

REGENERACIÓN DE LA VEGETACIÓN DESPUÉS DE UN INCENDIO. APLICACIÓN DE IMÁGENES LANDSAT-TM A SU CARACTERIZACIÓN Y SEGUIMIENTO

Rafael M^a Navarro Cerrillo¹, Carmen Navarro Mezquita² & Begoña Abellanas Oar¹

¹ Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes. Universidad de Córdoba.

² Servicio de Evaluación de Recursos Naturales Consejería de Medio Ambiente-Junta de Andalucía

1. INTRODUCCIÓN

La vegetación mediterránea ha estado sometida a alteraciones violentas y de gran intensidad desde tiempos bastante remotos hasta la actualidad. El origen de estas perturbaciones puede achacarse, en la mayor parte de los casos, a la acción del hombre sobre un ecosistema especialmente frágil. La combinación del fuego con otras causas son el principal enemigo de la vegetación en la región mediterránea, y hay muchas razones para creer que la presente distribución espacial y su composición específica ha estado influida y condicionada por los incendios forestales.

Los incendios forestales destruyen anualmente una superficie media de 28.700 ha. en Andalucía. Independientemente de las causas, el resultado es un incremento alarmante del número e intensidad de los mismos, así como de la degradación de las áreas afectadas.

Conocer los procesos de regeneración después de un incendio es fundamental para resolver numerosos problemas que se plantean en Ecología Forestal y Selvicultura en el mundo mediterráneo. En el campo teórico, esto puede ayudar a diseñar mejor los modelos espacio-temporales de la dinámica de la vegetación, así como la función del fuego en estos ecosistemas. En su aspecto práctico, permite la evaluación correcta de los daños

producidos por los incendios, especialmente en lo que concierne a la planificación y ejecución de una selvicultura más acorde a las condiciones mediterráneas. A pesar de su importancia, la mayor parte de los estudios sobre regeneración de la vegetación después de un incendio se han centrado en los aspectos ecológicos, sin haberse traducido en recomendaciones prácticas, principalmente por la falta de información adecuada, y la dificultad de encontrar métodos de evaluación para grandes superficies con una buena relación de costo-efectividad.

2. OBJETIVOS

El presente trabajo es parte del Convenio entre la Consejería de Medio Ambiente (Servicio de Evaluación de Recursos Naturales) y la ETSI Agrónomos y de Montes (Departamento de Ingeniería Rural) y se inscribe dentro de los objetivos del Sistema de Información Ambiental de Andalucía (SinambA). Dentro del marco del SinambA, desde 1991 se han estado inventariando los incendios más importantes acaecidos en la región mediante imágenes del satélite Landsat-TM y las bases de datos existentes en dicho sistema de información. En este sentido, este convenio supone un paso adelante en esta línea de investigación ya que abarca el estudio temporal de la dinámica de la vegeta-

ción después del incendio, combinándose además tanto la información procedente de las nuevas tecnologías (imágenes de satélite y Sistemas de Información Geográfica) como la información derivada de los inventarios en el terreno, necesaria para apoyar aquélla.

Se pretende, en un primer paso, una aplicación experimental con el fin de desarrollar una propuesta metodológica que pueda considerarse como precursora de un proyecto más ambicioso. Esto permitirá ofrecer datos actuales, recogidos de forma sistemática y útil, a los organismos responsables de la gestión y protección de los recursos forestales.

Para ello, se establecen, además del objetivo general, una serie de objetivos específicos:

1. Tipificación de la vegetación mediterránea en función de su respuesta a los daños producidos por el fuego.
2. Discriminación de zonas afectadas por un incendio mediante una adecuada estimación de la intensidad de los daños sobre la vegetación.
3. Estudiar la dinámica de recuperación de la vegetación después de un incendio, en función de la vegetación inicial y la evolución de los factores del medio (clima, geomorfología y suelo).
4. En cada uno de estos niveles, definir la utilidad de los diferentes sistemas de obtención y análisis de información:
 - Inventarios de campo
 - Fotografías aéreas
 - Imágenes de satélite

3. METODOLOGÍA

En los últimos años ha habido un interés creciente sobre los procesos de restauración de la vegetación después de un incendio. Inicialmente este interés se centró fundamentalmente en los aspectos ecológicos de la regeneración. Más recientemente se ha comenzado a aplicar nuevas tecnologías a la evaluación y seguimiento de grandes superficies afectadas por los incendios. Del estudio de estos trabajos, así como del conoci-

miento previo de la influencia del fuego sobre la vegetación mediterránea, se ha elaborado una propuesta metodológica para el desarrollo del proyecto. Para ello se han establecido tres fases:

FASE I.- Tipificación de la vegetación en función de su diferente repuesta al fuego. Esto se hace en base al estudio de la autoecología de las principales especies forestales leñosas mediterráneas, así como del análisis estructural de la vegetación. El resultado es la definición de un **índice del potencial para la regeneración natural**, que pretende estimar la capacidad de recuperación de un tipo determinado de vegetación frente a los daños producidos por un incendio.

