VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota

Sexta Reunion Nacional SELPER-Mexico

Latinoamérica Evaluada desde el Espacio

Puerto Vallarta, México

Memorias

Noviembre, 1995

MAPEAMIENTO DE ETAPAS DE REGENERACIÓN Y SU RELACIÓN CON DATOS DE RADAR

Corina da Costa Freitas Yanasse
Sidnei J. S. Sant'Anna
Alejandro C. Frery
Tatiana M. Kuplich
Luciano V. Dutra
INPE — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
DPI — Divisão de Processamento de Imagens
Avenida dos Astronautas, 1758
12227-010 São José dos Campos
SP - Brasil
{corina;sidnei;frery;tatiana;dutra}@dpi.inpe.br

ABSTRACT

One of the major objectives of environmental studies has been the understanding of the impact that the secondary succession has on the regional carbon budget, and its consequences in the carbon storage in the atmosphere. The use of remote sensing data can contribute to the achievement of this objective, due to the possibility of acquiring geophysical information for extended areas in a regular basis. In particular, in the last decades, radar data have been widely used in the studies of tropical forests, due to its capability of obtaining data almost independently of weather conditions. The aim of this paper is to present a methodology for the identification and characterization of the age of tropical secondary forests in a test site near Tapajós National Forest using a time series of LANDSAT/TM images, and to relate the stages of secondary forest with radar backscatter. Those images were co-registered, segmented and classified into several classes of land cover, and the resulting thematic images were superposed in a GIS system using logical (Boolean) operations to create an age map. Using this age map as a mask over several derived-from-optical and radar images, the relationship between the stages of secondary forest and the images was examined.

1 INTRODUCCIÓN

La Reserva Forestal de Tapajós es un área administrada por el Instituto Brasileño de Medio Ambiente y Recursos Renovables (IBAMA), localizada cerca de la ciudad de Santarém, estado de Pará, entre los paralelos 02°40′ a 04°10′ (sur) y los meridianos 54°45′ a 55°00′ (oeste). Esta reserva tiene por fronteras una línea que une la autopista Santarém-Cuiabá km 50 con el punto de latitud 02°40′ S (al norte), los ríos Santa Cruz y Cupari (al sur) y el río Tapajós (al oeste). La Figura 1 muestra la localización de la reserva forestal de Tapajós.

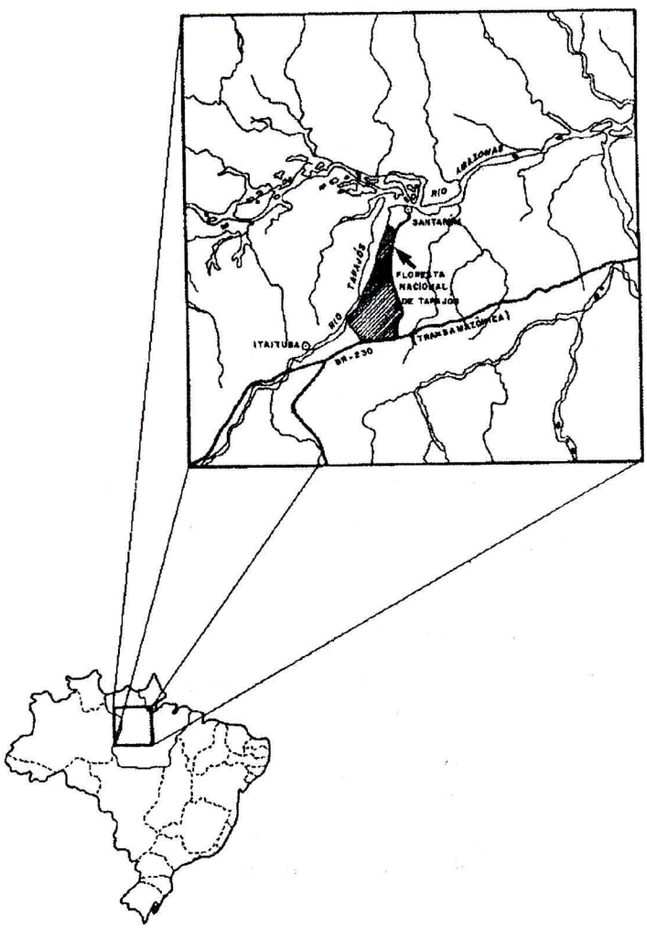

Figura 1: Localización de la Reserva Forestal de Tapajós.

