
EL PROCESO DE QUEMA DE BIOMASA DE BOSQUE TROPICAL Y DE SABANAS EN LA AMAZONIA BRASILEIRA: EXPERIENCIAS DE MONITOREO CON DATOS ÓPTICOS Y DE MICROONDAS

João Roberto dos Santos ¹, María Silvia Pardi Lacruz ¹, Luciana Spinelli de Araujo ¹ y Haron Abraham Magalhães Xaud ²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Av. dos Astronautas 1758, 12.227-010 São José dos Campos - Brasil

² Centro de Pesquisas Agro-Florestais de Roraima – CPAF/EMBRAPA
BR 174 Km 08 Distrito Industrial 69.301-970 Boa Vista, RR - Brasil

Resumen: El presente trabajo muestra experiencias en el uso de imágenes multisensores (TM/Landsat y JERS-1) para el inventario de biomasa de formaciones forestales y de sabanas, y como herramienta del monitoreo de las quemaduras que ocurren en estos tipos de vegetación en la región Amazónica. Se describen procedimientos metodológicos de adquisición de datos de biomasa vegetal de porte forestal y de las sabanas. Estos datos son relacionados con las informaciones espectro-texturales de las imágenes de satélite, con la finalidad de elaborar la cartografía de la biomasa por tipología vegetal. El efecto de las quemaduras y el nivel de intensidad de la pérdida parcial o total de biomasa está siendo investigado y descrito a partir de la verificación muestral en campo y en las imágenes ópticas o de radar. La posibilidad de un inventario sinóptico de la antropización de la tipología forestal, la cual viene acompañada de la acción de la deforestación, renovación de pastos implantados o naturales con el proceso tradicional de quemadura, es demostrado en áreas de los estados Mato Grosso, Rondônia, Roraima y Acre, que forman parte de la Amazonia brasileira.

Palabras claves: biomasa, quemaduras, bosque, sabana, Amazonia, percepción remota.

Abstract: *This study presents the experiences on the use of TM/Landsat and JERS-1 images for the inventory of areas covered by tropical rainforest and savanna in Brazilian Amazonia, within sections affected by burning, that is a common practice in the land occupation. Feature extraction techniques such as image segmentation and modelling by linear mixture analysis are presented to show the capacity to discriminate those areas covered by natural vegetation, where land use activities started using the old-fashioned slash-and-burn practices. Methods for field surveys to estimate the biomass of forest and savannas are described, as well as the procedure used for areas affected by fire, in order to define the intensity of burning by the analysis of physiognomic-structural features of vegetation.*

Key words: *biomass, burned areas, forest, savanna, Amazonia, remote sensing,*

INTRODUCCIÓN

En general, la caracterización de áreas deforestadas y aquellas sobre la acción de focos de incendios han sido efectivamente monitoreadas con datos del sensor AVHRR/NOAA, de resolución nominal de 1 Km x 1 Km. Las imágenes adquiridas por este sensor, a través de una base de datos georreferenciada, permiten la localización adecuada de esta acción antrópica, facilitando el proceso de fiscalización por parte de los órganos ambientalistas, gubernamentales o privados. Sin embargo, la necesidad específica de delimitar y cuantificar el área afectada por el fuego y la intensidad del daño en los diferentes tipos de vegetación, hacen de este sensor AVHRR una herramienta inapropiada para tal fin, debido al tamaño del pixel y su capacidad de saturación en respuesta a áreas deforestadas y/o quemadas. En este contexto, sensores ópticos y de microondas de mejor resolución espacial (~20 a 30 metros) constituyen una fuente primaria de datos para establecer con exactitud la dimensión del área afectada por la quema, bien como permitir un análisis de la biomasa residual por tipología forestal o de sabana. Así, el presente trabajo tiene como objetivo discutir sobre el estado del arte de la recolección de datos de biomasa en inventario forestal; la forma de tratamiento de los datos ópticos y de radar en asociación con los datos de la cobertura vegetal y, por último, la potencialidad de estos sensores en identificar el proceso de quema de esta biomasa, bien sea en áreas de bosque primario, secundario o de sabanas.

ÁREA DE ESTUDIO

La aplicabilidad de las técnicas de percepción remota en el área forestal y en la detección de quemadas, integrando informaciones de sensores ópticos (TM/Landsat) y de radar (JERS-1), está siendo estudiada en diversas áreas de la Amazonia brasilera. El presente trabajo muestra algunos ejemplos (Figura 1) de esta aplicabilidad en áreas de contacto bosque - sabana en Roraima (Alto Alegre - Mucajal) y Mato Grosso (Comodoro); en áreas con dominio de bosque tropical en Rondônia (Jarú - Jiparaná - Vilhena) y bosque tropical abierto con presencia de bambú (*Guadua Weberbaueri Pilger*) en el estado Acre.

DESCRIPCIÓN SUCINTA DE LOS PRODUCTOS ORBITALES

La base para la elaboración de la cartografía forestal y de la dinámica del uso del suelo en la Amazonia, en especial la que se refiere a los cambios debidos a los procesos de tala y quema, los cuales constituyen una práctica tradicional de limpieza del terreno en esta región, ha sido los datos TM/Landsat, generalmente con las tres bandas ópticas del rojo (0,63 - 0,69 μ m), del infrarrojo próximo (0,76 - 0,90 μ m) y del infrarrojo medio (1,55 - 1,75 μ m). La combinación de estas bandas espectrales, donde las características de la cobertura vegetal, como capacidad clorofílica, estructura y contenido hídrico de la hoja, son parámetros que contribuyen en la discriminación de los diferentes paisajes presentes en las imágenes de satélite.

En ciertos períodos del año, las áreas tropicales presentan un elevado porcentaje de cobertura de nubes, lo que dificulta la adquisición de imágenes de alta resolución con sensores ópticos. Para subsanar esta deficiencia, están siendo utilizadas imágenes de diferentes sensores, entre los cuales se destaca el radar instalado a bordo del JERS-1, de banda L ($\lambda = 23$ cm) en polarización HH, con pixel nominal de 12,5 m y ángulo de incidencia de 33° para estudios forestales (Rosenqvist, 1997).

