



El índice Ka: un nuevo algoritmo para analizar los componentes de la superficie terrestre en imágenes de satélite

ROBERTO LUÉVANO ESCOBEDO*, KARLA O. LUÉVANO DE LA CRUZ**, GERARDO DE LIRA REYES***, WALTER RITTER ORTIZ****, GUSTAVO A. MARTÍNEZ TURANZAS***, HUMBERTO RODRÍGUEZ FUENTES***, EMILIO OLIVARES SÁENZ*****

Los bosques del país aún no han sido inventariados en su totalidad, por lo que generar una clasificación de los estratos vegetales es complicado por estar sujeta a diversos procesos ecológicos.¹ A esto se aúna su composición definida por la diversidad, densidad y distribución de especies,² los costos tan elevados por los métodos tradicionales, tales como las evaluaciones de campo en los inventarios y el uso de fotografías aéreas, las cuales quedan obsoletas en poco tiempo debido a las actividades de aprovechamiento forestal. Un método a través de sensores remotos puede proporcionar información estratégica, con mayor rapidez y más económica, para la planeación y organización de la estructura del bosque.³ Así, los programas de forestación o reforestación se pueden encaminar a las necesidades y sitios que lo requieran. La composición de especies y las copas cerradas son factores importantes que afectan la respuesta espectral del bosque o dosel. La riqueza forestal de distintas regiones del país tiene cambios muy continuos por la destrucción de los bosques y selvas, pronosticándose la desapa-

rición total de esta biodiversidad.⁴

El establecimiento de la vegetación en el estrato inferior del bosque está influenciado por la disponibilidad de semillas y el sustrato,⁵ así como por factores ambientales como la radiación solar, temperatura del suelo, temperatura del aire, humedad del suelo y humedad atmosférica.⁶ La combinación de los factores anteriores es decisiva en el establecimiento y estructura del dosel y el conocimiento de éstos es esencial para generar un sistema de clasificación de cobertura de la tierra.³

Antecedentes

Desde 1989, el sistema Alberta Vegetation Inventory (AVI) ha generado un índice para “mapear” bosques, con dimensiones de dos hectáreas.⁷ Este nivel de detalle del estrato no se considera apropiado para datos de satélite.³ Las bases

* Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, FCF-UANL.

** Escuela de Matemáticas, UJED.

*** Facultad de Agronomía, UANL.

**** Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, luevano@ujed.mx

para la clasificación de imágenes de sensores remotos son la determinación de la respuesta espectral de los diferentes elementos o clases contenidos en la cobertura del suelo a partir del número digital (DN) de las bandas, así el índice de vegetación procede de la relación entre la reflectividad del infrarrojo cercano y el rojo, que da una medida del vigor de la cubierta vegetal. Un ancho de banda inadecuado o la elección incorrecta del número y posición de las bandas conduce a resultados pobres de la imagen empleada, que debe hacer una discriminación de la cobertura en cada píxel, al aplicar los índices tales como: NDVI, el SAVI, ARVI, éstos tienen como finalidad analizar la vegetación, para ello se han empleado bandas que leen en el visible de 0.4 a 0.7, μm B1, B2 y B3 y el rojo de 0.7 a 0.9, μm B4, del espectro magnético en Landsat, diversos estudios han demostrado que cada uno de estos índices tiene dificultad para mostrar los valores pequeños. El índice más usado es el NDVI cuyo rango es de -1 a +1 (índice de vegetación de diferencia normalizado), midiendo el verdor de la hoja, este índice se obtiene a partir de las bandas 3 y 4 para Landsat ETM+, que hasta la fecha se aplican en el análisis de la vegetación, determinado por la fórmula:

$$\text{NDVI} = \frac{P_{i,\text{IRC}} - R_{i,\text{R}}}{P_{i,\text{IRC}} + R_{i,\text{R}}}$$

donde $P_{i,\text{IRC}}$ y $R_{i,\text{R}}$ indican las reflectividades del píxel i en la banda del infrarrojo cercano y del rojo.