La vegetación tropical brasileña ha sufrido alteraciones dinámicas en las últimas décadas debido, entre otros factores, a perturbaciones humanas asociadas a la instalación de haciendas para explotación agropecuaria y a la implantación de varios proyectos de asentamiento agrícola.

Muchas de estas áreas fueron abandonadas, y su cobertura vegetal actual muestra señales de regeneración por sucesión secundaria, siendo poco lo que se sabe acerca de la extensión, localización y grado de regeneración de estas áreas. El estudio del estado de vegetación secundaria se justifica por el impacto que estas áreas tienen en el balance regional de carbono, que puede tener consecuencias en alteraciones globales del clima y en el almacenamiento de carbono en la atmósfera.

Este trabajo —parte del cual fue presentada en Sant'Anna et al. (1995)— muestra cómo pueden usarse secuencias temporales de imágenes LANDSAT/TM para la obtención de un mapa de etapas de regeneración. Usando este mapa como una máscara sobre imágenes generadas a partir de datos ópticos (imagen de NDVI

derivada de la imagen TM de 1992) y de radar (ERS-1, JERS-1 y SAREX), se verifica la relación existente entre edades de regeneración y estos datos de teledetección.

La metodología presentada se describe en las secciones subsiguientes, siendo que los resultados principales fueron obtenidos en un área aproximadamente cuadrada de alrededor de 12.5 km de lado. Las coordenadas geográficas de su diagonal son (03°03′23″S, 55°01′45″W) y (03°10′08″S, 55°55′00″W).

2 DATOS Y METODOLOGÍA

Los siguientes datos y plataformas computacionales fueron empleados en este estudio:

- una carta topográfica en escala 1:250000;
- imágenes anuales LANDSAT/TM, bandas 3, 4 y 5, correspondientes al período 1986–1992;
- imagen ERS-1 de 18/12/92, banda C, polarización VV, resolución espacial de 25m, *pixel spacing* de 12.5m y ángulo de incidencia de 23°;
- imagen JERS-1 de 26/6/93, banda L, polarización HH, resolución espacial de 18m, *pixel spacing* de 12.5m y ángulo de incidencia de 38°;
- imagen SAREX de 29/4/92, banda C, polarización HH, resolución espacial de 6m, *pixel spacing* de 4.31m en *azimut* y de 4m en *range*, ángulo de incidencia de 43.5°.
- Sistema de Processamento de Dados Georeferenciados (*SPRING*), en desarrollo en la DPI/INPE, empleado para registrar las imágenes y para derivar el mapa de edades de regeneración.
- Interactive Data Language (*IDL*), plataforma utilizada para el desarrollo de los programas que separan las clases, realizan las erosiones y efectúan las mediciones.

2.1 Registro

El primer paso de este trabajo consistió en registrar la imagen TM de 1991 (banda 3) con la carta topográfica. La resolución espacial resultante fue de 25 × 25m. Las restantes imágenes fueron registradas tomando la de 1991 (banda 3) como referencia, y la misma resolución espacial. El número de puntos de control empleado en este proceso de registro varió de siete a dieciseis, mientras que los errores variaron de 8.9m a 18.87m.

Para compatibilizar la resolución espacial de la imagen SAREX con la de los otros datos fue realizado um preprocesamiento de degradación espacial, además de haber sido previamente corregido su patrón de antena (através de un filtro de media móvil) y haber sido reproyectada (conversión *slant-to-ground range*). Esa degradación espacial consistió en reemplazar regiones de 3 × 5 pixels (en las direcciones de *range* y *azimut*, respectivamente) de la imagen original por la media observada en ese rectágulo.

La Fig. 2 muestra la primera componente principal (después de ecualizar el histograma) del área de estudio, obtenida procesando las bandas 3, 4 y 5 de la imagen TM de 1992. Esta región de la imagen tiene 418 × 416 pixels, y en la misma puede apreciarse la gran variedad de clases presentes en el área considerada.