METODOLOGÍA Y RESULTADOS DEL USO DE MULTISENORES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA Y DETECCIÓN DE ÁREAS QUEMADAS

Forma de recolección de los datos de campo

A partir de una fase pre-interpretativa de las imágenes ópticas y/o de radar, con una definición muestral de las áreas de entrenamiento representativas para la calibración de las informaciones, dentro de un margen significativo de costo/beneficio/precisión aceptable, se han realizado trabajos de campo con el objetivo de estimar la biomasa forestal y/o de sabana y realizar una evaluación

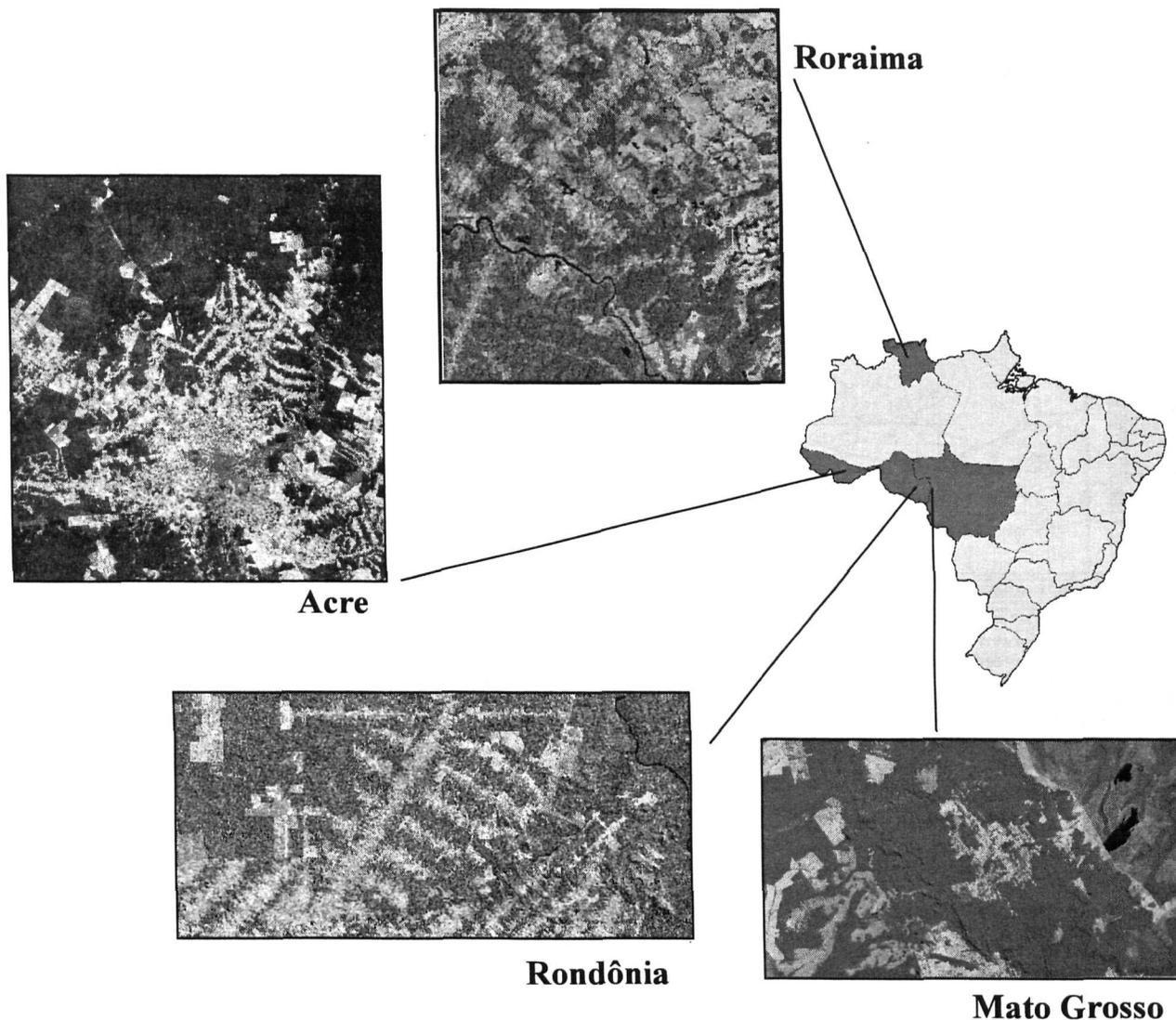


Figura 1. Sectores de imágenes TM/Landsat ilustrando la localización de las áreas de estudio.

cualitativa de la incidencia y el efecto de la quema sobre la cobertura vegetal estudiada. La localización geográfica de cada una de las parcelas consideradas en los trabajos de campo se obtuvo a través de la utilización de un GPS de alta precisión.

La metodología adoptada para la realización del inventario forestal de parcelas de bosque primario de 2.500 m² a 5.000 m² contempla la adquisición de las medidas de DAP, altura total (H_t), altura comercial (H_c), porcentaje de cubrimiento de las copas, posición de los individuos dentro de las parcelas y la identificación botánica, considerando todos los individuos con DAP mayor o igual que 10 cm. En el caso de parcelas con incidencia de fuego, se realizaron adicionalmente sub-muestras de los individuos afectados con DAP entre 5 y 10 cm, lo que ha permitido conocer la intensidad de la quema en los diferentes estratos del bosque. Con las medidas colectadas en los trabajos de campo se elaboran perfi-

les de la vegetación, que ilustran la estructura y la fisionomía de cada área forestal (Figura 2).

Por su vez, los valores de DAP y H_t son modelados en ecuaciones alométricas para generar estimativas de biomasa, utilizándose la siguiente ecuación para las áreas de bosque primario:

$$Y = 0,044 \times (\text{DAP}^2 \times \text{ALTURA})^{0,9719}$$

(Brown et al., 1989);

en los casos de bosque abierto con presencia de bambú, se utilizó la ecuación anterior para todos los individuos, excepto para aquellos del género *Bambusa* cuya biomasa fue estimada a través de la ecuación:

$$Y = 2,928 (\text{DAP})^3 - 37,554 (\text{DAP})^2 + 161,23 \text{ DAP} - 226,54$$

(Torezan y Silveira, 1996).

Para las áreas de sucesión secundaria se aplicó la ecuación propuesta por Uhl et al. (1988):