FASE II.- Discriminación y evaluación de la intensidad de los daños causados por el incendio sobre la vegetación, y por tanto sobre la capacidad de la misma para regenerarse posteriormente. La valoración a través de un **índice de afectación**, permite conocer y clasificar áreas homogéneas en cuanto a daños, y hacer comparaciones con la vegetación anterior para orientar sobre posibles acciones a tomar.

FASE III.- Seguimiento del proceso de regeneración, para conocer y valorar la respuesta real de la vegetación, en función de los daños producidos, y de la evolución posterior de los factores del medio.

3.1 Tipificación de la vegetación antes del incendio

Para conocer la dinámica de la vegetación, como respuesta a los daños producidos por un incendio, es necesario establecer una metodología de clasificación que refleje el diferente comportamiento de cada tipo de vegetación frente al fuego. Esta clasificación se establece en función de:

Autoecología de las principales especies leñosas de la vegetación mediterránea

La reacción frente al fuego de las especies vegetales de los ecosistemas mediterráneos es muy diferente, y sus mecanismos de adaptación son numerosos. Algunos investigado-

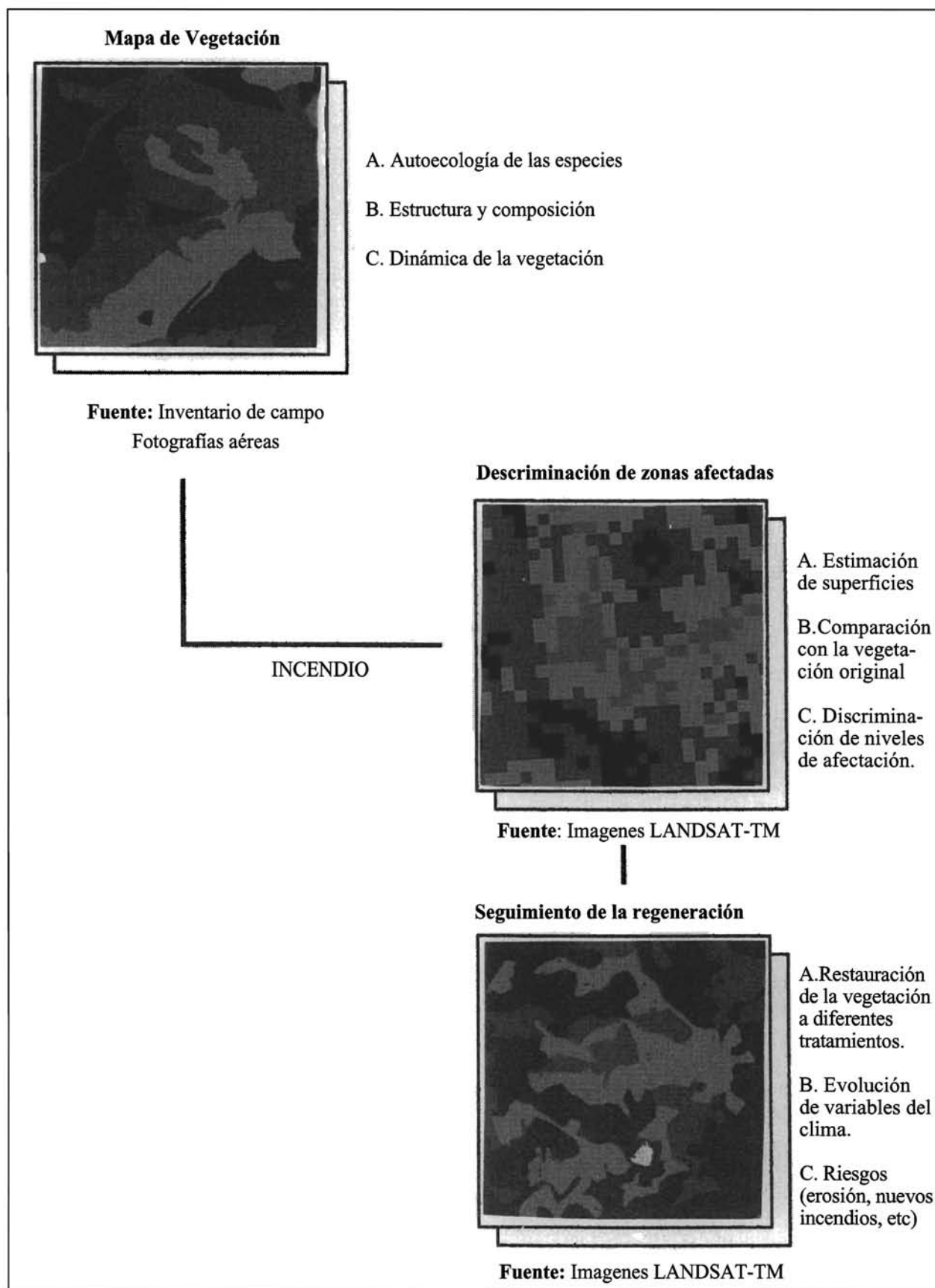


Figura 1.- Metodología para el estudio de la regeneración después de un incendio

res han estudiado la posible influencia que el fuego ha tenido en la evolución de muchas especies (NAVEH, Z. 1975), aunque hay numerosos factores que interactúan y son difíciles de segregar. En general, puede aceptarse el papel que ha desempeñado el fuego como un factor dominante en el control de estos ecosistemas. Esto se pone de manifiesto en la estrecha relación entre el fuego y la función ecológica de las diferentes especies dentro de las comunidades vegetales dominantes, así como de los requerimientos para la regeneración.

Las especies vegetales propias de ecosistemas donde el fuego desempeña un papel importante, presentan características especiales que les permiten resistir, evadir o recuperarse del fuego (Tabla I).

