árboles. Éstos tipos de vegetación también pueden asociarse temporalmente a áreas inundadas, en las zonas más o menos planas, junto a las principales líneas de agua, que son sazonalmente inundadas todos los años (Hess et al., 2003). Recientemente, estimativas de Houghton et al. (2001) apuntan para el hecho de la biomasa presente en AML corresponder aproximadamente al 10-15% de la biomasa global.

La deforestación en la Amazonia ha sido objeto de preocupación por parte de varias entidades (gobiernos, investigadores, organizaciones no gubernamentales), sobre todo en las últimas décadas (Moran, 1981; Skole y Tucker, 1993; INPE, 2002; Roberts et al., 2003). A pesar de siempre haber tenido un histórico largo de ocupación humana, cerca de 90% del área deforestada para la agricultura y pastizales hasta 1988 en AML ocurrió después de 1970, indicado por estimaciones basadas en imágenes de satélite de alta resolución espacial (Skole et al., 1994).



La construcción de la capital federal Brasília, iniciada en 1956, tenían como gran objetivo alterar el modelo de ocupación de Brasil que en los últimos 350 años se concentraba en la zona costera, y así empezar una ocupación más eficaz del interior del país (Mahar, 1988). Una de las primeras infraestructuras era la construcción de la carretera Belém-Brasília (BR-010) en 1958, indicada como la gran responsable por el inicio de la deforestación en gran escala en la Amazonia Legal (Moran et al., 1994; Nepstad et al., 1997). Como consecuencia, otras carreteras, como BR-364 en Mato Grosso, Rondônia y Acre, y el PALA-150 en Pará, acentuaron todavía más ese hecho (Moran, 1993).

Estas infraestructuras sirvieron como los medios de penetración para la colonización humana y conversión del bosque en la agricultura y pastizales en el área. En el año de 1966 un plan fue creado para animar la ocupación de la amazonia, con la creación de una agencia para el desarrollo (Superintendencia de Desarrollo de la Amazonia - SUDAM) y un banco de desarrollo regional y Apoyo de la Amazônia - BASA). Este plan previó la atribución de incentivos fiscales a pequeños propietarios o compañías que pensaron invertir en proyectos en la amazonia (Moran et al., 1994). Los pequeños propietarios recibieron préstamos con tarifas de interes bastante favorable en los primeros años, principalmente, para el cultivo de arroz, maíz, y frijol. Se beneficiaron compañías y grandes propietarios con los grandes incentivos fiscales, por medio del no pago de impuestos, en gran parte para el establecimiento de grandes áreas de pastizales extensivos (Moran, 1993). Una parte significativa de la deforestación en la AML se atribuye a esta última forma de incentivos fiscales, siendo mínimo el porcentaje de la deforestación atribuida a pequeños propietarios que practican, en la mayoría de los casos, una agricultura de subsistencia (Fearnside, 1993).

Otros tipos de actividades también introdujeron una deforestación potencial en la AML, como la exploración minera y el extracción selectiva de árboles con alto valor económico (Cochrane et al., 1999).

La deforestación en la AML se concentró en las áreas Sur y Oriental, en el llamado arco de deforestación, que va del Acre a Maranhão (Cochrane et al., 1999; Achard et al., 2002; Madera, 2002; Cardille y Foley, 2003).

En las últimos años han sido producidas varias estimaciones de deforestación en la Amazonia Legal, aunque con algunas inconsistencias relativas al área geográfica e incidencia en el tipo de vegetación (Skole y Tucker, 1993; Fearnside, 1993; INPE,

2002). Las inconsistencias relativas al delimitação geográfica de la AML son causas potenciales de estimaciones incorrectas del grado de la deforestación (Fearnside, 1993; Cardille y Foley, 2003). Otro problema esta relacionado con la inclusión o no de deforestación ocurrida en zonas consideradas de savannah, sistemáticamente desconocida, pero cuya magnitud es referida como similar o superior a la ocurrida en áreas ocupadas con el bosque tropical perenifolia (Fearnside, 1993; El Nepstad et al., 1997; Kaimowitz y Smith, 2001). La inclusión de las áreas de bosque secundario (regeneración) en la clase de la deforestación o en la clase de vegetación respectiva ha sido otro de los problemas asociado con la estimación de la proporción de deforestación en la AML (Fearnside, 1993).

## **2.2 Estimativa de áreas desflorestadas na Amazônia Legal**

El Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE) ha estado procediendo a la evaluación sistemática de la deforestación en la AML con base en las imágenes del satélite Landsat desde 1978. Sin embargo, las estimaciones sólo se refieren a la deforestación que ha pasado previamente en las áreas ocupadas por el bosque tropical perenifolia. Al principio de la década de 80, investigadores del INPE junto con el Instituto Brasileño de Desarrollo del Bosque (IBDF) hicieron una evaluación de áreas desflorestadas de la AML, a través de la interpretación visual de imágenes del sensor Escáner Multispectral (MSS) a bordo del satélite Landsat 3. En este trabajo se reportó que la deforestación en la AML había sido de 152.200 km<sup>2</sup> hasta 1978, siendo incluidas también, áreas de deforestación antigua (anterior a 1960) (Tardin et al., 1980). A partir de 1988 fue reportada una estimación acumulada de 377.500 km<sup>2</sup>. En el año 2000 investigadores del INPE reportaron un valor acumulado de 587.727 km<sup>2</sup>.

La tasa média de deforestación ha sufrido alteraciones desde 1978. En el periodo de 1978 a 1988 la tasa media de la deforestación era de 21.130 km<sup>2</sup>/ano. Después, disminuyó de manera sostenida hasta 11.130 km<sup>2</sup>/ano en 1991. De 1991 a 1995 aumentó de nuevo, alcanzando el valor máximo de 29.059 km<sup>2</sup>/ano. poco después, disminuyó de nuevo a a 1997, con 13.227 km<sup>2</sup>/ano, aumentando después a a 18.226 km<sup>2</sup>/ano en 2000 (INPE, 2002).

Skole y Tucker (1993) ellos usaron imágenes de sensor Mapper Temático (la TM), evaluar la deforestación previamente en las áreas ocupan para el bosque el perenifolia

tropical en el amazónico Legal del año de 1988. Los autores estimaron un valor de 230.324 km<sup>2</sup>; ellos también determinaron la extensión de la deforestación en 1978, usando la información producida por INPE e IBDF, y refinando el análisis para la definición exacta de la frontera entre la savannah y el bosque tropical perenifolia, ellos obtuvieron una estimación de 78.268 km<sup>2</sup>.

Más recientemente Cardille y Foley (2003), usaron datos adquiridos de censos y de imágenes del satélite, para determinar la distribución y la extensión de la agricultura y pastizales entre 1980 y 1995 en la AML (excluyendo la parte contenida en la cuenca del Río Paraguay y Parnaíba). En esta investigación los autores indicaron para una expansión total de 70.365 km<sup>2</sup> en el área agrícola y de pastizales. Según los autores todavía, esta expansión resultaba de un aumento de 8.028 km<sup>2</sup> del área de agricultura, una reducción de 84.275 km<sup>2</sup> en el área de pastos naturales, y un aumento de 146.612 km<sup>2</sup> en el área de pastos cultivados.

Por otro lado, existe evidencia suficiente que indica una regeneración rápida del bosque secundario, después del abandono de áreas deforestadas, provocado por el rebentamiento del *toíça*, dispersión de semillas o a través del banco de semillas existente en la tierra (Uhl, 1987; Buschbacher et al., 1988; Uhl et al., 1988; Brown y Lugo, 1990; Mesquita *et al.*, 2001). La composición, estructura y biomasa de las áreas regeneradas dependen, esencialmente, del tipo de uso de la tierra, de la presencia/ausencia de fuego, y de la fertilidad inicial de la tierra (Uhl, 1987).

Para los pequeños propietarios la regeneración es el obstáculo más grande a la continuación de la actividad agrícola que la disminución de fertilidad de la tierra (Moran *et al.*, 1994). Es en los estados de Maranhão y Pará que se verifican la proporción más grande de regeneración de bosque secundario, asociado las áreas que se deforestaron antes de 1960 (Lucas *et al.*, 2000).

Mientras la deforestación contribuye al aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, la regeneración de bosque secundario, al contrario, contribuye a la fijación de carbono, lo que es importante proceder a su cuantificación y distribución (Curran y Foody, 1994; Nepstad *et al.*, 1997).

La identificación, extensión y fases de la regeneración del bosque secundario en la AML ha sido hecho por varios autores con base en datos de sensoriamiento remoto (e.g. Schroeder y Winjum, 1995; Fearnside, 1996; Lucas *et al.*, 2000). Sin embargo, la mayoría de los estudios relativos la caracterización de la regeneración del bosque

secundario en la AML ha sido hecho con datos del fin de la década de 80 y empezando de la década de 90. Schroeder y Winjum (1995) usaron la información contenida en un mapa de ocupación de la tierra en América del Sur, obtenida por Stone *et al.* (1994), con base en los datos del periodo 1988-1991 del sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) a bordo de los satélites la Administración Oceánica y Atmosférica Nacional (NOAA), y estimaron en 151.000 km<sup>2</sup> el área de la regeneración en la AML.

Fearnside (1996), usando la matriz de Markov de probabilidades de transición anuales, calculó que aproximadamente 47,6% (195.170 km<sup>2</sup>) del área deforestada hasta 1990 estaba compuesta por la regeneración del bosque secundario. Lucas *et al.* (2000) usaron datos de NOAA AVHRR del periodo 1991-1994, y estimaron 157.973 km<sup>2</sup>, como áreas regeneradas.

## **2.2 Estimación de áreas deforestadas en la Amazonia Legal**

En el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, desde la década de 70 se viene realizando la evaluación de áreas deforestadas de la Amazonia Brasileña. Esta actividad empezó con el convenio entre el INPE y el IBDF, actualmente IBAMA, al final de los años 70. En la época fueron utilizadas las imágenes del MSS a bordo del Landsat.

Durante la vigencia del convenio fueron realizados dos levantamientos, a través de la interpretación de imágenes adquiridas en los períodos de 1973-1975 y 1975-1978. A partir del año de 1988, en el INPE pasaron a realizar los levantamientos de áreas deforestadas anualmente. A partir de esta fase los datos del MSS se sustituyeron por las imágenes del sensor mapeador temático (TM) a bordo del Landsat, lo que trajo una mejora en la precisión del mapeamento, a consecuencia de una mejor resolución espectral (6 bandas en el visible, infrarojo próximo y una en el infravermelho medio) y espacial (30m x 30m), cuando comparados a los datos del MSS (4 bandas en el visible, infrarojo próximo y 80 m de resolución espacial).

Hasta el fin de la década de 90 del siglo pasado, la metodología de mapeamento de las áreas deforestadas era basado en la interpretación visual de las imágenes Landsat y los resultados eran digitalizados, para totalizar el cálculo de áreas. A pesar de todos los cuidados en la interpretación y de la rigidez de la auditoría de los resultados, esa

metodología presentó algunos problemas de orden práctico. Por ejemplo, garantizar la fidelidad de la estimación de esas áreas, sus localizaciones eran perjudicadas, una vez que las imágenes en papel no presentaron buena corrección geométrica. Además, ese abordaje de interpretación no permitió la formación de un banco de datos georreferenciado de las áreas deforestadas. Por esa razón, los resultados eran sólo disponibilizados en el formato de Mesas.

Al final de la década de 90, usando las imágenes TM 1997, empezó el desarrollo de una metodología automatizada, denominada de PRODES Digital (Shimabukuro et al., 1997; Shimabukuro et al., 1998; Duarte et al., 1999). En esta metodología la clasificación de las imágenes TM es basado en el empleo del modelo lineal de mixtura espectral (MLME), para la generación de imágenes fragmento de vegetación, suelo y sombra, conforme es discutido en la sección (3.2.4.1). Este modelo, además de reducir el volumen de datos que serán analizados, genera imágenes que refuerzan ciertos objetivos en la tierra, por ejemplo, la imagen fragmento vegetación refuerza las áreas de cobertura vegetal; la imagen fragmento suelo refuerza las áreas deforestadas y suelos expuestos; y la imagen sombra refuerza las áreas ocupadas para los cuerpos de agua. Las imágenes obtenidas a través del MLME son segmentadas usando el algoritmo basado en el crecimiento de regiones; clasificadas usando el método no supervisado; mapeadas usando una leyenda del pré-establecida; y finalmente revisada para garantizar la calidad del mapa de deforestación final. Como puede verse, el papel del interpreta todavía es muy importante en el desarrollo del proyecto de estimación de la deforestación en la amazonia brasileña.

Las imágenes de MSS y de TM poseen características espaciales que permiten hacer una buena evaluación de las áreas deforestadas, sin embargo, las características temporales (frecuencia de adquisición) de esos datos no permiten la realización de su monitoreo en periodos cortos, como es requerido para una acción gubernamental de fiscalización. De esta manera, las informaciones de áreas deforestadas obtenidas en el PRODES Analógico y PRODES Digital no ofrecen las bases para las acciones coibitivas de los órganos gubernamentales, porque son de efecto retardado, eso es, informa lo que pasó durante el año.

Ahora, con la disponibilidad de los datos del sensor MODIS/Terra o MODIS/Aqua, con una resolución temporal aproximadamente de 2 días para la región amazónica, se vió en estos productos un potencial muy grande para la aplicación en el monitoreo de las áreas

deforestadas en tiempo casi real. Así, fue creado el nuevo proyecto denominado DETER, cuya metodología heredada del PRODES Digital (Duarte et al., 1999; Shimabukuro et al., 1998) es aplicado en las imágenes MODIS.

### **2.3 - Creación del Proyecto DETER**

La creación del proyecto DETER fue una consecuencia de la experiencia adquirida por el equipo involucrado en los Proyectos PRODES Analógico y PRODES Digital, y por la disponibilidad de datos de sensor MODIS. En otros términos, el desarrollo DETER estaba usándose fue sólo un cuestión de adaptación de la metodología que vino del PRODES Digital, aplicado a las imágenes TM de Landsat. Sin embargo, la viabilidad de ese sistema de alarma se puso en discusión en varias reuniones técnico-científicas, como el Simposio brasileño de Sensoriamento Remoto (Belo Horizonte), Taller de MODIS (Goiânia), Reunión científica de LBA (Fortaleza) y reuniones de GPTI (Brasília). Además, para el desarrollo de ese sistema varias propuestas se sometieron para: OBT (Proyectos y actividades de investigación), CNPq (Proclamación Universal), FAPESP (Ayuda a la Investigación) y SIPAM.