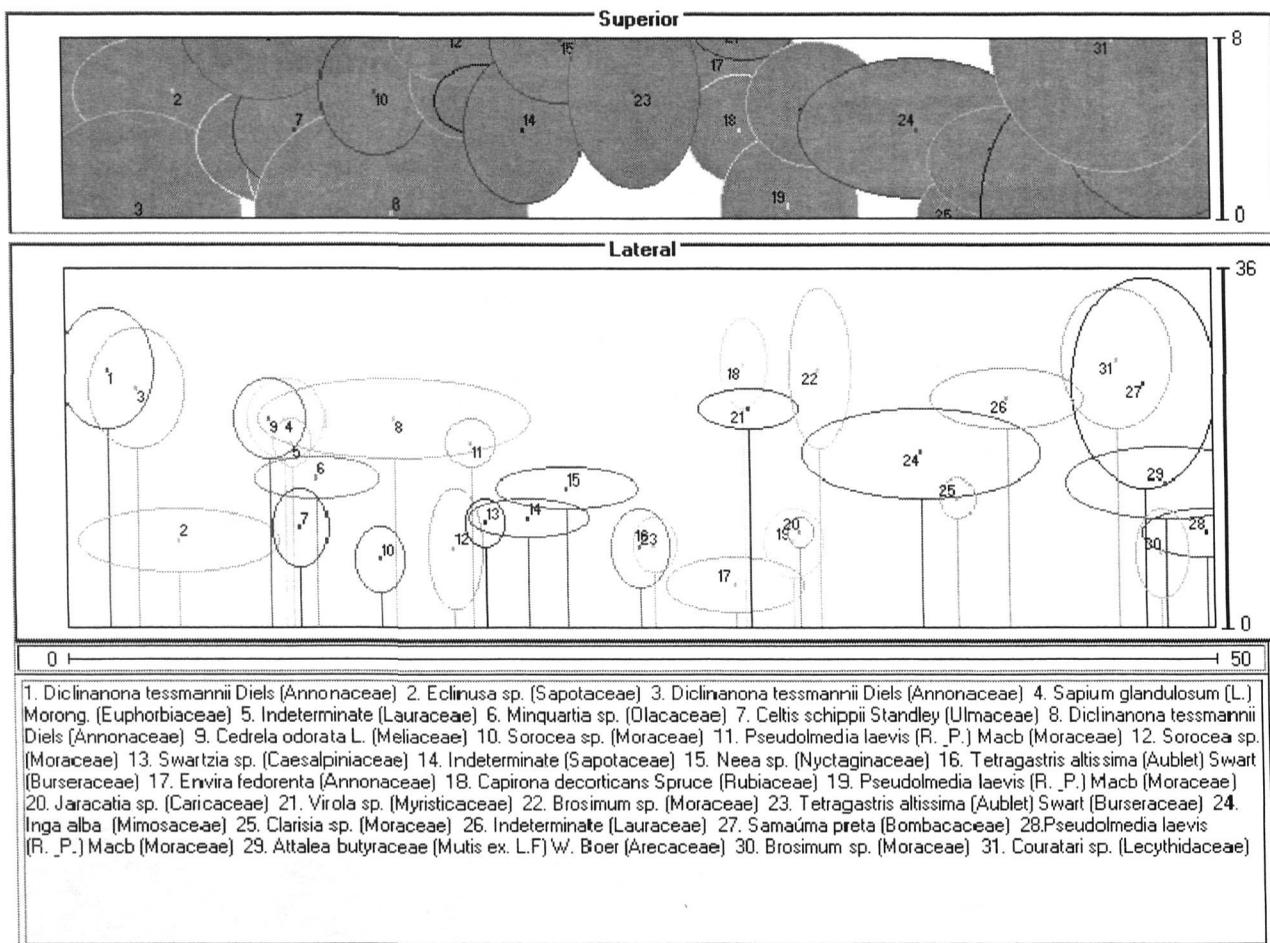


Figura 2. Perfil fisionómico-estructural típico de bosque primario en áreas de la Amazonia.

$$\ln Y = -2,17 + 1,02 \ln (\text{DAP})^2 + 0,39 \ln \text{ALTURA}$$

En este último caso, la dimensión de las parcelas inventariadas varía de 200 a 500 m², con medida de todos los individuos arbóreos con DAP mayor que 3 ó 5 cm, dependiendo de la fase de la regeneración de la vegetación.

La influencia de la acción del fuego en el aspecto fisionómico-estructural de las áreas de bosque, puede ser ejemplificada por un incendio forestal ocurrido en el estado de Roraima (región de Mucajaí – Apiaú) a inicios de 1998, hecho que fue muy comentado por los medios de comunicación nacionales e internacionales. En esta constatación *in situ*, se pudo verificar que, en media, 36% de los árboles con diámetro entre 5 y 10 cm estaban totalmente afectadas por el fuego (Figura 3), cuyo sub-bosque generalmente está representado por cerca de 340 individuos/ha. Para el caso de los individuos arbóreos con más de 10 cm de DAP, la mortalidad media estimada alcanzó 16% de un total de 425 árboles/ha. Es un hecho que en ciertos casos donde la incidencia del fuego fue de mayor proporción, estos valores llegaron a ser estimados en 53% para el sub-bosque y 21% para los estratos superiores del bosque, valores comparati-

vos a los registrados por IBAMA (1998a), en otro levantamiento realizado en diversas regiones de Roraima (Figura 4), con un abordaje de colecta de datos similar a la presentada en este trabajo.

Este tipo de información es útil, ya que una vez que se dispone de la distribución de la cobertura forestal de una determinada región, elaborada a partir de imágenes ópticas y/o de radar, se puede establecer el porcentaje de área quemada y verificar especialmente la magnitud del incendio y estimar la biomasa afectada por el mismo (Figura 5).

En el caso de las áreas de formación de sabana, el cálculo de biomasa se realiza por corte raso y pesaje de todos los individuos de porte arbustivo y/o arbóreo en unidades muestrales que varían de 200 a 500 m², de acuerdo con el paisaje investigado. El inventario del material herbáceo se realiza en sub-parcelas de 1 m², en las cuales se pesa el material fresco y también después que el mismo es secado en estufa. Adicionalmente se realiza un análisis de la cobertura porcentual del estrato graminoide con relación a la exposición del suelo y de las condiciones del material foliar fotosintéticamente activo. Estas informaciones son importantes ya que permiten indicar la condición

