

Evaluación de dos métodos para la estimación de biomasa arbórea a través de datos LANDSAT TM en Jusnajib La Laguna, Chiapas, México: estudio de caso

Jorge Escandón Calderón*
Ben H. J. de Jong**
Susana Ochoa Gaona***
Ignacio March Mifsut****
Miguel Angel Castillo****

Recibido: 2 de enero de 1999
Aceptado en versión final: 16 de agosto de 1999

Resumen. Se evaluaron dos métodos para estimar biomasa arbórea con apoyo en sensores remotos (LANDSAT TM). El primer método se realizó con base en una clasificación supervisada multiespectral con seis bandas. Se utilizaron tipos de vegetación identificados a partir de la composición de biomasa de los géneros dominantes y de la altura promedio estimada del dosel, habiéndose distinguido ocho clases de vegetación. Se obtuvo una biomasa total de $1\,073 \times 10^3$ t (902×10^3 t a $1\,220 \times 10^3$ t). En el segundo método se utilizaron índices diferenciados de vegetación (NDVI) de las bandas TM4/TM3; TM4/TM5 y TM4/TM7. Se aplicó un modelo de regresión que relaciona la biomasa promedio con los valores digitales (VD) de los NDVI. El modelo exponencial fue el de mejor ajuste para los tres NDVI con una $p \leq 0.01$. Los valores de los NDVI fueron TM4/TM3: $R^2=0.611$; TM4/TM5: $R^2=0.671$ y TM4/TM7: $R^2=0.676$. La biomasa total estimada con cada NDVI fue de $1\,164 \times 10^3$ t (490×10^3 t a $2\,409 \times 10^3$ t) para TM4/TM3; de 515×10^3 t (331×10^3 t a 757×10^3 t) para TM4/TM5 y de 726×10^3 t (398×10^3 t a $1\,210 \times 10^3$ t) para TM4/TM7. El resultado de la biomasa total calculada por el método de clasificación multiespectral, comparado con los valores estimados por el método de ordenamiento exponencial, mostró mayor similitud con el valor máximo del NDVI que relaciona las bandas TM4/TM7 (de mayor ajuste estadístico) y con el valor promedio del NDVI TM4/TM3 (de menor ajuste estadístico). Utilizando el NDVI TM4/TM5, todos los valores de biomasa resultaron más bajos. De este estudio se concluye que es posible asociar razonablemente la biomasa de vegetación arbolada de pino-encino y reservorios de carbono con los índices de vegetación. A través del uso de sensores remotos se podrían predecir cambios de biomasa en escalas temporales y espaciales.

Palabras clave: Biomasa arbórea, sensores remotos, clasificación supervisada, índice normalizado de vegetación, modelos de regresión.

Abstract. Two approaches to estimate arboreal biomass with remote sensing (LANDSAT TM) are evaluated. In the first approach a multi-spectral supervised classification with six bands was applied. The classification of the vegetation types is based on biomass composition of the dominant tree species and canopy height. Eight vegetation types could be distinguished. According to this approach the total tree biomass amounted to $1\,073 \times 10^3$ t (902 to $1\,220 \times 10^3$ t). In the second approach a Normal Differentiated Vegetation Index (NDVI) of the band combinations TM4/TM3, TM4/TM5, and TM4/TM7 was used. A regression equation was developed to relate arboreal biomass with NDVI. Using these equations, the total biomass was estimated at $1\,164 \times 10^3$ t (490 to $2\,409 \times 10^3$ t) for TM4/TM3; at 515×10^3 t (331 to 757×10^3 t) for TM4/TM5 and 726×10^3 t (398 to $1\,210 \times 10^3$ t) for TM4/TM7. The average biomass estimation of the NDVI using TM4/TM3 is similar to the estimation using the classification approach, but the 95% confidence interval is wider. Meanwhile, the biomass estimation of the NDVI using TM4/TM5 and TM4/TM7 was lower than the biomass estimation from the classification approach, but both showed a narrow 95% confidence interval. The results of this study indicate that it is possible to estimate within a reasonable confidence interval the tree biomass of pine-oak forest using an ordination approach with NDVI. As such, remote sensing could be used to estimate temporal and spatial changes in aboveground biomass.

Key words: Tree biomass, remote sensing, supervised classification, Normal Differentiated Vegetation Index, regression models.

* El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Apdo. Postal 63, 29200, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México.

** Departamento de Agroecología, División de Sistemas de Producción Alternativos, El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Apdo. Postal 63, 29200, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México. E-mail: bjong@scl.ecosur.mx

*** Departamento de Ecología y Sistemática, División Conservación y Biodiversidad, El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Apdo. Postal 63, 29200, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México.

**** Departamento de Ordenamiento Ecológico, División de Conservación y Biodiversidad, El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Apdo. Postal 63, 29200, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México.

INTRODUCCIÓN

La producción primaria neta (PPN) es una de las características propias de los ecosistemas. Los bosques son los ecosistemas con mayor PPN. Se calcula que los bosques producen de 400-1 000 g/m² año⁻¹ de carbono (C), cantidad dos veces mayor que la de los pastizales y varias veces mayor que la de los océanos por unidad de superficie terrestre (Warin y Schlesinger, 1985). Una parte de esta producción se acumula como biomasa y humus, la cual constituye la producción primaria neta del ecosistema; la otra se destina a procesos de mantenimiento del ecosistema a través de la respiración. La PPN se puede expresar como gramos de carbono asimilado, peso seco, o equivalente energético de peso seco por unidad de superficie. El contenido de C en la vegetación y suelos boscosos equivale aproximadamente a 60% del carbono orgánico almacenado sobre la superficie terrestre (Warin y Schlesinger, 1985).

El volumen de madera como medida de biomasa es una de las propiedades que se busca calcular a través de los inventarios forestales, ya que este atributo representa una valiosa información para la elaboración de planes de manejo. Sin embargo, estos estudios suelen tener un alto costo económico y requieren de períodos de tiempo relativamente largos, especialmente cuando se trata de áreas extensas (Lee *et al.*, 1995).