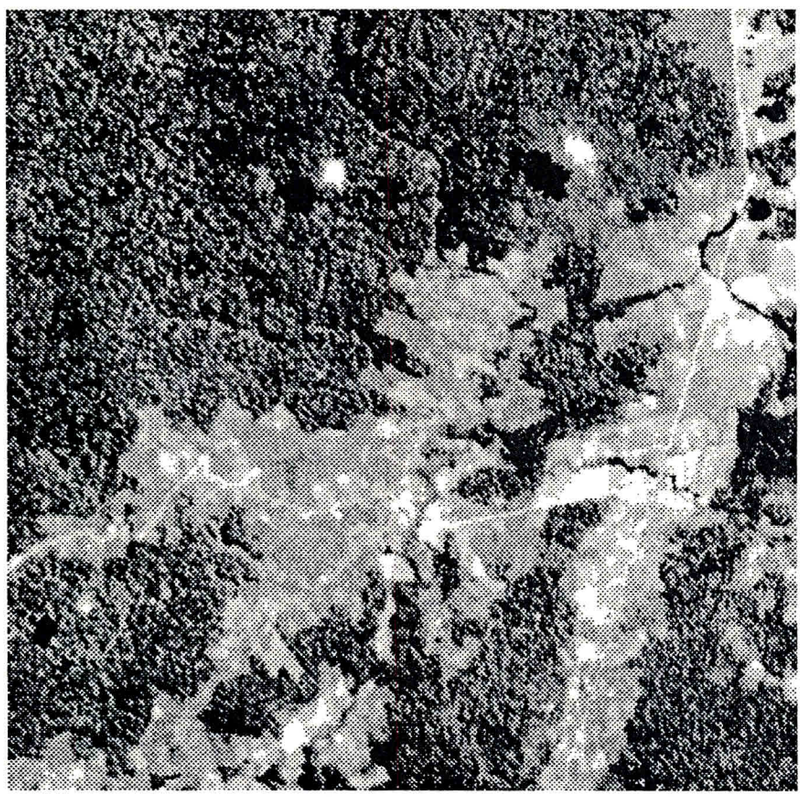

Figura 2: Primera componente principal de las bandas 3, 4, y 5 del área de estudio (imagen TM de 1992).

2.2 Segmentación

El proceso de segmentación usado fue un procedimiento de crecimiento de regiones, que consiste en la agregación de pixels con propiedades similares en conjuntos denominados *segmentos* que, a su vez, son definidos por sus bordes. Fue utilizado el algoritmo propuesto en Erthat et al. (1991) para extraer el conjunto de bordes adecuado. Este algoritmo considera que una *región* es un conjunto de coordenadas conexas espacialmente, cuyas radiometrías exhiben algún tipo de homogeneidad (por ejemplo, en relación a sus medias, varianzas, perímetro, área, etc.). El uso de esta técnica requiere la definición de dos tipos de umbrales:

umbral de similaridad: un valor por debajo del cual dos regiones son consideradas *similares* y, entonces, agrupadas en una nueva región; este umbral se define através de la mínima distancia Euclideana entre las medias de las regiones consideradas; y

umbral de área: el número mínimo de pixels necesario para definir una región, que para este trabajo fue fijado en 10.

El resultado de la aplicación de este algoritmo a una imagen produce una representación simbólica como salida, esto es, genera una lista de regiones cuyos atributos, una lista de arcos (bordes entre dos regiones) con sus atributos (fuerza, etc.) y una lista de nodos (puntos donde tres o más regiones se encuentran). Esta técnica fue aplicada separadamente a cada una de las siete imágenes de tres bandas, correspondientes a las fechas ya mencionadas (1986–1992).

2.3 Clasificación de Segmentos

Este paso identifica y rotula segmentos com propiedades similares, através de la aplicación de un algoritmo de agrupamiento llamado *ISOSEG* (Erthal et al., 1991), que es un tipo de clasificador de regiones.

Esta clasificación fue realizada en tres etapas:

Extracción de atributos: fueron calculados (considerando las tres bandas) el vector de medias y la matriz de covarianza de cada región previamente definida en el proceso de segmentación.

Identificación y coloreado: fueron identificados segmentos similares, y les fue atribuído un único color por el algoritmo de agrupamiento. En esta etapa se usa un umbral de aceptación, definido através de la máxima distancia de Mahalanobis entre regiones y del número de agrupamientos a ser detectados por el algoritmo.

Rotulado de geoclases: las regiones identificadas y coloreadas fueron asociadas a geoclases previamente definidas.

Este procedimiento fue aplicado a las siete imágenes segmentadas generándose, de esta manera, siete imágenes temáticas. En esta fase de clasificación fueron usadas siete geoclases, siendo que seis están asociadas a uso de la tierra y vegetación, ordenadas de la siguiente manera:

1. vegetación primaria,
2. vegetación secundaria,
3. vegetación secundaria nueva,
4. pastoreo y suelo expuesto,
5. suelo expuesto,
6. río, y
7. una geoclase sin información (nubes, sombras, etc.).