Para mantener la consistencia de las metodologías del PRODES (Analógico y Digital), DETER optó por usar imágenes de MODIS con características espectrales similares a las de TM Landsat, en otros términos, las imágenes obtenidas en las fajas espectrales del visible, infrarojo próximo (resolución 250m espacial) y el infrarojo medio (resolución de 500m y reamostrada para 250m). De esta manera, DETER se inserta como una actividad del Projeto PRODES (Estimación de la Deforestación en la Amazonia Legal), para supervisar áreas deforestadas durante el año, las cuales serán computadas al final del año por el PRODES Digital.

Dado esa característica de que podría monitorar áreas deforestadas a lo largo del año, DETER presenta una gran potencialidad de abastecer de informaciones para una acción del fiscalización por los Órganos Gubernamentales. Por consiguiente el Proyecto fue considerado como una de las actividades del Plan de Acción para la Prevención y Control de la Deforestación en la amazonia brasileña, de responsabilidad del Grupo Permanente de Trabajo Interministerial (GPTI), coordinado por la Casa Civil y compuesto por más trece ministerios (GPTI, 2004).

Durante el año de 2004, DETER se ejecutó usando los recursos computacionales e imágenes disponibles y presentó resultados fiables, conforme presentado en la reunión de evaluación de GPTI en agosto de 2004 (GPTI, 2004).

#### **2.4. El sensor MODIS**

El Sistema de Observación de la Tierra - EOS es un proyecto de la NASA National Aeronautics and Space Administration), que tiene como objetivo realizar estudios sobre el planeta Tierra. El Proyecto abarca tres grandes componentes: 1) colocar en la órbita de la Tierra una serie de satélites diseñados para estudiar las complejidades de los cambios globales; 2) configurar una red avanzada de computadoras, para procesar, guardar y distribuir los datos, denominados de EOSDIS; y 3) para crear un equipo de especialistas que involucran científicos de todos los continentes para analizar estos datos. El primer satélite lanzado para atender al proyecto EOS era el Satélite Tierra, en diciembre de 1999 que empezó la colección de datos en febrero de 2000. El satélite pasa por Ecuador 10:30 h de la mañana. En mayo de 2002 se puso en la órbita terrestre el segundo satélite, denominado de Aqua, con el horario de pasaje por el Ecuador a las 13:30 h de la tarde. Actualmente existen otros tres satélites en órbita del proyecto EOS, y más 15 están previstos para ser lanzados en los próximos cuatro años. Juntos, estas plataformas espaciales ayudarán a los científicos a desenmascarar los procesos climáticos y cambios ambientales y sus impactos.

Dentro del proyecto EOS, MODIS fue proyectado para satisfacer las solicitudes de tres campos de estudios diferentes: la atmósfera, el océano y tierra, con resolución espectral y espacial seleccionada para el conocimiento de necesidades observacionales diferentes y para ofrecer una cobertura global casi diariamente (Justice et al., 2002).

INPE posee en Cuiabá-MT una estación de recepción de datos del sensor MODIS que cubre buena parte de América del Sur, además de toda la amazonia brasileña. El sensor MODIS posee 36 bandas espectrales, siendo 2 con la resolución espacial de 250 m, 5 con 500 m y 29 con 1000m en el nadircubriendo una faja de 2330 km de ancho. PRODES usa las bandas 3 (0,63 - 0,69 m), 4 (0,76 - 0,90 m) y 5 (1,55 - 1,75 m) de TM Landsat que corresponde las bandas 1 (0,62 - 0,67 m), 2 (0,841 - 0,876 m) y 6 (1,628 - 1,652 m) de MODIS. Las bandas 1 y 2 poseen resolución espacial de 250 m, sin embargo la banda 6 posee resolución de 500 m siendo necesario un reamostraje para 250m.

### 2.4.1 - Resolución radiométrica de los datos MODIS

La selección de las bandas espectrales del sensor MODIS, para el monitoreo de la superficie terrestre, puede ser considerado como una herencia del TM/Landsat. En otras palabras, fueron definidas de acuerdo con los conocimientos adquiridos en la misión TM/Landsat, con capacidades mejoradas tanto en las menores longitudes de onda cuanto en el infrarrojo (Justice et al., 1998). Una lista de las principales características del MODIS, para el sensoramiento remoto de la superficie terrestre puede ser vista en la Tabla 2.1.

TABLA 2.1 - Características Generales del Modis para el Sensoramiento Remoto de la Superficie de la Tierra.

Órbita	705 Km, Sól-síncrona, casi polar descendiente, cruzando el ecuador a las 10:30 (horario local) – horarios específicos de pasaje pueden ser encontrados en el site: <a href="http://www.earthobservatory.nasa.gov/MissionControl/overpass.html">www.earthobservatory.nasa.gov/MissionControl/overpass.html</a>
Longitud de la faja	2330Km ± 550 en cross-track.
Bandas espectrales	36 bandas, entre 0,405 y 14,385µm con subsistemas de calibración a bordo.
Calibración espectral	Banda 1-4, 2% para reflectancia Banda 5-7, bajo investigación
Resolución radiométrica	12 bits
Resolución espacial en el nadir	250 m bandas 1 y 2; 500 m en las bandas 3 a 7 y 1000 m en las bandas 8 a 36.
Período de Revisita	Diariamente para latitudes arriba de 300 A cada dos días para latitudes inferiores a 300
Precisión de la malla de geolocalización	Dentro de 150 m (1 sigma) en el nadir
Registro banda a banda, para las bandas de 1-7	Dentro de 50 m a lo largo de la faja de imageamiento Dentro de 100 m a lo largo de la dirección de imageamiento

FUENTE: Adaptada de Justice et al. (2002).

La resolución radiométrica y sus aplicaciones para el monitoreo de la superficie terrestre pueden ser observadas en la Tabla 2.2. De acuerdo con Strahler et al. (1995) el sensor MODIS provee una alta sensibilidad radiométrica, específica para las necesidades de la comunidad científica, con una excelente respuesta para cada banda.



TABLA 2.2 - Resoluciones Radiométricas del Sensor Modis para las Bandas del Estudio de la Superficie Terrestre.

Uso preliminar	Bandas	Longitud de la banda	Radiancia espectral
Tierra/ Nubes / Limites de aerosoles	1	620-670	21.8
	2	841-876	24.7
	3	459-479	35.3
	4	545-565	29
Tierra/ Nubes/ Propiedades de aerosoles	5	1230-1250	5.4
	6	1628-1652	7.3
	7	2105-2155	1

FUENTE: Adaptada del site <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specs.html>

El instrumento MODIS fornece una alta sensibilidad radiométrica, específica para las necesidades de la comunidad científica, forneciendo una excelente respuesta para cada banda (Strahler et al., 1995).

#### 2.4.2 - Resolución espacial y temporal de MODIS

La interpretación correcta de la información científica de los productos globales, hasta los productos en series temporales requieren habilidad para diferenciar entre los artefactos de adquisición y los procesos de cambios en la Tierra que están supervisándose.

Las bandas de MODIS, para el estudio de la superficie terrestre (land bands), poseen resolución espacial de 250 m (para los canales del infrarojo prsóximo) y 500 m (para la banda azul, verde e infrarojo medio), que son valores nominales por los pixel al nadir. En el límite de la longitud del área imageada (swath), los pixels crecen con un factor de 2 veces en la dirección a lo largo de la línea del imageamento (long-track) y de un factor de 5 veces en la dirección a través de la línea del imageamento (cross-track) (Ilustración 2.1). Además, el error de geolocalización es computado en el centro de cada pixel, que es debido a las incertidumbres en el conocimiento de localización de la plataforma y su orientación (Justice et al., 2002).

ILUSTRACIÓN 2.1 - Representación esquemática de la barradura de MODIS, mostrando el aumento en el tamaño de los pixel con la variación del ángulo visada. FUENTE: Adaptado de van Leeuwen et al. (1999).

Las mejores estimaciones corrientes de puntuación del error son de más o menos 85 metros en la dirección long-track y más o menos 153 metros en la dirección across-track (MODIS geolocation workshop, 8/8/96, GSFC). Existen tres desviaciones normales (3 sigma) de valores proyectados en el nadir que crecen con el aumento del ángulo de visada en una moda similar al tamaño del pixel. Errores de geolocalização, junto con el crecimiento del tamaño de los pixel, generan un EIFOV (effective instantaneous field view), lo que significa que aunque el sensor se proyecta para tener una cierta resolución del espacio nominal que ejecuta, esto es generalmente peor que la resolución de la proyección geométrica del detector. En la superficie terrestre (Ilustración 2.2) es de 1087 metros en la dirección a lo largo de la línea imageada y de 1591 metros en la dirección a lo largo de la faja imageada, para una sucesión compuesta de mediciones de la base de datos con dato de entrada (input) de 32 días para la cobertura de la tierra. El EIFOV no incluye la niebla óptica o esparcimiento del instrumento, y ésta es una estimación conservada de la resolución espacial que ejecuta

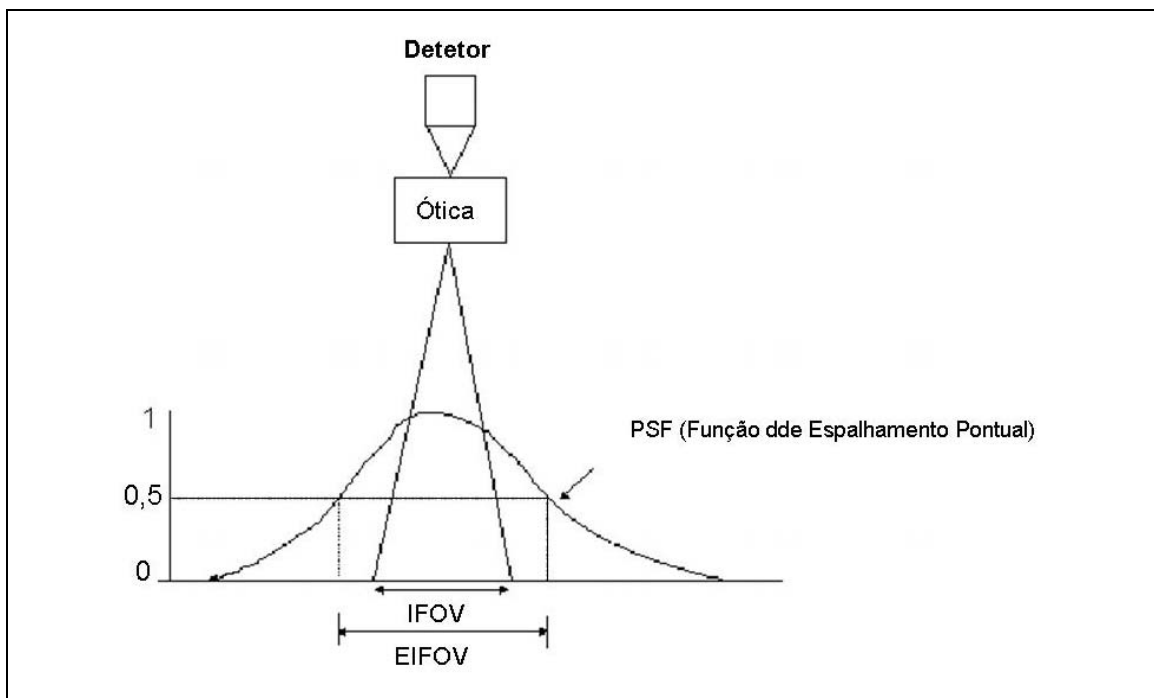


ILUSTRACIÓN 2.2 - Representación de la resolución nominal (IFOV) y de la representación de la resolución ejecutada (EIFOV).

FUENTE: Material de la clase, disponible en el sitio:  
[www.dpi.inpe.br/~leila/ser437/pdi1-introd.PDF](http://www.dpi.inpe.br/~leila/ser437/pdi1-introd.PDF)

Em la Tabla 2.3 pude ser vista la comparación entre as resoluções espaciales de los sensores ETM+ y MODIS.

TABLA 2.3 - Comparación entre las Resoluciones Espaciales de Sensor ETM+ y MODIS.

BANDAS/RESOLUCIÓN ESPACIAL	ETM+	MODIS
Azul	30 m	500 m
Verde	30 m	500 m
Rojo	30 m	250 m
Infrarojo próximo	30 m	250 m
Infrarojo médio	30 m	500 m
Infrarojo termal	60m	1000m

FUENTE: Adaptado del website: [www.earthobservatory.nasa.gov](http://www.earthobservatory.nasa.gov)

### **2.4.3 - Datos MODIS aplicados a los estudios ecológicos en los sistemas terrestres**

El sensor MODIS, a bordo del satélite Tierra y Agua, opera en siete bandas espectrales, las cuales fueron explícitamente desarrolladas para aplicaciones en estudios terrestres. Las características espectrales, radiométricas y la calidad geométrica de los datos MODIS proporcionan una gran base mejorada para el monitoreo y mapeamiento de los sistemas terrestres. Un gran gama de productos MODIS para el estudio de la cobertura de la tierra y detección de los cambios de la cobertura de estos sistemas son proporcionados por el grupo de investigaciones MODland.

#### **2.4.3.1 – Utilización del MODIS para el mapeamiento de la cobertura vegetal**

Los mapas globales y regionales de la cobertura de la tierra son necesarios para ayudar a las investigaciones de los sistemas terrestres, como el modelaje de ecosistemas, el monitoreo de quemadas, entre otros. El uso del sensor con buenas resoluciones temporal, espacial y radiométrica, pueden mejorar la precisión de estos mapeamientos, aumentando la confianza de la clasificación de las varias formaciones de la vegetación.

Hansen et al. (2002) generaron un mapa de vegetación para una región del Africa que usando imágenes de un producto MODIS: Vegetation Continuous Fields Layers, con una resolución espacial de 500 metros. Los resultados se estimaron a través de las medidas de campo, mapas de vegetación ya disponibles e imágenes IKONOS y Landsat. Al comparar los mapas obtenidos a través de ETM+ con una resolución de 250 metros con el mapa generado por el producto MODIS, también con una resolución de 250 metros, los resultados mostraron una gran capacidad del sensor MODIS para el mapeamiento de esta área. Gran parte de los problemas que surgieron fue a lo largo de valles estrechos, relacionados con la limitación en el georeferenciamento de las imágenes. Algunos problemas respecto al uso de mapas para validación, como, diferencia en las leyendas, mapas antiguos, en que la cobertura vegetal podrían haber sido alterada, o mismo la imprecisión del mapeamiento fueron mencionados. Algunas formaciones podrían haber tenido sus áreas sobrestimadas, debido al agrupamiento de formaciones vegetación diferentes en una misma clase temática, por presentarse espectralmente similares.