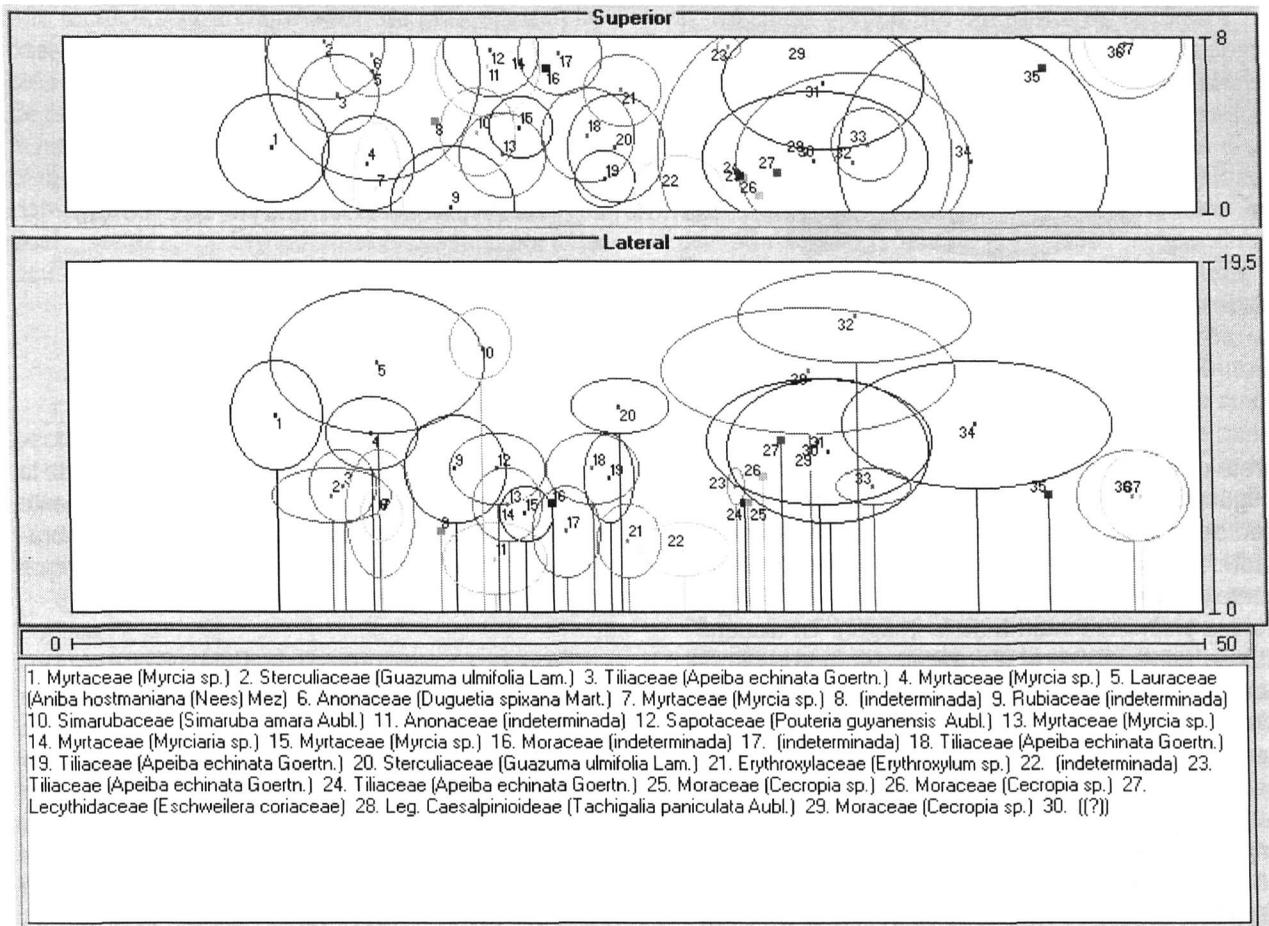


Figura 3. Perfil esquemático de bosque primario en un área afectada por el fuego en Roraima (aquellos individuos que no presentan copa son los que sufrieron la acción de un incendio de superficie y fueron seriamente afectados).

fenológica del paisaje frente a la posibilidad de quema o en ciertos casos, el grado de recuperación de la sabana posterior a la acción del fuego. En algunas áreas que fueron quemadas se pudo comprobar que con las primeras lluvias hubo un proceso rápido de desarrollo de las gramíneas, fácilmente perceptible por el aspecto fotosintéticamente activo, pero con poca cobertura del suelo, donde la biomasa estimada del estrato herbáceo (después de unos dos meses de la quema) está en torno de 1,67 ton/ha.

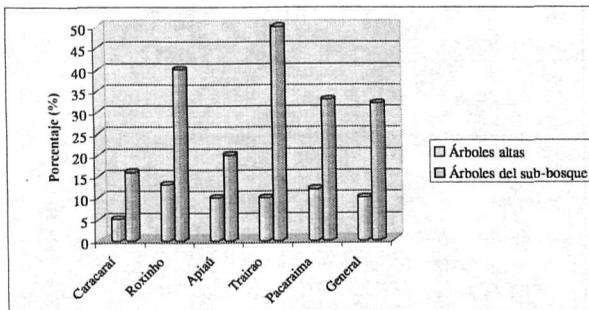


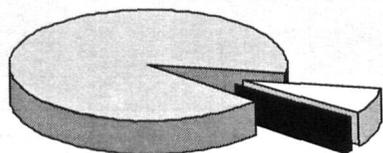
Figura 4. Mortalidad de árboles afectados por el fuego en un muestreo en municipios de Roraima. Fuente: IBAMA (1998a).

La biomasa aérea de las sabanas presenta un amplio espectro de variaciones que va desde las más "arboladas" con 20,15 ton/ha en media, hasta aquellas con dominio total del estrato herbáceo constituido por gramíneas, con 4,86 ton/ha, en condiciones no afectadas por quemadas recientes. Las sabanas tienen una característica muy peculiar con la acción del fuego, ya que los individuos arbóreos o arbustivos tienen un súber grueso que los protege de esta intensidad calorífica de corta duración, resultando en poca biomasa quemada, constituida generalmente por "paja" de rápida combustión.

Contenido informativo de las imágenes TM/Landsat y JERS-1: métodos de tratamiento, análisis e integración con informaciones de campo

Para la caracterización de la cobertura vegetal, identificación de las áreas con actividad de uso agrícola, pastoril y/o silvicultural e inclusive para la detección de áreas afectadas por el fuego, el analista/intér-

194,71 ton/ha



Biomasa forestal afectada por el fuego

16,08 ton/ha Árboles con DAP mayor que 10 cm

3,00 ton/ha Árboles con DAP entre 5 cm y 10 cm

Figura 5. Diagrama da pérdida de biomasa forestal afectada por el fuego en Roraima.

prete utiliza técnicas de segmentación de imágenes (Figura 6). Para iniciar el proceso de modelar la imagen de satélite, la segmentación se basa en las características espectro-texturales, geométricas y contextuales a través de las propiedades de discontinuidad y similitud interna de la imagen. La discontinuidad corresponde a la partición de la imagen de acuerdo con los cambios abruptos de la tonalidad de nivel de gris y/o textura de los diferentes albos presentes en la escena; la similitud se refiere a la agregación de los pixels por semejanza con los vecinos. Así, el proceso de segmentación puede ser implementado a través de diferentes algoritmos, siendo el de crecimiento de regiones el más utilizado. Este algoritmo se basa en la definición por parte del usuario de dos umbrales: el umbral de similitud que determina la diferencia máxima entre los valores digitales de dos pixels para que estos puedan ser incluidos dentro de una misma región y el umbral de área, que indica el número de pixels mínimo que debe poseer una región. No existe un conjunto de umbrales preestablecido que pueda ser utilizado para segmentar una imagen dada, estos valores varían dependien-

do del tipo de imagen, del objetivo del trabajo y de la complejidad del área, principalmente. Generalmente al segmentar imágenes de radar, se utilizan umbrales de similitud y de área mucho más elevados que para las imágenes de sensores ópticos.

El ejemplo mostrado en la Figura 6 corresponde a un sector del estado Acre, próximo al Proyecto de Colonización Humaitá, donde la tala y quema de las áreas de bosque primario (con valores de biomasa en torno de 170,25 ton/ha \pm 49,28) para la implantación de nuevos proyectos de pastoreo o asentamientos humanos, ha contribuido con la pérdida de la biodiversidad local.

