

# DETECCIÓN DE ÁREAS FORESTALES AFECTADAS POR EL ATAQUE DE INSECTOS EMPLEANDO TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA. APLICACIÓN A LAS MASAS DE EUCALIPTO AFECTADAS POR *GONIPTERUS SCUTELLATUS* EN GALICIA

M.F. Álvarez Taboada <sup>1</sup>, H. Lorenzo Cimadevila <sup>2</sup>, J. R. Rodríguez Pérez <sup>1</sup>, J. Picos Martín <sup>2</sup> y E. Valero Gutiérrez del Olmo <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad de León. E.S.T. Ingeniería Agraria. Avd. Astorga, s/n. 24400-PONFERRADA- LEON (España). Correo electrónico: flor.alvarez@unileon.es

<sup>2</sup> Universidad de Vigo. E.U.E.T. Forestal. Campus de A Xunqueira s/n. 36005-PONTEVEDRA (España)

## Resumen

En el pasado los inventarios de daños forestales se realizaban principalmente según métodos de muestreo de campo tradicional. Esto empezó a cambiar a finales de los años 80, cuando numerosos autores empezaron a emplear técnicas de teledetección para estimar la extensión y la intensidad de los daños en las masas forestales debidos a plagas. Desde entonces estas técnicas se han desarrollado ampliamente, principalmente en Europa Central y en Canadá y Estados Unidos. En este estudio se han revisado y comparado las metodologías existentes, y se ha propuesto una para las masas de eucalipto afectadas por *Gonipterus scutellatus* en Galicia. Esta metodología contempla la elaboración de un sistema de información geográfica con todos los datos necesarios para realizar la clasificación de estas zonas de forma óptima (correcciones topográficas, atmosféricas, ortofotografías, datos de inventario terrestre...) así como de las variables de interés para la gestión de estas zonas arboladas, relacionadas con el mayor o menor grado de incidencia de la plaga. Las técnicas de teledetección empleadas se basan en clasificadores orientados a objetos, que permiten considerar variables no sólo espectrales, sino texturas, formas, vecindad...

Palabras clave: *Defoliación, Control de plagas, Monitorización, Orientación a objetos*

## INTRODUCCIÓN

Desde principios de los años 90 numerosos investigadores se han centrado en emplear sensores ópticos o térmicos para detectar y cartografiar perturbaciones en los bosques, debidas a fuegos, cortas o ataques de plagas. La defoliación en masas forestales provoca cambios en la

reflectancia y puede emplearse para detectar los daños causados por los insectos. Las imágenes satélite permiten a los gestores establecer de forma rápida el nivel de daño actual, de modo que se pueda actuar de forma diferente según el grado de infección. Asimismo permite a los investigadores investigar la defoliación debida a insectos en áreas muy extensas, de modo que la

dinámica seguida por los brotes se puede relacionar con otros parámetros ambientales de modo que se puedan entender mejor y, de algún modo, predecirlos (LUTHER et al., 1997). Los primeros trabajos realizados en los años 80 demostraron la utilidad de las imágenes Landsat para detectar los daños causados por polillas (*Lymantria dispar*) y gusanos de los abetos (*Choristoneura fumiferana*; *C. occidentalis*) en los bosques norteamericanos (DOTTAVIO & WILLIAMS, 1983; FRANKLIN et al., 1995). Estas imágenes se han continuado empleando para detectar ataques de otros insectos (RADELOFF et al., 1999). En la actualidad la aparición de nuevos sensores, la disminución en los costes de adquisición de imágenes de mayor resolución y los problemas existentes con Landsat 7 ha inducido al empleo de nuevas resoluciones (espaciales y espectrales, fundamentalmente) y nuevos sensores en la detección de áreas defoliadas. La posibilidad de emplear clasificadores orientados a objetos que consideran la información espectral y la información contextual favorece la fusión de datos y el empleo combinado de diferentes fuentes de información, de modo que se produce una integración entre la información espectral y temática para mejorar los resultados.

## OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es realizar una revisión de las investigaciones realizadas para detectar áreas forestales afectadas por defoliación causada por insectos empleando sensores remotos y proponer una metodología adecuada para su aplicación a masas de eucalipto afectadas por *Gonipterus scutellatus* en Galicia.