El análisis hecho con los datos de campo, ofrecieron muchas ventajas en la clasificación porque permite al usuario definir las clases de interés. Según Hansen et al. (2002),

permite al usuario reconocer donde la magnitud de los errores encontrados es aceptable, de una manera más fácil que los métodos de evaluación de la precisión de la clasificación.

#### **2.4.3.2 - Uso de MODIS para la detección de cambios en la cobertura de la tierra**

Existe una discusión emergente a respecto de cual debe ser la escala más apropiada para analizar los cambios de la cobertura de la tierra. Malingreau y Tucker (1988) mostraron la efectividad de la resolución espacial de 4 a 8 Km para los datos GAC (Global Área Coverage), obtenidos a partir de AVHRR dado de NOAA, para delimitar los grandes tipos de fisonomías globales. El uso de datos con la resolución espacial de 8 a 15 Km para la clasificación de la cobertura de la tierra y su fenología también se demostró como persistente para otros autores (Tucker et al., 1985), pero es demasiado grosera para monitorar cambios en la cobertura de la tierra y detectar cambios de áreas de 1 Km o más pequeño. Estas observaciones son apoyadas por los análisis detalladas de la deforestación tropical que sugiere que 1 Km puede ser demasiado grosero para detectar y cuantificar las deforestaciones en algunas áreas (Strahler et al., 1999).

Muchos de los cambios en el uso y cobertura de la tierra que ocurrieron por acciones antrópicas poseen una escala espacial próxima de 250 m (Townshend y Justicia, 1988), y las bandas más apropiadas para la detección de estos cambios, están localizadas en el área del visible e infrarojo próximo.

Se han usado datos de 250 m de resolución espacial para la detección de conversión de la cobertura vegetal causado tanto por acciones antrópicas, como la deforestación de bosques por procesos naturales, como quemada e inundación. Los recientes estudios han estado usando algoritmos de detección de cambios, como VCC (Conversión de la Cobertura Vegetal) para producir productos de cambios en la superficie (Zahn et al., 2002).

A través de los productos MODIS VCC pueden identificarse locales de eventos dónde cambios en la cobertura de la tierra pueden ser atribuidos a las actividades humanas o donde ocurrieron eventos naturales extremos. Estos productos fueron desarrollados para servir como una alarma, dónde están ocurriendo rápidas conversiones, y una vez detectadas pueden consiguientemente ser evaluadas con los datos de mejores resoluciones espaciales, como las imágenes de Landsat, Ikonos y Quikbird. Para identificar estos

fenómenos varios algoritmos están desarrollándose y están probándose. La Tabla 2.4 contiene los tipos de productos que pueden generarse por MODIS 250m

TABLA 2.4 - Tipos de Cambio en la Cobertura detectada por el Producto Modis 250m.

Cobertura en el instante 1	Floresta	No Floresta	Suelo expuesto	Água	Quema
Floresta	-----	Deforestación	Deforestación	Inundación	Quema
No Floresta	Rebrote	-----	Urbanizaçã	Inundación	Queimada
Suelo expuesto	Rebrote	Expansión de la Agricultura	-----	Inundación	-----
Água	Rebrote	Rebrote	-----	-----	-----
Quema	Inundación	Inundación	Inundación	-----	-----

FUENTE: Adaptado de Zahn et al. (2002).

Mientras los datos para las composiciones globales necesarias para la aplicación de los algoritmos todavía no están disponibles, Zahn et al. (2002) hicieron una adaptación para el estudio de algunos cambios en los bosques.

## 2.5. El sensor WFI

WFI (Wide Field Imager) es un sistema del sensor a borde del satélite CBERS 2, puesto en la órbita terrestre el 21 de octubre de 2003, saliendo del Centro de Lanzamiento de Taiyuan, en China. El horario del lanzamiento fue a las 11:16h (horario de Pekín), lo que corresponde a 1:16h en Brasilia.

El satélite está compuesto por dos módulos. Uno es la "carga útil" dónde son acomodadas 3 cámaras (CCD - Cámara Imageadora de Resolución Alta (20 m), IRMSS - Imageador por Barredura de Média Resolución (80m y 160m en el termal) y WFI - Cámara Imageadora de Campo Longitud de Visada (resolución espacial de 260m) y el Repetidor para el Sistema brasileño de Colección de Datos Ambientales. El otro es el

"servicio", que contiene los materiales que aseguran el suministro de energía, los comandos, las telecomunicaciones y otras funciones necesarias al funcionamiento del satélite.

En la Ilustración 2.3 un esquema de las fajas de imaginamiento del terreno de cada uno del sensor tres (CCD, IRMSS y WFI) (INPE, 1995).

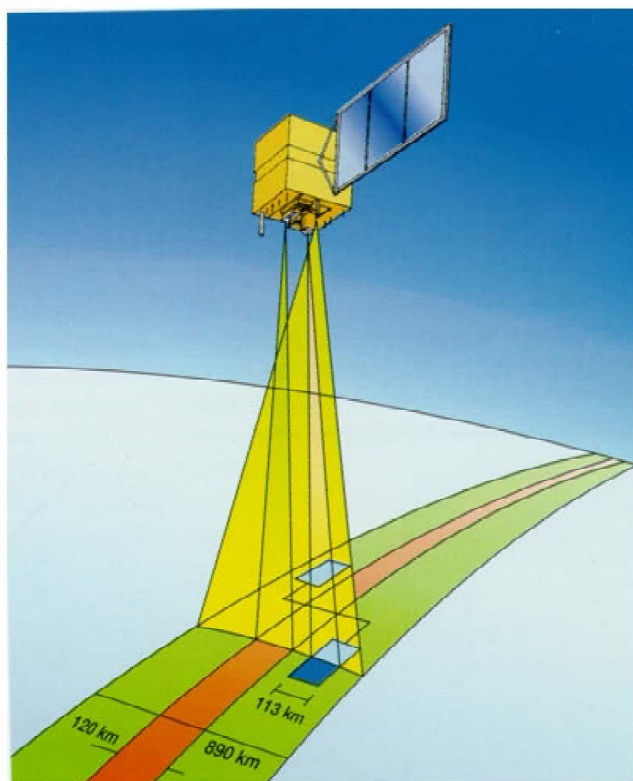


ILUSTRACIÓN 2.3 - Esquema del satélite CBERS para mostrar las longitudes de las fajas de los sistemas del sensor

WFI produce las imágenes con una longitud de la faja imaginadora de 890 km, permitiendo obtener las cartas-imagen con la resolución espacial de 260 m. En el periodo aproximado de cinco días, se obtiene una cobertura completa del globo. WFI opera en dos fajas espectrales del espectro eletromagnético, o sea, banda 1 (0,63 - 0,69  $\mu\text{m}$ ) y 2 (0,77 - 0,89  $\mu\text{m}$ ). En la Ilustración 2.3 se presenta un cuadro del sensor WFI y una imagen en composición colorida en que puede verse el dique de Itaipu.

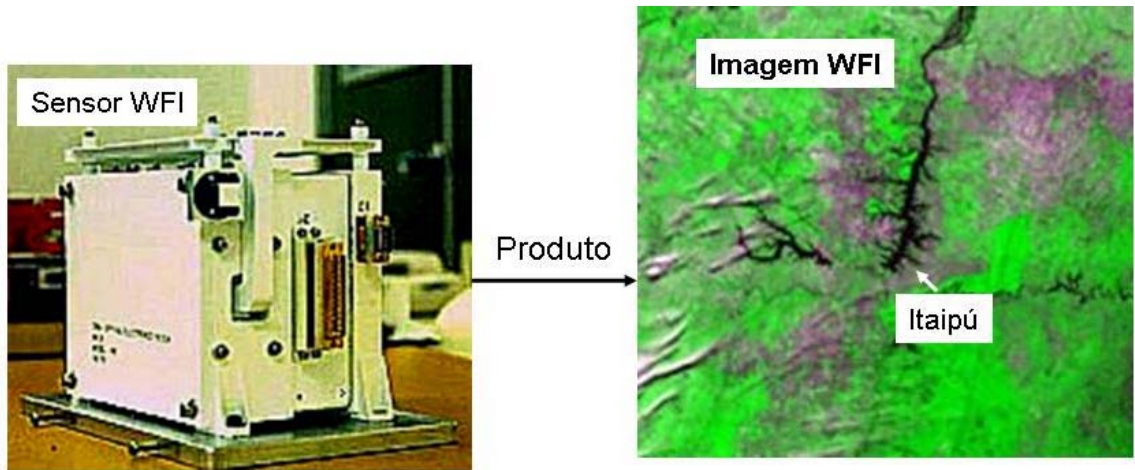


ILUSTRACIÓN 2.4 - Sensor WFI y una imagen colorida que muestra el dique de Itaipu. FUENTE: [http://www.cbears.inpe.br/pt/programas/cbears1-2\\_cameras.htm](http://www.cbears.inpe.br/pt/programas/cbears1-2_cameras.htm)



## CAPÍTULO 3

### EL MATERIAL Y MÉTODO

#### 3.1. Situación del Área de Estudio

La Amazonia Legal (AML), unidad administrativa de Brasil, incluye la totalidad de los estados de Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins, y parcialmente el estado de Maranhão (al oeste de los 44 W meridianos), ascendiendo a 5.000.000 km<sup>2</sup> aproximadamente (IBGE, 2000), entre 5 N y 20 S (latitud) y 44 W y 75 W (longitud). Salvo la región Sur del estado de Mato Grosso, integrada en la cuenca del Río Paraguay, parte del estado de Maranhão, perteneciendo a la cuenca de Río Parnaíba, el área restante de la AML está incluida en la cuenca del Río Amazonas' (Ilustración 3.1).

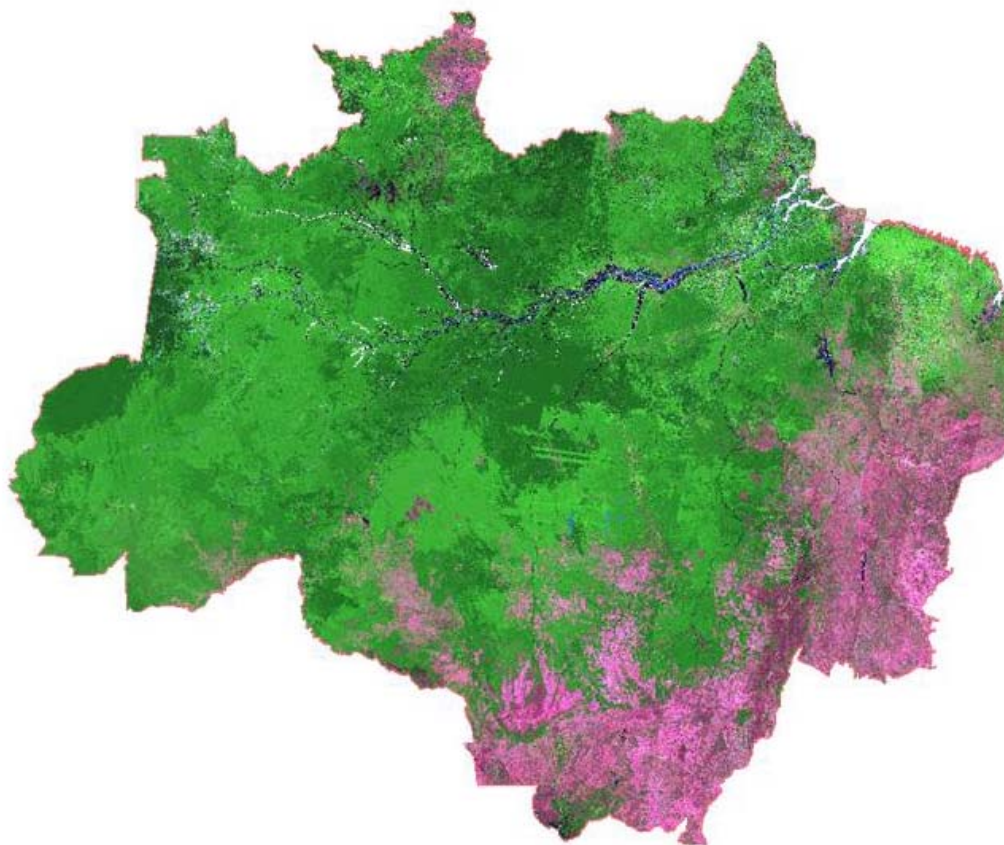


ILUSTRACIÓN 3.1 - Mosaico de 12 al 27 de agosto de 2003. R(MIR), G(NIR) y B(Red), para mostrar el área de estudio del Proyecto DETER.

### **3.2. Metodología**

El mapa base inicial para el proyecto DETER, es decir, la referencia de las áreas deforestadas de los periodos anteriores, se obtuvo a partir de los datos históricos del Proyecto PRODES Digital. Para tal, fue hecho un ajuste y complementación de los mapas temáticos existentes. El ajuste se refiere al procedimiento empleado para garantizar que el mapa temático se puso perfectamente en las imágenes MODIS. En otros términos, para garantizar que las áreas deforestadas de los años anteriores no fueran incluidas como nuevas deforestaciones.

Durante la ejecución del Proyecto PRODES, en algunas áreas de la Amazonia Legal no puede hacerse el mapeo de áreas deforestadas debido a la incidencia constante de nubes durante el pasaje del satélite Landsat sobre el área. Sin embargo, con la alta resolución temporal del satélite Terra, aumentó la oportunidad de obtener las imágenes MODIS libre de nubes, para esas áreas. De esta manera, antes de iniciar DETER se hace el mapeo de las áreas deforestadas en las imágenes MODIS obtenidas en agosto de 2003 (mosaico referente al periodo de 12 al 27 de agosto), considerada como el marco cero para el principio del Proyecto de alarma. Así, se pudo complementar los mapas temáticos de PRODES Digital, para tener una marca de referencia de las áreas deforestadas hasta entonces.