| |
|--|
| <i>Tabla I.- Características que permiten resistir, evadir o recuperarse del fuego. Adaptado de Burrows, C. 1988 (TRABAUD, L. 1981)</i> |
| A. RESISTENCIA |
| Hojas pequeñas, gruesas y/o con cutículas endurecidas (Esclerófilas) Sistemas radiculares fuertes y profundos Cortezas gruesas |
| B. EVASIÓN |
| B.1. Evasión en el espacio |
| Gran dispersión de semillas Restricción a sitios que no propaguen bien el fuego (por ejemplo zonas rocosas) Portes altos y limpios de ramas Órganos de reproducción especializados: meristemos, lignotubos, rizomas, etc. Semillas enterradas por medios mecánicos |
| B.2. Evasión en el tiempo |
| Muerte de los órganos aéreos durante los periodos de mayor vulnerabilidad |
| C. RECUPERACIÓN |
| Reservas abundantes Respuesta rápida a los daños: germinación activada por el fuego, estimulación de la floración, reproducción a través de órganos especializados, etc. |

NAVEH (NAVEH, Z. 1975), ha revisado los efectos del fuego en diferentes tipos de vegetación mediterránea distinguiendo entre pirófitos activos y pasivos (Tabla II).

| | | |
|---|---------------------|----------------|
| <i>Tabla II.- Estrategias de reproducción de algunas especies mediterráneas después de un incendio.</i> | | |
| | REGENERACIÓN | |
| | Vegetativa | Semilla |
| Fanerófitas | | |
| <i>Quercus coccifera</i> | +1 | - |
| <i>Pistacia lentiscus,</i> <i>P. terebinthus</i> | + | - |
| <i>Phyllirea media,</i> <i>Olea europaea</i> <i>Rhamnus alaternus</i> | + | - |
| <i>Ceratonia siliqua,</i> <i>Laurus nobilis</i> | | |
| <i>Myrtus communis</i> | + | - |
| <i>Tetraclinis articulata,</i> <i>Juniperus phoenicea</i> | +2 | - |
| <i>Arbustus unedo,</i> <i>Spartium junceum</i> | + | + |
| <i>Erica arborea, E. multiflora</i> | + | + |
| <i>Pinus halepensis, P. pinea</i> | - | + |
| Caméfitos | | |
| <i>Rosmarinus officinales</i> | +3 | + |
| <i>Thymus spp, Teucrium spp</i> | + | + |
| <i>Salvia spp</i> | + | + |
| <i>Cistus salvifolius</i> | + | + |
| <i>Cistus spp</i> | - | + |