Para cada coordenada de la fecha i (como son considerados siete años tenemos que $1 \leq i \leq 7$) se denota el valor clasificado $x_i \in \{c_1, \ldots, c_7\}$, donde c_j es la j-ésima geoclase. Por ejemplo, $x_3 = c_1$ significa que el pixel considerado fue clasificado como vegetación primaria (c_1) en 1998 ($i = 3$).

Los resultados de evaluar la clasificación de la imagen de 1992 se encuentran en Hernandes et al. (1994) y Sant'Anna et al. (1995).

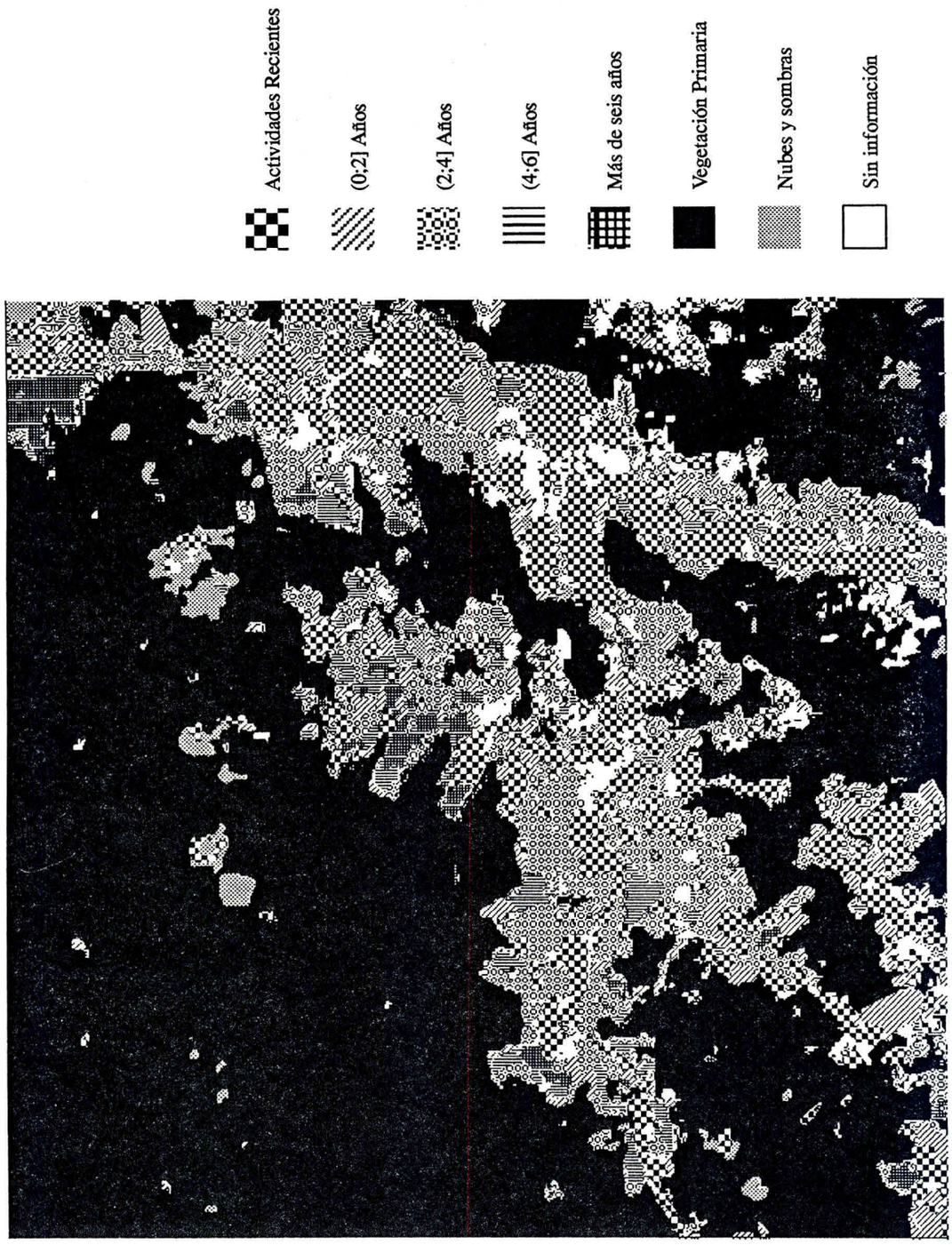

Figura 3: Mapa de etapas de regeneración.