El mapa de la deforestación, junto con las áreas de no-bosques (áreas cuya fisonomía no es considerada como formación de bosque), sirvió para generar una máscara que al superponerla sobre las imágenes MODIS pudo bloquear así las áreas sin el interés para realizar el monitoreo. Ese procedimiento evita, por ejemplo, clasificar áreas deforestadas anteriormente o las áreas de no-bosques, como es el caso de áreas deforestadas en la clase de fisionómica cerrado (savanna). Además de eso, disminuye considerablemente la extensión que será analizada, una vez que contendrá sólo el área de bosque primario y las nuevas posibles deforestaciones. En la Ilustración 3.2 muestra el área de la Amazonia Legal, que es considerada en el DETER, superpuesta por la máscara, generada a través de los datos de PRODES y complementación de áreas no mapeadas anteriormente.

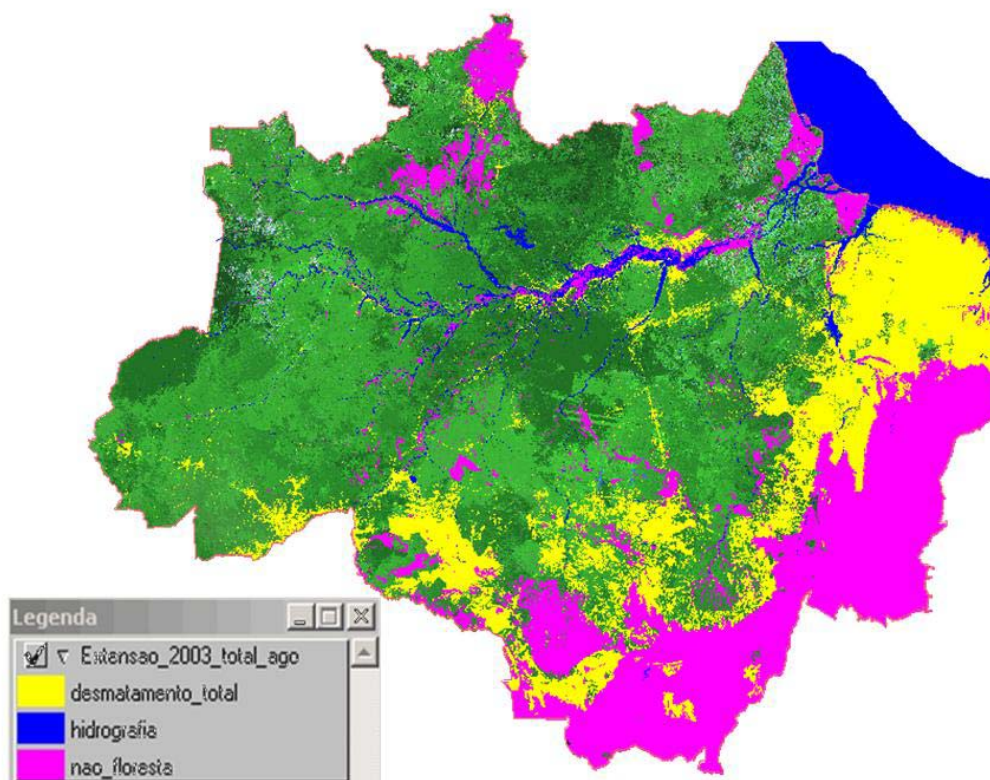


ILUSTRACIÓN 3.2 - Mosaico de la imagen MODIS de la Amazonia Legal, obtenida entre la fecha de 12 al 27 de agosto de 2003, con la sobreposición de la extensión de la deforestación total histórica originada del proyecto PRODES Digital y su leyenda respectiva

### 3.2.1 - Estructurando del banco de datos Georreferenciado

Al principio de los trabajos del proyecto DETER se creó un banco de datos georreferenciado para cada área de la Amazonia Legal, en la proyección Polyconic/SAD69, en que el cuadro del área de trabajo se entendió entre las coordenadas geográficas (44° 00 ' 00" W a 74° 00' 00" W) de longitud y (08° 00 ' 00" N a 20° 00 ' 00" S) de latitud. En este banco, además de las imágenes MODIS, también se insertó los mapas temáticos originados de PRODES Digital con las siguientes clases: el bosque, el no-bosque, hidrografía, deforestación total. Sin embargo, debido al tamaño de los archivos de datos, era necesario reducir el tamaño del banco. En ese caso, se optó por crear nueve bancos de datos más pequeños, teniendo como unidad de investigación el estado o parte de él, como es el caso de Maranhão. Además, esa nueva estructuración del banco de datos era importante porque las informaciones proporcionadas a nivel del estado es más práctico siendo posible indicar en cual o cuales estados de la AML la

deforestación esta ocurriendo con intensidad más grande, permitiendo así una acción más direccionada de los órganos del fiscalización. También se puede informar la cantidad de nubes y el área de bosque observado en la imagen MODIS, individualmente para cada uno de los estados.

### 3.2.2 - Selección de las imágenes MODIS

Además de la comprobación de la cobertura de nubes existente en las imágenes, otras dos características inherentes a las imágenes de sensor MODIS son consideradas para su selección. Primeramente, se creó una rutina para que las imágenes diarias (MOD09) de MODIS, disponibilizadas por la NASA, sean captadas apenas estén disponibles. Esta disponibilidad de las imágenes no posee un periodo fijo, podría variar de 3 a 11 días después del pasaje del satélite. Esas imágenes son disponibilizadas en el formato HDF, en la proyección *integerized sinusoidal* y divididos en *tiles*. Después de la adquisición de los *tiles* se genera el mosaico de la Amazonia en el formato geotif y una imagen colorida de baja calidad (Ilustración 3.3A) para un análisis preliminar. Después de seleccionar las fechas escogidas en el análisis preliminar, es necesario la selección en las imágenes de alta resolución (Ilustración 3.3B), donde puede observarse nubes pequeñas que no aparecen en las imágenes de baja calidad.

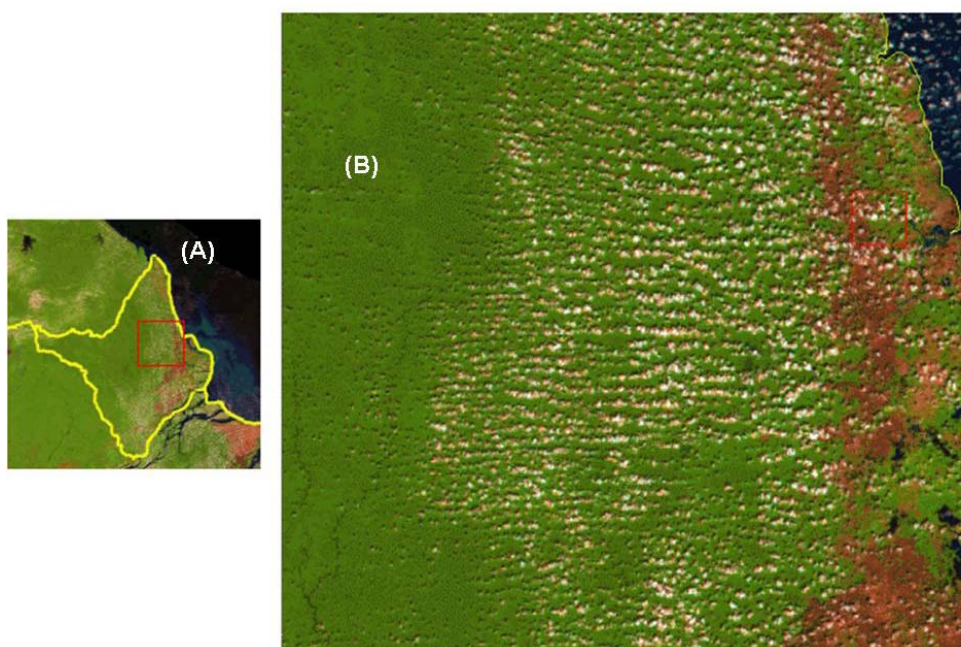


ILUSTRACIÓN 3.3 - Imágenes MODIS en el momento de la selección (A) y ampliada para análisis del porcentaje de nubes (B).

En la operación del proyecto DETER existe un análisis previo de todas las imágenes diarias de MODIS. Porque las imágenes diarias presentan mejor calidad visual que los



mosaicos de 16 días. La segunda característica de las imágenes observada para su selección es cuanto a la centralidad del Estado en la faja de barrerura del satélite, porque las imágenes que presentan los Estados centralizados poseen buena calidad visual, debido a la distorsión panorámica que alcanzan los elementos de la imagen que están en las fronteras de la barradura. Ocurre la selección inmediata de aquéllas imágenes diarias más favorables (baja cobertura de nubes y centralidad del Estado en la faja de barradura del satélite), conforme la Iliustración 3.4.



ILUSTRACIÓN 3.4 - Muestra la longitud de la faja de una imagen diaria de MODIS, además de contener la malla de los límites de los Estados (línea roja)

En el caso de la imagen de la Ilustración 3.4 la interpretación es sólo hecho en los estados que se centralizan. Sin embargo, no es posible obtener las imágenes diarias para algunos estados, la alternativa viable encontrada es usar el mosaico MODIS de 16 días.

### 3.2.3. - Georreferenciamento de las Imágenes MODIS

En DETER se usan las imágenes reflectância de superficie (Productos MOD09) que son disponibilizados al usuario ya georreferenciadas. Sin embargo, antes de que sean puestas disponibles a los usuarios, los datos de sensor MODIS pasan por diferentes fases de procesamiento y son clasificadas en función de los niveles de procesamiento, como muestra la TABLA 3.1.

TABLA 3.1 - Niveles de procesamiento de MODIS.

<b>Nivel de Procesamiento</b>	<b>Definición</b>
<b>Level 0</b>	Datos brutos reconstruidos en la resolución total, todas las informaciones de comunicación removidas.
<b>Level 1</b>	Datos de nivel 0 son referenciados por la hora y adicionados informaciones subsidiarias, incluyendo coeficientes de calibración geométrica e radiométrica, e información de geolocalización.
<b>Level 2</b>	Variables geofísicas derivadas en la misma resolución y localización de los datos de nivel 1.
<b>Level 3</b>	Variables mapeadas en mallas de espasamiento uniforme, normalmente completa y consistente.
<b>Level 4</b>	Salidas de modelo o resultados de análisis de los datos de niveles más bajos.

Los procesamientos de los datos MODIS son realizados a través de programas disponibilizados por la NASA, en que el geolocalização es un producto obtenido de la conversi3n del nivel 0 para el nivel 1.

La precisi3n de la geolocalização prevista en el lanzamiento sería de aproximadamente 150 m, con el objetivo de llegar a 50 m al nadir. Seg3n Wolfe (2002), despu3s de 3 a3os de funcionamiento de Tierra/MODIS esa precisi3n es de aproximadamente 50 m y para Aqua/MODIS es de aproximadamente 65 m. Los programas usan datos de Modelo de Elevaci3n Digital (DEM) para quitar distorç3es causadas por la tierra. Las imágenes pueden insertarse directamente en SPRING sin la transformaci3n en GRIB en el m3dulo IMPIMA.

### 3.2.4 - Clasificaci3n de los datos MODIS

Aunque siendo toda la Amazonia Legal una área de inter3s del sistema Alerta, para las limitaciones de Hardware, el procedimiento metodol3gico adoptado por DETER, como se mencion3 previamente, consiste en supervisar el bosque primario individualmente para cada uno de los estados de la AML. Al final se genera una tabla conteniendo las informaciones para el Estado y la deforestaci3n total. Por esa raz3n, en este informe

toda la parte metodológica se abordará, teniendo como área de estudio sólo al estado de Rondônia.

Una vez seleccionada la imagen, como discutido en la sección 3.2.2, es hecho el corte del área de interés, o bien, el área de los estados que se encuentran en el centro de la imagen. A partir de esa imagen parcial es que entonces, se crea el banco de datos para el Estado. Sobre el área del Estado se pone la máscara para bloquear el área que no tiene interés de analizarse. Con ese procedimiento se selecciona simplemente el área útil, en otros términos, el área que será clasificada para mapear posibles áreas de acción antrópica que ocurrió durante el periodo que se desea hacer el monitoreo.

Después del cortar es aplicado el Modelo Linear de Mixtura Espectral (MLME), para generar las nuevas imágenes, denominadas de vegetación, suelo y sombra. Para entender mejor el concepto de MLME, a seguir se harán una descripción del abordaje metodológico de ese modelo

#### **3.2.4.1 - Modelo Linear de Mixtura Espectral**

La mixtura espectral, dependiendo de las características específicas de los objetivos en la tierra, puede ser linear o no linear. En este caso, se considerará que una relación linear representa la mixtura espectral de los objetos dentro de un pixel. Siguiendo este abordaje, el valor de radiancia en cada pixel, en cualquier longitud de onda del espectro eletromagnético (faja espectral) puede imaginarse como una combinación linear de radiancias de cada componente presente en la mixtura (Shimabukuro y Smith, 1991; Aguiar et al. 1999). Entonces, cada pixel de la imagen, que puede asumir cualquier valor dentro de la escala de niveles de grises ( $2^n$  bits), contiene la información sobre la proporción (cantidad) y la radiância espectral de cada componente dentro de la unidad de resolución en el terreno. Por consiguiente, para cualquier imagen multiespectral generada por cualquier sistema de sensor (ej. Landsat MSS, TM, ETM+, Tierra MODIS), considerando el conocimiento de la proporción de los componentes, será posible estimar las radiancias espectrales de cada uno de esos componentes. Similarmente, si las radiancias espectrales de los componentes son conocidas, entonces la proporción de cada componente en la mixtura puede ser estimada.

El modelo de mixtura espectral puede escribirse como:

$$(1)$$

El modelo de mixtura espectral puede escribirse como:

$$r_i = a \cdot \text{vege}_i + b \cdot \text{solo}_i + c \cdot \text{sombra}_i + e_i,$$

siendo  $r_i$  la respuesta del pixel en la banda  $i$ ;  $a$ ,  $b$ , y  $c$  las proporciones de vegetación, suelo y sombra (o agua), respectivamente;  $\text{vege}_i$ ,  $\text{solo}_i$  y  $\text{sombra}_i$ , las respuestas espectrales de los componentes vegetación, suelo y sombra (o agua), respectivamente;  $e_i$  es el error en la banda  $i$  e  $i$  indica la banda de TM.

