



TRABAJO FIN DE MÁSTER

Máster en Investigación en Ingeniería
para la Conservación y Uso Sostenible
de Sistemas Forestales

TITULO:

**APLICACIONES DE LA
TELEDETECCIÓN EN EL ANÁLISIS
DE DAÑOS EN MASAS DE
CONÍFERAS EN LA PROVINCIA DE
BURGOS - ESPAÑA**

AUTOR: LAURENTINO, S. M. L.

TUTORES: GONZALO-JIMÉNEZ, J. y
DIEZ, J.J.

 **INIA**
Instituto Nacional de Investigación
y Tecnología Agraria y Alimentaria


Instituto Universitario de Investigación
GESTIÓN FORESTAL SOSTENIBLE

JUNIO - 2014



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias
Instituto Universitario de Investigación Gestión Forestal Sostenible

Máster en Investigación en Ingeniería para la
Conservación y Uso Sostenible de Sistemas Forestales

Aplicaciones de la teledetección en el análisis
de daños en masas de coníferas en la provincia
de Burgos - España

Autora: Maria Lucielle Silva Laurentino

Tutor: Dr Julián Gonzalo Jiménez

Co.tutor: Dr. Julio Díez Casero

VB⁰

Junio , 2014

Dedico a Dona Dida, "mamãe".

AGRADECIMIENTOS

Como no agradecer primero a Dios que me lo regalo todo. Señor Jesús te agradezco por las maravillas que haces en mi vida. Conseguir concluir esta etapa es sin duda una prueba que Tu eres un Dios que cumple las promesas.

Gracias a mis Padres-abuelos "Dona Margarida y Seu Carrinho" por luchar por mí y por quererme tanto, "obrigada papai e mamãe". Agradezco también a mis hermanas Lê, Tita, Ana, Neide y Valdo, por todo el apoyo. A mis suegros y su familia. Especialmente a Sidney por existir en mi vida, por compartir conmigo todo lo malo y lo bueno. Gracias amor.

Al Instituto de Co-Responsabilidade pela Educação, por la beca y los años de cuidado. En especial a Dr. Marcos Antonio Magalhães, por un día haberme notado, y a su familia de amigos.

A mi madrina, Marilene por abrirme la puerta de su vida y permitirme conocer más del complejo mundo en que algunos comparten lo bueno y otros ni lo notan. Que honor me concedisteis, gracias por todo.

A Odenilda Souza, por permitirme vivir esta experiencia con palabras diarias de AMOR. Por mi permitir conocer más de su tesoro (familia). Gracias por creer en mí.

A CEEETA, que me formó para la vida. Y en especial a Maria do Socorro Silva y su equipo de amigos. Que me enseñaron a romper las fronteras de las dificultades y a creer en un mundo mejor.

A mis amigos que creyeron en mí. A los de Brasil y a los que conmigo compartieron estos dos años de lucha, especialmente cuando en el móvil de la nada me encontraba una palabra de amor y fuerza, gracias Dios te doy por regalarme hermanos de fe.

A mis compis del Master por la comprensión y apoyo.

A Adriana, mi madre en Palencia, un regalo de Dios en mi vida. A vosotros Adri y Cris, se los dedico mi gratitud por haberme orientado y ayudado en este estudio. Por oírme en los momentos más duros y más gratificantes. Que Dios os bendiga mucho.

Agradezco a mis Profesores de estos largos años estudio.

Especialmente gracias a Julián Gonzalo Jiménez y Julio Díez, mis Directores en este proyecto, por colaboración y por la oportunidad de adquirir nuevos conocimientos.

Para concluir, agradezco a la Universidad de Valladolid, a la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias y todos los profesores del máster en Investigación en Ingeniería para la Conservación y Uso Sostenible de Sistemas Forestales que me han recibo en España y me permitieron aprender mucho más de lo que es el mundo de la investigación, y sin duda de la cultura española. Gracias

ÍNDICE

RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	4
1. ANTECEDENTES	5
OBJETIVOS.....	7
2.- MATERIAL Y MÉTODOS	8
2.1.- Zona de estudio	8
2.2. Uso de datos de las parcelas del IDF	9
2.3. Obtención y procesamiento de las imágenes	11
2.4. Índices espectrales de vegetación	13
2.5. Análisis estadístico	16
3. RESULTADOS	16
3.1. Análisis de los datos de las parcelas del IDF	16
3.2. Análisis de las respuestas de los índices de vegetación.....	18
3.3. Relación entre defoliación y los índices calculados.....	20
4. DISCUSIÓN.....	23
5.- CONCLUSIONES	24
6.- REFERENCIAS.....	25
APÉNDICES Y ANEXOS	30

RESUMEN

El cambio climático afecta directamente a los bosques y a las poblaciones que dependen de ellos, provocando efectos que pueden producirse a corto o largo plazo. Entre esos efectos, diversos estudios han previsto impactos en la sanidad forestal, por ejemplo, el incremento de insectos defoliadores al aumentar las temperaturas. En este trabajo se presenta una metodología de monitorización del estado fitosanitario en muestras de masas forestales mediante sensores remotos. Pretendiendo analizar y armonizar las informaciones con respecto a debilitación de los bosques, se ensayaron diversos índices de vegetación (mediciones cuantitativas basadas en los valores digitales de imágenes satelitales). Éstos índices se correlacionaron con un conjunto de datos del Inventario de Daños Forestales (IDF) de España, referidos a defoliación. A través de datos del satélite LandSat 5-TM, se calcularon cinco índices de vegetación con el software Erdas 9.2 y ArcGis 10, sobre seis parcelas forestales de la Provincia de Burgos y se analizó su correlación con los datos del IDF. Los resultados obtenidos son representativos y sugieren que en este caso los índices pueden ser considerados como viables para analizar la salud de las masas forestales. Además la metodología aporta herramientas que pueden ser aplicadas en zonas donde no hay información de inventarios forestales, ayudando así a la gestión forestal. Esta aproximación es de gran interés considerando que en el contexto actual, hay exigencias en cuanto a aproximaciones novedosas, de bajo coste y viables.

Palabras claves: teledetección, sanidad forestal, defoliación, decaimiento forestal

ABSTRACT

Climate change directly affects forests and all of its dependents, causing effects that may occur suddenly or in long-term. Between those effects, several studies have provided impacts to forest health, for example, an increase of insect defoliators to temperature increase. This paper intends to present a methodology of monitoring of the plant health in samples of forest mass by remote sensors, intending to analyze and harmonize information regarding the impairment of forests, if have proved some vegetation indices (quantitative measurements based on digital values of satellites images). Those indices were correlated with Inventory of Forest Damage (IDF) in Spain data, related to defoliation. Through Landsat 5 TM satellite data, were calculated five vegetation indices in the Erdas 9.2 and ArcGIS 10, on six forest parcels of the Province of Burgos and were analyzed its correlation with IDF data. The results obtained are representative and suggest that the indices can be considered as a viable method for analyzing the forest masses health. Furthermore, the methodology provides tools that can be applied in areas where there don't have information of forests inventories, helping thus, of the forest management. This approach is of great interest, considering that in the current context, there requirements innovative approaches, of low cost and viable.

Keywords: Remote Sensing, forest health, defoliation, decaying forest

1. ANTECEDENTES

El manejo forestal sostenible de los bosques, que considera sostenibilidad ecológica, económica y social, puede ayudar a lidiar con las posibles implicaciones del cambio climático reduciendo sus efectos negativos del cambio climático. Según la FAO, cada vez hay más sensibilización sobre el potencial de los bosques en la mitigación de los efectos del cambio climático y la adaptación al mismo, lo que hace más urgente la necesidad de mejorar su monitoreo y evaluación.

En el caso de los ecosistemas mediterráneos el tema es aún más relevante debido a su gran heterogeneidad biogeográfica, historia bioclimática y a su inestabilidad y vulnerabilidad, que tienen su origen en el medio ambiente mediterráneo y en la actividad humana, con lo cual los científicos y los sectores políticos le han dado una atención prioritaria en las últimas décadas. Los bosques españoles fijan una cantidad neta de CO₂ del 14% de las emisiones totales de España (OSE, 2011).

El carbono acumulado en estos bosques, varía en gran medida en función de las especies, por ejemplo los eucaliptos y los pinos son los árboles que presentan las mayores tasas de absorción de carbono (OSE, 2011), y los pinos presentan una media de 1,2 t/ha año, datos que revelan el potencial efecto amortiguador de este tipo de bosque en España. Potencial que se vería afectado negativamente si la sanidad forestal de esas masas de coníferas decae por estrés, cualquiera que sea el origen, sequías, defoliaciones o patógenos.

En la Península Ibérica algunas masas forestales sufren un proceso de decaimiento, y con probabilidad en algunos casos se debe a factores climáticos (Martínez-Vilalta y Piñol 2002; Navarro *et al.* 2004). El término decaimiento forestal trata del estado de deterioro de los ecosistemas forestales incluyendo cambios metabólicos, problemas de reproducción, prematura senescencia de la hoja, decoloración, disminución y alteraciones del crecimiento, alteraciones de las ramas y de la morfología de la copa, pérdida de follaje, y la muerte del árbol (Innes, 1993). Los estudios acerca de las mortandades ligadas a cambio climático han sido bien documentadas en áreas como Nuevo México (bosques de enebros sp. y *Pinus edulis*; Allen y Breshears 1998), Francia, Italia y Suiza (bosques de *Pinus sylvestris* L.; Rebetez y Dobbertin 2004), o España (bosques de *P. sylvestris*; Martínez-Vilalta y Piñol 2002 y formaciones de Quercíneas, particularmente encinas y alcornoques (Navarro *et al.*, 2004), por citar algunos ejemplos. Otros elementos que pueden concurrir de forma sinérgica, son los insectos, patógenos y parásitos, cuyos efectos negativos se magnifican bajo el nuevo escenario climático según la Teoría del Decaimiento Forestal (Manion 1981, Bigler *et al.* 2006) y según diversos estudios (Williams y Liebhold 1995, Verkaik *et al.* 2009, Prieto *et al.* 2012, Jaworsky y Hilszczanski 2013).

Al hablar de los factores involucrados en el proceso de decaimiento destacan los factores que predisponen a los árboles, tales como el exceso de competencia con árboles

vecinos, o los contaminantes atmosféricos, que pueden ejercer su efecto durante un período muy largo, provocando reducciones de crecimiento significativas e incrementando la susceptibilidad a otros factores, como los insectos defoliadores y la sequía. Estos factores condicionan el buen funcionamiento fisiológico de un árbol y reducen su vigor y capacidad potencial de defenderse. Esa pérdida de vigor puede verse reflejada en los índices espectrales de vegetación que pueden obtenerse de las imágenes satelitales.

En este sentido, al analizar los bosques, debe tenerse en cuenta que son la copas de los árboles, los principales componentes de donde se puedan sacar estimaciones espectrales de las condiciones fitosanitarias, evaluando dos variables particularmente importantes, decoloración y defoliación. Teniendo en cuenta que estos están relacionados con el estrés y se consideran factores y parámetros fiables para evaluar daños forestales (Innes, 1993), en este trabajo se considera la defoliación como el parámetro, y será tomado de los datos de campo que proveen los Inventarios de Daños Forestales (IDF).

Por defoliación entendemos la pérdida o falta de desarrollo de hojas o acículas que sufre un árbol en la parte de su copa evaluable, comparándola con la del árbol de referencia ideal de la zona. En las coníferas y frondosas de hoja perenne, la defoliación significa tanto reducción de retención de hojas o acículas como pérdida prematura en comparación con los ciclos normales. En frondosas de hoja caduca la defoliación es pérdida prematura de masa foliar (Manzano *et al.*, 2013).

Por consiguiente, para estudiar el decaimiento forestal con teledetección, es necesario entender antes de analizar las imágenes, los comportamientos físicos de la vegetación. Durante el proceso de decaimiento ocurren alteraciones en los pigmentos que absorben la luz, en la estructura interna de la hoja y en el contenido de humedad a nivel celular, que se reflejan en la respuesta espectral (Chuvieco, 1996). En el caso de la vegetación sana, la reflectividad es baja en el visible aunque con un pico en el color verde debido a la clorofila; y muy alta en el infrarrojo alejado o infrarrojo próximo reflejado debido a la escasa absorción de energía por parte de las plantas en esta franja. En el infrarrojo medio hay una disminución en la reflectividad especialmente importante en aquellas longitudes de onda en las que el agua de la planta absorbe la energía. En el caso de la vegetación enferma hay una disminución en el infrarrojo y un aumento en el rojo y azul. Se observa también que cuando el contenido de agua aumenta disminuye la reflectividad, ya que aumenta la absorción de radiación por parte del agua contenida en la planta.

Uno de los estudios más destacados que detectan y evalúan la gravedad de los daños en masas forestales, es el reciente trabajo de Townsend *et al.* (2012), con satélites Landsat, que predice la severidad de defoliación causada por *Lymantria dispar* en los bosques caducifolios. Otros trabajos realizan análisis multiespectrales que permiten la predicción de la distribución anual de las zonas defoliadas y pueden proporcionar datos

sobre el rebrote en períodos en los que los registros de campo no están disponibles (Jepsen *et al.*, 2009).

Muchos de los productos cartográficos, se dan a partir de índices de vegetación, entre ellos está el índice diferencial de vegetación normalizado - NDVI, el más aplicado en todo el mundo. Considerado ideal pues es sensible a la cubierta vegetal, insensible al brillo y color del suelo y está poco afectado por la perturbación atmosférica, los factores medioambientales y la geometría de iluminación y de observación (Jackson 1983). El NDVI logra predecir la actividad fotosintética de la planta ya que este índice de vegetación incluye tanto el rango del infrarrojo cercano como la luz roja.

Sin embargo presenta algunas limitaciones en cuanto a saturación, que se debe a la naturaleza de formulación no lineal del índice, basada en el ratio que se obtiene entre el Infrarrojo cercano y el rojo, provocando una respuesta asintótica (saturada) de la señal a altas concentraciones de biomasa (Huete, 1988). Además del NDVI, hay otros numerosos índices de vegetación como GNDVI, PRI, SAVI, MSAVI, WdVI, PCR, además de NDWI y MSI usados en este trabajo. Informaciones con respecto a índices consultar anexo 3.

Correlacionar los resultados obtenidos de los análisis de teledetección con datos de inventarios es sin duda un reto importante, teniendo en cuenta que no siempre todas las zonas son inventariadas al mismo tiempo; que los diferentes inventarios abarcan una heterogeneidad al presentar las bases de datos y las escalas de análisis son variadas. La calidad de los resultados que se logren dependerá de la calidad de los datos, de los tipos de bosques y de los algoritmos aplicados. Si consiguiésemos una buena correlación entre los análisis por teledetección y datos de inventarios, el caso de este trabajo, dispondríamos de una herramienta metodológica interdisciplinar, aportando a la gestión forestal sostenible aún más elementos, que puedan suplir los huecos de datos de las zonas no inventariadas, con posibles diagnósticos de tendencia o predicción de riesgos fitosanitarios.

OBJETIVOS

Este trabajo propone desarrollar una metodología interdisciplinar de monitoreo de la debilitación de las masas de coníferas en la Provincia de Burgos – España, mediante datos del inventario español de daños forestales (IDF) y los resultados obtenidos mediante la aplicación de índices de vegetación, calculados a partir de imágenes de satélite Landsat 5/TM, durante una serie temporal de 20 años. Para ello se han planteado los siguientes objetivos específicos:

(1) Analizar los datos de las parcelas de coníferas pertenecientes al inventario y al seguimiento de la Red Europea de Daños en los Bosques, nivel I para España, ubicadas en el sur de la provincia de Burgos.

(2) Aplicar índices de vegetación con el propósito de hacer un análisis temporal de la pérdida de vigor de la vegetación en la provincia de Burgos, en parcelas donde se han detectado daños por defoliación. Para ello se cuenta con imágenes de cuatros años, obtenidas en los meses de verano.

(3) Comparar los datos de defoliación de la Red Europea de Daño en los Bosques, nivel I, con los resultados de los índices de vegetación en intervalos a largo de una serie temporal de 20 años y determinar cuál o cuáles son los índices que mejor detectan problemas fitosanitarios en masas de coníferas.

2.- MATERIAL Y MÉTODOS

2.1.- Zona de estudio

La zona de estudio se sitúa en la provincia de Burgos - Castilla y León (figura 1), con una superficie 14.292 km², situados entre 2º 33' y 4º 19' de longitud oeste y 43º 12' y 41º 32' de latitud norte.