El valor del NDVI produce resultados con una valoración relativa y se considera que cuanto más positivo sea el valor, mayor vigor vegetal presenta la zona observada. Con la finalidad de evitar los valores negativos o muy pequeños, se han asignado constantes,⁸ de tal forma que los valores obtenidos de imágenes Landsat o Spot, con valores de NDVI inferiores a 0.5, tienen un error mayor y se aplica una corrección que haga equivalente el cálculo con DN, a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{NDVI} = \frac{R_{\text{IRC}} - 0.801g R_{\text{RI}}}{R_{\text{IRC}} + 0.801g R_{\text{RI}}}$$

Otro autor considera que el resultado puede conducir a problemas de interpretación mayores⁹ y se propone un $\text{NDVI}' = (\text{NDVI} + 1) * 125$, considerando que NDVI original varía de -1 a +1, al sumarle +1 elimina valores negativos y multiplicarlo por 125 se expande el rango de 0 a 250 de lectura en la imagen generada, normalmente su lectura es de 0 a 255 DN.

Con la finalidad de que NDVI se interprete mejor, se ha propuesto que se le adicione uno para que el promedio usado pueda obviar los valores negativos y el resultado es multiplicado por una constante para usar los valores de 8-bit, 256 en el gris de la imagen, y se desarrolla la siguiente modificación¹⁰ para el índice de vegetación:

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{NIR} - \text{R})}{[(\text{NIR} + \text{R}) + 1] * 128}$$

Una clasificación típica de la vegetación es usar métodos supervisados o no supervisados con la imagen de las bandas.^{11,12} Un método supervisado incluye el entrenamiento para la obtención de datos y la definición de las clases de cobertura del suelo, mediante un estudio previo del área,¹³ el no supervisado sólo emplea algoritmos estadísticos para dividir una imagen dentro de un número de bloques espectrales, basados en el agrupamiento natural que presentan los datos y el parámetro para conducir la clasificación.^{14,15}

En un estudio de las bandas¹⁶ TM5/TM4 se determinó el cociente para aislar las cubiertas vegetales de la roca desnuda. Por otro lado, con el cociente obtenido¹⁷ de la combinación de las bandas TM5/TM4 y TM7/TM4, se evaluó el daño en bosques de coníferas, se diferenció el bosque decíduo, el suelo desnudo, rocas y agua, permitiendo con ello identificar la vegetación verde de coníferas y los daños o mortalidad que ocurre en las regiones de alta montaña.

Debido a la complejidad para la comprensión del valor digital obtenido de imágenes satelitales, de los diversos índices utilizados, en el presente estudio se propone un nuevo algoritmo que se espera elimine esa dificultad o la minimice, el índice Ka , el cual ha sido desarrollado por Roberto Luévano Escobedo y Karla Olimpia Luévano de la

Cruz, en 2003, para el análisis de los componentes de la superficie terrestre, cuya base fundamental es a través del valor digital de la imagen, que es la información base de los sensores remotos. En este análisis, y como estudio de caso, se trabaja solamente con las coníferas, obteniéndose con esto los primeros valores o firmas espectrales de este grupo biológico.

Objetivos

- Conocer la relación del valor espectral de coníferas con el NDVI y el índice Ka
- Determinar el valor o firma espectral de las especies de coníferas
- Determinar, por medio del índice Ka , el cambio de la cubierta vegetal en el área de estudio entre la escena del año 2000 y 2004.

Métodos

Descripción del área de estudio

El área estudiada se localiza en el municipio de Pueblo Nuevo, Dgo., a 100 km al sur de la ciudad de Durango 23°22'15" y 23°29'50" de latitud Norte y los meridianos 104°48'45" y los 104°53' de longitud Oeste (carta topográfica F13-b-31 del INEGI), con una superficie de 5068 ha, dentro de la provincia denominada Sierra Madre Occidental y subprovincia de Grandes Mesetas y Cañones Duranguenses. La altura media de la zona de estudio es de 2700 msnm; el tipo de suelo dominante es regosol (Eútrico) asociado con litosol y cambisol con textura media, cubriendo el 88%, litosol asociado a regosol de textura media, cubriendo el 5% y el cambisol con un 7%. El clima, con base en la clasificación de Koeppen,¹⁸ es de dos tipos C (E) (W2), tipo semifrío, subhúmedos con lluvias en verano y C (W2): templado subhúmedo con lluvias en verano. Vientos todo el año, con dirección S, SO, SE, temperatura media anual de 11.2°C, máxima de 24.4°C y mínima de -1.8°C, y con precipitación media anual de 80.8 cm.¹⁹