## ANTECEDENTES

La mayoría de los estudios de defoliación en masas forestales realizados han empleado imágenes procedentes de sensores multispectrales de resolución media, principalmente los correspondientes al programa Landsat y SPOT. Ello se ha debido a que durante muchos años han sido las únicas imágenes con un acceso sencillo y cuyas resoluciones (espacial, espectral, tempo-

ral, radiométrica...) se ajustaban a los requerimientos de los investigadores. La proliferación de nuevos sensores en la actualidad ha diversificado el material de partida para este tipo de estudios (WULDER & FRANKLIN, 2003).

Muchos de los estudios realizados en Centroeuropa se han ocupado no sólo de detectar zonas defoliadas, sino todas aquellas afectadas por el denominado “decaimiento de los bosques” (*Forest decline*; *Waldsterben*) (ROCK et al., 1986; VOGELMANN & ROCK, 1988; EKSTRAND, 1990 y 1994; ARDÖ, 1998). Este término se emplea para describir el deterioro en el estado sanitario de los bosques, incluyendo cambios metabólicos, problemas en la reproducción, senescencia temprana, decoloración, alteraciones en el crecimiento, defoliación y, finalmente, muerte del árbol. Los métodos empleados por estos autores se han adaptado posteriormente a la detección de zonas defoliadas por insectos (RADELOFF et al., 1999).

Numerosos métodos empleados en un principio para la detección de cambios se han aplicado a zonas forestales (COLLINS & WOODCOCK, 1996, COPPIN & BAUER, 1996) y pueden emplearse para detectar defoliación causada por insectos. Entre estos métodos se deben destacar por su sencillez y relativa robustez el método de “diferencias en las imágenes” y el de “diferencias en el ratio” (GREEN et al., 1994), si bien no son adecuados por no reflejar correctamente las diferencias en el ángulo de elevación del sol, las condiciones atmosféricas o los cambios fenológicos entre imágenes tomadas en diferentes fechas (SINGH, 1989).

Otros métodos de detección de cambio más sofisticados son aquellos que realizan transformaciones en la imagen, tales como la transformación Gramm-Schmidt (COLLINS & WOODCOCK, 1994), el análisis de componentes principales (GONG, 1993) o la transformación Tasseled Cap (COLLINS & WOODCOCK, 1996). Otros modelos empleados para detectar cambios en la cubierta derivan del modelo de reflectancia de cubiertas de Li-Strahler (MACOMBER & WOODCOCK, 1994) y del análisis cambio-vector (LAMBIN & STRAHLER, 1994).

En algunos de estos estudios se han logrado como resultado clasificaciones bastante precisas empleando una única imagen (FRANKLIN &

RASKE, 1994), pero los mejores resultados se han obtenido a partir del análisis de series multitemporales de imágenes (FRANKLIN et al., 1995). La defoliación causada por insectos ha sido sin duda la principal área de trabajo de la investigación en detección de daños forestales, aunque los resultados se pueden considerar en general como no excesivamente satisfactorios, puesto que en la mayoría de los casos sólo se han podido diferenciar como mucho tres grados de defoliación (severa, media y débil), con precisiones del orden del 70-80%, siendo especialmente difícil detectar los niveles bajos de defoliación (RADELOFF et al., 1999).

En la actualidad se están empleando con éxito como estimadores de la defoliación las variaciones en el índice de área foliar (LAI) (HALL et al., 2003; EKLUNDH et al., 2003) y con modelos de mezclas (RADELOFF et al., 1999).

En España el estudio más sobresaliente en este campo es el realizado por NAVARRO et al., (2000) para el seguimiento de la procesionaria en los pinares de Andalucía empleando imágenes del sensor IRS-WIFS. Empleando la banda del NIR y para 3 clases de defoliación se consigue una clasificación adecuada del 50% de las masas, de acuerdo con la matriz de confusión empleada. Para mejorar estos resultados se propone disminuir el número de clases de defoliación, localizar con mayor precisión las áreas de entrenamiento, realizar correcciones topográficas y de reflectividad en las imágenes y realizar un seguimiento multitemporal.

De la revisión de los trabajos realizados se puede determinar que existen una serie de cuestiones que se deben considerar a la hora de hacer un seguimiento de la defoliación causada por insectos empleando imágenes satélite.