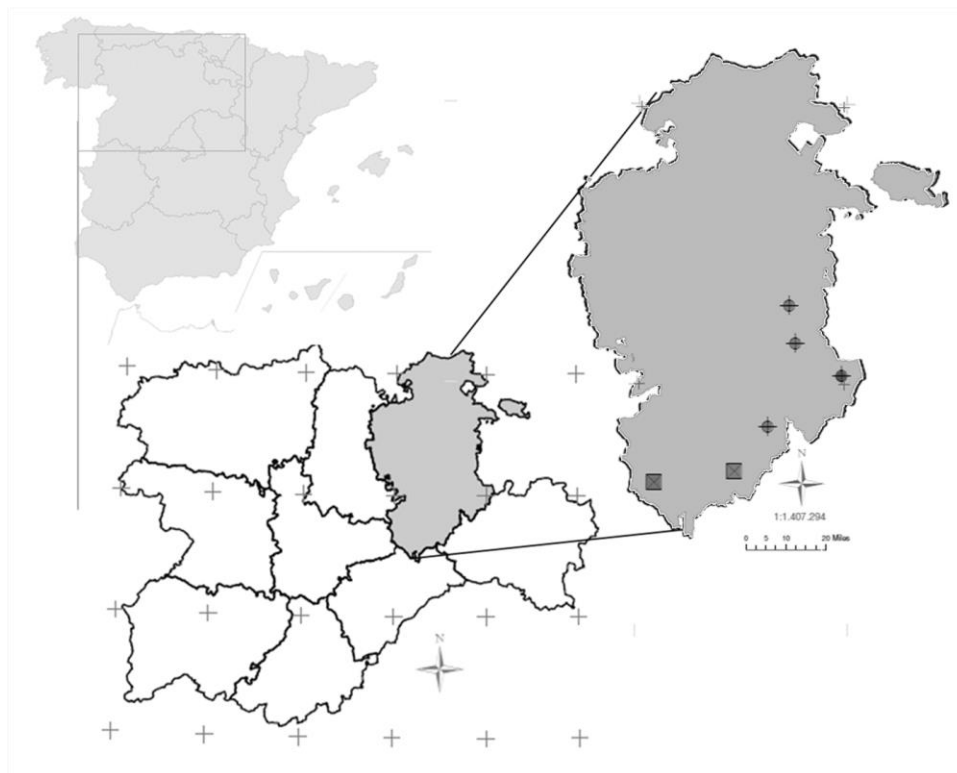


Figura 1: Mapa de localización de la provincia de Burgos con interpolación de las parcelas
(■ parcelas de *Pinus pinaster* Aiton y ● de *Pinus sylvestris* L.)

Con una altitud media de 700 metros sobre el nivel del mar, presenta veranos secos y la temperatura media anual es de 10 °C, marcado por escasas precipitaciones que oscilan

entre los 380 mm y los 480 mm anuales, con dominio climático Oceánico y Atlántico según la clasificación de Koppen el mapa climático de Castilla y León.

El territorio forestal de la provincia cuenta con 697.300,52 ha, lo que representa el 48,82 % de la superficie de la provincia, la superficie forestal pública de la provincia es de 74,85 %, mientras que un 22,83 % es superficie forestal privada según el Mapa Forestal de España (MMA, 2009).

Las informaciones con respecto a las parcelas de estudio interpoladas sobre el mapa de localización, están dispuestas en el aparto siguiente.

2.2. Uso de datos de las parcelas del IDF

Los datos de campo analizados proceden del inventario de la Red Europea de Daños en los Bosques, nivel I. Un serie que va desde de 1988 hasta 2013, facilitados por el Ministerio de Medio Ambiente. Ellos contienen informaciones de parcelas de toda España, que según la Red son unas 286 parcelas correspondientes a masas de frondosas, unas 300 de coníferas y unas 34 de masas mixtas. Con estos datos, se llevaron a cabo los siguientes procesos:

- Filtrado de los datos nacionales, separando las parcelas según los años con daños por defoliación, en la provincia de Burgos, quedando apenas un total de 17 parcelas.
- Selección de las parcelas que tienen masas de coníferas defoliadas, teniendo en cuenta que la escena (Path/Row: 201/31) de las imágenes de satélite Landsat 5 que las abarca no estuviese cubierta de nubes, y no presentase bandeado. Resultando un total de 6 parcelas con coníferas.
- Cuantificación de la media de defoliación por parcela y por año de cada una de las 6 parcelas resultantes en la selección anterior.

Las informaciones de las parcelas, con los datos de daños, utilizadas para la correlación con los datos de los índices de vegetación, están contempladas en la tabla 1.

En lo que se refiere a composición vegetal especificada, viene expresada en la columna de especie en la tabla 1. En cuanto a los tipos de suelos viene solamente la codificación, las informaciones completas vienen en anexo 2, o en la página Web del ITACyL en el Mapa IRNASA de CYL-400k-ClasesF.

Las parcelas están situadas sobre la zona clasificada como húmeda tomando el índice de aridez de 0.80 a 1, según la clasificación UNEP-FAO en Atlas Agroecológico de Castilla y León. El clima donde están situadas las parcelas, según la clasificación climática de Koppen, es Oceánico con Veranos Secos (Csb) y Atlántico (Cfb), es decir los mismos dominios climáticos de la provincia.

Tabla 1: Información de las parcelas de coníferas en el sur de la Provincia de Burgos

Parc	UTMX	UTMY	Sitio	Suelos(*)	Nº - Especies
426	477878	4681796	Valmala	CMd/CMu/LPq/LPu	134 - <i>Pinus sylvestris</i>
467	480354	4666337	Barbadillo del Pez	CMd/CMu/LPq/LPu	134 - <i>Pinus sylvestris</i>
509	498965	4653233	Regumiel de La Sierra	CMu/CM	134 - <i>Pinus sylvestris</i>
556	469124	4633037	Arauzo de Miel	CMg/FLc/FLe/FLd /LVa	134 - <i>Pinus sylvestris</i> - 115 - <i>Juniperus thurifera</i>
604	423151	4610468	La Cueva de Roa	CMc /LVk / FLc/ RGc	130- <i>Pinus pinaster</i> /46 - <i>Quercus ilex</i>
606	455453	4615191	Zazuar	FLc/FLe/FLd CMg/LVa	130 - <i>Pinus pinaster</i>

(*) El significado de las abreviaturas de los tipos de suelo puede verse en el Anexo 2.

Según el manual de la Red Europea de Daños en los Bosques (RBD), nivel I, las parcelas del IDF están sobre una malla de nudos asignadas a nivel europeo, y en el caso España, tomando como referencia las informaciones de masas forestales de Mapa Forestal Español. La metodología de toma de datos en la Red es la siguiente: en la parcela se eligen y luego se evalúan 24 pies, la distribución es similar a la que se presenta en la figura (2), siempre que la organización espacial de la masa forestal así lo permita. Los árboles elegidos pertenecen a la clase social predominante, dominante o codominante, con altura mínima superior a 60cm.

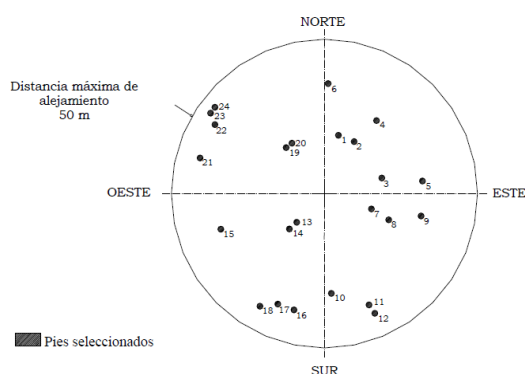


Figura 2 – Distribución deseable de los pies seleccionados. Fuente: Manual de la Red I

El período de muestreo de la RDB comprende los meses de Julio, Agosto y Septiembre. Son evaluados la defoliación y los cambios anormales en el color, y se marca la presencia/ausencia de ocho posibles parámetros que puedan ser causantes de los daños (asignados mediante códigos numéricos), entre ellos la fauna doméstica y silvestre, insectos, hongos, agentes abióticos, acción del hombre, contaminante local conocido, incendios y otros. Los intervalos de grados de defoliación son de 0 a 10% para el árbol

clasificado como no defoliado; de 11 a 25% para arboles ligeramente defoliados; de 26 a 60% como moderadamente defoliado; con más 60% clasificado como defoliación grave; y 100% el árbol está muerto/seco.

Además de los datos de Red de daños, se consultaron las bases de datos del Inventario Forestal Nacional para entender como estaba el estado de las masas cerca de las parcelas. El Mapa Forestal Español y el Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España se consultó para comprobar si las coordenadas de parcelas estaban ubicadas en masas forestales; también la base cartografía de Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León, con respecto a suelo y a ortofotografías; así como manuales y documentos de ayuda de los softwares y bases de datos trabajadas.

2.3. Obtención y procesamiento de las imágenes

2.3.1 Obtención

Se decidió trabajar con el satélite multispectral Landsat 5, de media resolución espacial, pues es uno de los satélites más utilizados en el mundo, ofrece un mayor número de bandas disponibles en la franja del espectro en comparación a otros satélites, además de que sus imágenes son de fácil acceso. Fueron trabajadas un total de 4 imágenes Landsat 5 del sensor TM. Las imágenes seleccionadas (tabla 2) corresponden a los años 1989, 2003, 2010 y 2011. Solamente se seleccionaron las imágenes de verano y con una baja cobertura de nubes.

Tabla 2: Información de las imágenes de las cuales se obtuvieron los índices de vegetación

	Fecha de la imagen	Nombre
1	15/07/1989	ETP201R31_5T19890715
2	22/07/2003	LT52010312003203MTI02
3	23/06/2010	LT52010312010174MPS00
4	28/07/2011	LT52010312011209MPS00
	WRS Path / Row	201 /31
	Satélite / sensor	LANDSAT_5 / TM

La zona de estudio está ubicada en la escena que corresponde al Path/Row: 201-031 de Landsat según WRS-2 (Worldwide Reference System - 2) que cubre la parte de la provincia Burgos. Dichas imágenes se obtuvieron de la página web <http://glovis.usgs.gov/> del USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos de América).

2.3.2. Procesamiento

Tras la adquisición de las imágenes, se procedió a la composición de las bandas y posteriormente a su corrección geométrica y radiométrica. Para ello se utilizó el software ERDAS IMAGINE 9.2. Este procedimiento es necesario porque la radiación electromagnética generada se propaga, interactuando con la atmósfera, y por lo tanto afectando la radiación en su longitud de onda, intensidad, distribución espectral o su dirección. La extracción del ruido introducido por la atmósfera es importante y necesaria, porque este ruido afecta en los resultados de los estudio de teledetección.

Corrección geométrica

En las imágenes se realizó la rectificación polinomial, de acuerdo con el sistema geodésico de referencia presente en otra imagen de Landast 5 de la misma zona, originalmente georreferenciada, rectificadas en la proyección cartográfica UTM zona 30 N y sistema WGS 84. Para ello se tuvo que hacer una precisa elección de puntos de control sobre el terreno, que permita un ajuste de los puntos de la imagen a una proyección adecuada de la superficie terrestre.

Corrección radiométrica

Esta corrección radiométrica propuesta por Markham y Becker (1986), consiste en convertir los valores digitales (ND - valores crudos) de la imagen a magnitudes físicas de radiancia y reflectancia, previo a la obtención de los índices de vegetación. Este cálculo es realizado por medio de la siguiente fórmula (ecuación 1):

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} \times ND \quad (\text{ecuación 1})$$

- a y b : valores de las radiancias espectrales mínima y máxima
- ND : el valor del pixel en número digital
- i : corresponde a las diferentes bandas del satélite

A partir de la ecuación propuesta por Bastiaanssen (1995), se puede encontrar la ecuación de reflectividad (ecuación 2), que es la razón entre flujo emergente de la atmósfera y el flujo incidente en el tope de la misma, o sea, la relación existente entre la energía incidente y la reflejada; en la región y banda espectral analizada:

$$r_{\rho i} = \frac{L_{\lambda i} \pi}{K_{\lambda} \cos Z \cdot dr} \quad (\text{ecuación 2})$$

$L_{\lambda i}$: es la radiancia espectral de cada banda

K_{λ} : es la irradiancia solar espectral de cada banda en el tope de la atmósfera

Z : es el ángulo zenital solar

dr : es el cuadrado de la razón entre la distancia media Tierra-Sol (r_0) y la distancia Tierra-Sol (r), en un dado día del año (Lira, 2010).

2.4. Índices espectrales de vegetación

Muchos son los estudios que analizan, proponen y comparan índices para el seguimiento de los doseles forestales y agronómicos, como Perry *et al.* 1984; y Gilabert y Meliá, 1990. Existen, numerosas publicaciones de teledetección que analizan las diferencias en las respuestas espectrales por clorosis o enrojecimiento de dosel, y la defoliación de insectos (Jepsen *et al.* 2009; Kantola *et al.* 2011). Aquí cabe mencionar que la defoliación y decoloración, no relacionada con la fenología de las plantas, se toman como indicadores del estrés de la planta que pueden ser causados por insectos defoliadores y otras causas (Rullán-Silva *et al.*, 2013). Además, la pérdida de agua que sufre el huésped es otro indicador de estrés importante, pero no visualmente evidente (Wang L. *et al.*, 2010).

Por ello una de las herramientas más usadas en estudios de sanidad forestal, son los índices de vegetación obtenidos desde imágenes de satélites porque éstos se basan en las diferencias en la reflectividad entre vegetación vigorosa y sana, y vegetación muerta o senescente (Jensen, 2005). Con ellos se han analizado los cambios en las diferencias entre el rojo (R), infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta o medio (SWIR), obteniéndose los índices con mejor sensibilidad al daño producido por la defoliación.

Los índices seleccionados se detallan a continuación, y fueron procesados en el software Erdas 9.2 mediante el módulo MODELER, Model Maker.

2.4.1.- Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

El *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), propuesto por Rouse *et al* (1974), es un índice normalizado que permite generar una imagen que muestra el verdor o vigor de la vegetación. Jensen (2005) apunta que este índice es muy sensible a la dinámica de la vegetación, dada su alta correlación con factores biofísicos, densidad de biomasa, actividad fotosintética y porcentaje de cubierta vegetal, ya que aprovecha el contraste de las características de dos bandas de un dataset raster multiespectral: las absorciones de pigmento de clorofila en la banda roja y la alta reflectividad de los materiales de las plantas en la banda del NIR, lo que corresponden a las bandas 3 y 4 del Landsat. Es muy utilizado en el seguimiento de la vegetación global porque ayuda a compensar los cambios en las condiciones de iluminación, la pendiente de la superficie, la orientación a factores extraños (Lillesand 2004).

Sus valores oscilan en el intervalo -1, +1, donde valores creciente mayores que 0 denotan aumento de la vegetación y valores negativos son representativos de agua o nieve, y superficies con rocas y terrenos desnudos. En general los valores moderados (0,2 a 0,3) representan terrenos con arbustos y prados, y valores altos (0,6 a 0,8) indican bosques de zonas templadas y tropicales.

La ecuación 3 del NDVI documentada es la siguiente:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (\text{ecuación 3})$$

Dónde:

NIR= reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano.

R = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al rojo.

Es un buen estimador de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación (fPAR) (Monteith, 1981), la productividad primaria (Paruelo *et al.*, 1997; Tucker *et al.*, 1985), y es una variable integradora del funcionamiento del ecosistema (Virginia y Wall, 2001). Sin embargo, varios trabajos han puesto de manifiesto algunas limitaciones del NDVI con respecto a saturación por altas concentraciones de biomasa (Nicholson *et al.*, 1990; Huete, 1988).

2.4.2. - Índice de Vegetación Ajustado al Suelo

El *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) combina las reflectividades captadas en el infrarrojo cercano y en el rojo, los mismos del NDVI. Es propio para zonas áridas y se utiliza como factor de corrección la línea de suelo (llamado factor L). Es un parámetro que varía según la densidad de la vegetación y que está relacionado con la reflectividad del suelo. Para densidades intermedias, como en el caso de las imágenes de satélite, se toma L = 0.5. Este índice se utiliza con el fin de conseguir corregir algunos efectos externos al valor del NDVI en lugares donde el aporte de la reflectividad del suelo es elevada (Huete, 1988).

El SAVI se calculó mediante la siguiente expresión (4):

$$SAVI = \frac{IR - R}{IR + R + L} (1 + L) \quad (\text{ecuación 4})$$

Dónde:

IR = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano

R = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al rojo

L = es un parámetro que varía según la densidad de la vegetación, para densidades intermedias, como en el caso de las imágenes de satélite, se toma 0,5 (Cosero *et al.* 1998).