Método de análisis en campo y laboratorio

Se utilizaron los datos del inventario cuantitativo de las especies de coníferas²⁰ (tabla I) obtenidas mediante un muestreo simple aleatorio en unidades muestrales de dimensiones de 100 x 100 m, analizando a 20 de ellas, mismas que se georreferenciaron en campo con GPS; con esta información se ubicaron en la imagen satelital, en el laboratorio de teledetección de la Facultad de Agronomía, se determinaron sus valores espectrales, en las seis bandas de la toma correspondiente al año 2000 y de las siete bandas de la toma de 2004, del sensor ETM+7 del Satélite Landsat, de fecha del 19 de marzo, respectivamente; determinando inicialmente el valor digital de cada unidad para cada banda, y saber cuál banda es la que mejor representa la vegetación analizada.

La determinación espectral se realizó por medio del índice de vegetación normalizado NDVI, y su valor se obtuvo con la combinación de las bandas que regularmente se usan para medir este índice y para poder contrastar su resultado con la combinación de la banda TM5; por ser la más adecuada para esta vegetación, la fórmula es:

$$NDVI = (TM3 - TM4) / (TM3 + TM4) \text{ y } (TM4 - TM5) / (TM4 + TM5).$$

Tabla I. Listado de especies de coníferas.

Especie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Pino otonoc	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pino quercifolius	0	36	36	0	7	37	1	2	4	30	15	5	28	1	4	8	7	0	18	18
Pino coney	0	0	33	0	0	0	0	0	39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pino cristobalanus	63	5	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pino discolor	0	38	23	0	5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pino durangensis	26	35	123	0	23	237	67	37	0	3	8	6	8	2	2	8	0	36	5	5
Pino encino	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Pino lecontei	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pino laricina	63	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	180	0	0	0
Pino lambertii	0	22	0	0	0	0	0	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Psuedotsuga mucronata	0	0	0	0	90	0	0	0	73	37	26	0	33	2	0	0	0	0	0	0
Pino mitis	50	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pino resinosa	0	30	63	15	33	63	50	0	66	95	306	8	18	116	8	34	35	56	37	
Sú. de indicadas	186	287	349	17	134	239	121	115	105	343	144	128	48	24	120	181	21	73	69	67
Sú. de especies	6	6	8	2	5	5	3	6	4	5	4	4	3	5	3	3	2	4	4	4

A fin de establecer que el índice *Ka* utilizado en el análisis de la vegetación proporciona mejor información que NDVI, se aplicaron las mismas bandas y sus valores digitales, que al combinarse con la vegetación generan el valor espectral de cada unidad muestral, relacionado con la densidad poblacional. El índice *Ka* se define como el valor espectral o reflexión de la cobertura de la superficie analizada, relacionada con la densidad de los componentes presentes en la unidad muestral.

El píxel analizado en la imagen tiene una dimensión de 30x30m, y se analizaron 110 de éstos para cada unidad muestral, siendo el equivalente a una ha.

Valor espectral de cobertura superficial y su relación con las coníferas analizadas

El valor espectral se determinó con el índice *Ka*, este índice se sitúa en un valor de 0 a 5. El valor espectral de cero corresponde a la mayor cobertura o densidad del componente. El valor espectral de cinco se refiere a la menor cobertura o densidad del componente analizado. El valor espectral de *Ka* permitió medir la relación con las especies de coníferas, se considera que a mayor valor espectral menor cobertura vegetal, el índice se determina con la siguiente ecuación:

$$\text{Índice Ka} = \frac{VD_b}{(Spi)(E_{Ti})} \quad i=1, \dots, n \quad (1)$$

donde *Ka* es el valor espectral de la densidad de los componentes en el píxel de la imagen (ejemplo: vegetación, suelo desnudo, rocas, agua, nubes etc.); *i* es el número de sitios o unidades muestrales analizadas; VD_b es el valor digital de la banda satelital utilizada, o la combinación de éstas; E_{Ti} corresponde al total de las especies presentes en la unidad muestral analizada y Spi es la suma de los individuos de todas las especies en la unidad muestral.