En el ámbito global, los patrones climáticos se están modificando hacia un mayor calentamiento de la Tierra, aparentemente por la adición de bióxido de carbono a la atmósfera (Ojima *et al.*, 1994; Sayer y Whitmore, 1991). La deforestación y degradación de los bosques primarios es una de las fuentes principales de emisiones de C, después de la combustión de energía fósil (Houghton, 1990; IPCC, 1992). Las estimaciones actuales por la pérdida de bosques sobre dichas emisiones fluctúan entre 0.6 y 3.6 Gt C año⁻¹ (Gt C=10⁹ toneladas de carbono, Houghton, 1990; IPCC, 1992; Dixon *et al.*, 1994). Las estimaciones disponibles acerca de las emisiones de C anuales en México por cambios en la cobertura vegetal, calculados para la década anterior difieren, por un factor de 5 (Maser *et al.*, 1997), fluctuando entre 13.7 hasta 71 x 10⁶ t C (WRI,

1994; Cairns *et al.*, 1995). Esta variación refleja las dificultades que existen para producir información adecuada sobre la conversión forestal y los parámetros relevantes relacionados con el C. Mucha de la variación radica en divergencias en las estimaciones de la deforestación por el tipo de bosques considerados, el sistema de clasificación utilizado, los distintos métodos de toma de datos y los períodos incluidos. Estas inconsistencias producen incertidumbre en lo que respecta a la tasa de cambio de uso de suelo, la cantidad de biomasa que se transforma en la conversión de bosques primarios a terrenos de cultivo y pastizales, y de estos últimos a bosques secundarios (Maser *et al.*, 1997).

Los sensores remotos pueden proveer de datos que permitan responder a las interrogantes e incertidumbres respecto al ciclo dinámico de la biomasa, ya que posibilitan la evaluación frecuente de cambios de cobertura boscosa en grandes extensiones (Brown y Lugo, 1992). Mediante el uso de sensores remotos es posible obtener información de las propiedades del bosque, y hasta cierto nivel es posible separar bosque en regeneración de bosques maduros (Foody y Hill, 1996; Foody *et al.*, 1996). La reflectancia del infrarrojo cercano (TM4) proporciona información adecuada de la densidad de vegetación, especialmente cuando se relaciona con área foliar, biomasa en hojas verdes y actividad fotosintética (Tucker, 1979; Sellers, 1985; Peterson *et al.*, 1987; Spanner *et al.*, 1990; Baret y Guyot, 1991). Por otra parte, las reflectancias del infrarrojo medio (TM5 y TM7) están inversamente relacionadas con la humedad (Ripple, 1986; Hunt y Rock, 1989; Cohen, 1991); éstas proveen de información acerca de biomasa muerta en pie o biomasa de madera senil (Hardisky *et al.*, 1984; Badhward *et al.*, 1986; Rey y Pope, 1995). En este principio se apoya la mayor parte de los denominados "índices de vegetación", en los que se combinan la banda roja (R) e infrarroja (IR) del espectro. Los más empleados son el cociente entre esas bandas y el denominado "Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada" -NDVI- en el cual las diferencias de respuestas en dos bandas (p. ej. roja e infrarroja) son resumidas en una sola lectura o medida de valores digitales (VD; Chuvieco, 1990).

El objetivo de este trabajo fue comparar el uso de tres índices de vegetación de diferencia normalizada con un método de clasificación para evaluar la biomasa arbórea en un área de aproximadamente 15 167 ha, alrededor de la comunidad de Jusnajib La Laguna, Chiapas, México. El estudio fue realizado de febrero de 1997 a octubre de 1998.

ÁREA EN ESTUDIO

Los Altos de Chiapas contienen varias formaciones forestales dentro de un complejo paisaje. Las comunidades vegetales más importantes incluyen bosques de pino, pino-encino, encino y bosques de niebla (Miranda y Hernández, 1963; Breedlove, 1981; González *et al.*, 1995). Estos bosques son altamente representativos de las montañas del sureste mexicano y de las regiones montañosas de Centroamérica (Rzedowski, 1978).

La zona en estudio se ubica entre los $16^{\circ}27'42''$ y los $16^{\circ}20'32''$ de latitud norte y los $92^{\circ}08'51''$ y los $92^{\circ}02'27''$ de longitud oeste, incluyendo a la

comunidad de Jusnajib La Laguna y sus alrededores; dicha comunidad es un ejido localizado en el municipio de Comitán, en la región central del sur de Los Altos de Chiapas (Figura 1). Su clima es templado subhúmedo con una temperatura media anual de 18°C , la estación de lluvias se presenta entre los meses de abril y octubre con una precipitación anual de 1 200 mm. La topografía básica es de un valle amplio a una altitud de 1 600 m rodeado por colinas bajas al este y al oeste del valle y en la parte norte por una zona montañosa que alcanza una altitud de 2 000 m. Los suelos se derivan de rocas sedimentarias y calizas de origen cretácico superior, que se clasifican como luvisoles moderadamente ácidos y erosionados, así como vertisoles, litosoles y acrisoles. La vegetación característica de la zona son bosques de pino y de pino-encino (Miranda, 1952). En la zona del valle se ubican la zona urbana y los terrenos agrícolas con cultivos de clima templado, pastizales y frutales caducifolios (Montoya *et al.*, 1995).

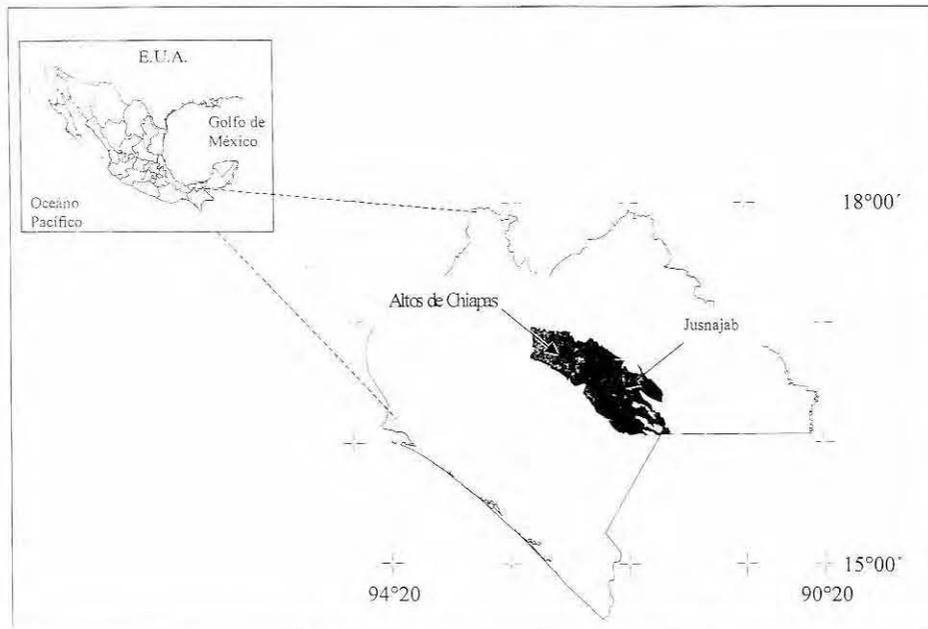


Figura 1. Localización del área en estudio en el estado de Chiapas.