2.4.3. Índice de Agua por Diferencia Normalizada

El *Normalized Difference Water Index* (NDWI) ha sido usado en varios estudios forestales (Stimson *et al.* 2005, Ito *et al.* 2007), frecuentemente relacionados con el contenido de humedad de la vegetación. Su importancia radica en que las informaciones

sobre el contenido de humedad interno de la vegetación son de gran utilidad en la agricultura, en la hidrología y en estudios forestales (Galvão *et al.* 2005).

Es calculado a partir de las bandas del infrarrojo cercano (B4, 760-900 nm) e infrarrojo medio (B5, 1550-1750 nm). Obteniéndose valores que oscilan entre -1 y 1.

Este proceso se basa en la siguiente expresión (5):

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (\text{ecuación 5})$$

Dónde:

NIR= reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano.

SWIR = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infra rojo medio.

El NDWI puede calcularse con las bandas 5 o 7 del Landsat en el SWIR, designándose como NDWI (5) y NDWI (7), según corresponda. Algunos autores, como Townsend *et al.* (2012) lo llaman NDII (*Normalized Difference Infrared Index*) siguiendo la fórmula propuesta por Hardisky *et al.* (1983).

2.4.4. - Índice de Estrés Hídrico

De todos los índices de uso común que no miden verdor, el más conocido es el denominado MSI – *Moisture Stress Index* o *Índice de Estrés Hídrico* (Rock *et al.* 1985), que combina las reflectividades captadas en el infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo medio (SWIR). En las imágenes del Landsat 5 TM, los valores corresponden a la banda 4 y 5 respectivamente. La banda 4 (NIR) responde a la biomasa presente; y la banda 5 es fuertemente afectada por el contenido de agua en la planta.

El resultado es que a medida que la vegetación se seca, produce aumentos en la zona del rojo (0,6 – 0,7 μm), y en el infrarrojo medio en la zona de las bandas de absorción de agua (1,4 μm , 1,9 μm , y 2,6 μm).

El Índice de Estrés hídrico se calcula mediante la siguiente expresión (6):

$$MSI = \frac{SWIR}{NIR} \quad (\text{ecuación 6})$$

Dónde:

NIR= reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano

SWIR = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infra rojo medio.

El MSI puede ser una alternativa para conocer el estado de estrés hídrico de un cultivo o una cobertura vegetal, y está relacionado con la temperatura de la planta y la humedad aprovechable del suelo (Palacios *et al.*, 2012).

Los valores de los índices de vegetación utilizados para hacer los análisis estadísticos, fueron extraídos de ventanas de 3x3 píxeles, donde se sitúa las coordenadas de cada una de las 6 parcelas, para de esta manera asegurar que se está midiendo espectralmente el daño por defoliación reportado por el IDF.

2.5. Análisis estadístico

Fueron trabajos el estadístico de correlacionen entre las variables obtenidas del filtrado de datos del IDF, definiendo así la Variable dependiente: media de porcentaje de defoliación de los 24 árboles evaluados en cada una de las 6 parcelas. Como Variable independiente: se trabajaron con los cinco índices de vegetación calculados (MSI / SAVI / NDVI / NDWI5 y NDWI7) para los cuatros años de los imagines de satélite (1989/2003/2010 y 2011) que miden desde vigor hasta el estrés hídrico de la vegetación.

2.5.1. Regresión Lineal Simple

La regresión y los análisis de correlación nos muestran como determinar tanto la naturaleza como la fuerza de una relación entre dos variables, una variable dependiente (y) y otra independiente(x). Se representa mediante un coeficiente R que oscila entre - 1 y + 1. Cuando la variable dependiente Y aumenta ante incrementos de la variable independiente X, el R es positivo y oscila entre 0 y 1. A su vez cuando Y disminuye ante incrementos de X el R es negativo, entre 0 y -1. Para describir la relación entre variable dependiente la variable independiente. El modelo de ajuste es dado por la siguiente ecuación (7):

$$Y = a + b * x \quad \text{(ecuación 7)}$$

Dónde:

a: ordenada al origen

b: pendiente

Debido a que se contó solo con cuatro fechas (cuatro imágenes), para solo seis parcelas, al establecer estimaciones entre datos de campo (IDF) y datos espectrales, la relación se estableció con una regresión lineal simple. De contarse en un futuro con más datos (de campo y espectrales) podrían probarse diferentes modelos de regresión. El análisis estadístico de los datos se realizó con el software *STATGRAPHICS* 2009.

3. RESULTADOS

3.1. Análisis de los datos de las parcelas del IDF

Con respecto a los grados de defoliación de las 6 parcelas, después de haber calculado las medias de los porcentajes de defoliación de cada año. Se identificó que los grados de defoliación van de nulo a moderados, y que los agentes causantes de daños son

variados: insectos (código 200), hongos (código 300), agentes abióticos (código 400), acción antrópica (código 500). Para mayor información sobre el rango de códigos de los agentes de daño ver el anexo 1.

En la figura (3), son presentados los gráficos de tendencia de defoliación desde 1988 hasta 2013 para las parcelas 426, 467, 509 y 604 y luego de los años 1999 hasta 2013, para las parcelas 556 y 606. La parcela más afectada es la 604, sufriendo la acción de ocho agentes, seguida de la parcela 509 afectada por siete agentes. Mientras que las parcelas 426 y 606 sufren la acción de dos tipos de agentes de daño. Al representar la tendencia de defoliación pueden observarse picos de mortandad (figura 4). Cuando el árbol muere se reemplaza para su medición.

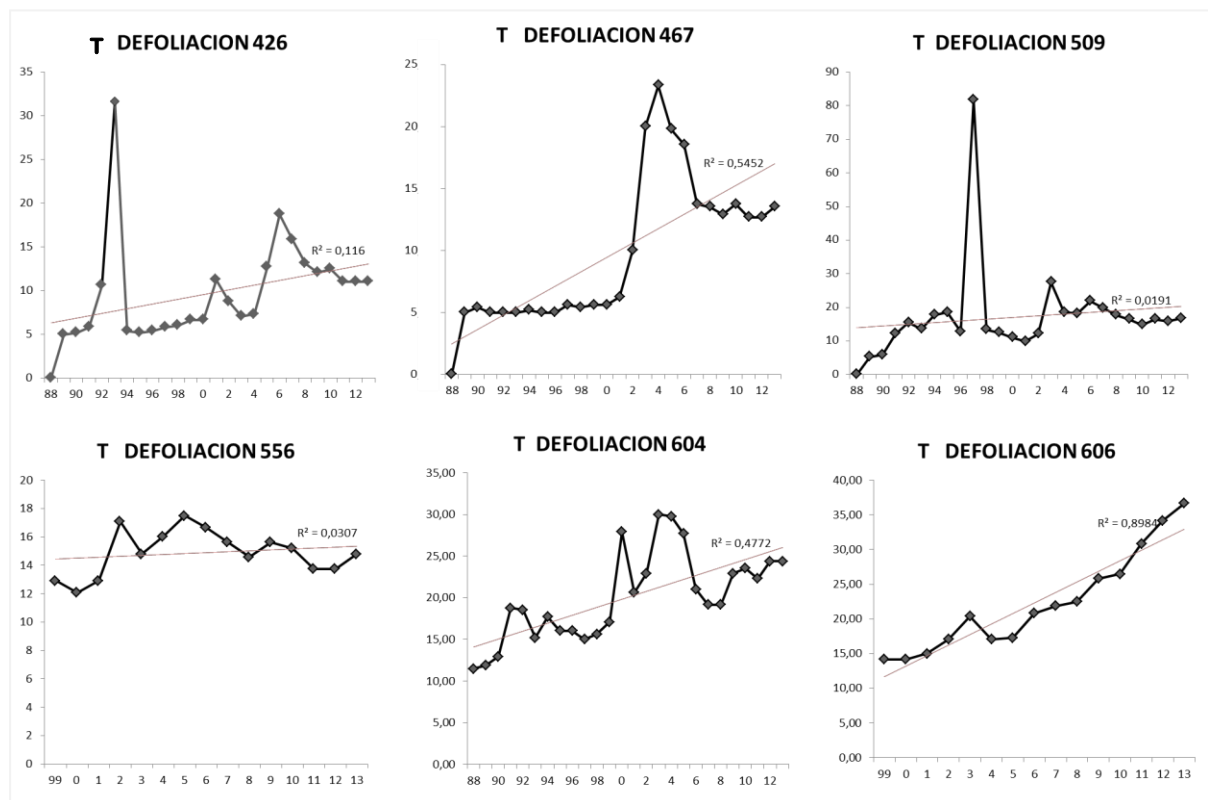


Figura 4: Gráficos de tendencia de defoliación por parcela. En el eje X se ubican los años y en el eje Y los porcentajes de defoliación

La defoliación fue la variable de campo analizada con respecto a cada parcela, considerada como «verdad terreno», con la que se busca un análisis de correlación entre variables obtenidas de la imagen satélite (índices de vegetación) y la información procedente del campo, o sea el porcentaje de defoliación presentado en la figura 4.

Con las imágenes satelitales conseguidas (tal como se explicó en la sección 2.3), se generaron los índices de vegetación, teniendo en cuenta las localizaciones de las parcelas, y así se correlacionaron con los datos de defoliación de las mismas (esto se presenta en los apartados siguientes).

3.2. Análisis de las respuestas de los índices de vegetación

Los mapas de las figuras 4, 5, 6, 7 y 8 fueron obtenidos de Landsat 5 en los años 1989, 2003, 2010 y 2011 para la provincia de Burgos. La previa selección de las imágenes se corresponde con los meses de verano, periodo de obtención de datos de campo IDF. Clasificados en el software Arcgis 10.2, con un rango de 25 clases, los cuatro índices de vegetación (NDWI (7), NDWI (5), NDVI y SAVI) cumplen el propósito de hacer un análisis temporal de la vegetación en la provincia.

Junto con los mapas acompaña las barras de los valores espectrales tomados como referencia las coordenadas de las 6 parcelas en los cuatro años analizadas. En las leyendas de gradación colores de cada gráfico, indica una gradación de valores que van del menor a mayor, de izquierda a derecha.

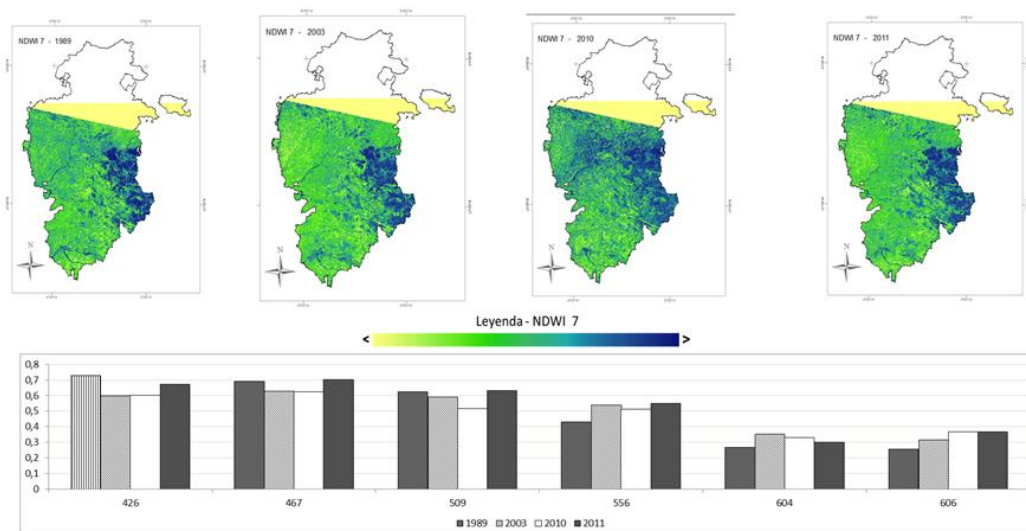


Figura 4: Mapa temático del NDWI 7 de la provincia con gráficas para las parcelas

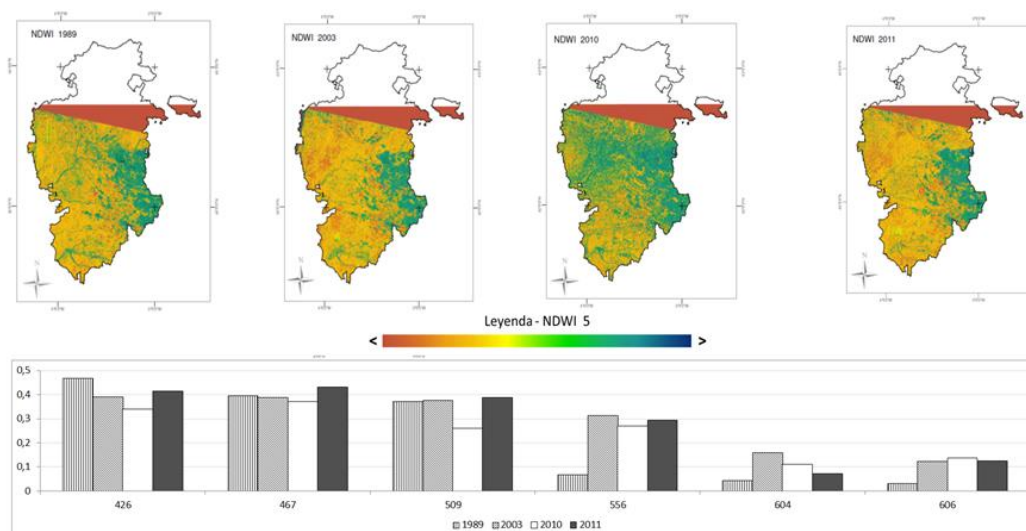


Figura 5: Mapa temático del NDWI 5 de la provincia con gráficas para las parcelas

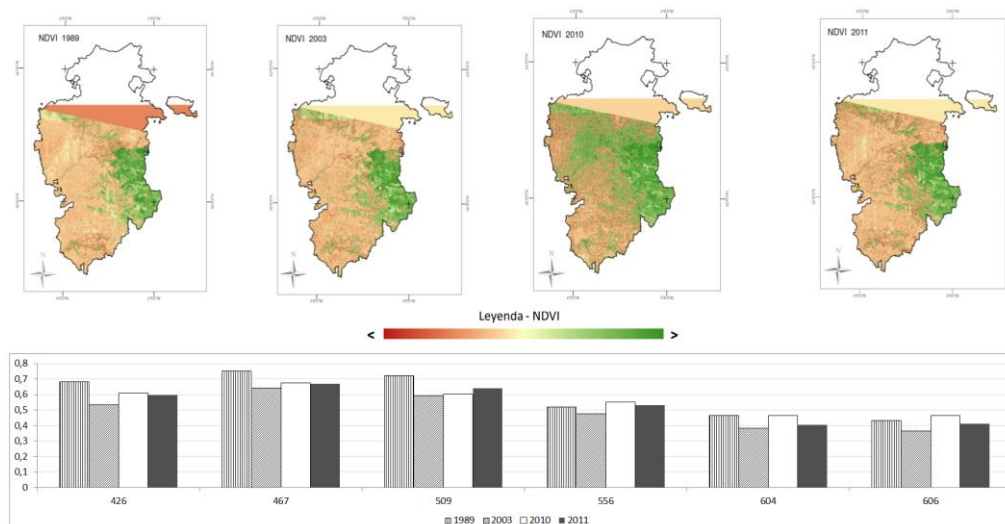


Figura 6: Mapa temático del NDVI de la provincia con gráficas para las parcelas

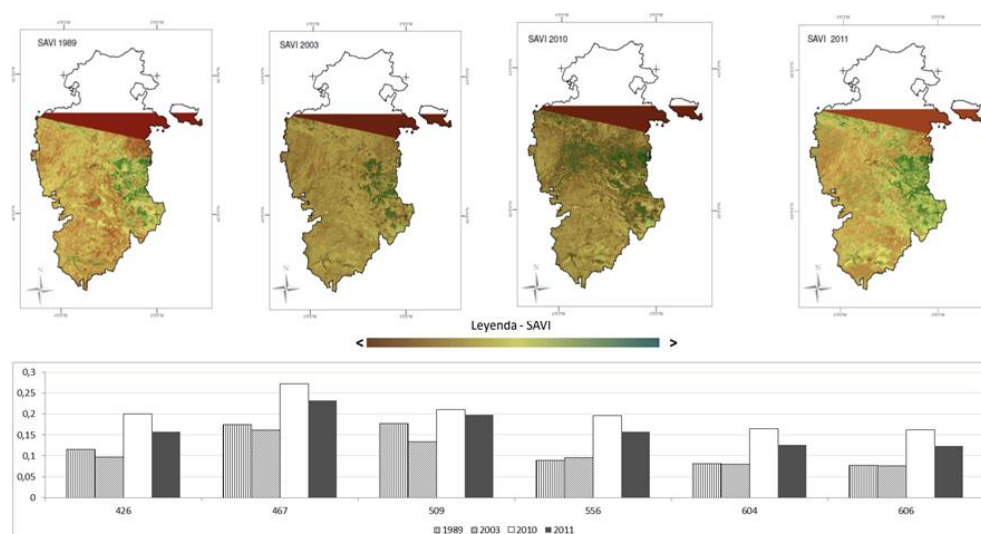


Figura 7: Mapa temático del SAVI de la provincia con gráficas para las parcelas

Los índices presentan visualmente el mismo patrón de comportamiento en los años considerados. De acuerdo con la interpretación visual el área ocupada por vegetación, son los valores más altos de los índices, sufre un discreto cambio entre los años 1989 y 2003, con una pequeña disminución de un año para otro. Luego, del año de 2003 a el año 2010 la vegetación presenta un aumento considerable de vigor, volviendo a disminuir en el año 2011. Sin embargo no se ve un patrón de pérdida de vigor de la vegetación.