Otra técnica de procesamiento de imágenes que ha sido evaluada con excelentes resultados es el modelo lineal de mezclas espectrales aplicado en escenas de sensores ópticos, la cual permite asociar las diferentes imágenes fracción con la biomasa forestal y con valores de índice de área foliar (IAF), entre otros. De acuerdo con Shimabukuro y Smith (1991), el modelo de mezcla espectral representa

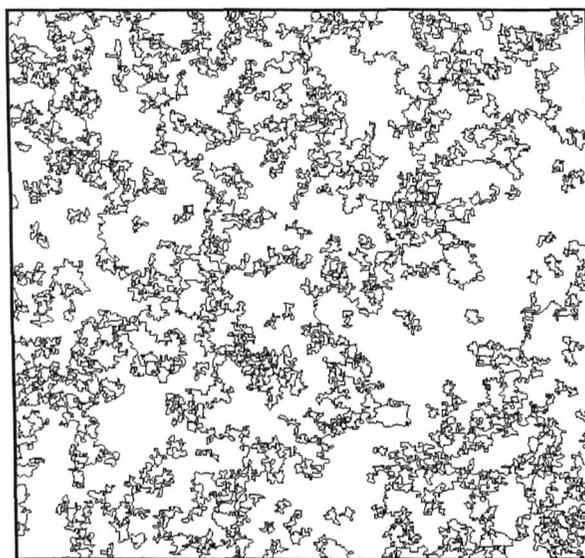
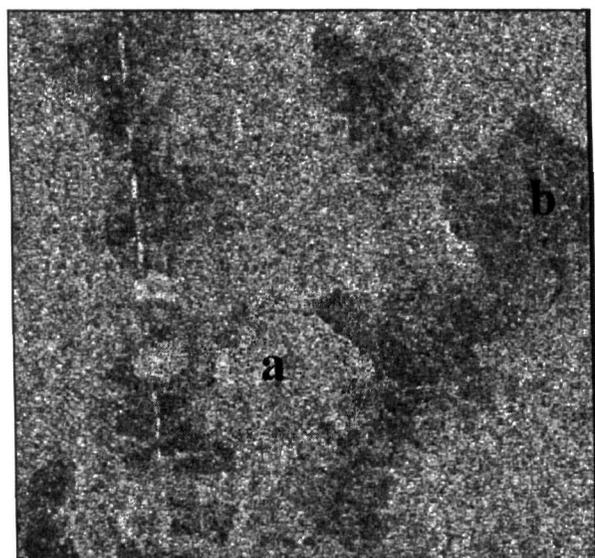


Figura 6. Sector de la imagen gERS-1 y la imagen segmentada correspondiente, ilustrando proyectos agropecuarios (a) y áreas quemadas (b) en la Amazonia (umbrales de similitud y de área igual a 2M y 5M respectivamente).

una técnica de transformación de imágenes ópticas, a través de la cual se crean imágenes fracción representativas de los principales elementos de la imagen. En este modelo de mezcla espectral, la respuesta de cada pixel es considerada una combinación lineal de respuestas espectrales de cada componente existente en la mezcla (vegetación, suelo, sombra, ...). El modelo es expresado por esta ecuación sintetizada:

$$r_i = \sum (a_{ij} * x_j) + e_i, \text{ siendo } \sum x_j = 1$$

r_i = reflectancia espectral en la $i^{\text{ésima}}$ banda espectral de un pixel;

a_{ij} = reflectancia espectral conocida del $j^{\text{ésimo}}$ componente en la $i^{\text{ésima}}$ banda espectral;

x_j = valor a ser estimado de proporción del $j^{\text{ésimo}}$ componente dentro del pixel;

e_i = error de estimación para la $i^{\text{ésima}}$ banda espectral;

i = número de bandas espectrales consideradas;

j = número de componentes.

El sistema de ecuaciones que conforman el modelo espectral de mezcla puede ser resuelto por mínimos cuadrados con restricciones, mínimo cuadrado ponderado o inclusive, por componentes principales. De esta manera, la caracterización del paisaje y cualquier fenómeno de antropización del mismo (áreas quemadas, por ejemplo), en escala compatible con la imagen, puede ser identificado, ya que es posible conocer el espacio de atributos espectro-texturales de cada albo y el nivel de proporciones de cada clase estudiada (Figura 7).

En cada vértice del diagrama de la Figura 7, está representada la cobertura total de un pixel en el terreno, por la componente fracción que lo caracteriza. Así, una determinada cobertura forestal al sufrir la acción del fuego, tiene una dislocación espectro-textural de una región situada más próxima del vértice correspondiente a la componente vegetación para el de la componente sombra, dependiendo de la magnitud e intensidad de la quema. Por su vez, las áreas de sabanas, de cobertura vegetal más esparza, con la acción del fuego tienen su espacio de atributos dislocándose de las proximidades del vértice suelo en dirección al de sombra, en razón de la cantidad de material residual de la quema y de la exposición relativa del suelo en el pixel investigado. De manera informativa, se puede realizar un análisis cuantitativo de la posición de los atributos de ciertos puntos considerados en la Figura 7b, los cuales reflejan una amplitud espacial directamente asociada con la regeneración de la vegetación, principalmente las sabanas, donde el estrato herbáceo se desarrolla rápidamente después de las quemadas y las primeras lluvias.

En la Amazonia existe una diversidad de valores de biomasa por especie, lo que hace importante conocer en las evaluaciones de extensión e influencia de las quemadas, aunque sea de una manera sinóptica, la cantidad de biomasa potencial a la acción del fuego. Para ilustrar esta complejidad se citan algunos valores medios de peso seco correspondiente a bosques primarios (considerando sólo aquellos individuos con DAP mayor o igual que 10 cm) en diferentes localidades de la Amazonia: 378,8

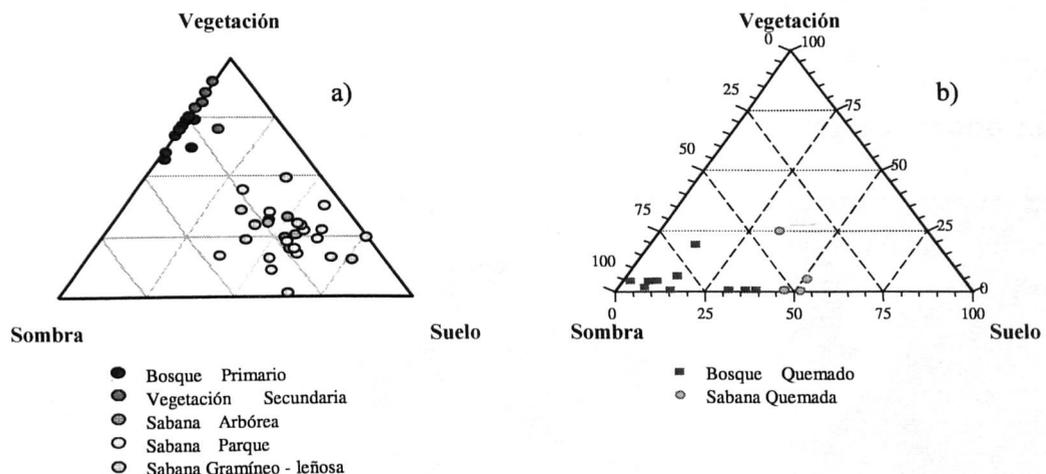


Figura 7. Diagrama de dispersión de las fracciones de vegetación, suelo y sombra en una imagen TM/Landsat para las clases de bosque y sabanas (a) y las mismas clases afectadas por quemadas (b). Fuente Figura 7(a): u aud, 1998

ton/ha en una región próxima a Manaus (AM), 368,97 ton/ha en la región de Caxiuanã (PA), 262,12 ton/ha en Jiparaná/Jarú (RO), conforme registrado por Carvalho Jr. et al. (1995), Pardi Lacruz y Santos (1997) y Schimdt (1997), respectivamente.