2.4 Mapeamiento de las etapas de regeneración

Las imágenes temáticas obtenidas fueron combinadas puntualmente usando operaciones Booleanas, formándose así un mapa temático que refleja áreas asociadas a diferentes edades. Las clases de interés, en este mapa, fueron definidas como áreas con actividades recientes (suelo expuesto o cultivos agrícolas en fase inicial), áreas con diferentes etapas de regeneración secundaria (variando de uno a seis años de regeneración), vegetación secundaria antigua (con más de seis años de edad) y vegetación primaria.

Considere el siguiente ejemplo: $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = c_1$, $x_5 = c_5$ y $x_6 = x_7 = c_2$; este pixel será asociado a la clase que presenta dos años de edad de regeneración. Las inconsistencias tales como $x_i = c_5$, $x_{i+1} = c_1$ (esto es, suelo expuesto seguido de vegetación primaria) fueron adecuadamente tratadas por el conjunto de reglas lógicas, y reaprovechadas por un procedimiento de minimización de errores o atribuídas a una clase sin información si consideradas irrecuperables.

Dado que la determinación exacta de etapas de regeneración es difícil, fue realizado un agrupamiento de clases con edades próximas (uno y dos años, tres y cuatro años, cinco y seis años) para reducir errores de clasificación.

2.5 Relación entre el mapa de etapas de regeneración y datos de teledetección

El mapa de etapas de regeneración fue usado como una máscara sobre imágenes de índice de diferencia de vegetación normalizado (NDVI: "normalized difference vegetation index") y de radar. La imagen de NDVI fue calculada sobre los datos TM de 1992, y las imágenes de radar son de los satélites ERS-1, JERS-1 y de la campaña SAREX. La información temática del mapa fue utilizada para calcular las medias de NDVIs de la imagen TM de 1992, y varias otras medidas sobre los retornos de radar asociados a cada clase. Antes de utilizar el mapa, para separar mediciones por clases, le fue aplicada una erosión por una ventana cuadrada de tres pixels de lado para reducir el efecto de los bordes entre las diferentes clases y, con ello, algunos de los posibles errores de clasificación. Así siendo, solamente fueron consideradas aquellas coordenadas cuyos ocho vecinos más próximos pertenecen a la misma clase.

3 RESULTADOS

En la Fig. 3 se muestra el mapa de etapas de regeneración resultante del procedimiento descripto en la Sección 2.4.

La edad máxima de regeneración cuya evolución pudo ser acompañada desde su inicio corresponde a seis años, ya que el intervalo temporal total de las imágenes estudiadas es de siete años (1986–1992). Los cuatro primeros puntos de las Figs. 4, 5 y 6 que se muestran a seguir (`ActRec`, `(0,2]`, `(2,4]`, `(4,6]`) están asociados a regeneraciones acompañadas desde sus orígenes, y están unidos por líneas sólidas; cada intervalo entre ellos corresponde a dos años. El quinto punto (`>6`) está asociado a áreas de vegetación secundaria cuya evolución no pudo ser acompañada desde su inicio con el conjunto de imágenes disponibles. A este punto están asociadas áreas de vegetación secundaria con edades superiores a seis años. Tomándose en cuenta que la vegetación primaria tendría un número "infinito" de años, el último punto (`VegPrim`) está asociado al estado de madurez de la vegetación. Estos últimos puntos están unidos por una línea de trazos, señalando la incerteza del comportamiento de la curva a partir del cuarto punto. Es importante notar que los espacios utilizados entre los puntos dibujados