MÉTODOS

Se utilizó una imagen LANDSAT TM (path21-row49, de marzo de 1996), la cual fue rectificadas con 80 puntos de control obtenidos de mapas topográficos del estado de Chiapas escala 1:50 000 (INEGI, 1984, 1988) correspondientes a la zona de la imagen. Se logró obtener un error residual de la media al cuadrado menor a un pixel (25 m). Se realizó una clasificación no supervisada con las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7, bajo el criterio de mínima distancia (Chuvieco, 1990).

El trabajo de campo se realizó de marzo a mayo de 1997 durante la temporada de "secas", que coincide con la fecha en que fue obtenida la imagen. El mapa fue generado con la clasificación no supervisada, y sirvió de base para identificar en campo a qué tipo de vegetación y uso del suelo correspondían las 20 clases diferenciadas inicialmente; a éste, se le superpuso una cuadrícula de 500 X 500 m, con cada línea referida a coordenadas UTM.

Sobre rumbos fijos al este y oeste del camino principal se trazaron cuatro transectos, y cada 200 m se estableció una parcela de muestreo. En total se inventariaron 48 parcelas. En cada una de éstas se establecieron tres sitios circulares de 17.84 m de radio (1 000 m² de superficie), acomodados en forma de "L" y separados entre sí por una distancia de 30 m en línea recta. En cada sitio (círculo) a cada árbol con más de 10 cm se le midió el diámetro a la altura del pecho (DAP=1.30 m de altura), se estimó su altura y se anotó el género al que pertenece. A los árboles con más de un fuste se les midieron los diámetros adicionales. La altura de los árboles se estimó con referencia a un sujeto de 1.50 m. Sólo se distinguieron los géneros de pinos y encinos, el resto se agrupó en latifoliadas. Se anotaron las coordenadas geográficas en UTM de cada sitio.

La biomasa arbórea de los tres grupos de especies se calculó mediante fórmulas alométricas (Ayala, 1998):

PINOS:	D_1	$PT=0.058 (D^2 A)^{0.919}$
ENCINOS:	D_1	$PT=0.283 (D^2 A)^{0.807}$
Fustes adicionales	D_2 y D_3	$PT=1.91 D^{1.782}$
LATIFOLIADAS	D_1	$PT=0.7692 [0.283 (D^2 A)^{0.807}]$
Fustes adicionales	D_2 y D_3	$PT=0.7692 (1.91 D^{1.782})$

Donde: PT, es el peso total seco del árbol.

D, es el diámetro medido en cada árbol, D_1 corresponde al fuste principal y D_2 - D_3 a los fustes secundarios.

A, representa la altura estimada.

El cálculo de biomasa por parcela se obtuvo de la suma de la biomasa de todos los árboles presentes en los tres sitios, promediándolo entre tres. Este valor sirvió de base para el cálculo de biomasa por hectárea.

Para identificar el tipo de vegetación al que correspondía cada parcela, se aplicaron dos criterios: porcentaje de biomasa de cada grupo de especies y altura del dosel. Con relación al porcentaje de biomasa, se diferenciaron las siguientes categorías:

- Pino: cuando $\geq 75\%$ de la biomasa total de la parcela correspondió a pino.
- Pino-Encino: cuando un 50-75% de la biomasa total de la parcela correspondió a pino.
- Encino-Pino: cuando un 50-75% de la biomasa total de la parcela correspondió a encino.
- Encino: cuando $\geq 75\%$ de la biomasa total de la parcela correspondió a encino.

En relación con la altura estimada, se diferenciaron cinco clases:

- Acahual arbustivo: de 2 a 5 m de altura.
- Acahual bajo: entre 5 y 10 m.
- Acahual medio: entre 10 y 15 m.
- Acahual alto: entre 15 y 20 m.
- Bosque: más de 20 m.

Los acahuales corresponden a vegetación secundaria, y con excepción del acahual arbustivo, todas las clases se refieren a comunidades arbóreas. Con base en estos criterios, se identificaron los tipos de vegetación para las 48 parcelas.

Estimación de biomasa arbórea por medio de clasificación por tipo de comunidad vegetal

Con base en las coordenadas y en la identificación de campo realizada sobre la clasificación no supervisada, se localizaron los 13 tipos de vegetación sobre la imagen de satélite para realizar una clasificación supervisada. Se utilizó un algoritmo de máxima verosimilitud. Se realizó un análisis de precisión de "usuario" y de "productor" (Congalton, 1991). La precisión del "usuario" relaciona el número de píxeles que, perteneciendo a una categoría, no fueron incluidos en ella (error de omisión); la precisión del "productor" relaciona el número de píxeles que se incluyeron en una categoría perteneciendo a otra (error de comisión). Si el error de omisión es bajo, significa un logro para el "productor" del mapa; si el error de comisión es alto, hay un grave

riesgo para el "usuario" de esa información (Chuvieco, 1990). Durante la colocación de píxeles de muestra que representaron a las categorías de interés en la imagen (semillas), además de las clases arbóreas identificadas, se incorporaron cinco clases correspondientes a agua, área sin vegetación aparente, sombra, pastizal y acahual < 2 m, para las cuales no se estimó biomasa, pero que están presentes en el área en estudio. La clasificación se realizó con 0.7% del total de píxeles del corte con apoyo del paquete ERDAS 8.1.