Otra localidad de la Amazonia que actualmente es objeto de estudio con datos ópticos y de radar (en cooperación con la *DLR - German Aerospace Research Establishment*) es la región de Comodoro (MT) – Vilhena (RO), localizada en el denominado "arco de la deforestación", en una zona de transición entre las fisionomías de bosques y de sabanas, donde el proceso de expansión agropecuario es intenso (Figura 8), siendo inclusive considerada también como un *hot spot areas* de deforestación por Achard et al., 1998). Un levantamiento de campo realizado en esta área muestra una biomasa para el bosque primario en torno de 207,19 ton/ha \pm 57,78 ton/ha y en las sabanas, valores de 5 ton/ha a 20,57 ton/ha, dependiendo del tipo. En principio, no hay una diferencia significativa de biomasa entre esta área de transición y aquella de Roraima, donde las sabanas gramíneo-leñosas presentan una biomasa fotosintéticamente activa en el estrato gramíneo en torno de 1,57 ton/ha (peso seco), recubriendo no más del 20 % del suelo.

En las imágenes de radar, el comportamiento de los albos no obedece a las mismas leyes que rigen el espectro óptico. En estudios de la cobertura vegetal es importante saber que algunos parámetros del dosel tienen una influencia en el coeficiente de retrodispersión (σ^0). El dosel, según Trevett (1986) es un ejemplo de dispersión volumétrica, donde parte de la energía enviada por el radar es dispersada por la superficie de la vegetación y otra parte de la energía, dependiendo de las características del radar y de la propia estructura vegetal, penetra en el albo, dispersándose en su interior y por la capa inicial del suelo.

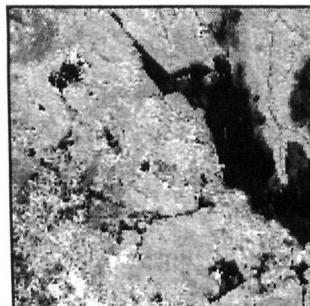
Con un mercado potencial de usuarios de imágenes de radar, las primeras experiencias estuvieron orientadas a la caracterización del paisaje natural y también a la identificación de áreas de ocupación agrícola y pecuaria en la región amazónica. Sin embargo, el avance metodológico de tratamiento de imágenes de radar, en este caso JERS-1, ha exigido un conocimiento de la relación biomasa *versus* señal de retorno del radar (Figura 9), con el objetivo de elaborar una cartografía más actualizada de la tipología vegetal y de la estimativa volumétrica, en el proceso de seguimiento de la dinámica de ocupación de la tierra, con la tala, la quema, la implantación de actividades agropastoriles y/o abandono del área. Aún con el conocimiento de la saturación en la señal de retrodispersión para un cierto valor de biomasa, en nivel más rápido en la banda L que en la banda P del microondas, es un hecho constatado que en las imágenes JERS-1, las áreas de bosque primario se distribuyen entre - 9 a - 6 dB y las sabanas entre - 16 y - 12 db, estando ahí insertadas también, aquellas áreas con un cierto gradiente de regeneración después de las tradiciones quemadas en el transcurrir de la época seca.

A partir de los incendios forestales en sabanas ocurridos en la Amazonia y más específicamente el de Roraima en inicios de 1998, el gobierno brasileño creó como estrategia de respuesta a la necesidad de monitoreo, el *Programa de Prevenção e Controle das Queimadas e Incêndios Florestais no Arco da Deflorestação - PROARCO* (IBAMA, 1998b), aunque la preocupación con estos incendios data de agosto de 1988, cuando fue creado el *Sistema Nacional de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais (PREVFOGO)*. Dentro del espíritu de integración de diversos órganos e instituciones

Componente suelo



Componente vegetación



Componente sombra

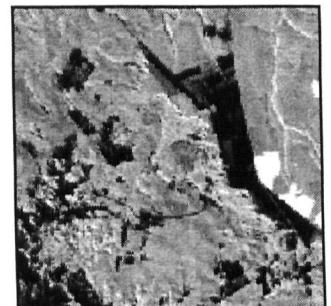


Figura 8. Imágenes fracción derivadas del modelo lineal de mezcla espectral en un área de contacto bosque – sabana próxima a la región de Comodoro (MT).

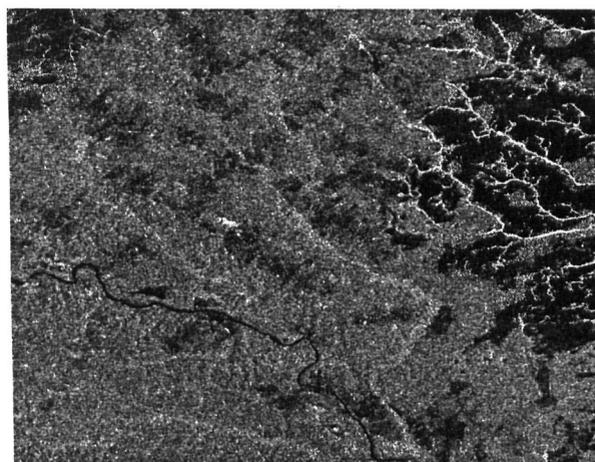
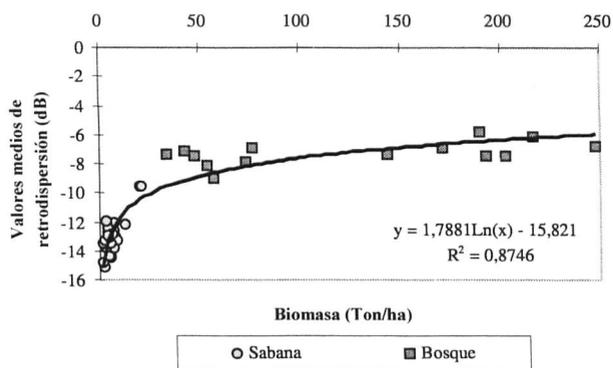
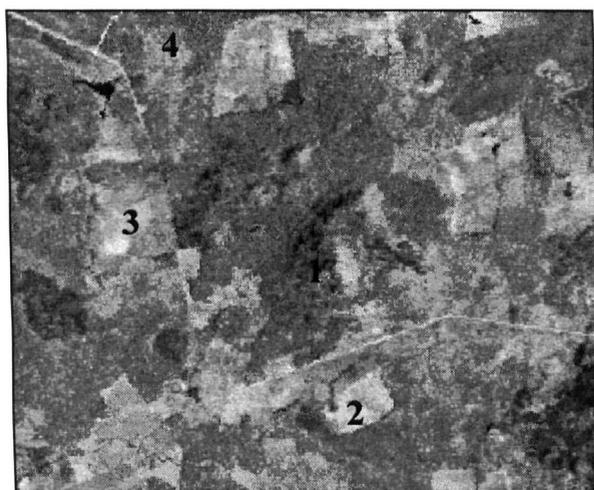


Figura 9. Diagrama de valores de retrodispersión y de biomasa para formaciones forestales y de sabanas en Roraima con la imagen gERS-1 correspondiente. Fuente: Santos et al. (1998a).