En primer lugar se debe tener en cuenta que las interacciones planta-herbívoro son dinámicas y que los periodos en los que se puede detectar la defoliación son a menudo cortos. Esto ocurre en el caso de *Lymantria dispar*, que sólo puede detectarse durante dos meses (WILLIAMS & NELSON, 1986) o en el caso de *Gonipterus scutellatus* en Galicia, cuyo ciclo biológico presenta dos o tres generaciones al año, con picos muy acusados que causan defoliaciones severas. En este último caso es fundamental disponer de información sobre el ciclo biológico del insecto

en la zona de estudio, puesto que los brotes pueden presentar un desfase temporal según la zona considerada (e.g. Rías Bajas o Mariña lucense). En otros casos la reflectancia de los pies defoliados puede cambiar según pasa el tiempo, aunque no haya respuestas directas de la planta (e.g. los daños causados por *Lymantria dispar* en zonas de Estados Unidos provocan clorosis pero las hojas no se caen hasta pasado un periodo de tiempo bastante largo) (LECKIE & OSTAFF, 1988). En otros casos el principal problema consiste en la falta de imágenes libres de nubes durante la época del ataque del insecto, problema que podría surgir en la zona norte de la provincia de Lugo, debido a las continuas brumas y cielos habitualmente cubiertos durante el verano.

El segundo problema es que la defoliación causa cambios en el árbol que tienen diferentes efectos según se consideren como objeto de estudio las hojas, el tronco o la cubierta forestal en su conjunto. La respuesta en uno de estos niveles no tiene por qué transferirse directa ni proporcionalmente a los otros niveles. Conviene destacar la respuesta de las diferentes partes del espectro electromagnético a los cambios en el estado sanitario de las masas:

- Espectro visible (4,4-0,7  $\mu\text{m}$ ): la mayor parte de la radiación incidente de la parte visible del espectro se absorbe por parte de los pigmentos de las hojas, mientras que sólo un 10% se refleja. Las clorofilas, carotenoides y antocianinas, con una fuerte absorción en el rojo y el azul, son responsables de la mayoría de la reflectancia en esta parte del espectro. Debido a la baja reflectancia en el visible, empleando sensores sólo se puede detectar y medir la reflectancia de la parte más superior de la cubierta (WILLIAMS, 1989). En cubiertas densas la influencia del suelo, sotobosque y partes más bajas de la cubierta es pequeña. Esta influencia aumenta cuando se reduce la fracción de cubierta cubierta. Una disminución en los pigmentos y la concentración de nutrientes aumenta la reflectancia en las regiones del rojo y el azul, y la disminuye en el verde (ARDÓ, 1998). Al disminuir la biomasa de hojas, la proporción de sombras en la masa puede aumentar, causando un pequeño descenso de la reflectancia en el visible (EKSTRAND, 1993). De

forma simultánea este efecto puede enmascararse con un incremento en la contribución espectral de la corteza, puesto que la reflectancia de la corteza es mayor que la de las hojas en esta parte del espectro (ROCK *et al.*, 1998). Según va aumentando la defoliación, la contribución a la reflectancia de las hojas va disminuyendo, mientras que aumenta la de las ramas, corteza, sotobosque, suelo y sombras (KOCH *et al.*, 1990). Por ello, un ligero descenso en la reflectancia puede transformarse en un aumento de la misma en masas forestales muy defoliadas.

- Infrarrojo cercano (NIR, 0,7-1,2 $\mu\text{m}$ ): la elevada reflectancia de las hojas en esta parte del espectro está causada por la estructura interna de la hoja. Aproximadamente el 50% de la radiación incidente es reflejada por cubiertas de bosques sanos, mientras que la absorción es baja y la transmitancia alta. Sin embargo la radiación solar puede penetrar y reflejar energía a través de las múltiples capas de hojas de la cubierta. Un aumento en el número de capas de hojas aumenta de forma significativa la reflectancia en el NIR (WILLIAMS, 1989). Resultados diferentes a este aumento en la reflectancia al aumentar la FCC se achacan a la aparición de sombras (COLWELL, 1974). La defoliación disminuye la reflectancia en el NIR; además de los cambios en la estructura interna de la hoja y la FCC, el aumento de la proporción de sombra y de fondo oscuro pueden explicar este hecho (EKSTRAND, 1993). El aumento de la exposición de la corteza también disminuye la reflectancia de la cubierta, puesto que la corteza refleja menos que las hojas en el NIR, sin embargo puede ocurrir lo contrario si el fondo es brillante, como en el caso de la hierba (COLWELL, 1974). Con esta banda es especialmente difícil determinar clases de defoliación bajas, puesto que se superpone la influencia de la vegetación del sotobosque.
- Infrarrojo medio (MIR, 1,2-2,5 $\mu\text{m}$ ): las propiedades ópticas de este rango se ven afectadas principalmente por el contenido en agua del blanco, que absorbe gran parte de la energía incidente. Según disminuye el contenido en humedad, aumenta la reflectancia en el MIR. La defoliación incrementa la refle-

xión en el rango de la banda 5 del sensor TM (1,55- 1,75 $\mu\text{m}$ ), debido a que se reduce la absorción (KOCH *et al.*, 1990). La reflexión debida a la corteza y a menudo la debida al fondo, es mayor que la producida por las hojas en el MIR. Las bandas 4 y 5 del sensor TM tienen una correlación negativa como respuesta a la defoliación, por lo que emplear un índice TM4/TM5 es adecuado porque pone de manifiesto la separabilidad de ambas bandas.