Valor o firma espectral de las especies

La determinación del valor o firma espectral de los diferentes componentes dentro de la unidad muestral se obtiene a partir del valor que adquiere Vs_s ,

que se calcula con la siguiente ecuación:

$$Vs_s = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^n (Ka * m)_i \right\}_s}{It_s} \quad (2)$$

donde Vs_s es el valor o firma espectral de la especie; *m* es el número de individuos de la especie *s* en la unidad *i*; It_s es el número total de individuos de la especie *s* de todas las unidades analizadas; *i* es el número de unidades analizadas y *s* representa la especie seleccionada.

Como se ha mencionado en este estudio, las unidades muestrales (UM) arrojan una abundancia de las especies del género *Pinus*. La imagen se georreferenció mediante la carta topográfica y vegetación del INEGI F13-B31, para cada banda por medio de sus coordenadas, las que previamente se determinaron. El programa utilizado para el análisis de las imágenes satelitales fue el Ilwis Ver 3.0.

Resultados y discusión

Para conocer la relación de coníferas con el NDVI, se generaron las imágenes con las bandas TM3, TM4, además de la combinación con la banda TM5²¹ (figuras 1 y 2), se puede observar que los valores generados por este índice, independiente a la banda empleada, no permiten analizar si existe relación con la vegetación o con otro elemento de la superficie terrestre.

Con el índice *Ka* (figuras 3 y 4), se obtiene un alto grado de relación, entre lo que representa la imagen (figura 7) y los datos de campo. El uso de estas bandas con este índice, a diferencia de NDVI, mantiene su resultado y la variación sólo obedece a que la banda TM5 es más específica para coníferas, por lo que éstas representan una excelente relación.

Se está buscando la mejor forma de identificar los componentes de la superficie terrestre, aplicando imágenes de alta resolución, sin embargo, el costo es limitante, y ha sido difícil encontrar el algoritmo que separe adecuadamente cada componente superficial; destaca la revisión que hacen en este sentido un grupo de investigadores.²² Sin lograr aún tal cometido, con el índice *Ka*, aparte de resolver esta problemática de diferenciar adecua-

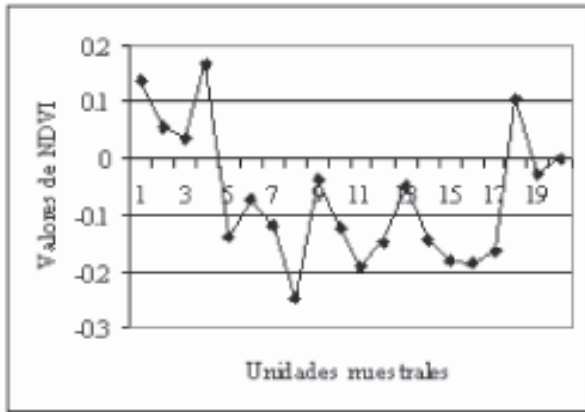


Fig. 1. Las coníferas cuantificadas no tienen relación con los valores de NDVI, a partir de de las bandas TM3 y TM4 (ver tabla I).

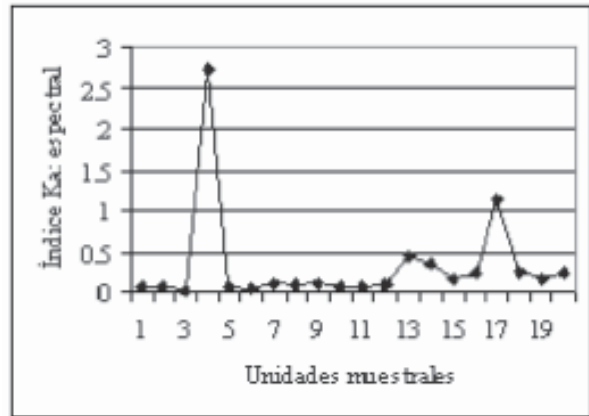


Fig. 3. Los valores de K_a están relacionados con las coníferas analizadas, imagen de las bandas TM3 y TM4 (ver tabla I).