Los mapas del índice de estrés hídrico (figura 9) también fueron clasificados en un rango de valores únicos en el software ArcGis 10.2. El comportamiento visual del MSI, es contrario a los de los anteriores índices de vegetación (NDVI, SAVI, NDWI (5), y NDWI (7)), pues los valores más altos son los que están en las zonas amarillas. Un comportamiento

que era el esperado, pues lo que propone el índice es indicar donde hay un déficit hídrico. Los que no se vio reflejado, por ejemplo, en los resultados visuales de los mapas de NDWI.

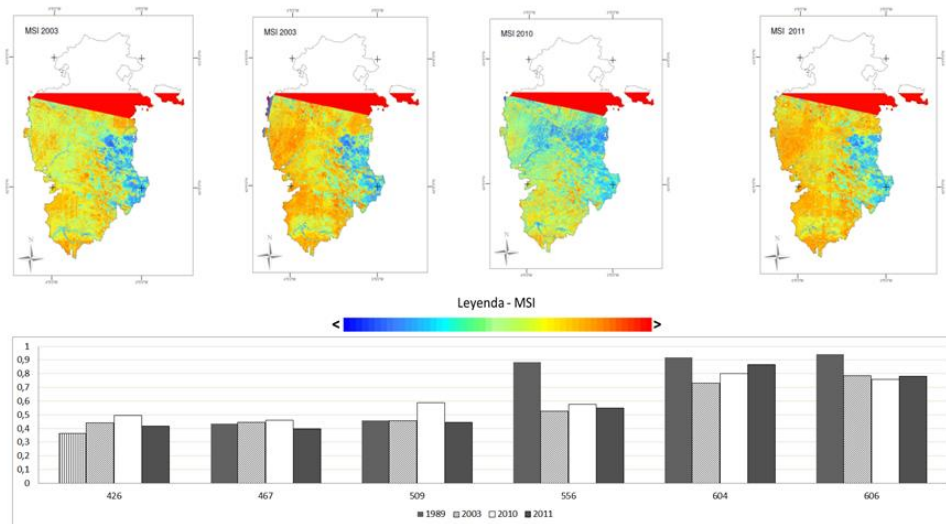


Figura 8: Mapa temático del Índice de Estrés Hídrico de la provincia con gráficas para las parcelas

Se comprueban que visualmente hay variaciones en cuanto al vigor de la vegetación en la provincia, sin embargo en general las parcelas están ubicadas, de forma puntual, en zonas donde hay pérdida de vigor, si vamos a comparar con la provincia. Haría falta que se realizará un análisis más preciso, añadiendo resultados espectrales con respecto a parcelas no dañadas, y compararlas con los valores de las zonas defoliadas. Cabe ahora confrontar la relación Índices de vegetación versus porcentaje de defoliación, provisto en la sección 2.5. y el objetivo 3.

3.3. Relación entre defoliación y los índices calculados

Para cumplir con el objetivo de comparar los datos de la Red Europea de Daños en los Bosques - nivel I, en cuanto a defoliación, con los resultados de los índices de vegetación a lo largo de una serie temporal de 20 años y debido a que las imágenes del satélite Landsat ni siempre están disponibles en coincidencia con la fecha del inventario, ni la cobertura de nubes mínima que se requiere para análisis suele ser la adecuada, solo se procesaron 4 imágenes que cubren ese periodo de tiempo preestablecido, que va de 1989 a 2011 (tabla 2). Además el satélite Landsat 5 sensor TM, no cubre hasta el último año correspondiente a la serie de datos del IDF.

En cuanto a los datos de parcelas del IDF (apéndice 1), solo cuatro están evaluadas desde 1988 hasta 2013, siendo dos parcelas las que no tienen datos para compararse con los resultados de los índices en la imagen 1989. Para este análisis de correlación se usan los mismos cinco índices de vegetación para los mismos tres años. De los 5 índices, tres (MSI, NDWI(5) y NDWI(7)) están relacionados directamente con la humedad y el estrés

hídrico de la vegetación. Importantes en si tratándose de los efectos de enfermedades forestales relacionados con estrés hídrico de la planta.

3.3.1. Resultados de las correlaciones

Lo datos utilizados para los cálculos incluyen los porcentajes de defoliación de las 6 parcelas que han sido objeto de estudio para este trabajo, y los valores de los cinco índices calculados (MSI, NDVI, NDWI-5, NDW-7 y SAVI). La figura (9) abajo incluye una serie de gráficas que proporcionan vistas interesantes de los datos.

Estos resultados obtenidos del procedimiento de análisis multivariado utilizando el software STATGRAPHICS (2009), resume en varias columnas los datos, calculándolos frente a varios estadísticos que incluyen correlaciones, covarianzas y correlaciones parciales.

La figura 9 muestra las correlaciones, producto de Pearson, entre cada par de variables. El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables. También se muestra, entre paréntesis, el número de pares de datos utilizados para calcular cada coeficiente. El tercer número en cada bloque de la tabla es un valor-P, que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores-P abajo de 0.05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95.0%.

Los siguientes pares de variables tienen valores-P por debajo de 0.05: % de defoliación y MSI*, % de defoliación y NDVI*, % de defoliación y NDWI 5*, % de defoliación y NDWI 7*, MSI y NDVI**, MSI y NDWI 5**, MSI y NDWI 7**, NDVI y NDWI 5**, NDVI y NDWI 7**, NDVI y SAVI**, NDWI 5 y NDWI 7** y por ultimo NDWI 7 y SAVI**.

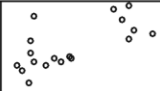



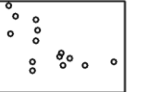
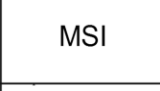
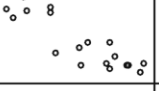
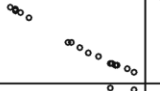

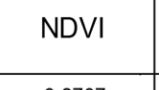


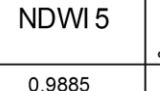
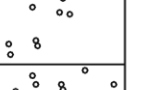
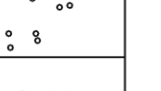
% defoliacion					
0.6674 (18) 0.0025*	MSI				
-0.5826 (18) 0.0112*	-0.8702 (18) 0.0000**	NDVI			
-0.6652 (18) 0.0026*	-0.9980 (18) 0.0000**	0.8707 (18) 0.0000**	NDWI 5		
-0.6822 (18) 0.0018*	-0.9870 (18) 0.0000**	0.9113 (18) 0.0000**	0.9885 (18) 0.0000**	NDWI 7	
-0.3844 (18) 0.1153	-0.4413 (18) 0.0667	0.7932 (18) 0.0001**	0.4373 (18) 0.0696	0.5340 (18) 0.0225**	SAVI

Figura 9: Salidas de análisis multivariado entre el porcentaje de defoliación y los índices NDVI, NDWI(5), NDWI(7), SAVI y MSI.

Después de este análisis multivariado utilizado para conocer los datos, las correlaciones se hicieron a partir del estadístico regresión lineal simple, del que se alcanzaron las informaciones de la tabla 3. Para estos cálculos de la regresión lineal, se tomó como variable dependiente el porcentaje de defoliación de las 6 parcelas y la variable independiente los índices, analizados de forma individual para los años 2003, 2010 y 2011.

Tabla 3: Coeficiente de determinación y el coeficiente de correlación del porcentaje de defoliación de las parcelas y los índices NDVI, NDWI (5), NDWI(7), SAVI y MSI

	R2	Coeficiente de correlación	Error estándar	Error absoluto medio
NDWI (7)**	46.5418	-0.682216	5.22581	4.06389
MSI*	44.5444	0.667416	5.32255	4.11537
NDWI (5)*	44.2503	-0.665209	5.33664	4.12864
NDVI*	33.9436	-0.582612	5.80903	4.49011
SAVI	14.7757	-0.384391	6.59824	4.92351

La salida grafica (figura 10) muestra los resultados ajustados del modelo lineal para describir la relación entre la defoliación y NDWI (7), y la defoliación y el MSI. Puesto que el valor-P de análisis de varianza es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables, con un nivel de confianza del 95.0%.

El R-Cuadrado (R^2) indica que el modelo ajustado explica 46.5418% de la variabilidad en defoliación. Comparado con los demás índices (tabla 3), el NDWI(7) presenta un R^2 mayor. El coeficiente de correlación es igual a -0.683614, indicando una relación negativa moderadamente fuerte entre las variables

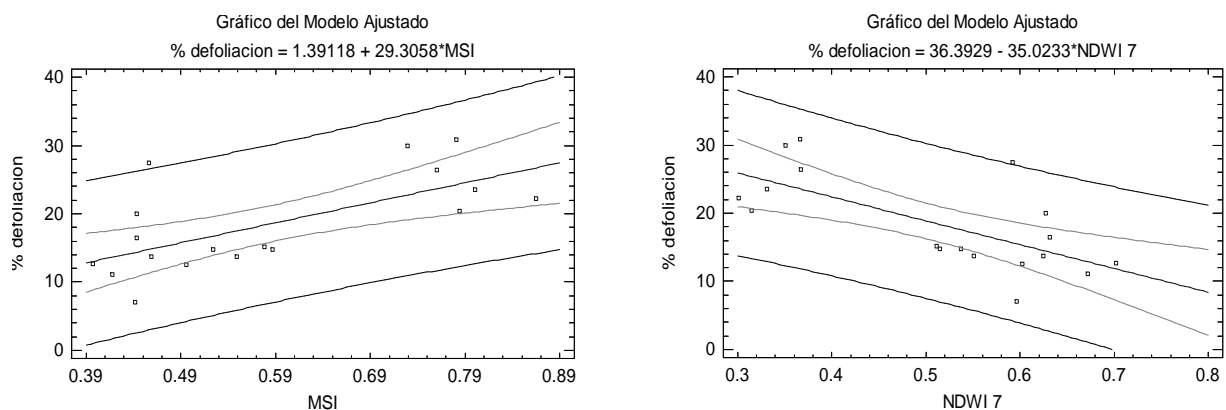


Figura 10: Resultados de la correlación entre NDWI (7) y MSI con respecto a la defoliación.

Con respecto a los demás índices, existe una relación estadísticamente significativa en el NDVI, el NDWI(5) y en el MSI. El coeficiente de correlación para NDWI (5) y el NDVI, indica una relación negativa moderadamente fuerte. En cuanto al MSI es la una relación positiva, considerada moderadamente fuerte. El SAVI fue el único cuyo la relación no es estadísticamente significativa.

4. DISCUSIÓN

La gran heterogeneidad de los bosques mediterráneos provoca que los análisis de teledetección produzcan una elevada variabilidad en los datos espectrales. Por ello para obtener los datos de los índices de vegetación, se consideraron las mismas coordenadas de las parcelas del IDF, aplicando la técnica de ventanas espectrales siguiendo lo propuesto por García-Martín *et al* (2011); garantizando con eso que los datos espectrales pudieran ser comparados con los datos del IDF, pues ambos miden el mismo punto.

Los filtros de datos del IDF permitieron seleccionar las parcelas de coníferas con daño fitosanitario. Sin embargo la selección de escenas de las imágenes Landsat influyó en el filtrado reduciendo los datos a seis parcelas, en las cuales están representadas las dos principales especies de coníferas (*Pinus sylvestris* L. y *Pinus pinaster* Aiton) de importancia económica para el ámbito forestal. En otros estudios de procesos de decaimiento de ecosistemas forestales, también se han utilizado sensores de media resolución espacial (Ekstrand, 1994; Zarco-Tejada *et al.*, 1999; Granica *et al.*, 2000), utilizando la variable defoliación como parámetro para diagnosticar daños. Si bien a nivel de comunidad autónoma existen resultados con respecto al decaimiento en *Pinos pinaster* (Prieto *et al.* 2012), no utilizan datos espectrales.

A pesar de las limitaciones de resolución espacial y espectral del sensor TM del Landsat, al contrastar los datos forestales se obtienen respuestas significativas, ya demostradas en otros trabajos (Townsend *et al.* 2012, Sangüesa *et al.* 2014, Rullán Silva *et al.* en prensa). Las regiones espectrales que mejor detectan la defoliación, son las correspondientes a las bandas 4, 5 y 7 en Landsat, porque pueden capturar la reducción del vigor en las acículas de los pinos y la consiguiente reducción de la evapotranspiración de árboles (Chuvieco, 2010) por lo cual los índices de vegetación que miden variaciones en vigor y humedad son aplicables. Por consiguiente los índices de vegetación probados en este trabajo pudieron correlacionarse con los datos de defoliación detectando los cambios fitosanitarios en las masas.

En dicha correlación se obtuvo una R^2 y coeficientes de correlaciones satisfactorios, entre lo que es la defoliación, variable que trata de explicar el daño forestal, y los índices. El NDWI (7) fue el que mejor se correlacionó con la defoliación, seguidos del NDWI (5) y el MSI. Resultados semejantes fueron encontrados en el artículo de Sangüesa *et al.* (2014), en el Townsend *et al.* 2012 y Rullán Silva *et al.* (en prensa). Interesante es que el NDVI, conocido en los análisis de vegetación, se quedó por detrás de los otros 3 índices de verdor. Esto ya se menciona en otros estudios que indican que en los bosques de coníferas, el MSI, por ejemplo, es mejor que el NDVI para distinguir daños forestales (Vogelmann *et al.*, 1993).

En las gráficas de tendencia de defoliación hay parcelas que presentan picos elevados, indicando con ello que hubo, a finales de los años 90, mortandad de los árboles,

elevando los valores de la media de defoliación de estos años a niveles graves. Evento interesante para posibles futuros estudios.

Casi la mitad de las parcelas analizadas presentan una tendencia de incremento de defoliación. Conforme haya incremento de la defoliación, se incrementa la vulnerabilidad de las especies al cambio climático (Gracia *et al.*, 2005) al disminuir su capacidad en caso de competencia o siendo más vulnerable a otros agentes patógenos que, al asociarse, pueden ocasionar la muerte del árbol. Con lo que se considere un incremento de la defoliación, se puede decir que ha habido una reducción de la biomasa aérea, lo que tiene profundas consecuencias sobre los balances de agua y carbono del bosque (Tello *et al.* 1994). Además del parámetro de análisis defoliación, hay otros parámetros que están relacionados con el estrés hídrico, como es el caso a producción de piñas estudiadas en otros trabajos como el Solberg (2004) y Preto (2012). Por las herramientas y respuestas de teledetección que tienen en cuenta el estrés hídrico, los estudios que seguirían deberían orientarse a predecir disminución o aumento en la producción del fruto, algo que ya se hace en la agricultura de precisión.

Finalmente se puede decir que los resultados presentados en este trabajo, en consonancia con lo antes citado, reafirman la idea que la teledetección es una herramienta de ayuda para la gestión forestal y el control fitosanitario de los bosques. Así mismo, en varias oportunidades la teledetección ha contribuido a incrementar la velocidad, eficiencia de coste y precisión de los inventarios (McRoberts y Tomppo, 2007).

Por último cabe destacar que se podrían obtener mayores R^2 en las correlaciones defoliación-datos espectrales, si se consigue trabajar con mayores números de puntos de análisis sobre el territorio forestal y de esta manera se podría contar con una muestra más robusta estadísticamente. De la misma manera podrían mejorarse los resultados si se aplican otros sensores multiespectrales, o incluso hiperespectrales, ya que existe una buena base de datos a modo de serie temporal en los inventarios nacionales que cuentan con parcelas permanentes.