Un tercer aspecto a considerar es que las características dasométricas y selvícolas de las masas forestales afectan a la respuesta espectral. Por ello se aconseja la estratificación en función de la especie, la densidad, la edad o la silvicultura. De este modo se podrán lograr resultados más precisos y se minimizarán los errores debidos a la influencia de la estructura de masa (e.g. confundir una masa poco densa o una masa joven con una masa defoliada). De igual importancia resulta la caracterización y posterior estratificación según el tipo y cantidad de vegetación acompañante y de sotobosque.

Además de las características de la masa forestal y de los síntomas que presente, las propiedades reflectantes están influidas por factores externos como: la orientación de las hojas, la geometría de la cubierta, la geometría del triángulo sol-sensor-blanco, las propiedades del suelo (humedad...), la reflectancia del fondo (suelo, rocas y mantillo), la disposición (orientación) de los pies y las perturbaciones causadas por las condiciones atmosféricas durante la toma de la escena (ARDÖ, 1998).

La influencia de la topografía sobre la respuesta del sensor es un tema abordado por numerosos autores (ARDÖ, 1998), puesto que la irradiancia recibida por un blanco varía con el coseno del ángulo de incidencia, además los blancos perpendiculares al sol reciben menos radiación si la elevación del sol no es mucha debido a la dispersión atmosférica (*scattering*) (EKSTRAND, 1996). A pesar de que se dispone de varios modelos para realizar correcciones topográficas, la baja calidad de los modelos digitales empleados o la falta de coincidencia de los mismos con las imágenes, ha llevado a muchos autores a no emplearlos. La interpolación de modelos digitales de elevaciones a partir de

mapas de curvas de nivel implica muchas veces la sobre representación de zonas llanas (EKLUNDH & MARTENSSON, 1995), lo que induciría a errores en las correcciones.

Otra de las dificultades encontradas es el establecimiento del grado de defoliación en campo. Muchos de los estudios se basan en correlacionar los datos de defoliación medidos en campo y la respuesta espectral de las diferentes bandas o índices propuestos. En general se han establecido clases de defoliación (en algunos casos hasta 5 clases), si bien resulta difícil establecer una cuantificación incluso en campo. Las estimaciones resultan en general bastante subjetivas, dependen en gran manera de la experiencia del observador y deben sincronizarse con el momento de la toma de la imagen para que no haya interferencias debidas a la refoliación. Se requiere además que exista una distribución homogénea del daño para obtener buenos resultados, es decir, que dentro de cada píxel de la imagen haya una única clase de daño (un único grado de defoliación) (SCHARDT, 1994).

## ZONA DE ESTUDIO

Se ha seleccionado como zona piloto para testar la metodología propuesta la Península do Morrazo (Pontevedra), con una extensión de aproximadamente 40 km<sup>2</sup>, entre las coordenadas 29T5062414686583 y 29T5367514686702.

Se ha seleccionado esta zona teniendo en cuenta la abundancia de eucalipto y que parte de los datos históricos de defoliación causada por *Gonipterus scutellatus* se corresponden con parcelas aquí instaladas.

## METODOLOGÍA PROPUESTA

Una vez conocidas las potencialidades y los inconvenientes de emplear sensores remotos para identificar áreas defoliadas, se propone un modelo que integra teledetección y sistemas de información geográfica (SIG) para el control de esta plaga, considerando aspectos como: el control biológico (para lo que se necesita identificar cuándo y dónde ocurren los ataques), la selvicultura (determinar si la estación es adecuada para

la especie, y en caso contrario determinar los tratamientos a realizar en el suelo y/o en la masa) o los tratamientos químicos (para lo que es necesario zonificar, según el grado de daño, el impacto que causarían).