Estimación de biomasa arbórea por ordenación mediante el modelo de regresión exponencial

Se relacionaron las bandas TM4/TM3, TM4/TM5 y TM4/TM7 para calcular índices de vegetación (NDVI, Steven *et al.*, 1992). Con las coordenadas geográficas obtenidas en campo, se localizó cada parcela sobre la imagen y, de esta forma, se obtuvo el Valor Digital (VD: 0-255) para cada NDVI. El VD se obtuvo del promedio de NDVI de las medidas obtenidas en una ventana de 3 X 3 píxeles. Al listado de parcelas con datos de biomasa se agregó el VD de cada NDVI. Se aplicó una correlación utilizando el coeficiente de Pearson entre los datos de biomasa y los valores digitales por parcela (SPSS 7.5). Este análisis exploratorio de los datos, junto con un dispersograma de cada uno de los índices de vegetación en relación con las fórmulas de biomasa, permitió generar un modelo exponencial de regresión entre los factores dependiente (biomasa) e independiente (VD del NDVI).

$$\text{MODELO EXPONENCIAL: } Y = b_0 \left[\exp^{(b_1 \times t)} \right]$$

Donde: Y (variable dependiente) corresponde a la biomasa
t (variable independiente) corresponde al VD
b₀ y b₁ son constantes.

Se calculó la biomasa total en todo el corte de la imagen utilizada mediante los dos métodos aplicados. En el método de clasificación por tipo de comunidad se utilizó el intervalo de confianza y

la biomasa promedio y se multiplicó por la superficie correspondiente a cada tipo de vegetación. En el método de ordenación de biomasa, se utilizó el valor de biomasa de cada valor digital

de toda la superficie arbolada y, con base en el número de píxeles y en la superficie correspondiente, se calculó la biomasa total, aplicando la fórmula del modelo exponencial para cada NDVI. La suma de todos estos valores proporcionaron la estimación de biomasa arbórea de la zona en estudio.

RESULTADOS

Las comunidades identificadas mostraron valores de biomasa entre 15 y 305 t/ha. Se encontró una variación de 15 a 25 t/ha en los acahuales

arbustivos. Para los acahuales bajos de encino, pino, pino-encino y encino-pino la biomasa varió de 25 a 190 t/ha. La biomasa de los acahuales medios mostró una amplitud de 113 a 188 t/ha. Los acahuales altos tuvieron de 142 a 216 t/ha y los bosques variaron de 179 a 305 t/ha (Cuadro 1). En general, los valores inferiores de los intervalos de biomasa separan más claramente los tipos de vegetación, mientras que algunos valores superiores se sobreponen con la categoría siguiente, como se puede observar entre los acahuales bajos y medios.

Cuadro 1. Clases de vegetación estimadas con base en el porcentaje de contribución de biomasa por género y por la altura estimada del dosel

Clase por porcentaje de biomasa y altura	Clave	Número de parcelas	Promedio de biomasa (t/ha)	Intervalo de confianza (95%)	Intervalo de biomasa (t/ha)
Acahuai de encino	AE	6	19	2.26	15-25
Acahual de latifoliadas/encino/pino	AL	1	22	---	22
Acahual bajo de encino	AbE	4	59	13.39	43-81
Acahual bajo de pino	AbP	2	109	19.1	96-123
Acahual alto de pino	AaP	3	177	33.98	142-216
Bosque de pino	BP	5	223	38.79	179-305
Acahual bajo de pino/encino	AbP-E	8	114	29.59	25-190
Acahual medio de pino/encino	AmP-E	4	156	32.09	113-188
Acahual alto de pino/encino	AaP-E	1	169	---	169
Bosque de pino/encino	BP-E	5	225	22.45	184-256
Acahual bajo de encino/pino	AbE-P	5	114	28.12	76-171
Acahual alto de encino/pino	AaE-P	1	207	---	207
Bosque de encino/pino	BE-P	3	242	20.91	216-259

Estimación de biomasa arbórea por medio de clasificación por tipo de comunidad vegetal

De las 13 clases identificadas a partir de los datos de inventario, las correspondientes a acahual medio de pino-encino, acahual alto de pino-encino y bosque de pino-encino no mostraron separabilidad espectral. Todas estas quedaron

incluidas en la clase de bosque de pino-encino. Las clases de acahual alto de encino-pino y bosque de encino-pino tampoco mostraron separabilidad espectral, registrándose como bosque de encino-pino (Cuadro 2). La precisión de las muestras para definir las clases de vegetación varió de 61 a 96% (acahual bajo de pino y acahual bajo de encino, respectivamente).

Las clases más confusas (acahuales medios y altos, y bosque de encino-pino) tuvieron una precisión de usuario de 60 a 85% y una precisión del productor de 48 a 70%, mostrando dificultad en su separación (Cuadro 2). Las clases más homogéneas (agua, sombra, etc.) tuvieron valores de alta precisión. Al realizar el algoritmo de máxima verosimilitud para la clasificación supervisada con las quince clases

definidas en el Cuadro 2, como producto final se obtuvieron trece clases, de las cuales, sólo ocho correspondieron a los tipos de vegetación arbórea identificados inicialmente (Cuadro 3).

La biomasa total para el área arbolada, calculada a través de este método, fue de $1\ 073 \times 10^3$ t en promedio, con una variación de 902×10^3 t a $1\ 220 \times 10^3$ t.

Cuadro 2. Tabla de precisión de la fase de entrenamiento (colocación de "semillas") con referencia en los datos de campo

Clase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Total fila	Precisión del productor (%)
1 Agua	358	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	358	100
2 Área sin vegetación	3	58	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	62	94
3 Sombra	0	0	108	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	111	97
4 Pastizal	1	0	0	75	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	77	97
5 Acahual arbustivo <2m	0	0	0	0	333	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	333	100
6 Acahual de encino ≤5m AE	0	0	0	0	1	96	0	0	2	0	0	3	0	3	0	105	91
7 Acahual de latifoliadas-encino-pino ≤5m LA	2	0	0	0	0	3	27	4	1	0	0	0	0	1	0	38	71
8 Acahual bajo de encino EAb	0	0	0	0	0	0	10	90	1	0	0	0	0	0	0	101	89
9 Acahual bajo de pino PAb	0	0	0	0	0	0	0	0	118	1	0	11	0	1	0	131	90
10 Acahual alto de pino Paa	0	0	0	0	0	0	0	0	10	27	4	3	2	1	7	54	50
11 Bosque de pino PB	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	37	0	1	0	4	50	74
12 Acahual bajo de pino-encino P-Eab	0	0	0	0	0	1	0	0	4	0	0	92	0	0	0	97	95
13 Bosque de pino-encino P-EB	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	5	0	36	0	0	51	71
14 Acahual bajo de encino-pino E-Pab	2	0	0	0	0	9	3	0	0	0	0	0	0	90	0	104	87
15 Bosque de encino-pino E-PB	0	0	0	0	0	0	0	0	2	11	14	1	0	0	26	54	48
Total columna	366	58	118	75	335	109	41	94	141	44	60	110	42	96	37	1726	91
Precisión de usuario (%)	98	100	92	100	100	88	66	96	84	61	62	84	86	94	70	91	