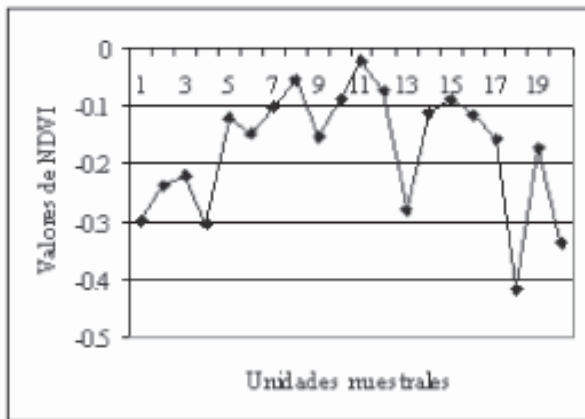


Fig. 2. En los valores de NDVI, con las bandas TM4 y TM5, el índice no tiene relación con la vegetación, independiente a la banda empleada.

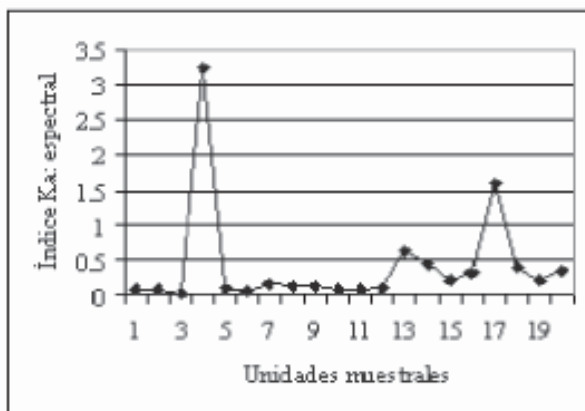


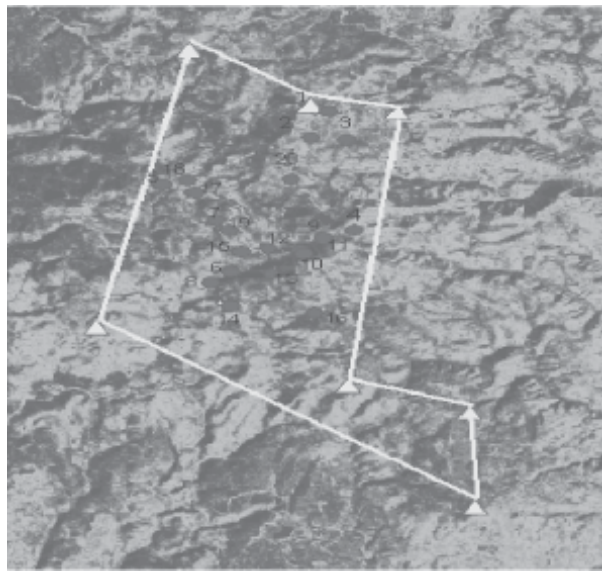
Fig. 4. Valor K_a con las bandas TM4 y TM5, obsérvese la relación con la vegetación, vegetación analizada (ver tabla I).

damente los elementos del paisaje, se pueden identificar variaciones, por mínimas que se presenten, en grandes masas forestales o pequeñas áreas, de tal forma que los aprovechamientos forestales y el impacto o cambio, después de un incendio, se puede medir de un período a otro, como se observa en las figuras 5 y 6, a partir de las imágenes generadas en falso color para ambos años. Obsérvese que en tan sólo cuatro años existe un incremento en K_a en casi todas las unidades analizadas (figura 7), este cambio refleja el efecto de los aprovechamientos forestales, por lo que habrá que cuidar los modelos que se están usando, esto porque, más que permitir el crecimiento sin competencia, trae consigo daños en el sistema.

Aplicando los datos espectrales generados por el índice K_a , se determinó el valor o la firma espectral de las diferentes especies analizadas, por lo que ello permitirá realizar estudios de diversidad por medio de imágenes satelitales, a medida que se incremente el banco de firmas espectrales.

Conclusiones

- La banda que mejor representan las coníferas es la 356.
- El NDVI no genera información confiable sobre las condiciones de la vegetación, mucho menos permite diferenciarla.



Legenda

- 0.04 Bosque cerrado de coníferas
- 0.08 Bosque abierto de coníferas
- 0.11 Vegetación de matorral
- 0.15 Suelo desnudo
- 0.19 Afloramientos rocosos

Fig. 5. Unidades muestrales de la imagen en falso color de la banda 356, de 2000.