5.- CONCLUSIONES

Los resultados más importantes de este trabajo pueden resumirse en los siguientes:

(1) Las parcelas del IDF proporcionan datos cuantitativos de abundancia de especies, tipos de daños y otras variables ambientales. Estas informaciones son esenciales para estudiar y gestionar el estado fitosanitario de los bosques. En las parcelas estudiadas los daños forestales registrados por el IDF, aunque con niveles moderados conforme al análisis temporal realizado de dos décadas, permiten a través del parámetro de defoliación, (que se comportó como un buen testigo de pérdida de vigor de la vegetación) ser identificados por los índices de vegetación. Las parcelas que presentan un claro aumento del porcentaje de defoliación son las que tienen como especie dominante el *Pinus Pinaster*.

(2) El análisis temporal de la vegetación en la provincia de Burgos, con los índices de vegetación sobre masas de pinares identificó, aunque con R^2 bajas, la pérdida de vigor de la vegetación a lo largo de los tres años evaluados. El análisis visual de los índices de vegetación revela cambios de un año a otro. Y el año de 2010 demostró resultados de mayor verdor de la vegetación en comparación a todos los demás índices. La aplicación de índices espectrales de vegetación permitió elaborar cartografía fiable de la variable defoliación en masas de pinar de las parcelas seleccionadas en la provincia de Burgos.

(3) Los análisis estadísticos son significativos, con excepción de la relación defoliación e índice SAVI. Hay correlación positiva entre la defoliación con MSI, y una correlación negativa con el NDVI, NDWI5, NDWI7. Por su R^2 y su coeficiente de correlación, el NDWI7 parece ser el índice más adecuado para identificar daños en coníferas sistemas forestales, seguidos del NDWI5 y el MSI. El sensor y los índices utilizados han permitido comprobar la pérdida de vigor y el estrés hídrico en las parcelas reportadas con daño en el IDF.

6.- REFERENCIAS

Allen, C.D., and D.D. Breshears. 1998. Drought-induced shift of a forest/woodland ecotone: rapid landscape response to climate variation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 95:14839-14842.

Bastiaanssen, W. G. M. 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climate. PhD. Dis., CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, the Netherlands: 272.

Bigler, C., Bräker, O.U, Bugmann, H., Dobbertin, M., Rigling, A. 2006. Drought as an inciting mortality factor in Scots pine stands of the Valais, Switzerland. *Ecosystems* 9:330-343. Bigler, C., Bugmann, H. 2003. Growth-dependent tree mortality models based on tree rings. *Canadian Journal of Forest Research*. 33:210-221.

Chuvieco E., 2010. Teledetección espacial: la observación de la Tierra desde el espacio. Ariel, Madrid.

Chuvieco E. 1996. Fundamentos de Teledetección espacial. Ed. Rialp. Madrid.

Cosero D, Riaño D, Chuvieco E. 1998. Estimación de la Humedad de la Vegetación Usando Imágenes de Satélite e Índices Meteorológicos de Peligro de Incendios. En: Serie Geográfica: Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá -España, vol. 7 p 59 – 72.

Ekstrand S. 1994. Assessment of forest damage with Landsat TM: Correction for varying forest stand characteristic. *Remote Sens Environ* 47(3), 291-302.

FAO. 2010. El Estado de los bosques del mundo. Bosques, actividad forestal y productos forestales para un futuro sostenible. Roma. 3: 26 - 46

- Galvão L S, Formaggio A R, Tisot D A. 2005. Discrimination of sugarcane varieties in southeastern Brasil with EO-1 Hyperion Data. *Remote sensing of Environment*, 94, 523-534.
- García-Martín A, de la Riva J, Pérez-Cabello F, Montorio R. 2011. Estimación del potencial energético de los pinares de la provincia de Teruel mediante teledetección. *Geographicalia* (ISSN: 0210-8380), Vol. 59-60, pp. 109 - 124.
- Gilabert M A, Segarra D, Meliá J. 1990. A simplifield algoritm for the evaluation of frost affect citrus. In: *Application of Remote Sensing in Agriculture*. J. A. Clark and M. D. Steven Eds. Butterworths, Guildford, 273 -284.
- Gracia, C., L. Gil & G. Montero. 2005. Impactos sobre el sector forestal. En Moreno J.M. (ed.) "Evaluación preliminar del impacto en España por efecto del cambio climático". Ministerio de Medio Ambiente: 399-435.
- Granica K, Schardt M, Gallaun H. 2000. Monitoring of Protection Forests by Means of SPOT4 Satellite Data. *Proceedings of 20th EARSEL-Symposium «ADecade of Trans-European Remote Sensing Cooperation»*, 14-16 June 2000, Dresden, Germany
- Hardisky, M.A., Klemas, V., and Smart,R.M. 1983. The influence of soilsalinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alternifloracanopies*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*: 49,77.
- Huete A. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25: 295-309.
- Innes J. 1993. *Forest health: its assessment and status*. Cab International, Cambridge. 677 pp.
- Ito E, S Lim, B Tith, P Pith, S Khorn, A Tani, M Kanzaki, T Kaneko, Y Okuda, M Araki. 2007. Use of ASTER optical indices to estimate spatial variation in tropical seasonal forests on the West Bank of the Mekong River, Cambodia. In Sawada H, M Araki, NA Chappell, JV LaFrankie, A Shimizu eds. *Forest Environments in the Mekong River Basin*. Japan, Springer. p. 232-240.
- Jackson R D. 1983. Spectral indices in n-space *Remote Sensing Environ.*, 13: 409 – 421.
- Jaworski T, Hilszczański J. 2013. The effect of temperature and humidity change on insect development and their impact on forest ecosystems in the context of expected climate change. *Forest Research Papers* 74 (4):345-355.
- Jensen J. 2005. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*, 3rd ed. Pearson Education, Inc. 526 pp.
- Jepsen J, Hagen S, Hogda K, Ims R, Karlsen S, Tommervik H et al., 2009. Monitoring the spatio-temporal dynamics of geometrid moth outbreaks in birch forest using MODISNDVI data. *Remote Sens Environ* 113: 1939-1947.
- Kantola T, Lyytikäinen P, Vastaranta M, Kankare V, Yu X, Holopainen M et al., 2011. Using high density ALS data in plot level estimation of the defoliation by the Common pine sawfly. *Proc 11th International SilviLaser Int Conf on "LIDAR applications for assessing forest ecosystems"* Hobart (Australia), October 16-20. pp: 1-8.

- Lillesand T M. 2004. Remote Sensing and Image Interpretation. 5 th edition. New York; Willey
- Lira D R. Araujov M S B, Sa E. V, da Silva H A. 2010. Mapeamento e Quantificação da Cobertura Vegetal do Agreste Central de Pernambuco Utilizando o NDVI. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 03, p. 157-162,
- MAGRAMA. 2011. Mantenimiento y toma de datos de la Red Europea de Seguimiento de Daños en los Bosques. Nivel I. Dirección General de Medio Natural y Política Forestal, Madrid.
- Manion PD. 1981. Tree disease concepts. Englewood Cliffs (NJ): Prentice Hall, 409 p.
- Manzano Serrano M J. Peña G S, Santiago D S P, Martínez, B T. 2013. Vitalidad de *Quercus ilex* durante los últimos 26 años. Dinámica e identificación de áreas críticas desde el punto de vista sanitario. 6º Congreso Forestal Español. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Victoria.
- Markham, B. L. & Barker, J. L. 1986. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at satellite temperatures, EOSAT Landsat Tech.
- Martínez-Vilalta J. & Piñol J. 2002. Drought-induced mortality and hydraulic architecture in pine populations of the NE Iberian Peninsula. Forest Ecology and Management 161: 247-256.
- McRoberts R E. Tomppo E O. 2007. Remote sensing support for national forest inventories. Remote Sensing of Environment, 110: 412-419.
- MMA. 2009. Estructura de la Propiedad forestal en las provincias de Ávila, Burgos y Segovia. Castilla y León. Provincia Burgos.
- Monteith, J. 1981. Evaporation and surface temperature. Q. J. R. Meteorol. Soc., 107: 1-27.
- Navarro-Cerrillo R M, Fernández P, Escuin S. Crespo R. 2004. Directrices para la restauración de áreas afectadas por incendios en Andalucía. En: Seminario de Restauración de áreas afectadas por grandes incendios. Rey van den Bercken E. ed. Junta de Castilla y León - Consejería de Medio Ambiente, Valladolid. 106-121 pp.
- Ninyerola M, Pons X y Roure JM. 2005. Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica. ISBN 932860-8-7. Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra.
- OSE. 2011. Biodiversidad en España. Base de la Sostenibilidad ante el cambio global. 5.
- Palacios S. Hernández R. Maestro-Martínez M. Camarero J J. 2012. Fast replenishment of initial carbon stores after defoliation by the pine processionary moth and its relationship to the re-growth ability of trees. Trees: Struct. Funct. 26: 1627-1640
- Paruelo J M, Epstein H E, Lauenroth W K, Burke, I C. 1997. ANPP estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the United States. Ecology 78: 953-958.

- Perry C R, Jr, L F Lautenschlager. 1984. Functional equivalence of spectral vegetation indices: Remote Sensing. Environ. 14:169-182.
- Prieto-Recio C, Romeralo C, Bezos D, Martín-García J, Martínez-Alvarez P, Botella L, *et al.* 2012. First Report of Heterobasidion annosum on *Pinus pinaster* in Spain. Plant Disease 96, 770.
- Rebetez M, Dobbertin M. 2004. Climate change may already threaten Scots pine stands in the Swiss Alps. Theoretical and Applied Climatology, 79: 1-9.
- Rock B N, Vogelmann J E, Williams D L, Vogehmann A F, Hoshizaki T. 1986. Remote detection of forest damage. Bioscience 36: 439 - 445.
- Rouse J W, Haas R H, Schell J A, Deering D W. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3., Washington, D. C., Proceedings. Washington, D. C.: NASA. Goddard Space Flight Center, 1973. v. 1, p. 309- 317. (NASA SP-351).
- Rullan-Silva C D, A E Olthoff, J A Delgado de la Mata, J A Pajares-Alonso. 2013. Remote monitoring of forest insect defoliation. A review. Forest System 22(3): 377 – 391.
- Salvador R, Pons X. 1998. On the applicability of Landsat TM images to Mediterranean forest inventories. Forest Ecology and Management, 104: 193-208.
- Sangüesa-Barreda, Gabriel; Camarero, J. Julio; García-Martín, Alberto; Hernández, Rodolfo; de la Riva, Juan . 2014. Remote-sensing and tree-ring based characterization of forest defoliation and growth loss due to the Mediterranean pine processionary moth . For.Ecol.Manage: 320, 0, 171-181.
- Sociedad Española de Ciencias Forestales – SECF. 2010. Situación de los bosques y del sector forestal en España. Informe 2010. INCA ingeniería. AGRESTA S. Coop.
- Solberg S. 2004. Summer drought: a driver for crown condition and mortality of Norway spruce in Norway. Forest Pathology 34, 93-104.
- Statgraphics. 2009. Statgraphics® Centurion XVI User Manual. StatPoint Technologies, Inc.
- Stimson H C, D D Breshears, S L Ustin, S C Kefauver. 2005. Spectral sensing of foliar water conditions in two co-occurring conifer species: *Pinus edulis* and *Juniperus monosperma*. Remote Sense of Environment 96: 108-118.
- Tello E., Sabaté S., Bellot J. y Gracia C. 1994. Modelling the Responses of Mediterranean Forest to Climate Change: The role of canopy in water fluxes. Noticiario de Biología 2(3):55. Santiago de Chile, Chile.
- Townsend P, Singh A, Foster J, Rehberg N, Kingdon C, Eshleman K *et al.* 2012. A general Landsat model to predict canopy defoliation in broadleaf deciduous forests. Remote Sense Environ 119: 255-265.
- Tucker C J, Townshend J R, Goff T E. 1985. African land-cover classification using satellite data. Science 227:369-375.

Verkaik E, Moraal L, Nabuurs G. 2009. Potential impacts of climate change on Dutch forests, mapping the risks. Wageningen, Alterra-rapport 85 pp.

Virginia R A, Wall D H. 2001. Principles of Ecosystem function. En: Levin, S.A. (ed.) Encyclopedia of Biodiversity, pp. 345-352. Academic Press, San Diego, USA.

Vogelmann J, Rock B, Moss D. 1993. Red-edge spectral measurements from sugar maple leaves. *Int J Remote Sensing* 14: 1563-1575.

Wang L, Huang H, Luo Y. 2010. Remote sensing of insect pests in larch forest based on physical model. Proc IGARSS Int Conf on Remote Sensing: Global vision for local action, Honolulu, Hawaii (USA), July 25-30. pp: 3299-3302.

Williams D, Liebhold A. 1995. Herbivorous insects and global change: potential changes in the spatial distribution of forest defoliator outbreaks. *J Biogeogr* 22: 665-671.

Zarco-Tejada P J, Miller J R, Mohammed G H, Noland T L, Sampson P H. 1999. Índices ópticos obtenidos mediante datos hiperespectrales del sensor CASI como indicadores de estrés en zonas forestales. Comunicación expuesta en el VIII Congreso Nacional de Teledetección. Teledetección. Avances y Aplicaciones. Servicio de Publicaciones de la Diputación de Albacete.

APÉNDICES Y ANEXOS

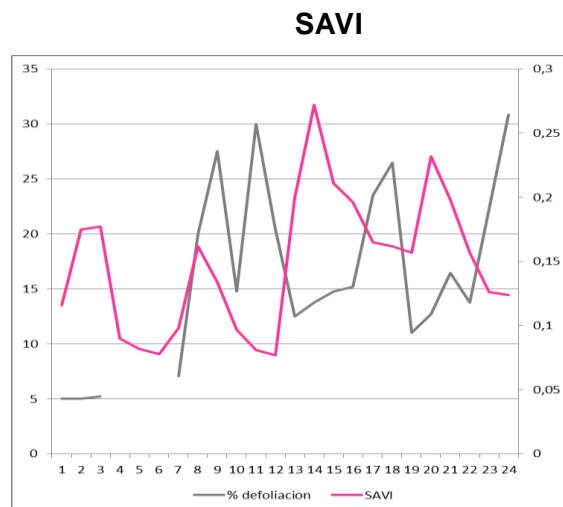
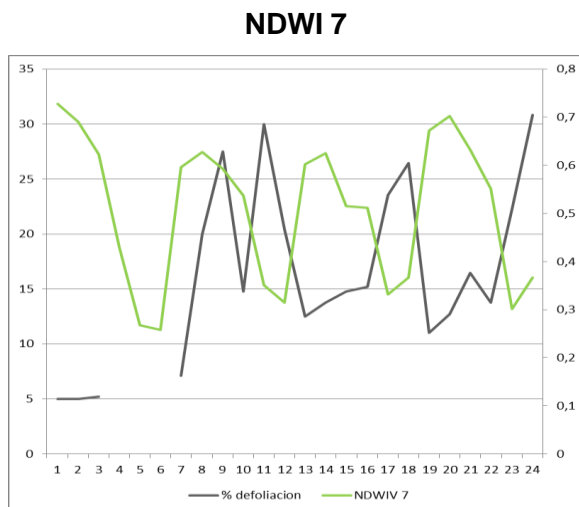
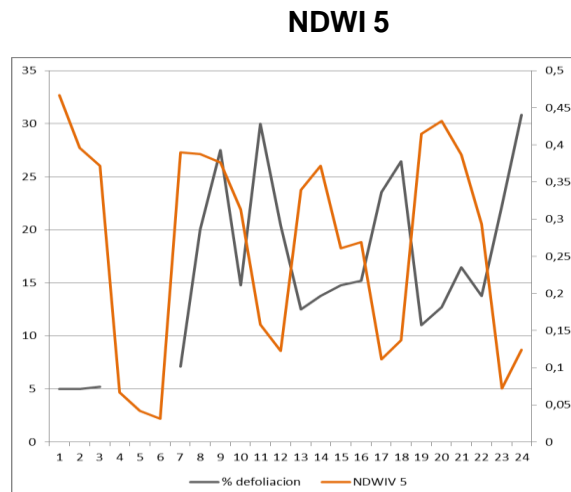
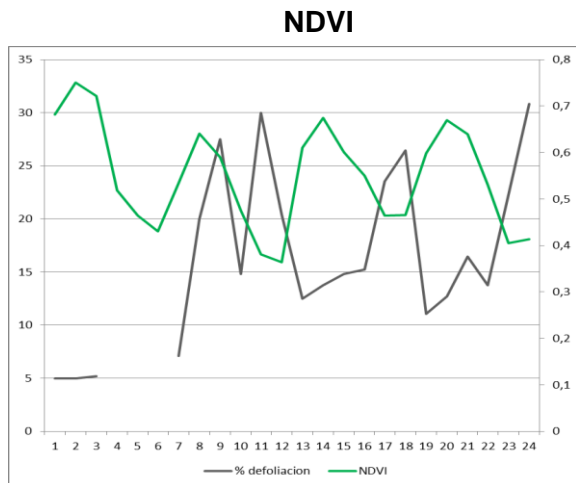
APÉNDICES 1: TABLAS DE DATOS DE DEFOLIACIÓN