Cuadro 3. Valores de biomasa promedio de la clasificación supervisada (BP-IC = Biomasa promedio e Intervalo de confianza 95%)

Método	Valor promedio de biomasa total ($\times 10^3$ t)	Valor mínimo de biomasa total ($\times 10^3$ t)	Valor máximo de biomasa total ($\times 10^3$ t)
Clasificación multispectral	1 073	902	1 220
NDVI (TM4/TM3)	1 164	490	2 409
NDVI (TM4/TM5)	515	331	757
NDVI (TM4/TM7)	726	398	1 210

Cuadro 4. Valores de estimación de biomasa total por el método de clasificación multiespectral y el de ordenación

Clase por porcentaje de biomasa y altura	Clases incluidas	Superficie (ha)	BP-IC (t/ha)	Intervalo de valores (t/ha)
AE	AE	1 070	19 (+/-2.3)	15-25
AL	AL	2 705	22	---
AbE	AbE	2 540	59 (+/-13.4)	43-81
AbP	AbP	726	109 (+/-19.1)	96-123
AbP-E	AbP/E	1 427	114 (+/-29.6)	25-190
AbE-P	AbE/P	656	114 (+/-28.1)	76-171
BP	AaP, BP, AaE-P, BE-P	470	215 (+/-23.4)	143-306
BP-E	AaP-E, AmP-E, BP-E	2 149	225 (+/-22.4)	184-256

Estimación de biomasa arbórea por ordenación mediante el modelo de regresión exponencial

De la correlación entre el VD de los índices de vegetación y la biomasa promedio de cada una de las 48 parcelas, el modelo exponencial presentó los siguientes valores: TM4/TM3: $R^2=0.611$, TM4/TM5: $R^2=0.671$, TM4/TM7: $R^2=0.676$, todos con una significancia estadística $P << 0.001$. En el análisis de residuales de la ecuación exponencial, la dispersión se distribuyó homogéneamente alrededor de dos veces el error estándar (Figura 2).

Por este método el valor promedio más alto de biomasa total fue de $1\ 164 \times 10^3$ t (490×10^3 t a $2\ 409 \times 10^3$ t) aplicando el NDVI TM4/TM3. El valor promedio más bajo de biomasa total se

obtuvo al aplicar el NDVI TM4/TM5 (515×10^3 t, con una variación de 331×10^3 t a 757×10^3 t). Al aplicar el NDVI TM4/TM7, el valor de biomasa total fue intermedio al de los NDVI TM4/TM3 Y TM4/TM5 (Cuadro 4).

El histograma del NDVI TM4/TM3 mostró 117 valores, los cuales quedaron ubicados entre los VD 138 a 255; una gran parte de estos VD cubrieron un número de píxeles que correspondieron a superficies de 150 ha. El histograma del NDVI TM4/TM5 mostró 143 valores que tienen un VD de 50 a 193, la mayor parte de estos valores equivalieron a superficies de 100 ha. El histograma del NDVI TM4/TM7 presentó 130 valores con VD entre 97 y 227, la mayoría correspondiendo a superficies de 100 ha (Figura 3).

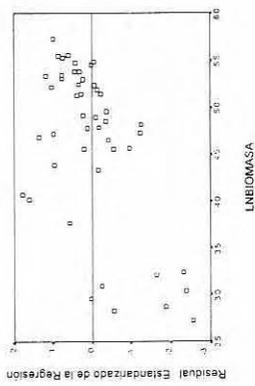
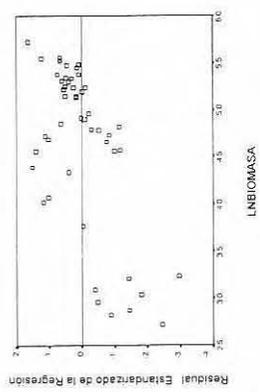
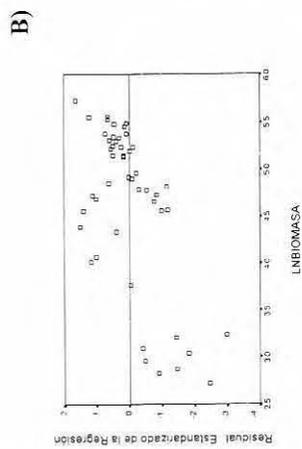
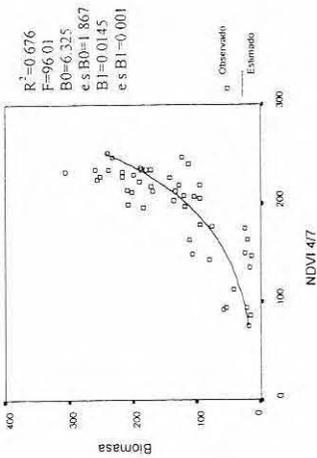
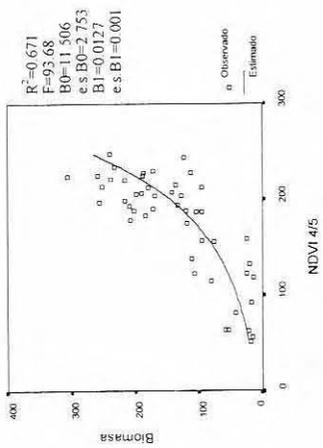
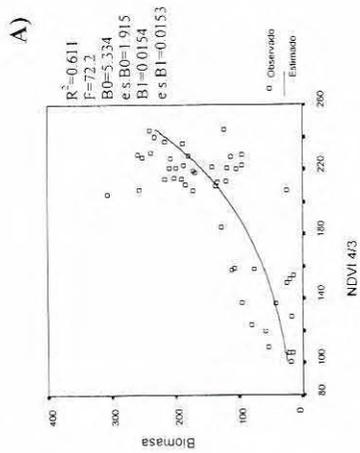


Figura 2. A) Regresión exponencial y relación de ajuste al dispersograma de los datos de la biomasa vs. NDVI. B) Residuales de los modelos exponenciales.