### Los modelos matemáticos

Para la solución de ese sistema de ecuaciones lineares que representan al modelo de mixtura espectral, existen varios abordajes matemáticos basados en el método de los mínimos cuadrados. En esta sección, se mencionan tres algoritmos que están disponibles en los softwares actuales de procesamiento de imágenes (SPRING, ENVI, PCI, etc.).

#### 1) Mínimos cuadrados con la restricción (Constrained Least Squares - CLS)

Este método estima la proporción de cada componente dentro del pixel que minimiza la suma de los errores al cuadrado. Los valores de la proporción no deben ser negativos y deben sumar 1. Para resolver este problema, se desarrolló un método de solución casi cerrado (ejemplo: un método que encuentra la solución haciendo aproximaciones que satisfacen las restricciones) (Shimabukuro, 1987, Aguiar, 1991).

#### 2) Mínimos cuadrados ponderado (Weighted Least Squares - WLS)

Considere el ajuste de la curva de los datos con una curva teniendo la forma:

$$R = f(A, x_1, x_2, \dots, x_n) = x_1 f(A) + x_2 f(A) + \dots + x_n f(A) \quad (2)$$

En que la variable dependiente  $R$  es lineal con respecto a las constantes  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . A pesar de existir muchas ramificaciones abordajes para el ajuste de curvas, el método de mínimos cuadrados puede aplicarse a una variedad amplia de problemas de ajuste de curvas que involucran las formas lineares con constantes indeterminadas. Las constantes son determinadas minimizando la suma de los errores (residuos) al cuadrado. La



solución obtenida por este método es matemáticamente aceptable, pero en algunos casos es físicamente sin significado y, por consiguiente, no aceptable (algunas restricciones están envueltas: las constantes deben ser no negativas y deben sumar 1). Entonces, se vuelve un problema de mínimos cuadrados con restricción y las ecuaciones de restricciones deben sumarse. Para resolver este problema, es necesario aplicar los conceptos de mínimos cuadrados ponderados.

A veces la información obtenida en un experimento pueden ser más exactas que otras fuentes de información del mismo experimento. En otros casos es conveniente usar informaciones adicionales (conocimiento anterior) para volver la solución físicamente relevante. En tales casos, puede ser deseable dar un “peso” mayor para aquellas informaciones que son consideradas más perfeccionadas o más importantes para el problema. Para considerar cierta información (ejemplo: información adicional) es deseable traer la solución más próxima del significado físico, obteniendo entonces una solución aceptable.

En este caso,  $x_1 + x_2 + x_3 = 1$  y  $0 \leq x_1, x_2, x_3 \leq 1$  son las condiciones que deben satisfacerse para obtener una solución aceptable. Entonces, se suman cuatro ecuaciones Eq. X; es decir, una correspondiendo la condición de la suma igual a 1 ( $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ ) y otro tres que corresponden a la condición que las proporciones deben ser no negativas ( $x_j \leq 1, j = 1, 2, 3$ ). Para resolver este problema, una matriz diagonal  $W$  que contiene valores de pesos asociados con el sistema de ecuaciones será resuelto cuando las restricciones no se entiendan entonces es aplicado. Inicialmente los  $m$  primeros valores igual a uno (1) a lo largo de la matriz diagonal  $W$  quiere decir que las ecuaciones son igualmente importantes para la solución del problema. El valor siguiente muy alto para la ecuación correspondiente a la primera restricción (suma  $x_j = 1$ ) que debe ser satisfacerse estrictamente. Entonces si los valores de los  $x_j$  están satisfechos, es decir, si ellos están en el intervalo de cero y 1, entonces la solución final fue encontrada. En caso contrario es necesario usar un proceso interactivo para traer todos los  $x_j$  dentro del intervalo cero y 1. Esto es realizado por el aumento gradativo de los pesos (que inicialmente son ceros) correspondiendo a las tres últimas ecuaciones. La solución para este problema es encontrada minimizando la cantidad:  $w_1 e_1^2 + w_2 e_2^2 + \dots + w_{(m+n+1)} e_{(m+n+1)}^2$ , donde  $w_1, w_2, \dots$  son los factores de pesos y  $e_1, e_2, \dots$  que son los valores de residuos por cada ecuación.

La implementación de este método es basado en la eliminación de Gauss y el algoritmo de sustitución forward and backward presentados en el libro texto de Análisis Numérica.

### 3) Componente Principal

Dado una imagen constituida por un número de los pixel con medidas en un número de bandas espectrales, es posible modelar cada respuesta espectral de cada pixel como una combinación lineal de un número finito de componentes.

$$\begin{aligned}
 dn1 &= f1 * e1,1 + \dots + fn * e1,n && \text{banda 1} \\
 dn2 &= f1 * e2,1 + \dots + fn * e2,n && \text{banda 2} \\
 \dots & && \\
 dnp &= f1 * ep,1 + \dots + fn * ep,n && \text{banda p}
 \end{aligned} \tag{3}$$

donde,

- dnj es el número digital para la banda i del pixel
- ei,j es el componente puro dn del componente puro j, banda i
- fj es la fracción desconocida del componente puro j
- n es el número de componentes puros
- p es el número de bandas

Esto deja la ecuación principal

$$dn = e * f \tag{4}$$

Una restricción lineal es sumada, ya que la suma de las fracciones de cualquier pixel debe ser igual a 1; por consiguiente, aumentar el vector dn con un adicional 1, y la matriz es como una línea de valores 1. Esto deja un grupo de p + 1 ecuaciones en n desconocidos. Como el número de componentes puros es normalmente más pequeño que el número de bandas, las ecuaciones son super determinadas y pueden ser resueltas por cualquier otra técnica. En la solución descrita aquí, se usa el análisis de los principales componentes para reducir la dimensionalidad del grupo de datos. La matriz del componente puro se transforma en espacio PCA, a través del uso del número

apropiado de autovectores, los datos del pixel se transforman en espacio PCA, las soluciones son encontradas, y los resultados de los fragmentos son guardados.

### **3.2.5 - Imágenes Fracción**

La relación lineal es usada para representar la mezcla espectral de los componentes, dentro del elemento de resolución del sensor. Así, la respuesta de cada pixel en cualquier banda espectral puede definirse como una combinación lineal de las respuestas de cada componente, suponiendo estar en el objetivo sensoriado. De esa forma, cada pixel de la imagen que puede asumir cualquier valor dentro de la escala de grises, contiene la información sobre la proporción y la respuesta espectral de cada componente dentro de cada elemento de la resolución. De esta manera, para cualquier imagen multispectral, como, por ejemplo, las del TM/Landsat, si las respuestas espectrales de los componentes son conocidas, entonces las proporciones de los componentes pueden ser estimadas. En otros términos, si las proporciones de los componentes son conocidas, entonces pueden obtenerse las respuestas espectrales de los componentes.

Las imágenes fracción (Ilustración 3.5) son los productos generados por los algoritmos descritos anteriormente. En general, todos los algoritmos producen el mismo resultado cuando las ecuaciones de la restricción no son consideradas. Normalmente son generadas las imágenes fracción de vegetación, suelo y sombra/agua que son los objetivos generalmente presentes en cualquier imagen. Las imágenes fracción son consideradas como una forma de reducción de la dimensionalidad de los datos y, también, como una forma de resaltar la información. Además, el modelo de mezcla espectral transforma la información espectral en información física (valores de la proporción de los componentes en el pixel). La imagen fracción vegetación resalta las áreas de cobertura vegetal, la imagen fracción suelo resalta las áreas de suelo expuesto; mientras la imagen fracción sombra/agua resalta las áreas ocupadas con los cuerpos de agua (ríos, lagos, etc.) y también áreas de quema, áreas inundadas, etc. Se considera como imagen fracción sombra ou agua, porque esos dos objetivos presentan respuestas espectrales similares.

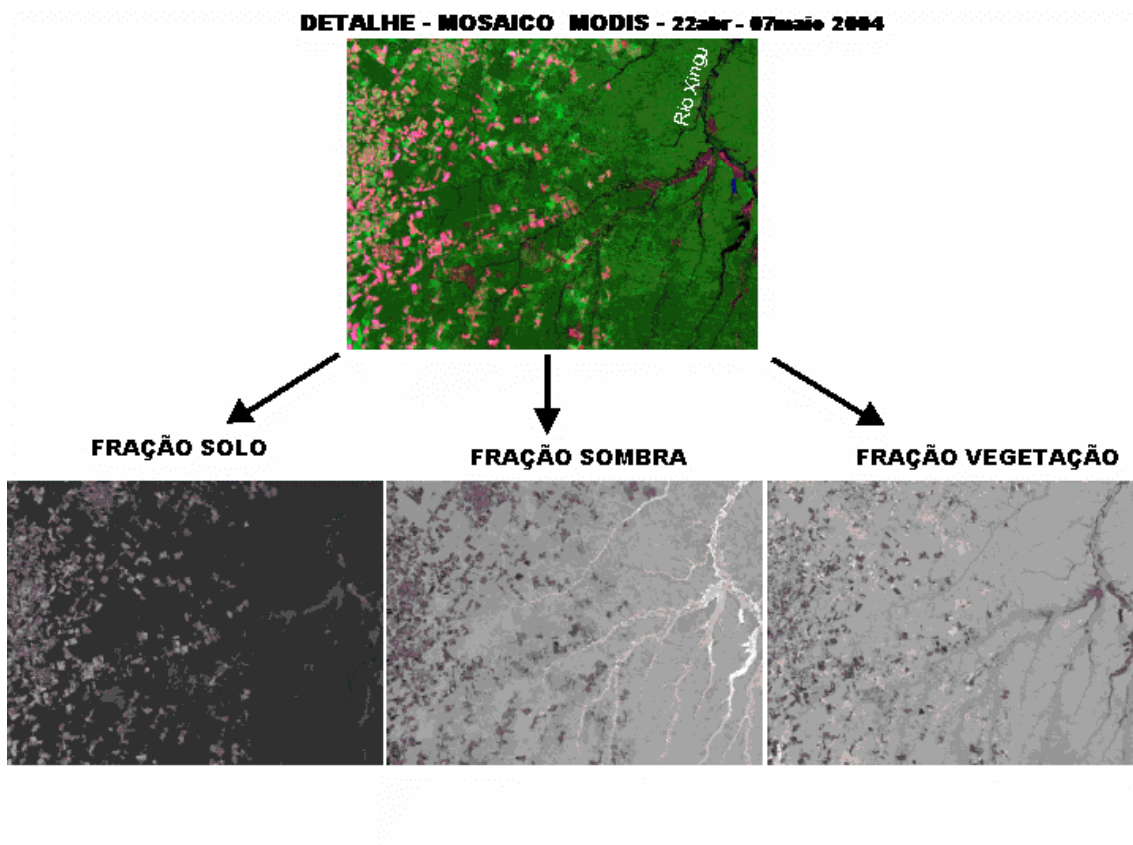


ILUSTRACIÓN 3.5 - Imágenes fracción, sombra y vegetación generadas a partir del mosaico MODIS del periodo del 22 de abril al 07 de mayo de 2004.

### 3.2.6 - Clasificación de la Imagen Fracción Suelo

Después de obtener las imágenes fracción (vegetación, suelo y sombra) es hecha la clasificación de la imagen suelo. La razón del uso de la imagen suelo es una consecuencia de las experiencias adquiridas en el Proyecto PRODES Digital que mostró ser esta la imagen más eficaz para identificar las nuevas áreas deforestadas. Además, se emplea el mismo abordaje de la clasificación adoptado en el Proyecto PRODES, en otros términos, un abordaje no - supervisado, a través del algoritmo ISOSEG. Antes de aplicar ISOSEG es hecho una segmentación y la extracción de regiones.

La segmentación de la imagen fracción suelo realizada a través del segmentador por crecimiento de regiones, implementado en SPRING. Tiene como objetivo generar polígonos espectralmente homogéneos. El empleo de ese segmentador pide la definición de dos límites: el) el límite de similitud, límite mínimo debajo del cual dos áreas son consideradas similares y agrupadas en una única área; y b) el límite de área, valor

mínimo de área dado en número de pixels, para que una área sea individualizada. En el caso del proyecto DETER se definió como los límites los valores 8 y 4 para la similitud y área, respectivamente.

Una vez realizada la segmentación, el paso siguiente es crear un archivo del contexto donde se guarda la información siguiente: e) el tipo de clasificación para las áreas; b) bandas o imágenes utilizadas; y c) imagen segmentada. Poco después es hecho la extracción de regiones, en que el algoritmo extrae los atributos estadísticos (los promedios y covarianza de las matrices) del grupo de regiones definidas en la fase de la segmentación. Realizada la extracción de regiones es aplicado la clasificación no supervisada, a través del clasificador ISOSEG que también es más una experiencia adquirida en el Proyecto PRODES. En ISOSEG la clasificación es hecha con base en un límite de aceptación que puede asumir cualquier valor adoptado por el analista de los datos. En general, en la clasificación se aplica un umbral de aceptación de 95%. Sin embargo, el límite no debe ser fijo, porque depende de cada caso en particular.

Después de la clasificación de la imagen segmentada es hecho el mapeamiento que consiste en asociar cada una de las clases temáticas a una clase de uso y ocupación de la tierra, que se definió previamente en el banco de datos digital de la Amazonia, o sea, las clases temáticas: bosque, no-bosque, hidrografía, deforestación total.

Obtenido el mapa temático, el paso siguiente consiste en una fase interactiva en que el interprete procede a un ajuste en los resultados obtenidos en la clasificación. En otras palabras, se conoce que por mejor que sea el entrenamiento del clasificador o la segmentación, los resultados obtenidos siempre presentan errores de clasificación que es inherente a una serie de fuentes entre ellos puede mencionarse: la semejanza de respuestas espectrales de los diferentes objetivos, selección de los límites de similitud y área mínima en la fase de la segmentación. Para corregir éstos errores de clasificación, uno de los métodos empleados es la edición matricial, que fue implementado en SPRING el cual será descrito en la siguiente sección.

### **3.2.6 1 - Edición Matricial**

La edición matricial se creó con la intención de eliminar errores de clasificación, a través de la edición de áreas, en ciertas clases, que ellos no fueron clasificados, corrección de los límites de los polígonos temáticos y cambio de una clase temática para otra que fue erróneamente clasificada. O sea, permite al interprete interferir

directamente en los resultados de la clasificación en la pantalla de la computadora, como si estuviera realizando una interpretación visual en una imagen en formato analógico. De esta manera, puede decirse que la edición matricial modernizó los procedimientos de interpretación visual, una vez, que no hay más necesidad de usar lapis, mesa de luz y overlay. Además, permitió usar la computadora para realizar la mayor parte de la interpretación de los datos que se hacen de una manera más rápida y evita el almacenamiento de imágenes en forma de papel.