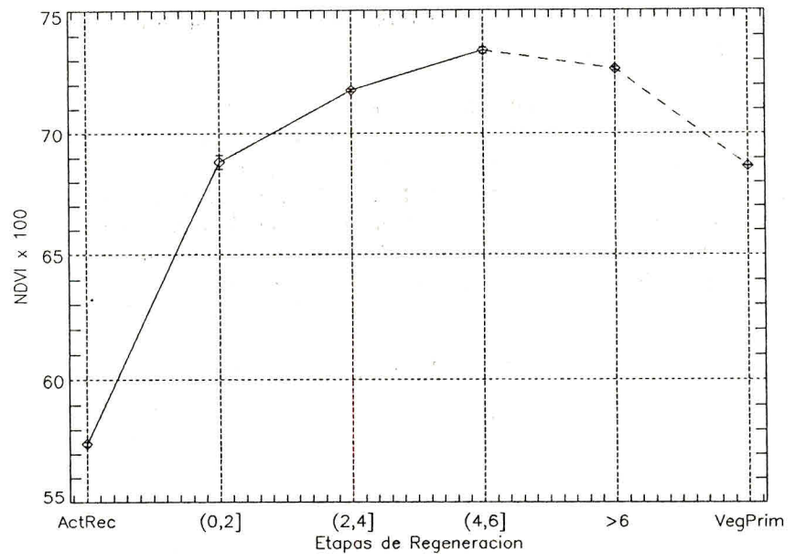

Figura 4: NDVI por classe, basado en la imagen TM de 1992.

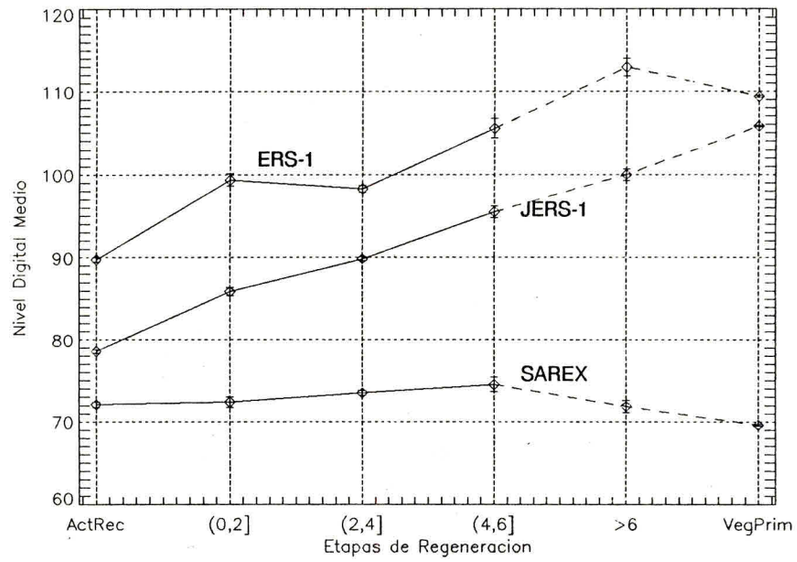

Figura 5: Niveles digitales medios por classe para las imágenes ERS-1, JERS-1 y SAREX.

en la escala horizontal no reflejan linealmente el pasaje de tiempo, aunque las etapas de regeneración estén dibujadas a intervalos igualmente espaciados.

La imagen de NDVI fue derivada a partir de la imagen TM de 1992 (utilizando las bandas 3 y 4), y sobre ella fueron calculados los valores medios asociados a cada clase definida en el mapa de edades. La relación entre etapas de regeneración y NDVI se expone en la Fig. 4, donde las barras de error son iguales a un desvío padrón. En esa figura puede observarse que la curva del NDVI sigue el mismo comportamiento que el de varios cultivos agrícolas en etapa de desarrollo. Este índice es creciente hasta que la regeneración esté, por lo menos, en el quinto año de edad (cuarto punto de la figura). A partir de un cierto momento, ese valor comienza a decrecer hasta alcanzar la respuesta de la vegetación primaria. Este decrecimiento puede deberse a la heterogeneidad de las copas de los árboles, evidenciada en la imagen por el aparecimiento de árboles dominantes y sus sombras.

Fueron calculados las medias y los coeficientes de variación de los valores digitales de las imágenes de radar, como función de las etapas de regeneración. Los resultados se muestran en las Figs. 5 y 6, respectivamente.

En la Fig. 5 puede verificarse que los datos provenientes de los satélites ERS-1 y JERS-1 son sensibles a las etapas de regeneración. Esa sensibilidad, para el caso de ERS-1, se manifiesta através de una respuesta aproximadamente constante entre uno y cuatro años de edad de regeneración, pero diferente de la respuesta observada en áreas asociadas a actividades recientes. A partir de cuatro años de edad se verifica una respuesta creciente para los datos de este sensor, aunque para vegetación primaria se observa una disminución en la respuesta media, talvez debida al aparecimiento de textura. La relación observada para los datos JERS-1 es que el crecimiento de la respuesta se sostiene hasta, por lo menos, seis años de edad. Probablemente el retorno captado por el sensor del satélite ERS-1 se sature (deje de crecer) antes que el del JERS-1, según se desprende de la Fig. 5. El sensor aerotransportado (SAREX) no muestra una relación fuerte entre etapas de regeneración y media de valores digitales. En Yanasse et al. (1993) fue tabién mostrado que la media de los niveles digitales no discrimina áreas de vegetación primaria de áreas de vegetación secundaria.