Más recientemente CURRAS et al. han propuesto una clasificación de las estrategias de las especies, desde el punto de vista de su regeneración (CURRAS, R):

1. Pirófitos de fruto y/o semilla

a.1. Pirófitos de explosión de frutos (*Pinus halepensis*)

a.2. Pirófitos de semilla con cubierta seminal dura (*Genista scorpius*)

2. Pirófitos de rebrote basal

b.1. Geófitos constantes (*Gladiolus illyricus*)

b.2. Geófitos facultativos (*Ruscus aculeatus*)

b.3. Caméfitos y fanerófitos (*Quercus coccifera*)

3. Pirófitos de tallo

c.1. Fanerófitos con ritidomas suberosos (*Quercus suber*) o fibrosos (*Chamaerops humilis*).

Normalmente la respuesta de la vegetación será variable incluso dentro de la misma especie, y esta estrechamente ligado a la disponibilidad de agua y la calidad de estación. Las especies rebrotadoras facultativas (por ejemplo, romero) son típicamente evasoras de la sequía, y están adaptadas a veranos secos mediante la reducción de la actividad fisiológica, y especialmente mediante la reducción de la superficie de transpiración. Estas especies solo comienzan a rebrotar después de las primeras lluvias de otoño/invierno. Por el contrario, las rebrotadoras obligadas (por ejemplo, lentisco), al disponer de un sistema radical profundo y bien ramificado, pueden comenzar a rebrotar inmediatamente después del fuego y mantener un ritmo de crecimiento bastante intenso, al menos durante el primer y segundo año hasta recuperar de nuevo su posición en el ecosistema.

Estructura de la vegetación

La experiencia ha demostrado que cada formación, dentro de un tipo dominante de vegetación (en este caso el mediterráneo), tiene frecuentemente una respuesta similar frente al fuego. Esto supone que la evolución posterior a un incendio, al menos en términos de regeneración, puede predecirse. La

composición específica y su disposición en el espacio, permiten ligar con suficiente precisión los diferentes tipos de vegetación y su respuesta después de un incendio.

Esto requiere de una tipificación de la vegetación de acuerdo a un criterio estructural (que se está generalizando en la clasificación de la vegetación, RUIZ DE LA TORRE, J. 1990), lo que presenta algunas ventajas en nuestro caso:

1. Se eliminan los factores de sucesión, definiéndose tipos de vegetación que en cierta forma reflejan un *estado* de la vegetación (análogo al concepto de Tipo Climático Estructural).

2. El comportamiento del fuego está directamente relacionado con la estructura y la composición de cada tipo de vegetación, por lo que también ayuda a interpretar los posibles daños producidos por el fuego.

3. Se puede incorporar fácilmente información respecto a la composición, en términos de especies principales y secundarias.

4. La cartografía de la vegetación es mucho más sencilla mediante el análisis estructural, y puede relacionarse fácilmente con trabajos ya existentes.

Adoptando este análisis estructural, se ha elaborado una tipificación de la vegetación en base a los siguientes criterios:

A. FORMA PRINCIPAL DE CRECIMIENTO DE LA ESPECIE DOMINANTE

a.1. Bosque arbolado. Talla mayor de 7 m. (5 m.)

a.2. Arbustado o matorral arbustivo. Talla entre 3 y 7 m.

a.3. Matorral. Talla entre (0.05) 0.5 y 3 m.

B. ESTRUCTURA

Masa densa

b.1. Estructura simple o a la suma con un estrato formado por herbáceas vivaces o herbazal terofítico.

b.2. Estructura compuesta por mezcla de dos estratos simples

b.2.1. Bosque con continuidad vertical entre los estratos

b.2.2. Bosque sin continuidad vertical entre los estratos

Masa ahuecada Distribución adhesionada de especies arbóreas sobre cultivos o cubiertas menores. Cubierta de la especie(s) principal(es) entre el 5% y 20 % (35%).

b.3. Estructura simple o a lo sumo con un estrato formado por herbáceas vivaces o herbazal terofítico.

b.4. Estructura compuesta por mezcla de dos estratos simples

b.3.1. Bosque con continuidad vertical entre los estratos

b.3.2. Bosque sin continuidad vertical entre los estratos

C. COMPOSICIÓN

Composición del estrato principal

c.1. Estrato principal dominado por una especie

c.2. Estrato principal diverso

c.2.1. Bosque con dos o más especies en el estrato principal

c.2.2. Arbustado o matorral de gran diversidad

Composición del estrato asociado

c.3. Estrato secundario dominado por una especie

c.4. Estrato secundario de gran diversidad

D. ESTRATEGIA DOMINANTE DE REPRODUCCIÓN

d.1. Pirófitos de fruto y/o semilla

d.2. Pirófitos de rebrote basal

d.3. Pirófitos de tallo

E. CAPACIDAD DE REPRODUCCIÓN. MADUREZ

e.1. Estrato formado por individuos que

«Regeneración de la vegetación después de un incendio»

han alcanzado la madurez sexual o tienen garantizada su reproducción asexual.