La gran diferencia observada en el procedimiento de edición matricial y de edición vectorial es que, en la edición matricial, el intérprete ejecuta las correcciones de errores de la clasificación del dato matricial y no sobre los datos vectoriales. Cuando la edición es hecha en los datos vectoriales, el intérprete necesita ejecutar el procedimiento de ajuste de líneas y poligonalizaçãõ, etapas que no suceden en la edición matricial. Esto reduce el tiempo de cómputo. En el caso de la edición matricial, los polígonos mapeados se aceptan o son reclassificados en otras categorías de uso de la tierra, según la decisión y experiencia del intérprete. Esta supervisión de polígonos clasificados es el hecho usando como superficie de fondo una imagen colorida (sintética) bajo el mapa temático. Para visualizar la imagen de fondo, se usa simplemente como mapa clasificado, las líneas de los polígonos, en otros términos, el mapa clasificado, representado en la forma vectorial. Se se prefiere trabajar con la clase temática activa en lugar de las líneas de los polígonos, puede hacerse cargando en la pantalla dos del SPRING y activando el intermitentemente, para visualizar la clase y la imagen bajo ella.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

Como se dijo anteriormente, la metodología de DETER es aplicada separadamente para cada uno de los estados que componen la AML. Además, no difiere de un estado para otro. Así, se optó por describir los resultados obtenidos, teniendo como base una área piloto que corresponde al Estado de Rondônia. Al final se presentará también y se discutirá una tabla con los resultados de la Alarma, realizado para todo la Amazonia Legal durante el periodo de un año, o sea, de agosto de 2003 a agosto de 2004.

#### 4.1 - Resultados del Procesamiento de Imágenes MODIS para el estado de Rondônia.

En la Ilustración 4.1 estan contenidos los resultados de la segmentación de la imagen suelo, del área util del estado de Rondônia

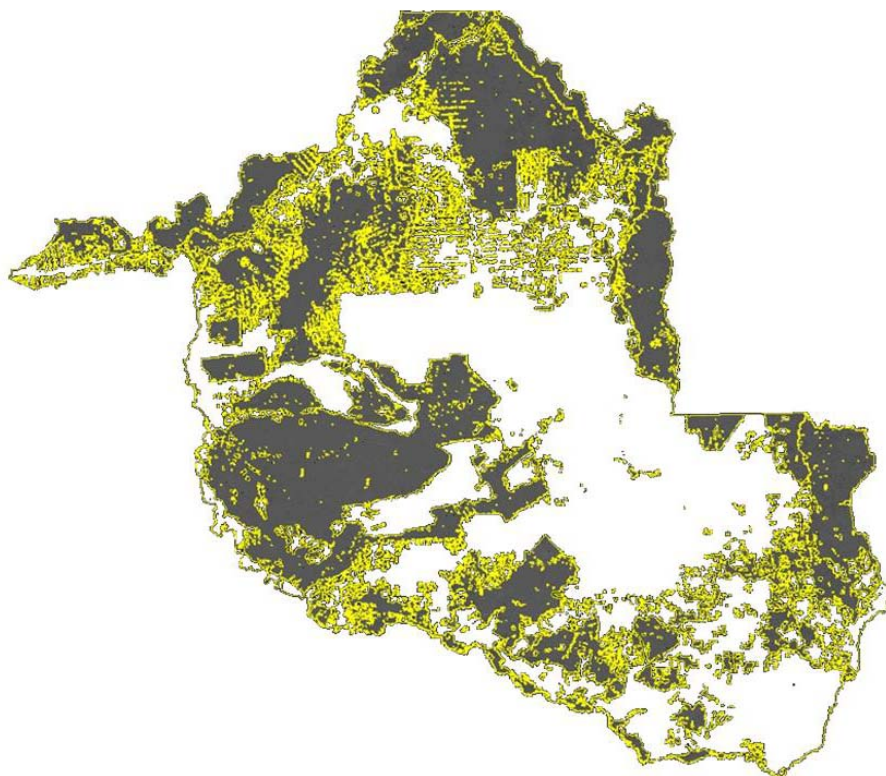


FIGURA 4.1 – Resultados de la segmentación por crecimiento de regiones (líneas amarillas) para el área util del estado de Rondônia.

Observase que toda el área en blanco dentro del estado o es área deforestada anteriormente o son áreas consideradas como no-bosque. De esta manera, además de

reducir el tamaño del área para la segmentación, evita clasificar una área deforestada de los años anteriores.

Una vez segmentada la imagen y hecha la extracción de regiones es realizada la clasificación a través del clasificador ISOSEG, con el límite de aceptación de 95% cuyos resultados se muestran en la Ilustración 4.2.

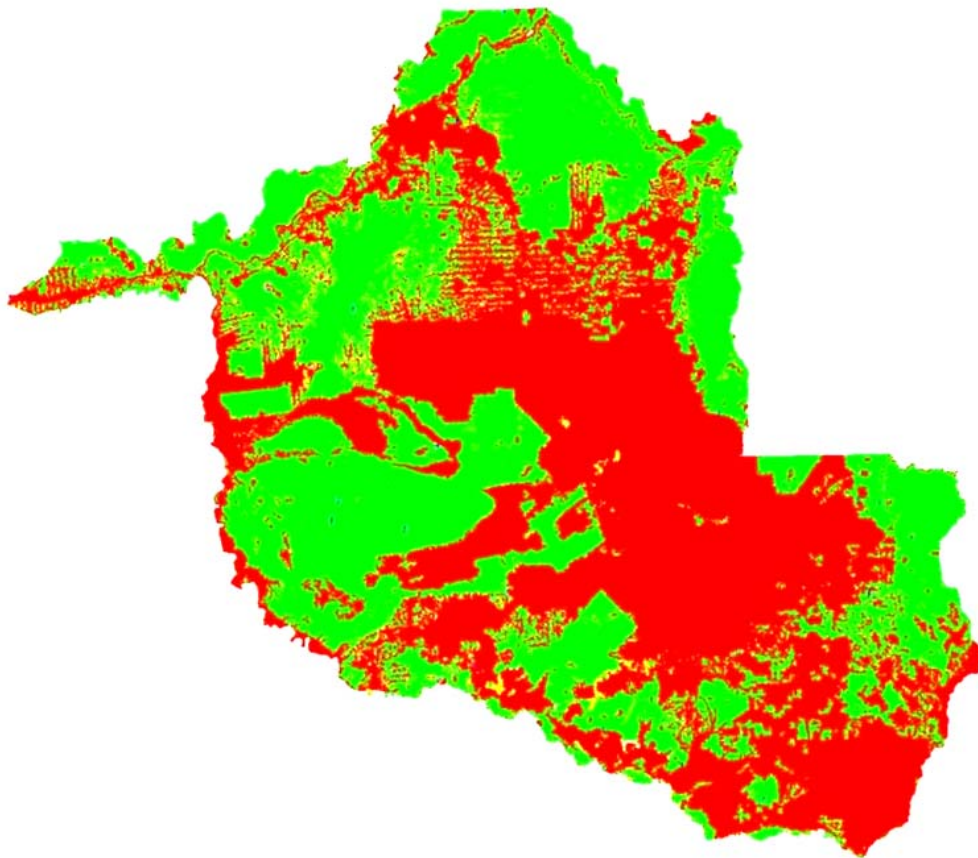


ILUSTRACIÓN 4.2 - Resultado de la clasificación de la imagen fracción suelo de Rondônia hecha por el clasificador ISOSEG, con ocho clases temáticas.

Después de que esta clasificación, es hecho el mapeamento en el cual es realizada la asociación de cada una de las clases temáticas resultantes de la clasificación a una clase del uso y ocupación de la tierra. Ese procedimiento es realizado con la participación del interprete. Pueden verse los resultados del mapeamento en la Ilustración 4.3.



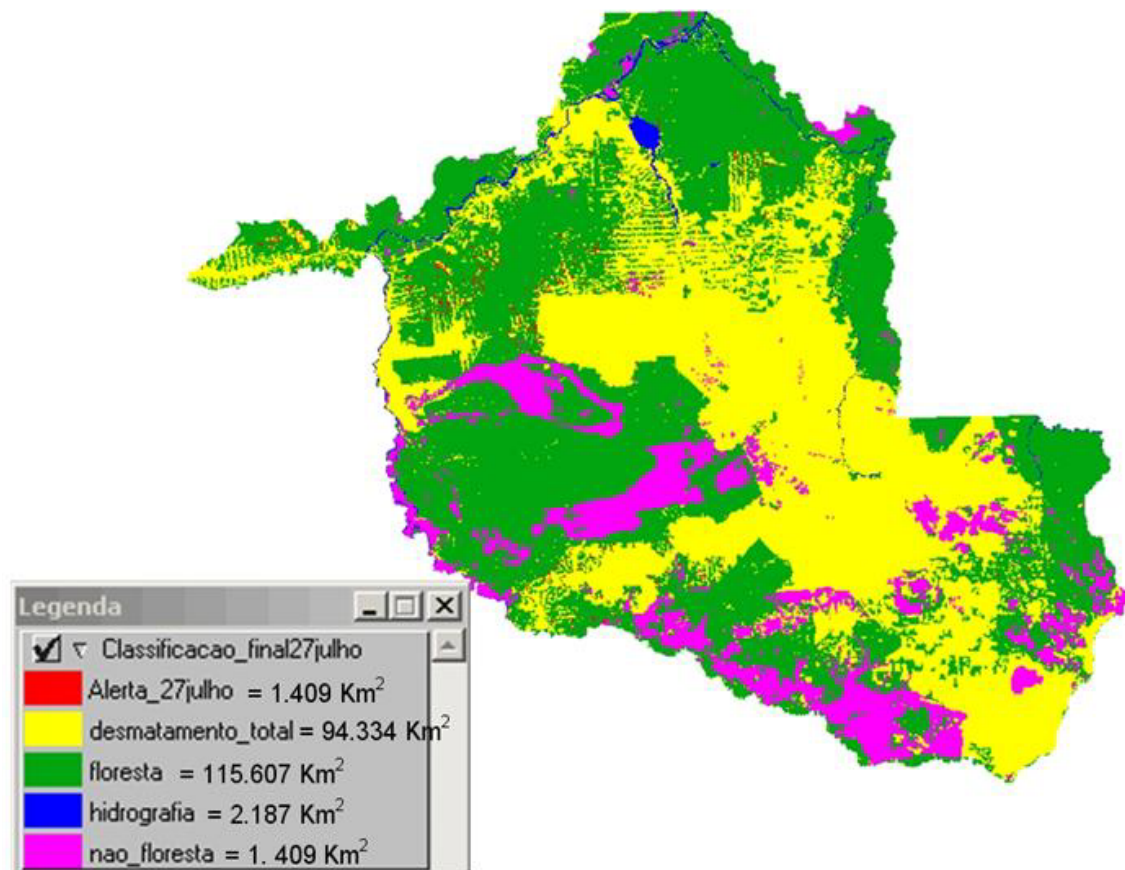


ILUSTRACIÓN 4.3 - Mapa final obtenido para el Estado de Rondônia.

#### 4.2 Resultados de la Alarma en el Nivel Municipal

A pesar de que la Alarma tiene una visión global, es decir, ha sido desarrollado para supervisar la deforestación en toda la AML, los resultados también pueden obtenerse en el nivel Municipal. Para ilustrar esa situación las Ilustraciones 4.4 y 4.5 muestran como eso puede lograrse, teniendo como destaque el distrito Municipal de Altamira, en Pará.

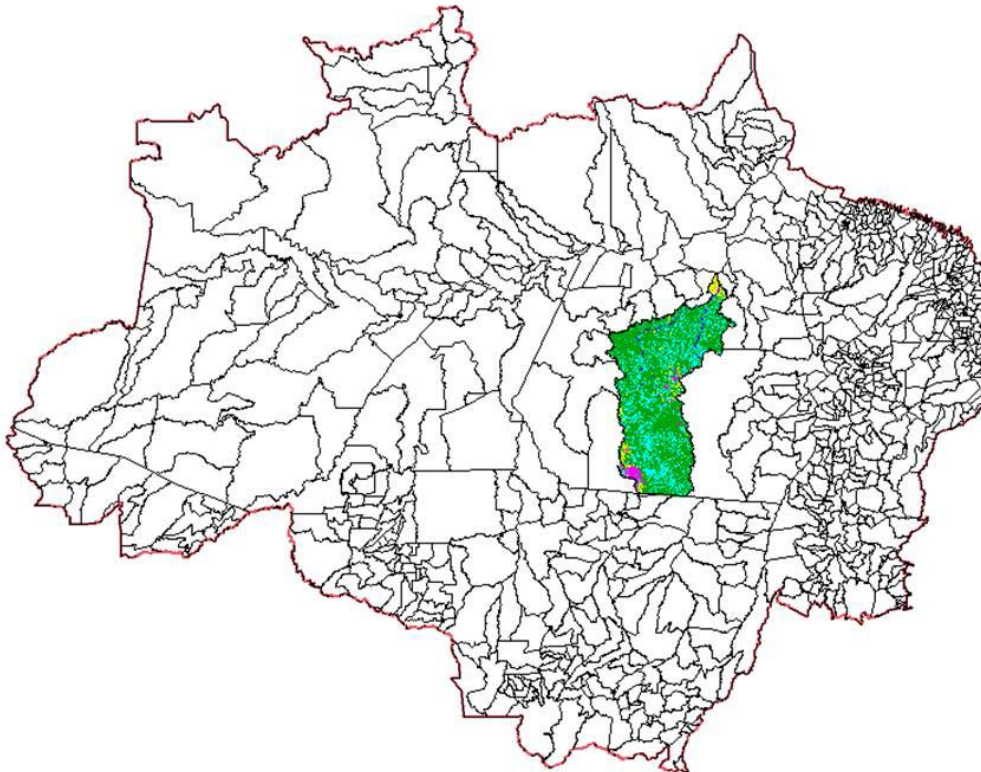


ILUSTRACIÓN 4.4 - Mapa de AML con los límites municipales, con destaque del distrito municipal de Altamira, PARÁ. FUENTE: IBGE (1997).