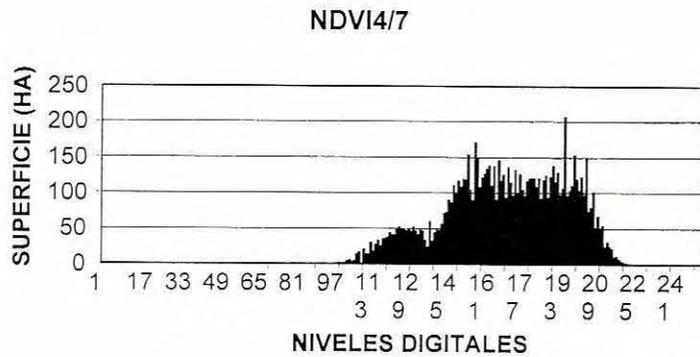
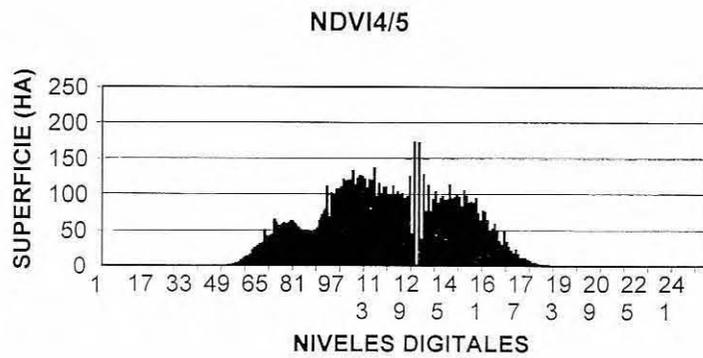
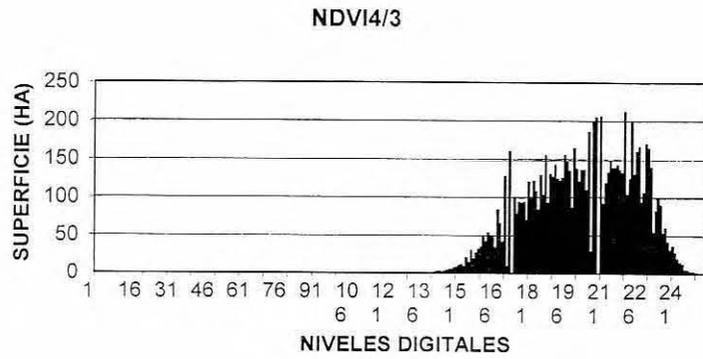


Figura 3. Histogramas de superficies en relación con los valores digitales de los tres índices normalizados de vegetación.

DISCUSIÓN

Al analizar los resultados de la clasificación que se hizo a partir de los datos de inventario, se encontró que el intervalo de biomasa de todos los acahuales arbóreos se sobrepone, por lo que éste no es un indicador que permita distinguir a los diferentes tipos de acahuales identificados. Esto puede deberse a que los acahuales presentan una gran diversidad en la composición de especies leñosas, que incluso llega a ser mayor que la de los bosques. Por otra parte, algunos de estos intervalos (p. ej., AbPE, AbEP) mostraron amplitudes de más de 100% de diferencia entre el valor mínimo y el máximo, lo cual puede deberse a las diferencias en la historia de sitio de cada una de las parcelas evaluadas o a la densidad de árboles (Cuadro 1). Los bosques también presentaron valores de biomasa sobrepuestos entre sí, independientemente del tipo de especies dominantes. Sólo los acahuales arbustivos, se diferenciaron claramente.

Al hacer la clasificación multispectral, no fue posible diferenciar las 13 clases de vegetación identificadas a partir de los datos de inventario. Esto se puede deber a que el muestreo fue sistemático, pero relativamente al azar, por lo que no todas las clases de vegetación identificadas se muestrearon con la misma frecuencia, y de algunas de ellas sólo se tuvo información de una muestra única, no pudiendo obtener valores promedio ni tampoco un intervalo de confianza para pruebas estadísticas.

En particular, los acahuales altos y medios de pino-encino y de pino no pudieron separarse de la clase de bosque correspondiente (BPE y BP), es decir, no mostraron suficiente diferencia en su reflectancia, ya que sólo se registra el dosel dominante independientemente de la altura. De igual manera, en la tabla de precisión se corroboró que las muestras de BEP y BP se traslaparon; aunque en biomasa hay una clara diferencia de dominancia de especies entre estos dos tipos de vegetación, el dosel no necesariamente es diferente, y esto pudiera estar creando dicha confusión (Cuadros 2 y 3). Las ocho clases de vegetación arbórea diferenciadas en la clasificación, posibilitan un análisis detallado del área en estudio en cuanto superficie cubierta

por cada una de estas clases, así como la estimación de biomasa por clases y total. Debido a que los acahuales medios y altos se confunden y quedan incluidos en las clases de mayor altura, el área de estos tipos de vegetación se amplió y, debido a que los valores promedio de biomasa también son más altos, el valor total puede estar sobrestimado.

En lo que respecta al método de ordenamiento mediante el modelo de regresión exponencial, la aplicación del NDVI TM4/TM3 produjo valores más altos de biomasa. Esto puede deberse a que, por una parte, presentaron valores digitales más altos, y por otra, a que la mayor parte de éstos equivalían a superficies también mayores (150 ha) y distribuidas hacia los valores altos, en comparación con los histogramas de frecuencias de los NDVI TM4/TM5 y TM4/TM7 (Figura 3). Pese a que las R^2 mostraron un valor de ajuste estadísticamente aceptable para los tres NDVI utilizados, al correr el modelo con los valores de las constantes y hacer el análisis de residuales para la validación de dicho modelo, se observa que las parcelas con biomasa ≤ 33 t/ha quedan fuera del límite aceptable de predicción (Figura 2B, LNBIOMASA < 3.5). Esta falta de predicción puede deberse a la heterogeneidad y diferente grado de apertura de los acahuales arbustivos, ya que su reflectancia puede estar afectada por el estrato herbáceo del sitio e incluso por la hojarasca y tipo de suelo. Para corroborar esto, sería necesario llevar a cabo una cuantificación de biomasa arbustiva (DAP < 10 cm) y pastizal en dichas parcelas para correlacionarla con los NDVI y evaluar el ajuste del modelo aplicado, o incluso con algún otro tipo de relación matemática.