Años	Def. par- 426	Def. par- 467	Def. par- 509	Def. par-556	Def. par- 604	Def. par- 606
88	0	0,00	0,00	12,92	11,46	14,17
89	5,00	5,00	5,21	12,08	11,88	14,17
90	5,21	5,42	5,83	12,92	12,92	15,00
91	5,83	5,00	12,08	17,08	18,75	17,08
92	10,63	5,00	15,42	14,79	18,54	20,42
93	31,67	5,00	13,54	16,04	15,21	17,08
94	5,42	5,21	17,71	17,50	17,71	17,29
95	5,21	5,00	18,54	16,67	16,04	20,83
96	5,42	5,00	12,71	15,63	16,04	21,88
97	5,83	5,63	81,67	14,58	15,00	22,50
98	6,04	5,42	13,33	15,63	15,63	25,83
99	6,67	5,63	12,50	15,21	17,08	26,46
0	6,67	5,63	11,04	13,75	27,92	30,83
1	11,25	6,25	9,79	13,75	20,63	34,17
2	8,75	10,00	12,08	14,79	22,92	36,67
3	7,08	20,00	27,50		30,00	
4	7,33	23,33	18,54		29,79	
5	12,71	19,79	18,13		27,71	
6	18,75	18,54	21,88		21,04	
7	15,83	13,75	19,79		19,17	
8	13,13	13,54	17,71		19,17	
9	12,08	12,92	16,46		22,92	
10	12,50	13,75	14,79		23,54	
11	11,04	12,71	16,46		22,29	
12	11,04	12,71	15,83		24,38	
13	11,04	13,54	16,67		24,38	

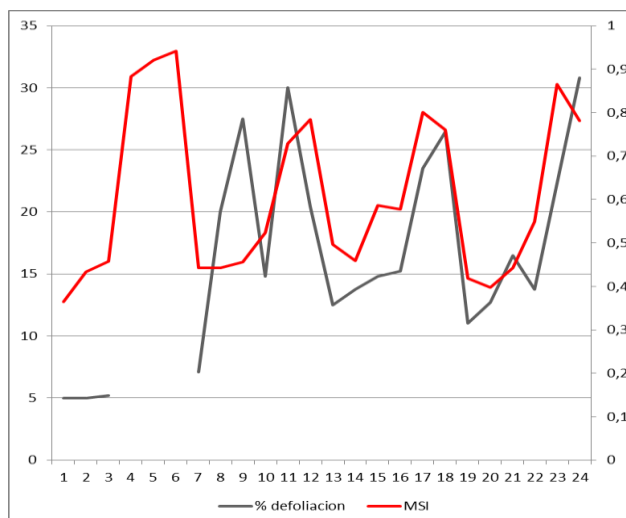
APÉNDICES 2: TABLAS DE DATOS DE DEFOLIACIÓN

	parcelas	% defoliación	NDVI	SAVI	NDWI	MSI	NDWIV 7
1989	p1	5	0,682	0,116	0,467	0,365	0,728
	p2	5	0,751	0,175	0,396	0,434	0,69
	P3	5,208	0,722	0,177	0,372	0,458	0,623
	p4		0,518	0,09	0,067	0,883	0,43
	p5	11,87	0,464	0,082	0,042	0,92	0,267
	p6		0,43	0,078	0,031	0,941	0,258
2003	p1	7,083	0,534	0,098	0,39	0,442	0,596
	p2	20	0,641	0,162	0,388	0,443	0,627
	P3	27,5	0,59	0,134	0,376	0,456	0,592
	p4	14,79	0,475	0,097	0,313	0,524	0,537
	p5	30	0,381	0,081	0,158	0,729	0,351
	p6	20,416	0,364	0,077	0,123	0,784	0,315
2010	p1	12,5	0,611	0,2	0,339	0,496	0,602
	p2	13,75	0,674	0,272	0,372	0,459	0,625
	P3	14,79	0,601	0,211	0,261	0,587	0,515
	p4	15,208	0,55	0,196	0,269	0,578	0,511
	p5	23,54	0,464	0,165	0,111	0,801	0,331
	p6	26,45	0,466	0,162	0,137	0,76	0,367
2011	p1	11,041	0,598	0,157	0,415	0,418	0,672
	p2	12,708	0,67	0,232	0,432	0,397	0,702
	P3	16,458	0,639	0,198	0,387	0,443	0,632
	p4	13,75	0,531	0,157	0,293	0,549	0,551
	p5	22,29	0,405	0,126	0,072	0,865	0,301
	p6	30,83	0,413	0,124	0,124	0,781	0,366

2.2 - Graficas comparativas entre los datos de los índices (en colores) y la defoliación (en gris).



MSI



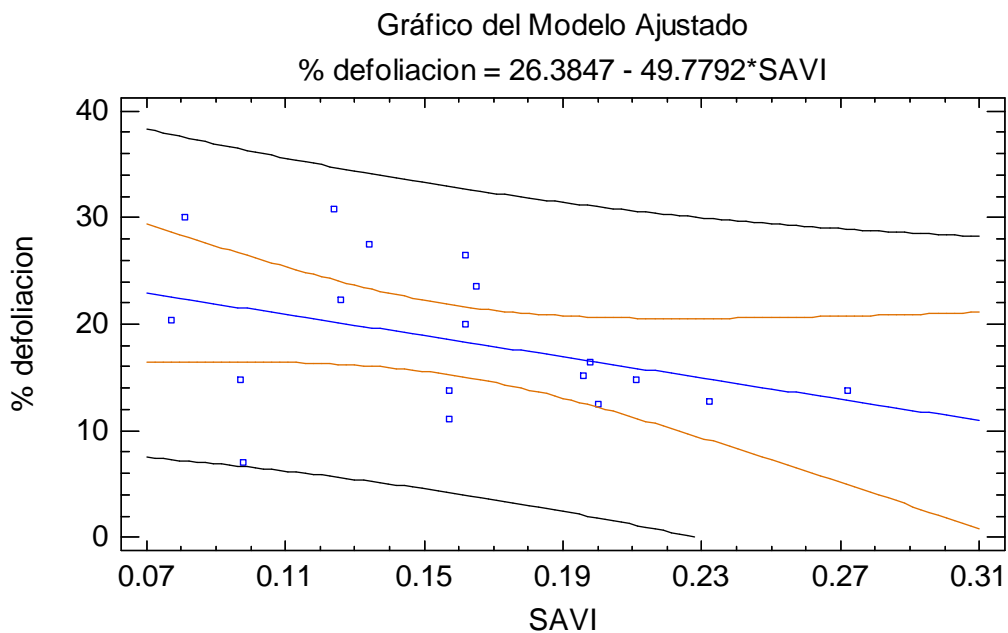
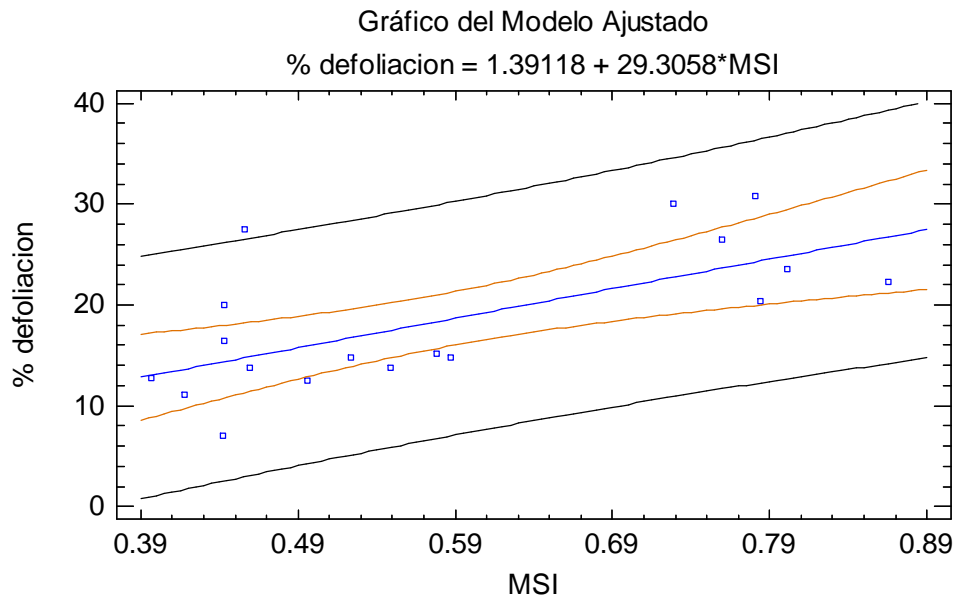
APÉNDICES 3: COMPARACIÓN LOS ÍNDICES Y SALIDAS DE LOS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

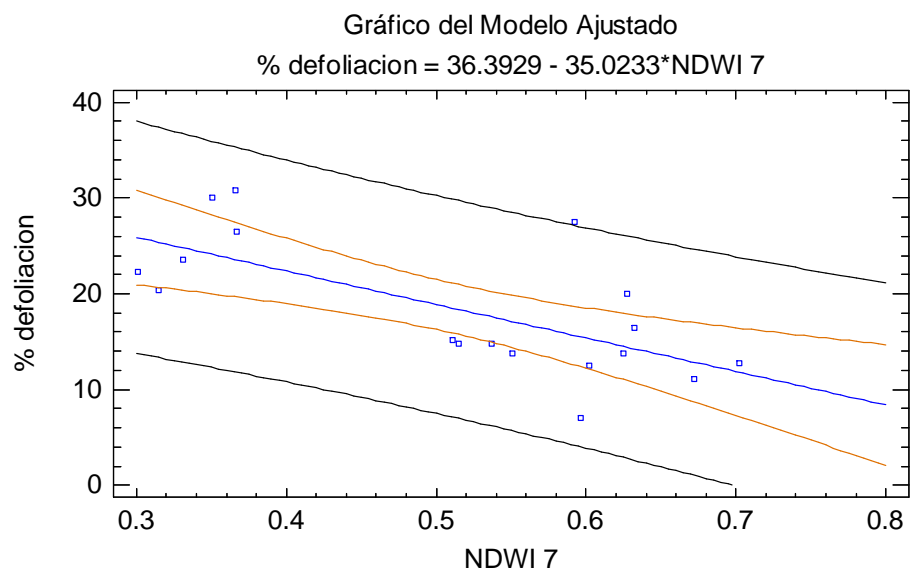
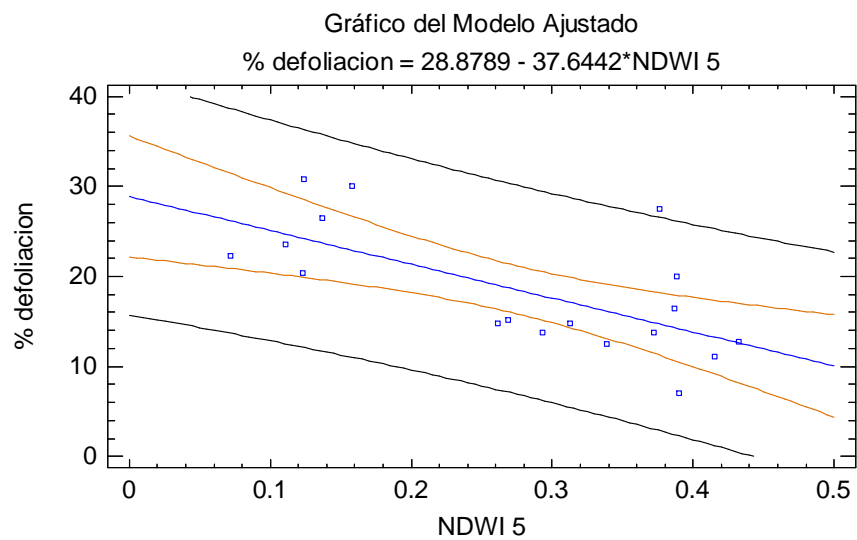
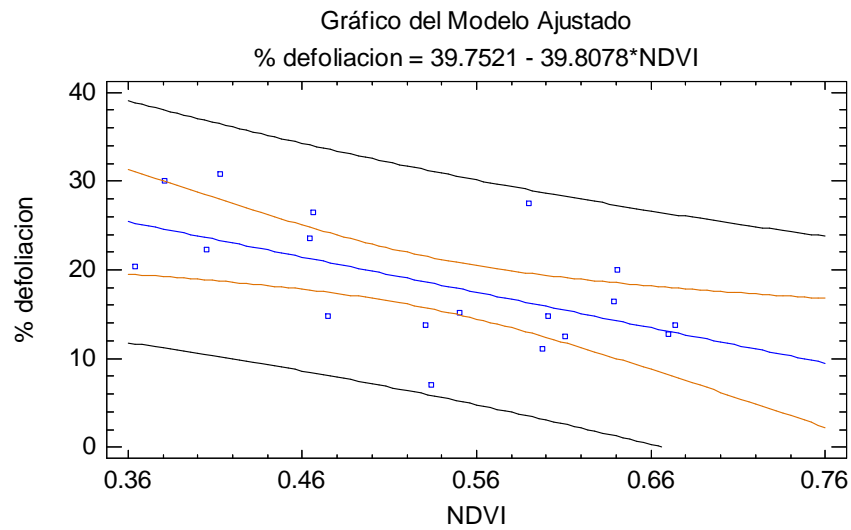
3.1. REGRESIÓN LINEAL SIMPLE

Variable dependiente: % defoliación

Variable independiente: MSI / SAVI / NDVI / NDWI5 / NDWI7

Lineal: $Y = a + b \cdot X$





SnapStat: Comparación Varias Muestras

Muestra	Recuento	Media	Sigma
MSI_1	24	0.604708	0.189934
NDVI	24	0.548917	0.112298
NDM 5	24	0.263958	0.142998
NDM 7	24	0.507875	0.152041
SAVI	24	0.148625	0.0535048
	120	0.414817	0.223404

Gráfico de Dispersión

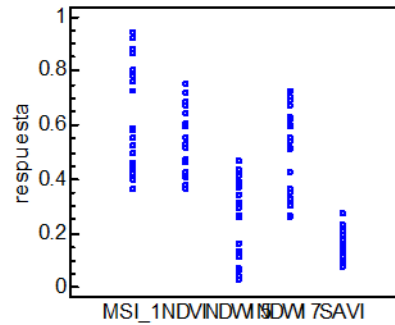


Gráfico Caja y Bigotes

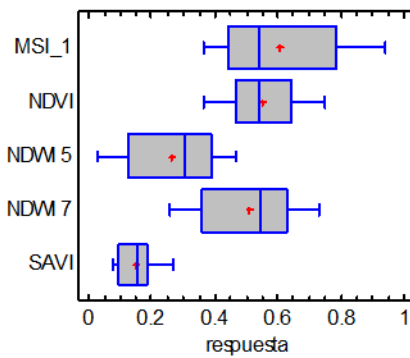


Tabla ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Media Cuadrado	Razón-F
Entre	3.75163	4	0.937906	49.30
Dentro de	2.18761	115	0.0190227	
Total	5.93923	119		

Valor-P = 0.0000

Verificación de Varianza

Levene's: 7.26068

Valor-P = 0.0000

Gráfico de Medias
Con intervalos LSD del 95.0%

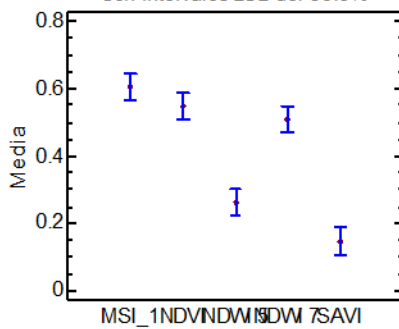
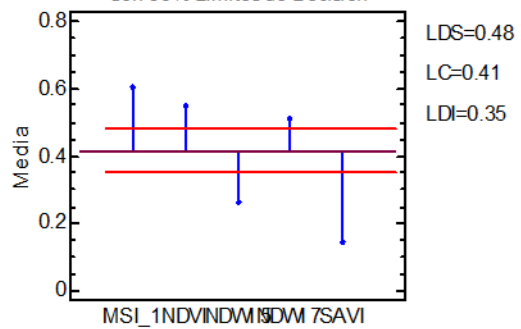


Gráfico ANOM
Con 95% Límites de Decisión



ANEXOS 1: GRUPO DE AGENTES DAÑOSOS PRESENTES EN LAS PARCELAS ESTUDIADAS. Fuente: Anexo del Manual de la Red de Daños I.