Una vez recortado el distrito municipal de la malla municipal, disponibilizada para IBGE y de la imagen, así como del mapa final de clasificación, el paso siguiente es obtener los resultados de áreas de bosques deforestados cubiertos por nubes, y las áreas de deforestación antigua. La Ilustración 4.5 muestra con el detalle el distrito municipal de Altamira recortado sobre las imágenes MODIS y los resultados temáticos de la clasificación no-supervisada.

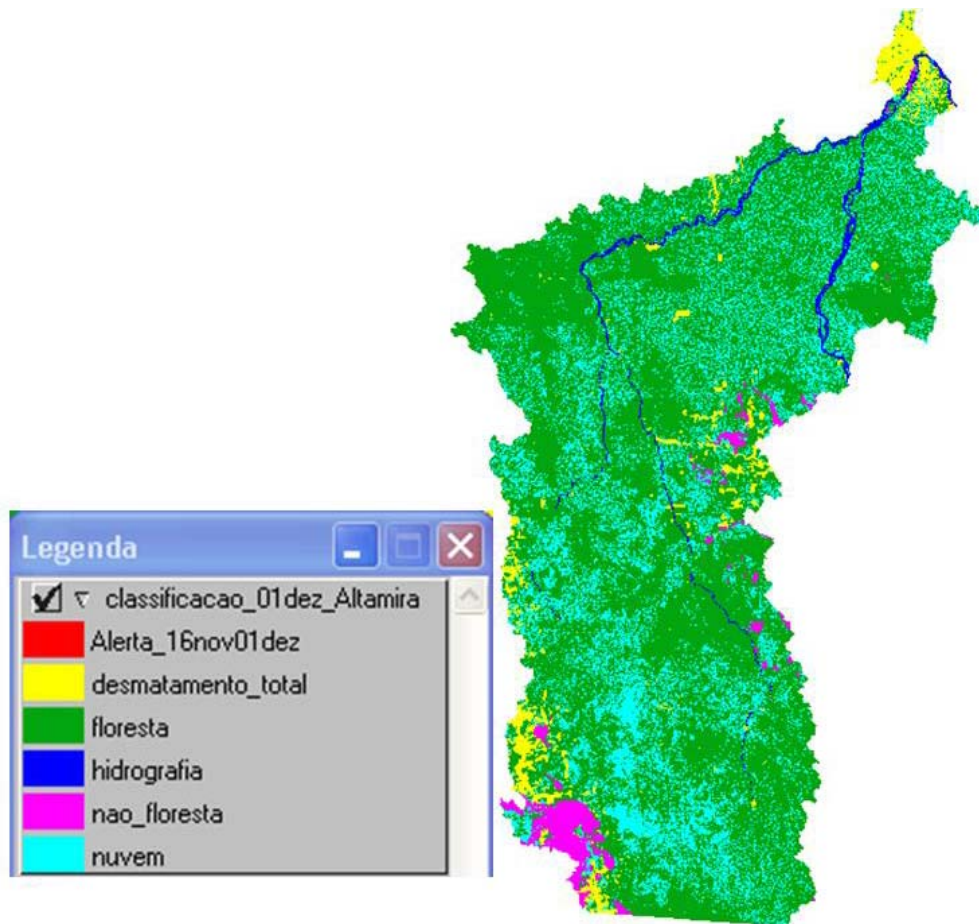


ILUSTRACIÓN 4.5 - Resultado de la Alarma en el distrito municipal de Altamira, para la fecha de 16/11/2004.

#### 4.3. Resultado de la Alarma para toda la Amazonia Legal en el periodo de un año.

Después de la creación del primer banco de datos geográfico del Proyecto DETER (Imágenes MODIS de 27/08/2003), empezó el sistema de alarma, en otros términos, una vez creado el banco de datos geográfico para la alarma y para el estado, el paso siguiente fue supervisar la disponibilidad de las imágenes MODIS y, cuando seleccionada, realizar la clasificación del mismo y determinar las áreas deforestadas para la fecha seleccionada. Una vez determinadas las áreas de bosques que fueron deforestadas, esas áreas son catalogadas numericamente e incorporan a la máscara para el análisis de las próximas imágenes seleccionadas. Adoptando esta estrategia metodológica, fueron obtenidas y clasificadas las imágenes libres de nubes de seis fechas subsecuentes a 27/08/2003, que se muestran en la Tabla 4.1 y los resultados de este monitoreo están en la Tabla 4.2

TABLA 4.1 - Fechas de Adquisición de Imágenes MODIS Durante Período de 12 Meses (Agosto/2003 Agosto/2004).

Fecha base	Fechas de obtención de las imágenes MODIS
27/08/2003	07/05/2004 21/05/2004 08/06/2004 22/06/2004 29/07/2004 25/08/2004

TABLA 4.2 - Resultados de la Alarma para el Periodo de agosto de 2003 a agosto de 2004

<b>Evolução Anual do Desmatamento Bruto da Amazônia (km<sup>2</sup>/ano)</b>										
PERÍODO CONSIDERADO: "AGOSTO/2003 A AGOSTO/2004"										
Estados	Desmatamento antigo Extensão agosto/2003	Período de 25 a 29 de julho de 2004				Período de 11 a 30 de agosto de 2004				Total observado Evolução anual do Desmatamento
		Nuvem (desflorestável)	Floresta Observada	Dia	Alerta	Nuvem (desflorestável)	Floresta Observada	Dia	Alerta	
Acre	19.313	35.779	100.655	28	121	124	135.928	11	379	500
Amapá	0				0					0
Amazonas	22.974	681.285	782.125	25	380	35.049	1.428.452	12a27	192	572
Maranhão	136.446				4					4
Mato Grosso	200.149	666	265.615	29	8.829	18.817	245.997	30	1.419	10.248
Pará	254.154	214.787	611.624	29	6.255	76.269	748.563	12a27	602	6.857
Rondônia	88.783	0	115.607	27	1.922	2.598	112.151	19	798	2.720
Roraima	4.386				0	56.309	104.941	26	76	76
Tocantins	30.480			28	68					68
<b>Total-AMZ</b>	756.685	<b>932.517</b>	<b>1.875.626</b>		<b>17.579</b>	<b>189.166</b>	<b>2.776.032</b>		<b>3.466</b>	<b>21.045</b>

La Tabla 4.2 es una forma del disponibilizar los resultados de la varios Alarmas ejecutados en un determinado periodo. Sin embargo, pueden ser creadas otras formas de representación, como por ejemplo, para cada observación, es decir, para la fecha de adquisición de las imágenes. De cualquier forma, al final del periodo, los resultados serán siempre los mismos, independiente de la manera como fueron tabulados, por consiguiente todos ellos vinieron de los mismos datos y de la misma manera de obtención.

En la Tabla 4.2 se nota que los resultados fueron tabulados para dos periodo, en otros términos, de 25 a 29 de julio de 2004 y 11 al 30 de agosto de 2004. En el extremo de la tabla es colocada una columna del total del área deforestada en el periodo anual.

Lo importante en DETER es la posibilidad de proporcionar los resultados tanto de áreas deforestadas cuanto de áreas de bosques y áreas cubiertas con nubes en el periodo observado. Tomando como ejemplo el estado de Pará, vea que en la primera observación (25 al 29 de julio de 2004) el área deforestada hasta agosto de 2003 era de

254.154 km<sup>2</sup>. en la primera observación se verificó un incremento de área deforestada de 6.255 km<sup>2</sup>. Sin embargo, había 214.787 km<sup>2</sup> de bosques que no pudieron ser observados, porque estaban cubiertos con nubes. El área del bosque que se observó en los datos de MODIS era de 611.624 km<sup>2</sup> y la observación fue realizada con los datos del pasaje del 29 de julio de 2004.

Ese mismo estado en el segundo periodo de la observación presentó los siguientes valores:

" Área cubierta con nubes = 76.269 km<sup>2</sup>

" Área de bosque observado = 748.563 km<sup>2</sup>

" Área antropizada = 602 km<sup>2</sup>.

" Día de adquisición de los datos MODIS - 12 al 27 de agosto de 2004

El total de área antropizada del año para el estado de Pará era de 6.857 km<sup>2</sup>, como se puede observar en la última columna de la tabla.

Sin embargo, es bueno dejar claro que los valores contenidos en la Tabla 4.2 simplemente son relativos, es decir fueron estimados de datos cuya resolución espacial es baja (250m x 250m). Por esta razón, son números que dan una idea de lo que esta ocurriendo en un determinado estado o una determinada región del estado. En el caso de ser necesario cuantificar el área deforestada, para los fines de penalización, se recomienda el uso de imágenes de TM/Landsat o de CCD/CBERS que poseen la resolución espacial media, o sea, 30 m x 30 m y 20 m x 20m, respectivamente.

Para aclarar mejor la rutina adoptada en DETER y visualizar la consistencia de los resultados obtenidos, se seleccionó una área de la AML y se hizo monitoreo de tres periodos de adquisición de los datos MODIS, como se muestra en la Ilustración 4.6. El mosaico que se obtuvo de MODIS en el periodo del 24 de mayo al 8 de junio de 2004. Considerando que cada área amarilla representa la deforestación antigua es posible observar que, en ese periodo, había deforestación, representada en color rojo que es la tonalidad típica de tierra descubierta.



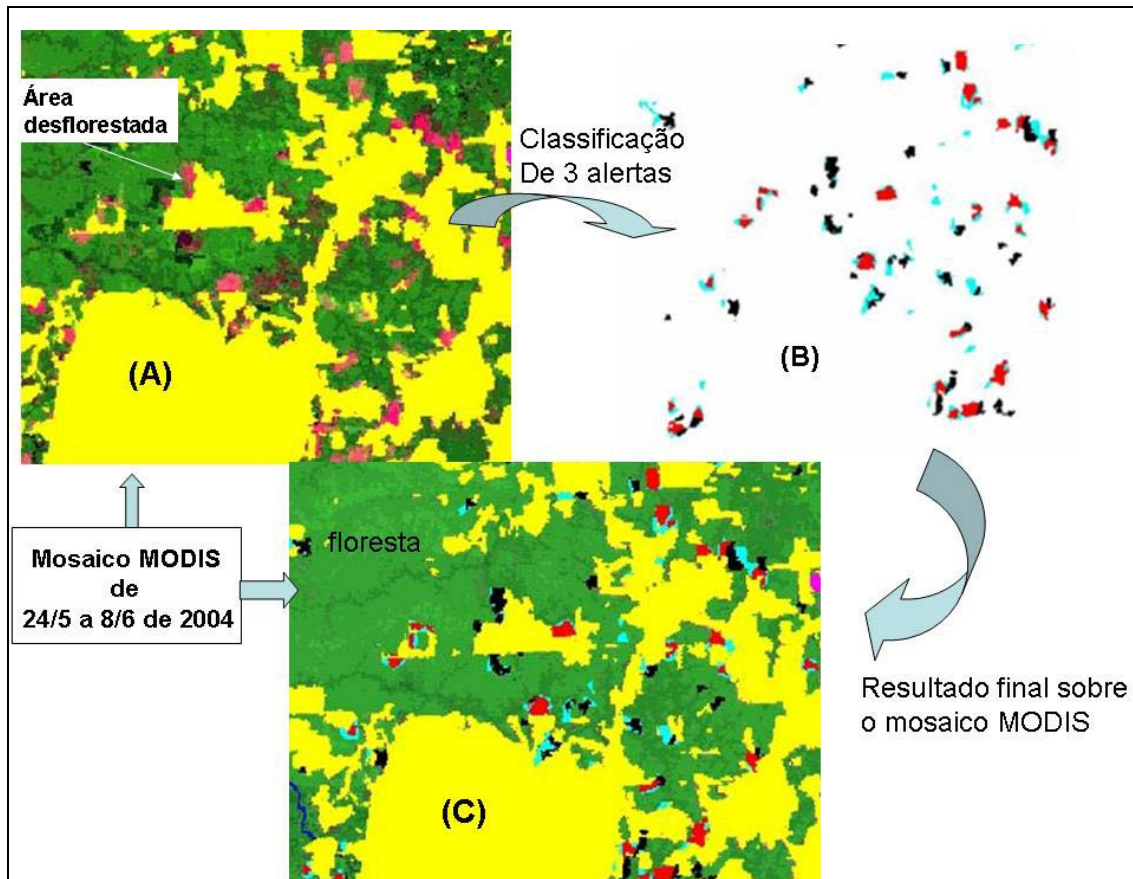


ILUSTRACIÓN 4.6 - Mosaico MODIS (el 24 de mayo al 8 de junio de 2004) con la máscara de las áreas de las deforestaciones antiguas a agosto de 2003 (color pone amarillo), áreas por ser clasificadas (color rojo) (A), resultados de la clasificación para los tres periodos de la observación (azul, rojo y negro) (B) y los resultados sobrepuestos al mosaico MODIS (C).

En el primero periodo de la observación (agosto de 2003) era hecha la clasificación de las áreas deforestadas que se representan en color rojo. Después, era hecha una segunda clasificación de los datos MODIS durante 21 de abril cuyo resultados se muestran en color negro. Finalmente, el tercer monitoreo era realizado en el mosaico MODIS, obtenido en el periodo del 24 de mayo a 8 de junio de 2004 cuyo resultados se presentan en color azul, como puede verse en la Ilustración 4.6 (B). Es bueno aclarar que no es necesario poner los colores diferentes para cada monitoreo. En este ejemplo los colores fueron diferentes para mostrar la evolución de DETER. De hecho, lo que se hace es computar el área deforestada para una observación dada y, en la próxima observación o monitoreo, las áreas observadas en la alarma anterior son incorporadas a la máscara para la corte de los nuevos datos y así sucesivamente, para cuántas observaciones o monitoreos se realicen. En la Ilustración 4.6(C) es mostrado la sobreposición de los

resultados de la clasificación en el mosaico MODIS, para tener una idea de la consistencia del mapeamiento. Puede ser observado que donde se deforestó fue clasificado por la metodología de DETER. En otros términos, además de los resultados controlados es posible verificar visualmente la exactitud del mapeamiento.





## CAPÍTULO 5

### CONSIDERACIONES FINALES

Este informe presentó el desarrollo y funcionamiento del Proyecto DETER en ejecución en el INPE. Como se discutió en los capítulos anteriores, el proyecto es basado en la metodología de PRODES Digital, en que las imágenes TM de Landsat se sustituyeron por las imágenes de MODIS/Tierra.