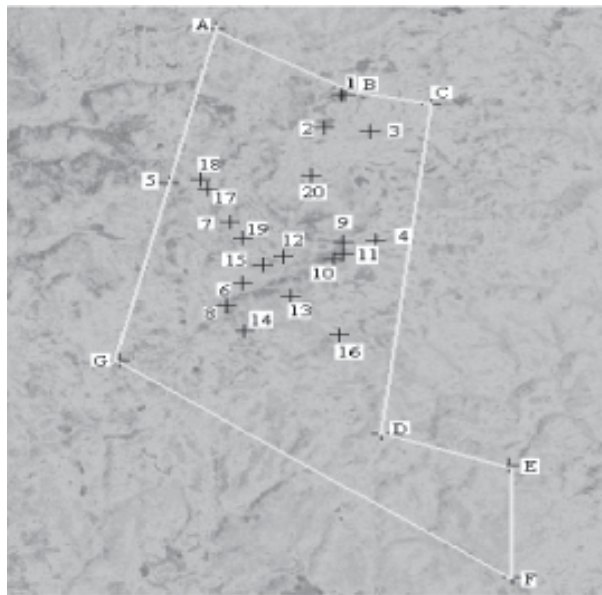


Fig. 6. Unidades muestrales de la imagen en falso color de la banda 356, de 2004.

- c) El índice K_a refleja con claridad la cobertura del suelo, asimismo, permite determinar los cambios en análisis temporales.
- d) A partir del valor K_a es posible obtener el va-



Fig. 7. Cambios espectrales de la cubierta vegetal obtenidos a través del índice K_a a partir de los valores digitales.

- lor o firma espectral de las especies.
- e) El índice K_a abre la puerta para un nuevo concepto de análisis a través de la teledetección.
- f) Se podrá aplicar en diferentes resoluciones espaciales con resultados altamente coherentes e identificar cambios por mínimos que ocurran.

Resumen

El cambio del paisaje de la superficie terrestre, su composición y estructura, ocurrido por causas diversas, ha estado en la mira de toda la humanidad. Se han desarrollado diversas formas para entenderlos y la sensoría remota es lo más reciente y novedoso para tener un conocimiento rápido de grandes extensiones. En este estudio se ha desarrollado un nuevo algoritmo para medir estos cambios, así como para identificar valores espectrales de especies de coníferas, utilizando imágenes del satélite Landsat7 ETM+. Los resultados muestran un gran potencial del índice K_a para detectar los diferentes componentes superficiales y su variabilidad debido a efectos naturales o antropológicos, etc.

Palabras clave: Índice K_a , Coníferas, Sensoría remota, Índice de vegetación espectral.

Abstract

The change in the landscape of the terrestrial surface, its composition, and its structure, caused by many factors, has been in the aim of all humanity. Diverse forms have been developed in order to understand them, the sensory remote being the most recent and novel thing in acquiring fast knowledge of large extensions. In this study a new algorithm has been developed to measure these changes, as well as to identify ghasly values of coniferous species using images of the satellite Landsat7 ETM+. The results show a great potential of the Ka index in detecting the different superficial components and its variability due to natural effects or due to man.

Keywords: Coniferous, Models, Remote sensing, Index of vegetation *Ka*.

Agradecimientos

Al Cocytad de Durango y al Paycit-UANL, por su apoyo financiero para la realización de este estudio.