CONIFERAS							
Grupo de agente	Código	Clase	Código	Principales especies	Código	Género afectado	Sintomas
S O T C E S I	200	Defoliadores	210	<i>Acantholyda sp.</i>		<i>Pinus</i>	Refugio de sedas con excrementos sobre acículas y acículas antiguas comidas alrededor.
				<i>Brachonyx pineti</i>		<i>Pinus</i>	Punteaduras con orificio central en acículas y orificios en vainas.
				<i>Brachyderes suturalis</i>		<i>Pinus</i>	Acículas comidas en forma de sierra gruesa.
				<i>Diprion pini</i>		<i>Pinus</i>	Defoliaciones en verano. Falsas orugas, verdosas con cabeza marrón-anaranjada. Puestas en margen de acículas y pupas en el suelo.
				<i>Gelechia senticetella</i>		<i>Juniperus, Cupressus</i>	Hilillos de seda en ramillos secos.
				<i>Lymantria monacha</i>		<i>Pinus</i>	Huevos puestos en resquebrajaduras de la corteza. Orugas recién nacidas gregarias en tronco. Defoliaciones en verano.
				<i>Lymantria dispar</i>		<i>Larix, Picea, Pinus</i>	Acículas comidas; orugas con pelo largo, color variable de amarillo a negro con una doble fila característica de puntos azules y rojos.
				<i>Neodiprion sertifer</i>		<i>Pinus</i>	Defoliaciones en primavera. Falsas orugas, verdosas de cabeza negra, gregarias sobre acículas. Puesta en pequeñas placas romboidales en margen de acículas.
				<i>Pachyrhinus sp.</i>		<i>Pinus</i>	Acículas comidas en forma de sierra fina. Puesta en 3 acículas unidas.
				<i>Thaumetopoea pinivora</i>		<i>Pinus</i>	Colonias de orugas en nidos sedosos ligeros. Defoliaciones en verano. Procesiones antes de pupación.
				<i>Thaumetopoea pityocampa</i>		<i>Pinus</i>	Colonias de orugas en nidos sedosos densos. Defoliaciones en invierno. Procesiones antes de pupación.
				<i>Bupalus piniarius</i>		<i>Pinus</i>	
				<i>Choristoneura murinana</i>		<i>Abies</i>	
				<i>Cephalcia abietis</i>		<i>Picea</i>	
	<i>Cephalcia lariciphila</i>		<i>Larix</i>				
	<i>Dendrolimus pini</i>		<i>Pinus</i>				
	Perforadores de tronco, ramas y ramillos (incl. minadores de brotes)	220		<i>Dioryctria sylvestrella</i>		<i>Pinus</i>	Perforación con grumo de resina en tronco con restos de serrín y excrementos rojizos.
				<i>Hyllobius abietis</i>		<i>Pinus</i>	Mordeduras superficiales en ramillas finas y pinos jóvenes.
				<i>Ips acuminatus</i>		<i>Pinus</i>	Sistema de galerías subcorticales en forma de estrella. Daños en corro. Muerte de pies en verano.
				<i>Ips sexdentatus</i>		<i>Pinus</i>	Sistema de galerías subcorticales en forma de estrella. Daños en corro. Muerte de pies en verano. Adulto más grande que <i>Ips acuminatus</i> .
				<i>Ips typographus</i>		<i>Picea</i>	Escolítido perforador que causa la muerte de píceas, peligroso, daña la masa entera.
				<i>Magdalis sp.</i>		<i>Pinus</i>	Picaduras en yemas y ramillos jóvenes. Brotes jóvenes secos y huecos.
				<i>Orthotomicus sp.</i>		<i>Pinus</i>	Galerías en forma de estrella alargada. Adultos de tamaño muy pequeño.
				<i>Phaenops cyanea</i>		<i>Pinus</i>	Daños de las larvas en la parte del tronco con corteza gruesa, galerías de las larvas más mayores con serrín, el imago es azul oscuro con reflejos verdes.
				<i>Pissodes castaneus</i>		<i>Pinus</i>	
				<i>Pityogenes chalcographus</i>		<i>Picea, Larix, Abies, Pseudotsuga</i>	
				<i>Pityokteines curvidens</i>		<i>Abies</i>	
				<i>Retinia resinella</i>		<i>Pinus</i>	Grumo grueso de resina grande con interior hueco y excrementos, en ramas finas y/o yemas.
				<i>Semanotus laurasi</i>		<i>Juniperus</i>	Galerías y cámaras de pupación en ramas y ramillos. Fogonazos rojizos en la copa.
				<i>Tomicus destruens</i>		<i>Pinus</i>	Ramillos terminales secos y huecos. Grumo de resina en tronco con orificio de entrada. Galería subcortical en forma de raspa de pescado. Muerte de pies en primavera.
	<i>Tomicus minor</i>		<i>Pinus</i>	Ramillos terminales secos y huecos. Grumo de resina en tronco con orificio de entrada. Galería subcortical en forma de V abierta. Muerte de pies de otoño a primavera.			
	<i>Tomicus piniperda</i>		<i>Pinus</i>	Ramillos terminales secos y huecos. Grumo de resina en tronco con orificio de entrada. Galería subcortical en forma de raspa de pescado. Muerte de pies en primavera.			
	Perforadores de yemas	230		<i>Rhyacionia buoliana</i>		<i>Pinus</i>	Yemas y brotes jóvenes huecos (brotes en forma de bayoneta), con grumos de resina.
<i>Rhyacionia duplana</i>					<i>Pinus</i>	Yemas y brotes jóvenes huecos (brotes en forma de bayoneta), sin grumos de resina.	
Perforadores de frutos	240		<i>Dioryctria mendacella</i>		<i>Pinus</i>	Perforaciones en la piña, irregulares y con resina. Presencia de galerías con excrementos e hilos de seda.	
			<i>Pissodes validirostris</i>		<i>Pinus</i>	Perforaciones circulares limpias en la piña. Puestas cubiertas con un tapón oscuro en las escamas de la piña.	
Chupadores	250		<i>Haematoloma dorsatum</i>		<i>Pinus, Juniperus</i>	Puesta en forma de salivazo sobre gramíneas. Acículas enrojecidas.	
			<i>Leucaspis pini</i>		<i>Pinus</i>	Adultos con cuerpos elípticos blancos (emulando escamas blancas pegadas a las acículas).	
			<i>Matsucoccus sp.</i>		<i>Pinus</i>	Fracturación y escamación en troncos. Adultos con cuerpos elípticos sésiles bajo corteza.	
Minadores	260		<i>Epinotia subsequana</i>		<i>Abies</i>	Acícula ahuecada y marrón en parte de su longitud, con orificio.	
Formadores de agallas	270						
Otros insectos	290						

CONIFERAS							
Grupo de agente	Código	Clase	Código	Principales especies	Código	Género afectado	Síntomas
H O N G O S	300	Hongos de acículas/ royas de acículas	301	<i>Lophodermium pini</i> = <i>Leptostroma pinostri</i>		<i>Pinus</i>	Cuerpos de fructificación alargados negros brillantes por encima de la superficie de la acícula.
				<i>Lophoderma sulcigena</i>		<i>Pinus sp.</i>	
				<i>Cyclaneusma minus</i> = <i>Naemacyclus minor</i>		<i>Pinus (Sylvestris, radiata)</i>	Formación de bandas transversales pardo rojizas y cuerpos de fructificación elípticos color crema o del mismo color que la acícula
				<i>Phaeocryptopus gaeumannii</i>		<i>Pseudotsuga</i>	
				<i>Rhabdocline pseudotsugae</i>		<i>Pseudotsuga</i>	
				<i>Mycosphaerella laricina</i>		<i>Larix</i>	
				<i>Naemacyclus nvens</i>		<i>Pinus</i>	Cuerpos fructíferos de color claro. Cuando se desprenden dejan orificios en las acículas.
				<i>Thyriopsis halepensis</i>		<i>Pinus</i>	Acículas con cuerpos de fructificación negros circulares y el centro de color marrón
				<i>Mycospherella pini</i> = <i>Dothistroma septospora</i>		<i>Pinus (radiata, nigra, halepensis)</i>	Es la llamada "banda roja" en acículas
				<i>Chrysomyxa abietis</i>		<i>Picea</i>	Manchas amarillas a marrón anaranjado en acículas que caen prematuramente
	Royas de tronco y brotes	302		<i>Melampsora pinitorqua</i>		<i>Pinus</i>	Curvatura de los brotes en forma de "C" o de "S". Necesita para completar su ciclo huéspedes del género <i>Populus</i> y <i>Pinus</i>
				<i>Cronartium ribicola</i>		<i>Pinus strobus</i>	
				<i>Coleosporium tussilaginis</i> = <i>Coleosporium senecionis</i>		<i>Pinus</i>	Roya vesicular de las acículas. Vesículas anaranjadas cuando están llenas y blancas cuando están vacías.
				<i>Cronartium flaccidum</i> = <i>Peridermium pini</i>		<i>Pinus</i>	Roya vesicular de corteza. Anillamiento de las ramas o tronco con abundantes exudaciones de resina. Vesículas anaranjadas cuando están llenas y blancas cuando están vacías.
				<i>Gymnosporangium sp.</i>		<i>Pinus</i>	Ramas y hojas deformadas con cuerpos de fructificación anaranjados
	Dieback y hongos que forman canchros	309		<i>Gremmeniella abietina</i>		<i>Pinus</i>	Muerte de ramas y ramillos con cuerpos de fructificación negros en la corteza que al madurar exudan zarcillos de color rosa con conidios.
				<i>Cenangium ferruginosum</i>		<i>Pinus</i>	Muerte de ramas y ramillos con cuerpos de fructificación negros en corteza.
	Tizón	303		<i>Sphaeropsis sapinea</i> = <i>Diplodia pinea</i>		<i>Pinus</i>	Brotes periféricos curvados con deformaciones, resinosis y cuerpos de fructificación negros
				<i>Sirococcus conigenus</i>		<i>Pinus (halepensis)</i>	Muerte de brotes y acículas, colgantes, de color marrón rojizo
	Hongos de pudrición y de pudrición de raíces	304		<i>Fomes pini</i> = <i>Trametes pini</i>		<i>Pinus</i>	Cuerpos de fructificación planos "casco de caballo", leñosos, de color pardo
				<i>Amillaria mellea</i>		<i>Pinus</i>	Fielto blanquecino al descortezar las raíces y el cuello, avanza hacia arriba. Forma setas de color miel con columnilla y
				<i>Heterobasidion annosum</i>		<i>Abies, Pinus</i>	Fielto blanquecino menos consistente que el de <i>Amillaria</i> al descortezar las raíces y el cuello. Las setas son de color pardo y borde blanco y están pegadas a la superficie del cuello de la raíz
	Otros hongos	390					

CONIFERAS / FRONDOSAS							
Agente	Códigos	Clase	Código	Tipo	Código	Agente específico	Código
A B I O T I C O S	400	Factores químicos	410	Desórdenes nutricionales / Deficiencia de nutrientes	411	Deficiencia Cu	41101
						Deficiencia Fe	41102
						Deficiencia Mg	41103
						Deficiencia Mn	41104
						Deficiencia K	41105
						Deficiencia N	41106
						Deficiencia B	41107
						Toxicidad Mn	41108
						Otros	41109
		Sal marina + surfactants	412				
		Factores físicos	420	Avalancha	421		
				Sequía	422		
				Inundaciones/aument o del nivel freático	423		
				Heladas	424	Heladas invernales	42401
						Heladas tardías	42402
				Granizo	425		
				Calor/Golpe de calor	426		
				Rayo	427		
				Deslizamientos de tierra o lodo	429		
				Nieve / Hielo	430		
				Viento / Tornado	431		
				Daño invernal - desecación invernal	432		
				Suelo somero o poco profundo	433		
Caída de rocas	434						
Otros factores abióticos	490						

Agente	Código		Código		Código		
Acción directa del hombre	500	Objetos empotrados	510				
		Técnicas de repoblación inadecuadas	520				
		Cambios de uso del suelo	530				
		Daños por operaciones selvícolas o aprovechamientos	540	Cortas		541	
				Podas		542	
				Resinación		543	
				Descorche		544	
				Operaciones selvícolas en pies próximos y otras operaciones selvícolas		545	
		Daños mecánicos / vehículos	550				
		Construcción de caminos	560				
		Compactación del suelo	570				
Uso impropio de productos químicos	580	Pesticidas		581			
		Sales contra hielo		582			
Otras acciones directas del hombre	590						

Agente	Código
Fuego	600

Agente	Código	Clase	Código
Contaminantes atmosféricos	700	SO ₂	701
		H ₂ S	702
		O ₃	703
		PAN	704
		F	705
		HF	706
		Otros	790

ANEXO 2: SUELOS EN LAS PARCELAS DE LA PROVINCIA DE BURGOS

604	CMc /LVk / FLc/ RGc	Cambisol calcárico/Luvisol cálcico/ Fluvisol calcárico/Regosol calcárico
606	FLc/FLe/FLd CMg/LVa	Fluvisol calcárico/Fluvisol eútrico/Fluvisol dístico /Cambisol gléico /Luvisol álbico
556	CMg/FLc/FLe/FLd/LVa	Cambisol gléico /Luvisol álbico/Fluvisol calcárico/Fluvisol eútrico/ (Fluvisol dístico /Fluvisol eútrico
509	CMu/CM	Cambisol húmico/Cambisol gléico
467	CMd/CMu/LPq/LPu	Cambisol húmico/Leptosol lítico/Cambisol dístico/Leptosol úmbrico
426	CMd/CMu/LPq/LPu	Cambisol dístico /Leptosol úmbrico /Cambisol húmico /Leptosol lítico

ANEXOS 3: ÍNDICES DE VEGETACIÓN EXISTENTES

A continuación se ofrecen una serie de índices de vegetación más utilizados.).

Tipo	Nombre	Fórmula	Comentarios	Referencias
Basic Vegetation Indices	Ratio Vegetation Index (RVI)	ρ_{NIR}/ρ_{red}	Range of 0 to infinity. Often used as a quick estimate of vegetated areas.	Jordan (1969); Rouse <i>et al.</i> ,(1974)
	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$(\rho_{NIR} - \rho_{red})/(\rho_{NIR} + \rho_{red})$	Very common and well studied index. Range of -1 to +1. Positive values indicate vegetated areas.	Rouse <i>et al.</i> ,(1974)
	Transformed NDVI (TNDVI)	$(NDVI + 0.5)^{0.5}$	Not reported to have any significant benefit over the NDVI.	Deering <i>et al.</i> ,(1975)
	Infrared Percentage Vegetation Index (IPVI)	$\rho_{NIR}/(\rho_{NIR} + \rho_{red})$	Based on NDVI. Eliminates negative values in the output. Designed to increase speed of calculation. Output values can range from 0 to 1.	Crippen (1990)
	Modified Normalized Difference Vegetation Index (MNDVI)	$MNDVI = NDVI(1+C_2H_2)/(1+C_1H_1) = MNDVI_0(1+C_2H_2)$	Designed to be a feedback system, where H_1 is a function of soil and atmospheric noise, H_2 should approach zero, C_1 and C_2 are empirical coefficients.	Liu and Huete (1995)
	Modified Simple Ratio (MSR)	$\frac{\rho_{NIR} / \rho_{red} - 1}{(\rho_{NIR} / \rho_{red})^{0.5} + 1}$	Not reported to have any significant benefit over the NDVI.	Chen (1996)
	Renormalized Difference Vegetation Index	$\frac{(\rho_{NIR} - \rho_{red})}{(\rho_{NIR} + \rho_{red})^{0.5}}$	Not reported to have any significant benefit over the NDVI.	Roujean and Breon (1995)