Varios de los valores medios mostrados en la Fig. 5 anterior son estadísticamente diferentes a niveles significativos (ver los desvíos padrones asociados a cada media). Es importante resaltar que estos valores fueron calculadas usando un número muy grande de pixels, factor que puede limitar en la práctica la discriminación de edades de regeneración usando niveles digitales medios de datos de radar.

Cabe destacar que los sensores mencionados tienen diferentes capacidades de penetración en la vegetación, siendo que la respuesta de ERS-1 y SAREX (banda C) es prioritariamente sensible a la superficie de las copas de los árboles. En contrapartida, la respuesta de JERS-1 (banda L) es también sensible a estructuras internas de la vegetación dado que su señal tiene mayor poder de penetración. Otros factores importantes en la capacidad de discriminación de los diferentes sensores empleados para este trabajo son el nivel de adquisición de los datos (el sensor aerotransportado tiene mayor resolución espacial que los orbitales), la polarización y el ángulo de incidencia.

En la Fig. 6 se muestran los coeficientes de variación, por clase, según medidos en las imágenes de radar mencionadas anteriormente. Puede observarse que los coeficientes de variación de los datos JERS-1 presentan una tendencia decreciente con las edades de regeneración. Esta tendencia, de modo menos acentuado, puede también observarse en los datos ERS-1. Es interesante observar que, para los datos SAREX, el coeficiente de variación es aproximadamente constante para las diferentes edades de regeneración, creciendo para vegetación primaria. En Yanasse et al. (1993) también se verificó que el coeficiente de variación, en las imágenes SAREX, es mayor para vegetación primaria que para vegetación secundaria.

Es importante notar que la poca variabilidad del coeficiente de variación en relación a las edades de regeneración observada en la imagen SAREX empleada en este trabajo puede deberse a la degradación sufrida por esta imagen (ver Sección 2.1). Tal procesamiento redujo considerablemente el contenido de información de esta imagen, cuando se lo compara con el observado en Yanasse et al. (1993); aún así, el coeficiente de variación se muestra como una medida sensible a la separación entre vegetación primaria y otras clases. Esa reducción de información se debe, principalmente, a que la discriminación por edades de regeneración (en la imagen SAREX) puede realizarse através de la textura observada y, dado que la textura influye directamente en las varianzas observadas y que éstas se reducen con la aplicación de medias locales, al degradar la imagen se pierde buena parte de la información textural.

4 CONCLUSIONES Y EXTENSIONES

El uso de una secuencia temporal de imágenes ópticas se mostró adecuado para la determinación y el acompañamiento de la evolución temporal de vegetación secundaria en el Amazonas. Esta potencialidad puede ser explotada, desde que sea posible construir esa secuencia completa con datos de alta calidad (poca cobertura de nubes, etc.).

La verificación de la precisión global de los resultados presentados no es una tarea simple ya que, entre otras razones, es muy difícil obtener informaciones precisas sobre la historia de las áreas. Aún así, se observa una relación entre las etapas de regeneración y el NDVI y las las mediciones de radar.

Aparentemente, los niveles digitales medios de los datos JERS-1 (banda L) son más sensibles a las edades de regeneración que los de ERS-1 y SAREX (banda C). Estos niveles son aproximadamente constantes para los datos SAREX, lo que muestra una incapacidad de discriminar las edades de regeneración con esta medida.

Para datos SAREX, el coeficiente de variación en vegetación primaria es mayor que la misma medida en áreas de regeneración. Ésto puede deberse a que esos datos presentan una textura más grosera en áreas de vegetación primaria debido al aparecimiento de sombras asociadas a las copas de los árboles emergentes. Esa textura se refleja en mayor varianza con respecto a la media, aumentando así el coeficiente de variación. Para los otros dos sensores la ausencia de tal crecimiento del coeficiente de variación en relación a las edades de regeneración se debe a que los desvíos padrones de los datos crecen en tasas inferiores a las de las medias. Este comportamiento diferenciado entre sensores puede deberse a las características intrínsecas de cada sensor, relación ésta que merece estudios más detallados.