Algunas parcelas consideradas "atípicas" (Parcela #28: 305 t/ha y VD 205; Parcela #34: 25 t/ha con VD 206) o fuera del límite en el NDVI TM3/TM4, pudieron influir en el ajuste del modelo. Cuando se eliminaron dichas parcelas, se encontró un mejor ajuste y, por consiguiente, se esperaría una mejor predicción (TM4/TM3: $R^2=0.679$; TM4/TM5: $R^2=0.691$; TM4/TM7: $R^2=0.694$). No obstante, la ocurrencia de observaciones "atípicas" es inevitable, sobre todo en paisajes tan heterogéneos como el del área en estudio, y que están sujetos a complejos procesos de intervención humana.

El resultado de la biomasa total calculada por el método de clasificación multispectral, comparado con los valores estimados por el método de ordenamiento exponencial, mostró mayor similitud con el valor máximo del NDVI que relaciona las bandas TM4/TM7 (de mejor ajuste estadístico) y con el valor promedio del NDVI TM4/TM3 (de peor ajuste estadístico). Utilizando el NDVI TM4/TM5, todos los valores de biomasa resultaron más bajos.

Ambos métodos estuvieron influidos por los siguientes factores: a) la relación entre biomasa total, área foliar total y altura del dosel; b) la reflectancia diferencial entre pinos y latifoliadas; c) la relación fenológica de las latifoliadas y la estación de la zona en estudio en la época de adquisición de la imagen, ya que parte de las latifoliadas se encuentran sin hojas en marzo; d) el efecto de sombra debido a la exposición y a la pendiente de las parcelas en relación con la hora de toma de la imagen; e) la imprecisión en la georreferenciación, y f) la dinámica de cambio provocada por intervención humana.

En el método de clasificación multispectral, un factor limitante fue la dificultad para distinguir clases de altura identificadas en las parcelas, en tanto que en el método de ordenación, el NDVI es una medida influida por la reflectancia de los píxeles de alrededor, no siendo éste un valor homogéneo. Sin embargo, el NDVI minimiza el efecto del ángulo solar, lo cual hace que sea deseable para una gran variedad de análisis de vegetación (Turner *et al.*, 1993).

Habría que aplicar la misma metodología en otras regiones con características similares y diferentes a la zona en estudio, para validar la estimación de biomasa a través de modelos matemáticos, y estar en capacidad de realizar cálculos de biomasa a escala regional. También es necesario incluir correcciones topográficas usando el ángulo de incidencia solar relativo a la inclinación local del relieve, y la respuesta de radianza práctica –número digital del NDVI– como lo hicieron Lee y Nakane (1996).

Aunque para la clasificación multispectral la reflectancia del dosel es la que proporciona valores de lectura para la clasificación de la vegetación, para el método de ordenación el

hecho de incluir vegetación de sotobosque (con DAP <10 cm) en la cuantificación de biomasa, sin duda modifica los valores totales por tipo de vegetación, y esto podría contribuir en una mejor correlación entre el dato de reflectancia y la biomasa total de la parcela.

El método de ordenación tiene la ventaja de no necesitar de una clasificación de vegetación, y es suficiente diferenciar zonas "arboladas" y "no arboladas", para aplicar el modelo de regresión. Tiene también la ventaja de resolver parcialmente el problema de incompatibilidad entre inventarios de diversos lugares. Otra ventaja más es que, una vez validado el modelo, a través de su aplicación es posible la evaluación de biomasa arbórea, disminuyendo significativamente los costos, tanto en tiempo como en dinero.

El uso de técnicas de ordenamiento no implica el abandonar la verificación de campo, y por el contrario, lo recomendable sería tratar de combinar ambos enfoques mediante el muestreo semicuantitativo (área foliar, cobertura, densidades, etc.), para optimizar los estudios de NDVI relacionados con biomasa y reservorios de carbono.

De este estudio se concluye que es posible asociar razonablemente la biomasa de vegetación arbolada de pino-encino, con los índices de vegetación. A través del uso de sensores remotos se podrían predecir cambios de biomasa de árboles en escalas temporales y espaciales.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a dos revisores anónimos por sus valiosos comentarios, y a Pedro F. Quintana-Ascencio por su asesoría en el análisis estadístico. El ECOSUR proporcionó la infraestructura y el subsidio para el desarrollo de este trabajo. Fondos recurrentes provinieron de US-Environmental Protection Agency (US-EPA) bajo convenio con ECOSUR (CR822200). A las autoridades y a la comunidad de Jusnabaj, por permitir este estudio en su territorio. A Delfino Méndez Ton, por su ayuda en el Laboratorio de Información Geográfica y Estadística de ECOSUR. A Pablo Santís, Hipólito Pérez, Fortunato García y Rosario García, por su cálida hospitalidad y enseñanza de visión práctica. A Andrés González y John Taylor, por compartir sus experiencias de campo.