Para ello es necesario en primer lugar detectar las zonas defoliadas y tratar de establecer relaciones con parámetros del medio, para comprobar o descartar su existencia. Teniendo en cuenta las características de las masas eucalipto (hoja perenne, sin intervenciones selvícolas, monoespecíficas, extensión) y el ciclo biológico del insecto (número de generaciones, control biológico efectivo con el parasitoide *Anaphes nitens*) se propone emplear imágenes multispectrales de resolución media (Landsat TM para registros históricos, ASTER a partir de mayo de 2003) para la zona, y realizar un ensayo en una subzona con una imagen IKONOS de alta resolución espacial. En función de los resultados obtenidos se aconsejará el empleo de unas u otras. Se propone la fusión de esta información con la procedente de un vuelo en el NIR de la zona, para determinar si se producen mejoras en la clasificación. Se realizarán correcciones topográficas empleando los mapas topográficos 1:5.000 de la zona, que servirán asimismo de base para la georreferenciación del resto de la información.

Las verdad terreno se obtiene de las redes de parcelas existentes con datos de defoliación (red de parcelas de ENCE, parcelas del C.I.F. de Lourizán, parcelas de la E.F. do Areiro, Red de parcelas de seguimiento de daños forestales) (registro histórico) y de las parcelas establecidas ex profeso para este estudio. Es preciso para ello disponer de las coordenadas de cada una de las parcelas y que los datos hayan sido medidos en fechas próximas a la toma de las imágenes. De estas parcelas se requieren asimismo datos del inventario dasométrico, para poder realizar estratificaciones en función de la edad, la estructura de la masa, la fracción de cabida cubierta, etc.

Para obtener buenos resultados es además necesario disponer de información sobre las zonas y fechas en las que se liberó el parasitoide empleado en el control biológico de la plaga, puesto que el no considerarlo podría introducir errores en la verdad terreno.

Se incluyen además en el SIG mapas de elevación, pendientes y orientaciones derivados de

la cartografía 1:5.000, para tratar de verificar la existencia de algún patrón de ataque por parte de esta plaga; así como datos climáticos/microclimáticos, e información de suelos, para determinar si existe relación entre los ataques y la calidad de estación.

Para la identificación de las áreas defoliadas se emplearán clasificadores clásicos (clasificación supervisada, clasificación no supervisada) que empleen información espectral a escala de píxel, y clasificadores orientados a objetos, que consideren además de la información espectral contenida en el píxel la información contextual y la textura. Los resultados obtenidos de las dos formas se compararán y se determinará cuál es el método más adecuado y que capas de información se deben incluir en el sistema de información diseñado para la gestión de estas masas (tipo de imágenes, tipo de información temática, cartográfica...).

## BIBLIOGRAFÍA

- ARDÖ, J.; 1998. *Remote Sensing of Forest Decline in the Czech Republic*. Lund University Press. Lund.
- COLLINS, J.B. & WOODCOCK, C.E.; 1994. Change detection using the Gram-Schmidt transformation applied to mapping forest mortality. *Rem. Sens. Env.* 50: 267-279.
- COLLINS, J.B. & WOODCOCK, C.E.; 1996. An assessment of several linear change detection techniques for mapping forest mortality using multitemporal Landsat TM data. *Rem. Sens. Env.* 56: 66-77.
- COLWELL, J.E.; 1974. Vegetation canopy reflectance. *Rem. Sens. Env.* 3: 175-183.
- COPPIN, P.R. & BAUER, M.E.; 1996. Digital change detection in forest ecosystems with remotely sensed imagery. *Rem. Sens. Rev.* 13: 207-234.
- DOTTAVIO, C.L. & WILLIAMS D.L.; 1983. Satellite technology: an improved means for monitoring forest insect defoliation. *J. For.* 81(1): 30-34.
- EKLUNDH, L. & MARTENSSON, U.; 1995. Rapid generation of DEM from topographic maps. *Int. Jour. GIS* 9: 329-340.
- EKLUNDH, L.; HALL, K.; ERIKSSON, H.; ARDÖ, J. & PILESJÖ, P.; 2003. Investigating the use of Landsat thematic mapper data for estimation of forest leaf area index in southern Sweden. *Can. J. Rem. Sens.* 29(3): 349-362
- EKSTRAND, S.; 1990. Detection of moderate damage on Norway Spruce Using Landsat TM and digital stand data. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 28: 685-692.
- EKSTRAND, S.; 1993. *Assessment of forest damage using Landsat TM, elevation models and digital forest maps*. Ph. D. thesis. Royal Institute of Technology. Stockholm .
- EKSTRAND, S.; 1994. Assessment of forest damage with Landsat TM: correction for varying forest stand characteristics. *Rem. Sens. Env.* 47: 291-302.
- FRANKLIN, S.E. & RASKE, A.G.; 1994. Satellite remote sensing of spruce budworm forest defoliation in Western Newfoundland. *Can. J. Rem. Sens.* 20: 37-48.
- FRANKLIN, S.E.; WARING, R.H.; McREIGHT, R.W., CHEN, W.B. & FIORELLA, M.; 1995. Aerial and satellite sensor detection and classification of western spruce budworm defoliation in a subalpine forest. *Can. J. Rem. Sens.* 21: 299-308.
- GONG, P.; 1993. Change detection using principal components analysis and fuzzy set theory. *Can. J. Rem. Sens.* 19: 22-29
- GREEN, K.; KEMPA, D. & LACKEY, L.; 1994. Using remote sensing to detect and monitor land-cover and land-use change. *Photogrammetric Eng. Rem. Sens.* 60: 331-337.
- HALL, R.J.; FERNANDES, R.A.; HOGG, E.H.; BRANDT, J.P.; BUTSON, C.; CASE, B.S.; & LEBLANC, S.G.; 2003. Relating aspen defoliation to changes in leaf area derived from field and satellite remote sensing data. *Can. J. Rem. Sens.* 29 (3): 299-313
- KOCH, B.; AMMER, U.; SCHNIEDER, T. & WITTMEIER, H.; 1990. Spectroradiometer measurements in laboratory and in the field to analyse the influence of difference damage symptoms on the reflection spectra of forest trees. *Int. Jour. Rem. Sens.* 11: 1145-1163.
- LAMBIN, E.F. & STRAHLER, A.H.; 1994. Change-vector analysis in multitemporal space: a tool to detect and categorize land-cover change