Como se demostró en los resultados, tanto para el estado, cuanto para la Amazonia Legal, DETER puede usarse con mucho éxito y a un costo relativamente bajo, porque puede ejecutarse con imágenes gratuitas, por lo menos hasta el presente momento, y con un número bastante pequeño de analistas. Sin embargo, es necesario dejar claro que DETER no puede ser sustituto de PRODES Digital, porque los dos presentan objetivos diferentes, en otros términos, mientras el objetivo de DETER es supervisar áreas deforestadas periódicamente, es decir, acompañar la acción antrópica en el bosque de una manera cualitativa, PRODES Digital tiene el objetivo más del punto de vista cuantitativo. En otros términos, DETER acompaña la acción antrópica, pudiendo indicar donde y cuando está ocurriendo y PRODES proporciona la tasa anual de deforestación. De esta manera, no son proyectos ambiguos y sí, complementares.

Además, fue mostrado que el proyecto, a pesar de haber sido desarrollado para supervisar las grandes áreas del bosque, como él el caso del Amazonia Legal, él también puede usarse en áreas más pequeñas, por ejemplo, en el nivel municipal.

Sin embargo, es necesario dejar muy aclaro que las características espaciales de los datos MODIS no permiten obtener un resultado cuantitativo de área en los moldes que se obtienen con los datos de sensor TM/Landsat o de cualquier otro sensor con las mismas resoluciones espaciales o similar a la TM, como por ejemplo CCD de CBERS. Así, los resultados cuantitativos que se publican deben verse con cierta cuatela.

Por tener una característica de monitoreo, DETER es parte de las actividades del Plan de Acción para la Prevención y Control de la Deforestación en la Amazonia brasileña, de responsabilidad de un Grupo Permanente de Trabajo Interministerial (GPTI), coordinado por la Casa Civil y compuesto por más de trece ministerios.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, A.P.D. **Utilização de atributos derivados de proporções de classes em um pixel na classificação multispectral de imagens de Sensoriamento Remoto.** 1991. Dissertação de Mestrado (São José dos Campos, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE).
- Aguiar, A.P.D; Shimabukuro, Y.E.; Mascarenhas, N.D.A. Use of synthetic bands derived from mixing models in the multispectral classification of remote sensing images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n. 4, p. 647-657, 1999.
- Achard, F., Eva, H.D., Stibig, H.-J., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T., e Malingreau, J.-P. Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. **Science**, v. 297, p. 999-1002. 2002.
- Brown, S.; Lugo, A.E. Tropical secondary forests. **Journal of Tropical Ecology**, v. 6, n. 1, p. 1-32. 1990
- Buschbacher, R.; Uhl, C. ; Serrão, E.A.S. Abandoned pastures in eastern Amazonia. II. Nutrient stocks in the soil and vegetation. **Journal of Ecology**, v.76, n. 3, p. 682-699, 1988.
- Cardille, J.A.; Foley, J.A. Agricultural land-use change in Brazilian Amazônia between 1980 and 1995: evidence from integrated satellite and census data. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 551-562, 2003.
- Carreiras, J.M.B. **Deteção remota de alterações da cobertura vegetal na Bacia Amazônica.** Tese de Doutorado Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, 2005.
- Cochrane, M.A.; Alencar, A.; Schulze, M.D.; Souza Jr., C.M. ; Nepstad, D.C.; Lefebvre, P.; Davidson, E.A. Positive Feedbacks on the fire dynamic of closed canopy tropical forests. **Science**, v. 284, p. 1832-1835, 1999.
- Curran, P.J.; Foody, G.M. The use of remote sensing to characterize the regenerative states of tropical forests. Em G.M. Foody, e P.J. Curran (Eds.). **Environmental Remote Sensing from Regional to Global Scales.** Chichester, Reino Unido: John Wiley & Sons, p. 44-83, 1994.
- Duarte, V.; Shimabukuro, Y.E.; Santos, J.R.; Mello, E.M.K.; Moreira, J.C.; Moreira, M.A; Souza, R.C.M.; Shimabukuro, R.M.K.; Freitas, U..M. **Metodologia para criação do PRODES Digital e do banco de dados digitais da Amazônia – Projeto BADDAM.** São José dos Campos: INPE, 1999. 33p. (INPE-7032-PUD/035).
- Fearnside, P.M. Deforestation in Brazilian Amazonia: the effect of population and land tenure. **Ambio**, v. 22, n.8, p. 537-545. 1993.

- Fearnside, P.M. Amazonian deforestation and global warming: carbon stocks in vegetation replacing Brazil's Amazon forest. **Forest Ecology and Management**, v. 80, p. 21-34. 1996.
- Goulding, M.; Barthem, R.; Ferreira, E. **The Smithsonian Atlas of the Amazon**. Washington: Smithsonian Books. 2003.
- Grupo Permanente de Trabalho Interministerial (GPTI). **Relatório da comissão executiva do plano de ação para a prevenção e controle do desmatamento na Amazônia Brasileira**: Período de março a agosto de 2004, Brasília, agosto de 2004, 1p.
- Hansen, M.C.; DeFries, R.S.; Townshend, J.R.G.; Marufu, L.; Sohlberg, R. Development of MODIS tree cover validation data set for Western Province, Zambia. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 320-335, November 2002.
- Hess, L.L.; Melack, J.M.; Novo, E.M.L.M.; Barbosa, C.C.F.; Gastil, M. Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the Central Amazon region. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 404-428, 2003.
- Houghton, R.A.; Lawrence, K.T.; Hackler, J.L.; Brown, S. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. **Global Change Biology**, v.7, p. 731-746. 2001.
- Brasil. Ministério da Agricultura, Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal, Secretária de Planejamento e Coordenação da Presidência da Republica. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Mapa de Vegetação do Brasil, escala 1:5000000**. Brasília, 1988.
- Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Atlas Nacional do Brasil, 3rd edn, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 2000. 262 p.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Relatório de atividades - 1995**. São José dos Campos, SP: INPE. 43p., 1995.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Monitoring of the Brazilian Amazonian forest by satellite, 2000-2001**. São José dos Campos, SP, 2002.
- Junk, W.J.; Firch, K. The physical and chemical properties of Amazonian waters and their relationship with the biota. In: G.T. Prance, e T.E. Lovejoy (Eds.). **Amazonia** Nova Iorque: Pergamon, p. 3-17, 1985.
- Justice, C. O.; Townshend, J.R.G.; Vermote, E.F.; Masuoka, E.; Wolfe, R.E.; Saleous, N.; Roy, D.P.; Morisette, J.T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 3-15, 2002.
- Justice, C.O.; Vermote, E.; Townshend, J.R.G.; DeFries, R.; Roy, D.P.; Hall, D.K.; Salomonson, V.V.; Privette, J.L.; Riggs, G.; Strahler, A.; Lucht, W.; Myneni, R.B.;

- Knyazikhin, Y.; Running, S.W.; Nemani, R.R.; Wan, Z.; Huete, A.R.; van Leeuwen, W.; Wolfe, R.E.; Giglio, L.; Muller, J.P.; Lewis, P.; Barnsley, M.J. The moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1228-1247, July 1998.
- Kaimowitz, D.; Smith, J. Soybean technology and the loss of natural vegetation in Brazil and Bolivia. In: A. Angelsen, e D. Kaimowitz (Eds.). **Agricultural Technologies and Tropical Deforestation**. Oxon, Reino Unido: CAB International Publishing, p. 195-211, 2001.
- Lucas, R.M.; Honzák, M.; Curran, P.J.; Foody, G.M.; Milne, R.; Brown, T.; Amaral, S. Mapping the regional extent of tropical forest regeneration stages in the Brazilian legal Amazon using NOAA AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n.15, p. 2855-2881, 2000.
- Mahar, D. **Government policies and deforestation in Brazil's Amazon Region**. Washington, D.C.: World Bank. 1988.
- Malingreau, J.-P. and Tucker, C.J. 1988. Large-scale deforestation in the southeastern Amazon basin of Brazil. **Ambio** v. 17, p. 49-55, 1988.
- Marengo, J.A.; Nobre, C.A. General characteristics and variability of climate in the Amazon Basin and its links to the global climate system. In: E, McClain, R.L. Victoria, e J.E. Richey (Eds.). **The Biogeochemistry of the Amazon Basin**. Nova Iorque: Oxford University Press, p. 17-41, 2001.
- Mesquita, R.C.G.; Ickes, K.; Ganade, G.; Williamson, G.B. Alternative successional pathways in the Amazon Basin. **Journal of Ecology**, v.89, p. 528-537, 2001.
- Moran, E.F. **Developing the Amazon. Bloomington**. Indiana, EUA: Indiana University Press. 1981.
- Moran, E.F. Deforestation and land use in the Brazilian Amazon. **Human Ecology**, v. 21, n.1, p. 1-21, 1993.
- Moran, E.F.; Brondizio, E.; Mausel, P.; Wu, Y.. Integrating Amazonian vegetation, land-use, and satellite data. **Bioscience**, v. 44, n. 5, p. 329-338, 1994.
- Nepstad, D.C.; Klink, C.A.; Uhl, C.; Vieira, I.C.; Lefebvre, P.; Pedlowski, M.; Matricardi, E.; Negreiros, G.; Brown, I.F.; Amaral, E.; Homma, A.; Walker, R. Land-use in Amazonia and the Cerrado of Brazil. *Ciência e Cultura* **Journal of the Brazilian Association for the Advancement of Science**, v. 49, n. 1/2, p.73-86. 1997.
- Oliveira-Filho, A.T.; Ratter, J.A. Vegetation physiognomies and woody flora of the cerrado biome. In: P.S. Oliveira, e R.J. Marquis (Eds.). **The Cerrados of Brazil**. Nova Iorque: Columbia University Press, 2002. p. 91-120.

- Roberts, D.A.; Keller, M.; Soares, J.V. Studies of land-cover, land-use, and biophysical properties of vegetation in the large Scale Biosphere Atmosphere experiment in Amazônia. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p.377-388, 2003.
- Salati, E. The climatology and hydrology of Amazonia. In: G.T. Prance, e T.E. Lovejoy (Eds.). **Amazonia**. Nova Iorque: Pergamon, 1985. p. 18-48.
- Schroeder, P.E.; Winjum, J.K. Assessing Brazil's carbon budget: II. Biotic fluxes and net carbon balance. **Forest Ecology and Management**, v. 75, p. 87-99, 1995.
- Shimabukuro, Y.E. **Shade images derived from linear mixing models of multispectral measurements of forested areas**. Doctor of Philosophy Dissertation. Colorado State University, Fort Collins, CO, 1987.
- Shimabukuro, Y.E., Smith, J.A. The Least-Squares Mixing Models to Generate Fraction Images Derived From Remote Sensing Multispectral Data, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, p. 16-20, 1991.
- 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).
- Shimabukuro, Y.E., Batista, G.T, Mello, E.M.K., Moreira, J.C., Duarte, V. Using shade fraction image segmentation to evaluate deforestation in Landsat Thematic Mapper images of the Amazon region. **International Journal of Remote Sensing**, v.19, n. 3, p.535-541, 1998.
- Silva, J.M.C.; Bates, J.M. Biogeographic patterns and conservation in the South American cerrado: a tropical savanna hotspot. **BioScience**, v. 52, n.3, p. 225-233. 2002.
- Skole, D.; Tucker, C. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: Satellite data from 1978 to 1988. **Science**, v. 260, p. 1905– 1910, 1993.
- Skole, D.L.; Chomentowski, W.H.; Salas, W.A.; Nobre, A.D. Physical and human dimensions of deforestation in Amazonia. **Bioscience**, v. 44, n. 5, p.14-322, 1994.
- Stone, T.A. ;Schlesinger, P.; Houghton, R.A.; Woodwell, G.M. A map of the vegetation of South America based on satellite imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 60, p. 541-551, 1994.
- Strahler, A.H.; Moody, A.; Lambin, E. **MODIS Land cover product: Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD)**. v. Version 3.0, 1995. Disponível em: <modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/pdf/MOD\_14\_40.PDF>. Acesso em: 7 nov. 2002.
- Strahler, A.; Muchoney, D.; Borak, J.; Friedl, M.; Gopal, S.; Lambin, E.; Moody, A. **MODIS land cover product algorithm theoretical basis document**. versão 5.0, p.

1-72, may 1999. Disponível em: <modis.gsfc.nasa.gov/data/atdb/atdb\_mod12.pdf>. Acesso em: 7 nov. 2002.

Tardin, A.T.; Lee, D.C.L.; Santos, R.J.R.; Osis, O.R.; Barbosa, M.P.S.; Moreira, M.L., Pereira, M.T.; Silva, D.; Santos Filho, C.P. **Subprojeto Desmatamento**. São José dos Campos: IBDF/CNPQ-INPE, 1980.

Townshend, J.R.G.; Justice, C.O. Selecting the spatial resolution of satellite sensors required for global monitoring of land transformations. **International Journal of Remote Sensing**, v.92, p. 187–236, 1988.

Tucker, C. J.; Townshend, J. R.G.; Goff, T. E. African land-cover classification using satellite data. **Science** v.227, p. 369–375, 1985.

van Leeuwen, W.; Huete, A.R.; Laing, T.W. MODIS vegetation index compositing approach: a prototype with AVHRR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 69, p. 264-280, 1999.

Uhl, C. Factors controlling succession following slash-and-burn agriculture in Amazonia. **Journal of Ecology**, v. 75, n. 2, p. 377-407. 1987.

Uhl, C.; Buschbacher, R.; Serrão, E.A.S. Abandoned pastures in eastern Amazonia. I. Patterns of plant succession. **Journal of Ecology**, v. 76, n. 3, p. 663-681, 1988.

Wolfe, R.E.; Nishihama, M.; Fleig, A.J.; Kuyper, J.A.; Roy, D.P.; Storey, J.C.; Patt, F.S. Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of MODIS land science. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 31–49, 2002.

Wood, C.H. Land use and deforestation in the Amazon. In: C.H. Wood, e R. Porro (Eds.). **Deforestation and Land Use in the Amazon**. Gainesville, Florida: University Press of Florida. 2002. p. 1-38.

Zhan, X.; Sohlberg, R.A.; Townshend, J.R.G.; DiMiceli, C.; Carroll, M.L.; Eastman, J.C.; Hansen, M.C.; DeFries, R.S. Detection of land cover changes using MODIS 250 m data. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 336-350, Nov. 2002.