Soil Adjusted Indices	Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)	$\frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red} + L} (1 + L)$ <p>L = correction factor that ranges from 0 for high vegetation cover to 1 for low vegetation cover. Typically set to 0.5.</p>	Designed to minimize the effects of soil background. Equivalent to NDVI if L=0 (high vegetation cover). Isovegetation lines converge in the negative quadrant. Less sensitive to change in low vegetation cover than NDVI and more sensitive to atmospheric variation.	Huete (1988) Qi <i>et al.</i> , (1994)
	Transformed Soil Adjusted Vegetation Index (TSAVI)	$\frac{s(\rho_{NIR} - s * \rho_{red} - a)}{(a * \rho_{NIR} + \rho_{red} - a * s + X * (1 + s * s))}$ <p>a = soil line intercept s = slope of the soil line X = empirical adjustment factor</p>	Designed to be more sensitive to soil brightness and moisture content than SAVI. Less sensitive to change in low vegetation cover than NDVI and more sensitive to atmospheric variation.	Baret <i>et al.</i> , (1989); Baret and Guyot (1991).
	SAVI ₂	$\frac{r_{NIR}}{(r_R + q)}$ <p>Where: q = A/B A = $r_{\neq, NIR} + (0.067 - r_{\neq, NIR}) \exp(-k_{NIR} LAI) - 1.16 r_{\neq, R} \exp[(k_R - k_{NIR}) LAI] - \exp(-k_{NIR} LAI)$ B = $1.16 \exp[(k_R - k_{NIR}) LAI]$</p>	A special case of Huete's SAVI. Parameters derived using the SAIL model for wheat canopy reflectance. Requires iterations to find the best parameters. Prone to high errors when subject to conditions of low zenith angles combined with erectophile canopies.	Major <i>et al.</i> , (1990)
	Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI)	$\frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red} + L} (1 + L)$ <p>L = $1 - 2 * s * NDVI * WDV I$ S = slope of soil line</p>	Does not require prior knowledge about the vegetation cover to determine L (Unlike SAVI, TSAVI). L can vary across the image.	Qi <i>et al.</i> , (1994)
	Second MSAVI (MSAVI2)	$0.5(2(\rho_{NIR} + 1) - \sqrt{(2(\rho_{NIR} + 1))^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_{red})})$	Designed based on MSAVI. Does not require calculation of NDVI, WDV I.	Qi <i>et al.</i> , (1994)

	Two-axis adjusted vegetation index (TWVI)	$((\rho_{NIR} - \rho_{red} - \Delta)/(\rho_{NIR} - \rho_{red} + L))(1+L)$ Where: $\Delta = \bar{O}2e^{-KLA}D = \bar{O}2(I-(I_0)/(I_0 - I))D$	Designed to compensate for more than one soil type. D is the deviation caused by soil distance offset D in the secondary axis.	Xia (1994)
--	---	---	--	------------

Atmospheric Adjusted Vegetation Indices	Global Environmental Monitoring Index (GEMI)	$H(1-0.25H) - \frac{\rho_{red} - 0.125}{1 - \rho_{red}}$ $H = \frac{2(\rho_{NIR}^2 - \rho_{red}^2) + 1.5\rho_{NIR} + 0.5\rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red} + 0.5}$	Minimizes atmosphere-induced variations. Especially sensitive at high vegetation cover. Non-linear index.	Pinty and Verstraete (1991)
	**Soil adjusted Atmospheric Resistant Vegetation Index (SARVI)	$\frac{\rho_{NIR} - \rho_{rb}(1+L)}{\rho_N + \rho_{rb} + L}$	Designed to minimize both soil and atmospheric noise.	Kaufman and Tanré (1994)
	**Atmosphere Soil Vegetation Index (ASVI)	$0.5(2(\rho_{NIR} + 1) - \sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_{rb})})$ $\rho_{rb} = \rho_{red} - \gamma(\rho_{blue} - \rho_{red})$	Designed as a modification to MSAVI2 by substituting the red reflectance for the corrected red/blue relationship. Note that any of the modified SAVI equations could be changed with this method.	Qi <i>et al.</i> , (1994)
	**Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI)	$\frac{\rho_{NIR} - \rho_{rb}}{\rho_{NIR} + \rho_{rb}}$ $\rho_{rb} = \rho_{red} - \gamma(\rho_{blue} - \rho_{red})$	One of the first indices designed to correct for atmospheric effects.	Kaufman and Tanré (1992).
	Enhanced Vegetation Index (EVI)	$2.5[\frac{\rho_{NIR}^* - \rho_{red}^*}{1 + \rho_{NIR}^* + 6\rho_{red}^* - 7.5\rho_{blue}^*}]$ ρ^* is apparent reflectance	Based on SARVI. Also called Soil and Atmospheric Resistant Vegetation Index (SARVI2)	Huete <i>et al.</i> , (1997)

Other	Thermal NDVI	Ts/NDVI	Multi-temporal thermal information was shown to improve AVHRR based classifications incorporating NDVI. Areas with very small NDVI values (e.g. deserts) cause non-linear behavior of this index.	Lambin and Ehrlich (1995)
-------	--------------	---------	---	---------------------------

** Qi *et al.* (1994) compared these atmospheric indices to GEMI and showed that they were very slightly more sensitive to changes in vegetation cover and less sensitive to the atmosphere and the soil than GEMI for moderate to high vegetation cover. Qi *et al.* (1994) also found that the insensitivity to atmospheric influences and soil breaks down violently for low vegetation cover.

Tabla 2. Índices basados en distancia espectral.

Nombre	Fórmula	Comentarios	Referencias
Simple Vegetation Index (VI)	$\rho_{NIR} - \rho_{red}$	High values indicate vegetated areas. Negative values for materials that reflect more in the visible than infrared (water, clouds, snow, etc.) Some discrepancy as to the origin of this index. Difference Vegetation Index (DVI) and Ashburn's Vegetation Index (AVI) are essentially the same.	Richardson and Wiegand (1977); Lillesand and Kiefer (1994); Ray (1994)
Perpendicular Vegetation Index (PVI)	$\sin(\alpha) \rho_{NIR} - \cos(\alpha) \rho_{red}$	Allow for soil lines of different slopes. Very sensitive to atmospheric change.	Richardson and Wiegand (1977); Qi <i>et al.</i> , (1994)
Weighted Difference Vegetation Index (WDVI)	$\rho_{NIR} - g * \rho_{red}$ g = slope of soil line	Allow for soil lines of different slopes. Very sensitive to atmospheric change.	Clevers (1988)
Green Vegetation Index (GVI)	$C_1 \rho_1 + C_2 \rho_2 + C_3 \rho_3 + C_4 \rho_4$ $C_{TNR1} \rho_{TNR1} + C_{TNR2} \rho_{TNR2} + C_{TNR3} \rho_{TNR3} + C_{TNR4} \rho_{TNR4}$ $+ C_{TNR5} \rho_{TNR5} + C_{TNR6} \rho_{TNR6}$	Tasseled Cap transformation designed to detect green vegetation. C coefficients are sensor dependent.	Kauth and Thomas (1976); Jensen (1996); Crist and Cicone (1984); Jackson (1983)
Soil Brightness Index (SBI)	$C_1 \rho_1 + C_2 \rho_2 + C_3 \rho_3 + C_4 \rho_4$ $C_{TNR1} \rho_{TNR1} + C_{TNR2} \rho_{TNR2} + C_{TNR3} \rho_{TNR3} + C_{TNR4} \rho_{TNR4}$ $+ C_{TNR5} \rho_{TNR5} + C_{TNR6} \rho_{TNR6}$	Tasseled Cap transformation designed to detect soil. C coefficients are sensor dependent. Many of the soil indices are based on the concepts of this index.	Kauth and Thomas (1976); Jensen (1996); Crist and Cicone (1984); Jackson (1983)
Yellow Stuff Index (YSI)	$C_1 \rho_1 + C_2 \rho_2 + C_3 \rho_3 + C_4 \rho_4$	Tasseled Cap transformation that typically	Kauth and Thomas (1976);

		shows the dead vegetation. C coefficients are sensor dependent.	Jensen (1996)
Non-such Index (NSI)	$C_1\rho_1 + C_2\rho_2 + C_3\rho_3 + C_4\rho_4$	Tasseled Cap transformation that illustrates atmospheric effects. C coefficients are sensor dependent.	Kauth and Thomas (1976); Jensen (1996)

Table 3. Índices hiperespectrales basados en ratios

Index	Fórmula	Comentarios	Referencias
Optimal narrow-band NDVI	$NDVI_{ij} = (R_j - R_i) / (R_j + R_i)$ $R_i, R_j =$ reflectance in bands i and j	All possible band combinations in the red/NIR region are tested for correlation with the biophysical parameter of interest.	Thenkabail <i>et al.</i> , (1999)
Photochemical Reflectance Index (PRI)	$PRI_1 = (\rho_{528} - \rho_{567}) / (\rho_{528} + \rho_{567})$ $PRI_2 = (\rho_{531} - \rho_{570}) / (\rho_{531} + \rho_{570})$ $PRI_3 = (\rho_{550} - \rho_{531}) / (\rho_{550} + \rho_{531})$ $PRI_4 = (\rho_{570} - \rho_{539}) / (\rho_{570} + \rho_{539})$	Four versions of the same index. Varies with vegetation type, photosynthetic capacity, and efficiency of radiation use.	1&2) Gamon <i>et al.</i> , (1995) 3&4) Zarco-Tejada <i>et al.</i> , (1999)
Versions of NDVI	a. $NDVI = (\rho_{831} - \rho_{667}) / (\rho_{831} + \rho_{667})$ b. $NDVI = (\rho_{774} - \rho_{667}) / (\rho_{774} + \rho_{667})$	There have been multiple narrow band versions of this index reported for various applications. b.) used as pigment index	a) Merton and Harvey (1997); Merton (1998) b) Zarco-Tejada <i>et al.</i> , (1999)
Vogelmann sugar maple indices	$Vog1 = (\rho_{740}) / (\rho_{720})$ $Vog2 = (\rho_{734} - \rho_{747}) / (\rho_{715} + \rho_{726})$ $Vog3 = (\rho_{734} - \rho_{747}) / (\rho_{715} + \rho_{720})$	Indices designed based on the spectral measurements of sugar maple leaves. Vog1-3 are red-edge indices.	Vogelmann <i>et al.</i> , (1993); Zarco-Tejada <i>et al.</i> , (1999)
Gitelson and Merzlyak chlorophyll 1&2	$G_M1 = (\rho_{750}) / (\rho_{550})$ $G_M2 = (\rho_{750}) / (\rho_{700})$	Designed for the measurement of chlorophyll content in plant leaves.	Gitelson and Merzlyak (1997)
Lichtenthaler indices 1 to 3	$Lic1 = (\rho_{800} - \rho_{680}) / (\rho_{800} + \rho_{680})$ $Lic2 = (\rho_{440}) / (\rho_{690})$ $Lic3 = (\rho_{440}) / (\rho_{740})$	Indices designed to detect stress in green vegetation leaves using UV-laser induced fluorescence bands	Lichtenthaler <i>et al.</i> , (1996)
Simple Ratio Pigment Index (SRPI)	$SRPI = (\rho_{430}) / (\rho_{680})$	Index based on carotenoid/chlorophyll-a content	Peñuelas <i>et al.</i> , (1995)
Normalized Phaeophytin Index (NPQI)	$NPQI = (\rho_{415} - \rho_{435}) / (\rho_{415} + \rho_{435})$	Responsive to chlorophyll degradation in studies at a leaf level	Barnes <i>et al.</i> , (1992)
Normalized Pigment Chlorophyll Ratio Index	$NPCI = (\rho_{680} - \rho_{430}) / (\rho_{680} + \rho_{430})$	Found to vary with total pigments/chlorophyll.	Peñuelas <i>et al.</i> , (1994)

(NPCI)			
Greenness Index (G)	$G = (\rho_{554})/(\rho_{677})$	Indicator of prolonged vegetation stress due to changes in canopy structure, but not due to biochemical constituents	
Structure Intensive Pigment Index (SIPI)	$SIPI = (\rho_{800} - \rho_{450}) / (\rho_{800} + \rho_{650})$	*	
Simple Ratio (SR)	$SR = (\rho_{774})/(\rho_{677})$	Indicator of prolonged vegetation stress due to changes in canopy structure	
Carter Indices	$Ctrl = (\rho_{695})/(\rho_{420})$ $Ctrl2 = (\rho_{695})/(\rho_{760})$	Developed for early and pre-visual detection of stress in pine forests. Proved that imagery at these wavelengths is superior to thermal imagery for this purpose.	Carter (1994) Carter <i>et al.</i> , (1996)
Zarco-Tejada & Miller	$ZTM = (\rho_{750})/(\rho_{710})$	Red edge index highly related to pigment content at leaf and canopy levels, minimizing shadow effects in forest canopies.	Zarco-Tejada <i>et al.</i> , (2001)

Tabla 4. Índices hiperespectrales diferenciales e integrales.

Index	Fórmula	Comentarios	Referencias
First Difference Transformation	$DL_i = (R_{\lambda_i-g} - R_{\lambda_{i+g}})/\Delta\lambda$ $DL_i =$ first difference transformation at band i. g = gap R = reflectance	Used to relate chlorophyll a concentration to water reflectance.	Novo <i>et al.</i> (1995)
1DL_DGVI	$1DL_DGVI = \sum_{\lambda_i} d'(\lambda_i) \Delta\lambda_i$	First-order derivative green vegetation index derived using local baseline.	Elvidge and Chen (1995)
1DZ_DGVI	$1DZ_DGVI = \sum_{\lambda_i} d'(\lambda_i) \Delta\lambda_i$	First-order derivative green vegetation index derived using zero baseline.	Elvidge and Chen (1995)
2DZ_DGVI	$2DZ_DGVI = \sum_{\lambda_i} d''(\lambda_i) \Delta\lambda_i$	Second-order derivative green vegetation index derived using zero baseline.	Elvidge and Chen (1995)
Double Peak Ratio Indices 1-4	$DPR1 = D_{\lambda_{0[680-750]}}/D_{\lambda_{0+12}}$ $DPR2 = D_{\lambda_{0[680-750]}}/D_{\lambda_{0+22}}$ $DP21 = D_{\lambda_{0[680-750]}}/D_{703}$ $DP22 = D_{\lambda_{0[680-750]}}/D_{720}$	* Derivative indices used to correlate with chlorophyll fluorescence and pigments	Zarco-Tejada <i>et al.</i> , (2001)
Lichtenthaler 4	$Lic4 = \int_{430}^{680} R$	Indices designed to detect stress in green vegetation leaves using UV-laser induced fluorescence bands	Lichtenthaler <i>et al.</i> , (1996)
Vogelmann 4	$Vog4 = D_{715}/D_{705}$	Chlorophyll index based on spectral measurements of sugar maple leaves.	Vogelmann <i>et al.</i> , (1993); Zarco-Tejada <i>et al.</i> , (2001)

Area Red Edge Peak (ADR)	$ADR = \int_{680}^{760} D$	* Integral over the red edge region.	Zarco-Tejada <i>et al.</i> , (2001)
λ_p indices 1-3	$lp1r = \lambda_{\max[680-750]}$ $lp1g = \lambda_{\max[500-600]}$ $lp2g = \lambda_{\min[500-600]}$	* Used to correlate with chlorophyll content	Hare <i>et al.</i> , (1984); Bonham-Carter (1988), Zarco-Tejada <i>et al.</i> , (2001)
R_0	$R_0 = \rho_{\min[650-700]}$	* Used to correlate with chlorophyll content	Hare <i>et al.</i> , (1984); Bonham-Carter (1988)
R_s	$R_s = \rho_{\max[700-770]}$	* Used to correlate with chlorophyll fluorescence and pigments	Hare <i>et al.</i> , (1984); Bonham-Carter (1988)

Tabla 5. Otros índices hiperespectrales

Índice	Fórmula	Comentarios	Referencias
Optimal Multiple Narrow-Waveband Reflectivity (OMNBR)	$BP = \sum_{j=1}^N a_j R_j$ BP = Biophysical parameter of interest R = reflectance in band j a = coefficient for reflectance in band j for i^{th} variable	These indices were derived for crop variables using the MAXR algorithm in SAS. They describe the amount of variability for a biophysical parameter of interest that is explained by the band(s). Significance testing can be used to prevent over-fitting when increasing the number of bands.	Thenkabail <i>et al.</i> , (1999)
Red-Edge Vegetation Stress Index (RVSI)	$RVSI = \left(\frac{\rho_{714} + \rho_{752}}{2} \right) - \rho_{753}$	Designed as a general index to measure stress in disparate vegetation communities (at the Jasper Ridge Biological Preserve, Palo Alto, California), based on upper red-edge geometry.	Merton (1998)
Green Vegetation Fraction (GVF)	$GVF = a_v / (a_v + a_s)$ a_s = abundance of soil in pixel spectrum a_v = abundance of vegetation in pixel spectrum	Created based on the inversion of a non-linear model of ground reflectance.	Ustin <i>et al.</i> , (1992); Schmuck <i>et al.</i> , (1998)
% Nitrogen	$0.486 + (0.001\rho_{783}) + (0.003\rho_{1640})$	Used to estimate canopy nitrogen content from AVIRIS data.	Aber and Martin (1995)
% Lignin	$33.36 - (0.048\rho_{822}) + (0.106\rho_{627}) + (0.005\rho_{756}) + (0.052\rho_{1660})$	Used to derive a canopy lignin content from AVIRIS data in temperate forests of diverse types.	Aber and Martin (1995)

Fuente: http://coello.ujaen.es/asignaturas/teledeteccion/telav/fundespec/más_índices.htm