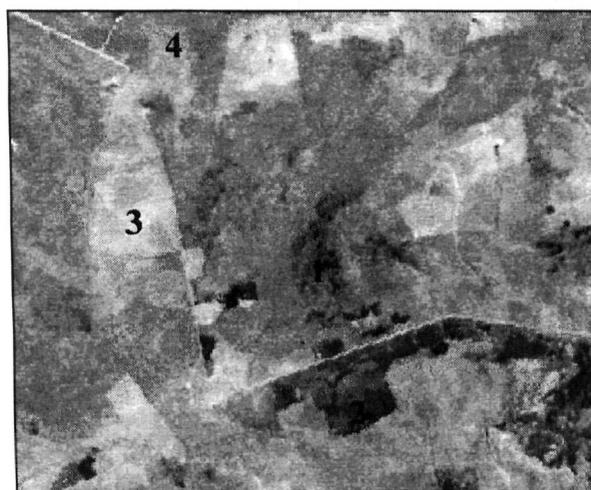
de las diferentes esferas gubernamentales para estudio de tal problema, está siendo gerenciado un proyecto para verificar la extensión de las quemadas, como forma aplicativa en Roraima, utilizando imágenes videográficas digitales, imágenes TM/Landsat (Figura 10), RADARSAT y también datos de DMSP, en una integración de resultados de acuerdo con las características y limitaciones de cada uno de estos sensores (INPE, 1998). Las primeras estimativas de las áreas con bosque primario afectadas por el incendio, en un total de 7.161,80 Km² y de

22.836,60 Km² para sabanas de Roraima son reportadas por Barbosa (1998), en una asociación de informaciones extraídas de imágenes AVHRR/NOAA, sobrevuelos sobre la región e informaciones expeditas de campo. Por esta extensión de quema puede percibirse la complejidad del problema en la integración del hombre con las prácticas de exploración de la tierra y el resultado en la diversidad biológica local.

En la figura anterior se puede apreciar un ejemplo típico de la intensidad de la quema en área de



(a)



(b)

- 1 Bosque primario
- 2 Vegetación secundaria inicial
- 3 Pasto
- 4 Vegetación secundaria intermedia



Áreas afectadas por el fuego

Figura 10. Sector de la imagen TM/Landsat (banda 5) del área forestal (a) antes y (b) después del incendio en Roraima. Fuente: INPE (1998).

bosque primario, la cual fue categorizado como incendio de superficie, dejando el sub-bosque totalmente quemado y el dosel chamuscado con pérdida parcial de biomasa (1). En el área de sucesión secundaria inicial (2) ocurrió un incendio de dosel con pérdida total de biomasa.

Otro enfoque científico que está siendo estudiado trata sobre las áreas en fase de sucesión secundaria. El paso de una superficie de bosque tropical primario (~300 ton/ha de biomasa aérea seca) para un cultivo itinerante (~16 ton/ha) que fue abandonado con dos años de edad y tiene 17 años de barbecho representa, según Freitas (1996), una liberación líquida de carbono del orden de 73 ton de C - CO₂/ha o la reducción de 32% del tenor inicial de carbono del ecosistema estudiado al final del periodo de 19 años. Aún así, si este ciclo de cultivo agrícola itinerante se repite en el área de regeneración, la pérdida líquida será de 3 ton C-CO₂/ha, o sea 2 % del tenor de carbono de una superficie de bosque secundario de 17 años.

La apertura de la frontera agrícola en áreas de bosque primario es una labor que necesita de una concesión de explotación junto al órgano gubernamental fiscalizador, además de cierta facilidad logística. Es un hecho común, actualmente, que la explotación de áreas en proceso de sucesión secundaria, tengan mejor relación costo/beneficio de explotación, bien sea para fines de cultivos agrícolas o de implantación de pastajes. Por consiguiente, la capacidad de las imágenes ópticas y de microondas para caracterizar estas áreas en proceso de regeneración e identificar una nueva tala y quema, está también siendo investigada en todas las áreas objeto de este estudio. En la Figura 6 anteriormente presentada, es posible visualizar la capacidad del sensor JERS-1 en diferenciar un área de bosque primario de un área de vegetación secundaria.

Los valores de retrodispersión de áreas de sucesión secundaria de diferentes edades, se encuentran generalmente en un intervalo entre -10,4 y -9,61 dB; estos valores obtenidos de las imágenes JERS-1, han sido relacionados con valores de biomasa colectados en campo (Santos et al., 1998b). Una serie de factores, como la edad de la regeneración, la composición florística, el tipo de manejo anterior al proceso de recuperación del área, la fragmentación forestal son algunos de los parámetros que orientan el estado fisionómico-estructural de la cobertura secundaria y consecuentemente el comportamiento radiométrico de las imágenes orbitales.

En un intento de caracterizar las fases de sucesión secundaria, diversas técnicas y algoritmos de extracción de informaciones han sido utilizadas

(Bernardes, 1996; Yanasse et al., 1997; Ribeiro et al., 1998; Santos et al., 1998b), ya que existe una variedad de aspectos estructurales, florísticos y de valorización de la biomasa para estas fases. Medidas de campo realizadas registran en media, una amplitud de biomasa de 13,02 ton/ha para la fase inicial de regeneración (~2 años de edad) hasta 77,12 ton/ha para fases un poco más avanzadas (edad mayor de 10 años). Debido a que generalmente las áreas de sucesión secundaria tienen valores de biomasa inferiores al punto de saturación de la banda L (~100 ton/ha), existe la posibilidad de una relación significativa con los valores de retrodispersión obtenidos de la imagen JERS-1, lo que indica también que, cualquier modificación antrópica (tala y quema) en estas áreas, puede ser detectada.

CONCLUSIÓN

Actualmente existe una conciencia por parte de la comunidad científica en hacer que los planeadores y los *decision makers* ambientalistas estudien y acompañen las estrategias de valorización de las regiones tropicales, insertada en una visión de riesgo referentes a los cambios globales. Estos riesgos, que están estrictamente relacionados al uso del suelo (léase deforestaciones acentuadas, quemas indiscriminadas, degradación de la biomasa) no siempre racional de los recursos naturales.