REFERENCIAS

- ☐ Ayala López, R. (1998), *Ecuaciones para estimar biomasa de pinos y encinos en la Meseta Central de Chiapas*, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Forestal, División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- ☐ Baret, F. y G. Guyot (1991), "Potential and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment", *Remote Sensing of Environment*, 35: 161-173.
- ☐ Badhwar, G.D., R.B. Mc Donald, F.G. Hall y J.G. Carnes (1986), "Spectral characterization in a boreal forest: relationships between thematic mapper band reflectance and leaf area index for aspen", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 24: 322-326.
- ☐ Breedlove, D. E. (1981), "Introduction to the flora of Chiapas", *Flora of Chiapas*, 1, 1-35.
- ☐ Brown, S. y A.E. Lugo (1992), "Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon", *Interciencia*, 17: 8-18.
- ☐ Cairns, M.A., R. Dirzo y F. Zadroga (1995), "Forest in Mexico: ¿A declining resource?", *Journal of Forestry*, 93: 21-24.
- ☐ Cohen, W.B. (1991), "Response of vegetation indices to changes in three measures of leaf water stress", *Photogrametric Engineering and Remote Sensing*, 57: 195-202.
- ☐ Congalton, R. (1991), "A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data", *Remote Sensing of Environment*, 37: 35-46.
- ☐ Chuvieco, E. (1990), *Fundamentos de teledetección espacial*, RIALP, España.
- ☐ Dixon, R.R., K.J. Andrasko, F.G. Sussman, M.A. Lavinson, M.C. Trexler y T.S. Vinson (1993), "Forest sector carbon offset projects: near-term opportunities to mitigate greenhouse gas emissions", *Water, Air and Soil Pollution*, 70: 561-577.
- ☐ Dixon, R.R., S. Brown, R.A. Houghton, A. M. Solomon, M.C. Trexler y J. Wisniewski (1994), "Carbon pools and flux of global forest ecosystems", *Science*, 263: 185-190.
- ☐ Foody, G. M. y R. A. Hill (1996), "Classification of tropical forests classes from Landsat TM data", *International Journal of Remote Sensing*, 17: 2353-2367.
- ☐ Foody, G. M., G. Palubinskas, R. Lucas, P. Curran y M. Honzak (1996), "Identifying terrestrial carbon sinks: classification of successional stages in regenerating tropical forest from Landsat TM data", *Remote Sensing of Environment*, 55: 205-216.
- ☐ González-Espinosa, M., N. Ramírez Marcial, P.F. Quintana-Ascencio y M. Martínez Icó (1995), "La utilización de los encinos y la conservación de la biodiversidad en Los Altos de Chiapas", *Memorias del III Seminario Nacional sobre la Utilización de Encinos*, 4-6 de noviembre de 1992. Reporte Científico UANL, núm. especial 15, Linares, Nuevo León, México.
- ☐ Hardisky, M.A., F.C. Daiber, C.T. Roman y V. Klemas (1984), "Remote sensing of biomass and annual net aerial primary productivity of salt marsh", *Remote Sensing of Environment*, 16: 91-106.
- ☐ Houghton R. A. (1990), "The future role of tropical forest in affecting the carbon dioxide concentration of the atmosphere", *Ambio*, 19: 204-209.
- ☐ Hunt, E.R. y B.N. Rock (1989), "Detection of changes in leaf water content using near and middle-infrared reflectances", *Remote Sensing of Environment*, 30: 43-54.
- ☐ INEGI (1984), *Cartas: Uso actual del suelo y vegetación*, 1984, escala 1: 50 000, INEGI, con clave E-15-D-62 San Cristóbal; E-15-D-63 Chanal.
- ☐ INEGI (1988), *Cartas: Uso actual del suelo y vegetación*, 1988, escala 1: 50 000, INEGI, con clave E-15-D-64 Morelia; E-15-D-73 Comitán; E-15-D-74 Las Margaritas; E-15-D-84 El Triunfo; E-15-D-85 Amparo Aguatinta.
- ☐ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC; 1992), *Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*, Cambridge University Press, Melbourne, Australia.
- ☐ Lee, D.C., Y. Shimabukuro, B. Rudorff, y T. Krug (1995), "Timber volume estimation using qualitative variables", *Memorias del VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota*, Pto. Vallarta, México, noviembre, pp. 613-621.
- ☐ Lee, N.J. y K. Nakane (1996), "Forest vegetation classification and biomass estimation based on Landsat TM data in mountainous region of west Japan", en Gholz, H.L., Nakane, K. y Shimoda, H. (eds.), *The use of remote sensing in the modeling of forest productivity*, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, The Netherlands, pp. 159-171.

- ☞ Masera, O., M. de J. Ordóñez y R. Dirzo (1997), "Carbon emissions from Mexican forest: current situation and long-term scenarios", *Climatic Change*, 35: 265-295.
- ☞ Miranda, F. (1952), *La vegetación de Chiapas*, Ediciones del Gobierno del Estado, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- ☞ Miranda, F. y X. Hernández (1963), "Los tipos de vegetación de México y su clasificación", *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 28: 29-179.
- ☞ Montoya, G., L. Soto, B. De Jong, K. Nelson, P. Farias, Pajal Yakac'Tic, y J. Taylor (1995), *Desarrollo forestal sustentable: captura de carbono en las zonas tzeltal y tojolabal del estado de Chiapas*. Cuadernos de trabajo (4), Instituto Nacional de Ecología, México.
- ☞ Myers, N. (1989), *Deforestation rates in tropical forest and their climatic implications*. Friends of Earth, London.
- ☞ Ojima, D. S., K. A. Galvin, y B. L. Turner II (1994), "The global impact of land-use change", *BioScience*, 44: 300-304.
- ☞ Peterson, D.L., M.A. Spanner, S.W. Running y K.B. Teuber (1987), "Relationships of thematic mapper simulator data to leaf area of temperate coniferous forests", *Remote Sensing of Environment*, 22: 323-341.
- ☞ Rey-Benayas, J.M. y K.O. Pope (1995), "Landscape ecology and diversity patterns in the seasonal tropics from Landsat TM imagery", *Ecological Applications*, 5: 386-394.
- ☞ Ripple, W.J. (1986), "Spectral reflectance relationships to leaf water stress", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52: 1669-1675.
- ☞ Rzedowski, J. (1978), *Vegetación de México*, Limusa, México.
- ☞ Sayer, J. A. y T. C. Whitmore (1991), "Tropical moist forest: destruction and species extinction", *Biological Conservation*, 55: 199-213.
- ☞ Sellers, P. (1985), "Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration", *International Journal of Remote Sensing*, 6: 1335-1372.
- ☞ Spanner, M.A., L.L. Pierce, D.L. Peterson y S.W. Running (1990), "Remote sensing of temperate coniferous forest leaf area index: the influence of canopy closure, understory vegetation and background reflectance", *International Journal of Remote Sensing*, 11: 95-112.
- ☞ Steven, M.D., T.J. Malthus, F.M. Dawson, K.W. Jaggard y B. Andrew (1992), "Monitoring responses of vegetation to stress", *Remote Sensing from Research to Operation, Proceeding of 18th Annual Conference of the Remote Sensing Society*. Arthur P. Cracknell y Robin A. Vaughan (ed.), University of Dundee, pp. 369-377.
- ☞ Turner D. P., G. Koerper, H. Gucinski y C. Peterson (1993), "Monitoring global change: comparison of forest cover estimates using remote sensing and inventory approaches", *Environmental Monitoring and Assessment*, 26: 295-305.
- ☞ Tucker, C.J. (1979), "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation", *Remote Sensing of Environment*, 8: 127-150.
- ☞ Warin, R.H. y W.H. Schlesinger (1985), *Forest ecosystems: concepts and management*, Academic Press, Inc. San Diego, California.
- ☞ WRI (World Resources Institute; 1994), *World Resources 1994-95*, Oxford University Press, New York.
- ☞ Wofsy, S.C., M.L. Goulden, J.W. Munger, et al. (1993), "Net exchange of CO₂ in the mid-latitude forest", *Science*, 260: 1314-1317.