Referencias

1. Navratil S., L. G. Brace, E. A. Sauder and S. Lux. (1994). Silvicultural and Harvesting Options to Favor Immature white Spruce and Aspen Regeneration in Boreal Mixedwoods. Information Report NOR - X - 337. Canadian Forest Service Northern Forestry center, Edmenton, AB. 78 p.
2. Blackburn, G. A. and E. J. Milton (1995). Seasonal variations in the spectral reflectance of deciduous tree canopies. *Int. J. Remote Sens.* 16 (4): 709 - 720.
3. Hall R. J., Peddle. D. R. and Klita D. L. (2000). Mapping conifer understory within boreal mixedwoods from Landsat T M satellite imagery and forest inventory information. *The Forestry Chronicle*. Vol. 76. No 6. pp 887- 901.
4. Cortina V. Sergio., Macario M. Pedro, Ogneva H. Y. (1998). Cambios en el suelo y deforestación en sur de los estados de Campeche y Quintana Roo, México. *Investigaciones Geográficas* No. 38, pp. 41-56.
5. Lieffers, V. J. and J. A. Beck (1994). A semi-natural approach to Mixedwoods Management in the prairie provinces. *For Chron.* 70 (3): 260-264.
6. Groot. A., D.W. Carlson. R.L. Fleming and J.E. Wood. (1997). Small Opening in Trembling Aspen Forest: Microclimate and Regeneration of White Spruce and Trembling Aspen NODA-/NFP Technical Report TR- 47. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Great Lakes Forestry centre Sault, Ste Marie. ON. 25 p.
7. Nesby, R. (1997). Alberta Vegetation Inventory Standards Manual, version 2.2. Alberta Environmental Protection, Edmonton, AB. 150 p.
8. Guyot, G. and Gu, X.F. (1994). Effect of radiometric corrections on NDVI determined from SPOT-HRV and Landsat- TM data *Remote Sensing of Environment*, vol 49, pp 169- 180.
9. Chuvieco E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial*. Ediciones Rialp. S.A. Madrid. 568 pp.
10. Dagonne, A., A. Dauphine, G. Escleyne, L. Gueron, L. Baudoin and M. Lenco (1990). Use of aerial and satellite-based remote sensing in multi-sensor, multi-date mode to study vegetation regeneration after fire. *Photo Interp* 5: 48-51.
11. Ayanz M. J. S. and G. S. Biging (1996). An iterative classification approach for mapping natural resources from satellite imagery. *Int. J. Remote Sens.* 17(5): 957-981.
12. Wulder, M. (1998a). Optical remote- sensing techniques for the assessment of forest inventory and biophysical parameters. *Progress in Physical Geography* 22 (4): 449-476.
13. Mather, P. M. (1987). *Computer processing of Remotely-sensed Images*. John Wiley and Sons, New York . N.Y. 352 p.
14. Lillesand, T.M. and R.W. Kiefer (1994). *Remote sensing and Image Interpretation*. John Wiley and Sons, Toronto, 750 p.
15. Cihlar, J. (2000). Land cover mapping of large areas from satellites: status and research priorities. *Int. J. Remote Sens* 21 (6/7): 1093-

- 1114p.
16. Podwysocki, M. H., Power, M. S. y Jones, O.D. (1985). Preliminary evaluation of the Landsat 4 Thematic Mapper data for mineral exploration, en *The Earth's Surface Studied from Space, Advances in Space Research* (S.G. Ungar Ed.), Pergamon Press, Oxford, 13-20 pp.
 17. Vogelmann, J. E. and Barrett N. Rock. (1998). Assessing Forest Damage in High-Elevation Coniferous Forests in Vermont and New Hampshire Using Thematic Mapper Data. *Remote Sensing of Environment* 24: 227-246.
 18. García E. (1978). *Los climas de México*, UNAM. 160 pp.
 19. Cuévano E. R., Martínez, A. G., Olivares i.e., De Lira, R. G. Rodríguez F. H, and Ritter O. W. (2000 otoño). Determinación de la variación climática en las Bayas: municipio de Pueblo Nuevo, Dgo. México. *Memorias de seminarios otoño*, Fac. Agronomía, UANL. 1-9.
 20. Luévano E. R., Martínez, A. G., Olivares S. E., De Lira, R. G. Rodríguez F. H, and Ritter O. W. (2001 autumn). Las especies de pinos de las Bayas: municipio de Pueblo Nuevo, Dgo. México. *Memorias de seminarios otoño*, Fac. Agronomía, UANL. 31-35.
 21. García M. R. Pérez G. M. E. (2001). Discriminación de gypsoles mediante el sensor ETM+ del Satélite Landsat - 7. *Edafología*, Vol 8 (3)/ 25, PP 25-36.
 22. Henny M., Cutler M., Fairbairn and Thomson Gillian (2004). *Global Ecology and Biogeography*, (Global Ecol. Biogeogr.)(2004) 13, 359-369.

Recepción: 10 de febrero de 2005
Aceptación: 20 de octubre de 2005