En este contexto se puede percibir que los datos de satélite, de sensores ópticos o de microondas, son herramientas importantes en los estudios de riesgos ambientales. Tal aplicación queda evidentemente comprobada por el esfuerzo que actualmente es realizado para monitorear la Amazonia brasilera (~ 5 millones de Km²), donde una serie de estudios están siendo conducidos para disminuir las incertezas cuantitativas de estimativas y magnitud del proceso de antropización de la región. La extensión y dirección tomada por las deforestaciones/quemas y por las áreas hoy en proceso de regeneración, reflejan respectivamente la pérdida y la absorción de carbono con los cambios dinámicos de biomasa forestal. De acuerdo con Freitas (1996), las alteraciones de la cobertura forestal y quema de la biomasa leñosa en los trópicos son responsables por cerca de 10-30% de las emisiones antrópicas de CO₂, 6-15% de CH₄ y 26% de las emisiones de CO a nivel global. Como las estimativas de emisiones son bastante controversiales, hacer la cartografía de la biomasa, de las áreas de quemadas por tipología forestal y de las áreas en proceso de sucesión secundaria es fundamental para el modelaje de los cambios globales, donde las técnicas y productos de per-

cepción remota orbital pueden facilitar la adquisición de datos de esta región remota.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de las siguientes instituciones: *Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP* (proceso n° 1997/0943-8); *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq* (procesos n° 300677/91-0 y 381246/97-3); *Centro de Pesquisas Agroflorestais de Roraima/EMBRAPA*; *Universidade Federal do Acre - UFAC/Parque Zoológico*; *Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária - INCRA* Jiparaná y Vilhena; *Japanese Space Agency - NASDA/Global Rainforest Monitoring Project (GRMF)* por ceder los datos JERS-1; *DLR/DFD - German Aerospace Establishment/Remote Sensing Studies for Rainforest and Landuse Monitoring Program*.

REFERENCIAS

Achard, F., Eva, H., Glenni, A., Mayaux, P., Richards, T. y Stibig, H.J. (1998). *Identification of deforestation hot spot areas in the humid tropics*. TREES Series B, n° 4. EUR 18079 EN, European Commission, Luxembourg. 100 p.

Barbosa, R.I. (1998). *Avaliação da área dos sistemas naturais e agroecossistemas atingida pelo fogo no Estado de Roraima (Período de 01/12/97 à 30/04/98)*. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - Núcleo de Pesquisas de Roraima. Boa Vista. 22 p. (Manuscrito).

Bernardes S. (1996). *Índices de vegetação e valores de proporção na caracterização de floresta tropical primária e estádios sucessionais na área de influência da Floresta Nacional do Tapajós - Estado do Pará*. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 94 p.

Brown, S., Gillespie, A.J.R. y Lugo, A.E. (1989). Biomass estimation methods for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35: 881-902.

Carvalho Jr., J.A., Santos, J.M., Santos, J.C., Leitão, M.M. y Higuchi, N. (1995). A tropical rainforest clearing experiment by biomass burning in the Manaus region. *Atmospheric Environment* 29: 2301-2309.

Freitas, M.A.V. (1996). O uso do solo e da biomassa nos trópicos e sua contribuição ao equilíbrio climático planetário: o caso da Amazônia brasileira. *Pesquisas recentes em energia, meio ambiente e tecnologia*.

(Freitas, M.A.V. & Dutra, L.E.D., Eds.) COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro: 115-133.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Renováveis - IBAMA. (1998a). *Roraima: Avaliação de impacto ambiental*. Brasília, DF. 6 p. Folder.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Renováveis - IBAMA. (1998b). *Programa de prevenção e controle às queimadas e aos incêndios florestais no arco do desflorestamento - PROARCO*. Brasília, DF. 26 p.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. (1998). Incêndio florestal de Roraima: imagens videográficas como suporte à interpretação de dados de sensoriamento remoto orbital. In: *III Seminário sobre Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Florestal*. FUPEF. Curitiba, Paraná: 157.

Pardi Lacruz, M.S. y Santos, J.R. (1997). Contribución de la percepción remota en la estratificación de bosque tropical húmedo (SE Amazonia, Brasil). *XI World Forestry Congress - IUFRO*. Antalya, Turkey. CDROM.

Ribeiro, M.C., Alves, D.S., Soares, J.V., Yanasse, C.C.F. y Li, F.M. (1998). Potentialities of using texture measure for mapping land use dynamics based on radar imagery. *ISPRS Symposium: Resource and Environmental Monitoring*. Budapest, Proceedings. vol. XXXII, part 7: 392-396.

Rosenqvist, A. (1997). *Analysis of the backscatter characteristics of rubber, oil palm and irrigated rice in multiband polarimetric Synthetic Aperture Radar Imagery*. (PhD Thesis). Institute of Industrial Science, University of Tokyo. 114 p.

Santos, J.R., Xaud, M.R. y Pardi Lacruz, M.S. (1998a). Analysis of the backscattering signals of JERS-1 image from savanna and tropical rainforest biomass in Brazilian Amazonia. *ISPRS Symposium: Resource and Environmental Monitoring*. Budapest. Proceedings, vol. XXXII, part 7: 523-526.

Santos, J.R., Pardi Lacruz, M.S., Keil, M., Kux, H.J.H. y Xaud, M.R. (1998b). Análise da imagem JERS-1 para estimativa de biomassa aérea de florestas tropicais no sudoeste da Amazônia. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Santos, SP. CD-ROM.

Schmidt, M. (1997). *Untersuchung des Informationsgehalts und der Eignung experimenteller und operationeller SAR-Sensoren zur Erfassung tropischer Primärund Sekundärwälder, periodischer Überschwemmungen und zur Überwachung der Rodungsdynamik*. Dissertation Universität Mainz, Deutschland. DLR-Forschungsbericht 97-45, 117 p. (ISRN DLR-FB-97-45)

Shimabukuro, Y.E. y Smith, J.A. (1991). The least-square mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing* 29: 16-20.

Torezan, J.M.D. y Silveira, M. (1996). Equações alométricas para o cálculo de biomassa de bambú (*Guadua weberbaueri Pilger*) em floresta ombrófila aberta no Acre. *XLV Congresso Nacional de Botânica*. Nova Friburgo, Rio de Janeiro.

Trevett, J.W. (1986). *Imaging radar for resources surveys*. New York, N.Y., Chapman and Hall. 313 p.

Uhl, C.; Buschbacher, R.; Serrão, E.A.S. (1988). Abandoned pastures in eastern Amazonia. I: pattern of plant succession. *Journal of Ecology* 76:663-681.

Xaud, M.R. (1998). *Avaliação de dados TM/Landsat e SAR/JERS na caracterização da cobertura vegetal e distribuição de fitomassa em áreas de contato floresta/savana no Estado de Roraima*. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP. Brasil. 151 p.

Yanasse, C.C.F., Sant'Anna, S.J.S., Frery, A.C., Rennó, C.D., Soares, J.V. y Luckman, A.J. (1997). Exploratory study of the relationship between tropical forest regeneration stages and SIR-C L and C data. *Remote Sensing of Environment* 59: 180-190.