El presente trabajo será actualizado a medida que sean adquiridas imágenes correspondientes a fechas posteriores a las aquí usadas, lo que necesariamente acarreará la necesidad de sofisticar el conjunto de reglas lógicas (para el trabajo aquí presentado, fueron necesarias más de mil reglas para tomar en cuenta todas las posibilidades y minimizar la pérdida de información).

La misma metodología podrá ser aplicada a otras regiones, para verificar la dependencia del comportamiento de las mediciones (NDVI y estadísticas sobre datos de radar) con la localización geográfica, la topografía, el tipo de suelo, la historia de uso, etc.

Las herramientas computacionales desarrolladas para este trabajo permiten el acompañamiento individual temporal de cualquier área de interés.

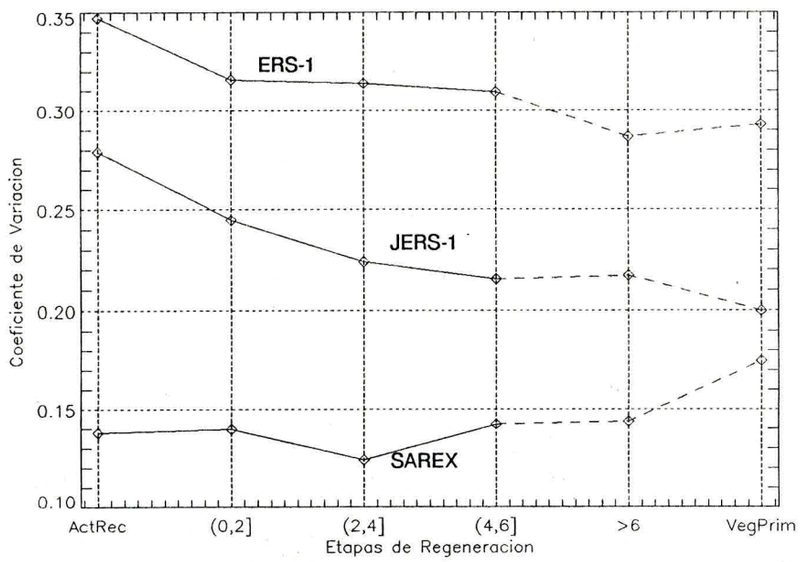

Figura 6: Coeficientes de variación por classe para las imágenes ERS-1, JERS-1 y SAREX.

Este estudio continuará con el análisis de la relación entre etapas de regeneración, la biomasa de vegetación secundarias, y el retorno de sensores de radar con diversas bandas y polarizaciones. Este retorno será usado en forma directa o através de medidas estadísticas y texturales sobre él calculadas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las fructíferas conversaciones mantenidas con Yosio Shimabukuro y Dalton Morrison Valeriano (INPE–DSR). Este trabajo fue parcialmente financiado con recursos de FAPESP (Projecto 91/3532-2) y CNPq (Projecto GEOTEC 680.061-94-0).

REFERENCIAS

Erthal, G.J.; L.M.G. Fonseca; L.S. Bins; F.R.D. Velasco; A.M.V. Monteiro, 1991, Um sistema de segmentação e classificação de imagens de satélite. In: Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens, 4., São Paulo, SP, 14–17 Jul. 1991. *Anais.* SP, EPUSP, v. 1, p. 237–240.

Hernandez Filho, P.; C.C.F. Yanasse; S.J.S. Sant'Anna; T.M. Kuplich; P.P. Santos; L.V. Dutra; A.C. Frery; P.M. Oliveira; R.J.D. Cruz; V.R.G. Azevedo, 1994, *Análise dos dados TM: floresta nacional de Tapajós – 1994.* São José dos Campos, INPE. (INPE-5614-RPQ/670).

Sant'Anna, S.J.S.; C.C.F. Yanasse; P. Hernandez Filho; L.V. Dutra; T. Mora Kuplich; A.C. Frery; P.P. Santos, 1995, Secondary forest age mapping in Amazônia using multi-temporal LANDSAT/TM imagery. In: 1995 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Italy, Jul. 10–14. *Quantitative remote sensing for science and applications.* Florence, Italy, IEEE, v. 1, p. 323–325.

Yanasse, C.C.F.; A.C. Frery; S.J.S. Sant'Anna; P. Hernandez Filho; L.V. Dutra, 1994, Statistical analysis of SAREX data over Tapajós – Brazil. In: SAREX-92 South American Radar Experiment, Paris, 6–8 Dec. 1993. *Workshop Proceedings.* Paris, ESA, p. 25–40.