- processes using high temporal-resolution satellite data. *Rem. Sens. Env.* 48: 231-244.
- LECKIE, D.G. & OSTAFF, D.P.; 1988. Classification of airborne multispectral scanner data for mapping current defoliation caused by the spruce budworm. *For. Sci.* 34: 259-275.
- LUTHER, J.E., FRANKLIN, S.E., HUDAK, J. & MEADES, J.P.; 1997. Forecasting the susceptibility and vulnerability of balsam Fir Stands to insect defoliation with Landsat TM data. *Rem. Sens. Env.* 59: 77-91.
- MACOMBER, S.A. & WOODCOCK, C.E.; 1994. Mapping and monitoring of conifer mortality using remote sensing in the Lake Tahoe Basin. *Rem. Sens. Env.* 50: 255-266.
- NAVARRO, R.M.; BLANCO, P.; FERNÁNDEZ, P.; 2000. *Aplicación de las imágenes IRS-Wifs al análisis y evaluación de daños producidos por la procesionaria del pino (Thaumtopoea pytiocampa Den. & Schiff) en los pinares de Andalucía Oriental.* [http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=124](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=124).
- RADELOFF, V.C.; MLADENOFF, D.J. & BOYCE, M.S.; 1999. Detecting Jack Pine budworm defoliation using spectral mixture analysis: separating effects from determinants. *Rem. Sens. Env.* 69: 156-169.
- ROCK, B.N.; VOGELMANN, J.E.; WILLIAMS, D.L. & VOGELMANN, A.F.; 1986. Remote sensing of forest damage. *Bioscience (July/August)*: 439-445.
- ROCK, B.N.; HOSHIZAKI, T. & MILLER, J.R.; 1998. Comparison of in situ and airborne spectral measurements associated with forest damage. *Rem. Sens. Env.* 24: 109-127
- SCHARDT, M.; 1994. Classification of forest damage by means of remote sensing and GIS. *In: Proceedings Pollution monitoring and GIS*: 128-137. Czech Republic.
- VOGELMANN, J.E. & ROCK, B.N.; 1988. Assessing forest damage in high elevation coniferous forest in Vermont and New Hampshire using TM data. *Rem. Sens. Env.* 24: 227-246
- WILLIAMS, D.L.; 1989. *The radiative transfer char. of Spruce.* Ph.D. Univ. Maryland.
- WILLIAMS, D.L. & NELSON, R.F.; 1986. Use of remotely sensed data for assessing forest and stand conditions in Eastern United states. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 24: 130-138.
- WULDER, M.A. & FRANKLIN S.E.; 2003. *Remote sensing of forest environments: concepts and case studies.* Kluwer Academic Publishers. Boston.