e.2. Estrato formado por individuos que no tienen garantizado su reproducción

Partiendo de estos criterios de clasificación, el sistema supone un gran número de divisiones y subdivisiones. Con el fin de evitar un número excesivo de categorías, en este primer momento nos hemos limitado a los tipos de vegetación más significativos en Andalucía, y que por tanto tiene una mayor significación en términos de superficie afectada. Para facilitar la interpretación del sistema este se presenta en forma de una clave que va integrando diferentes niveles de información.

3.2 Tipificación de la vegetación para estudios de regeneración después de un incendio

A. Bosque arbolado. Vegetación mayor de 7 (5) m. de alto formado por plantas leñosas, con clara diferenciación de tronco y copa.

MASAS DENSAS

A.1. Masa densa con una estructura simple o a lo sumo con un estrato secundario formado por herbáceas vivaces o herbazal terofítico. Estrato principal dominado por una especie.

A.1.1. Estrategia dominante de reproducción por pirófitas de fruto y/o semilla
Estrato principal formado por individuos que han alcanzado la madurez sexual

Masas adultas puras de *Pinus spp* (en general repoblaciones).

Estrato principal formado por individuos que no han alcanzado la madurez sexual

Masas jóvenes puras de *Pinus spp* (en general repoblaciones).

A.1.2. Estrategia dominante de reproducción por pirófitas de rebrote basal o de tallo. Los individuos tienen garantizada su capacidad reproductiva desde edades muy tempranas.

Masas arboladas puras de especies del género *Quercus spp.*. Encinares y alcornoques desbrozados.

A.2. Masa densa con una estructura compuesta por mezcla de dos estratos simples.

A.2.1. Estrato principal formado por una especie, con estrato secundario dominado por una única especie o de escasa diversidad. Normalmente sin que exista continuidad vertical.

Especie dominante del estrato principal con estrategia de fruto y/o semilla.

Estrato principal formado por individuos que han alcanzado la madurez sexual.

Masas adultas de *Pinus spp.* con sotobosque de especies del género *Cistus spp.* o *Retama spp.*

Estrato dominante formado por individuos que han alcanzado la madurez sexual. Los individuos tienen garantizada su capacidad reproductiva desde edades muy tempranas.

Masas adultas de *Quercus spp.* con sotobosque de especies del género *Cistus spp.* o *Retama spp.*

Estrato principal formado por una especie, con un estrato secundario dominado por una única especie o de escasa diversidad. Normalmente con continuidad vertical entre los estratos. Estrato principal formado por individuos que no han alcanzado la madurez sexual.

Masas jóvenes de *Pinus spp.* con sotobosque de especies del género *Cistus spp.* o *Retama spp.*

A.2.2. Estrato principal formado por dos o más especies, con estrato secundario en general diverso. Normalmente existe continuidad vertical.

Dominancia en el estrato principal de especies de estrategia pirófitas de fruto y/o semilla. Estrato secundario con especies de estrategia diversa.

Masas irregulares dominadas en el estrato principal por *Pinus spp.* y con presencia de *Quercus spp.* El sotobos-

que puede estar formado por especies de matorral mediterráneo. Se trata de masas naturales o con un alto grado de naturalización.

Dominancia en el estrato principal de especies de estrategia de rebrote basal o tallo. Estrato secundario con especies de estrategia diversa.

Masas irregulares dominadas en el estrato principal por *Quercus spp.* El sotobosque puede estar formado por especies de matorral mediterráneo. Se trata de masas naturales, con diferente grado de antropización.

MASAS HUECAS

A.3. Distribución adhesionada de especies arbóreas sobre cultivos y cubiertas menores. Cubierta de la especie(s) principal(es) entre el 5% y 20% (35%).

Estructura simple o a lo sumo con un estrato formado por herbáceas vivaces o herbazal terofítico, dominado por una especie. Estrategia dominante de reproducción del estrato principal por rebrote basal o de tallo. Los individuos tienen garantizada su capacidad reproductiva desde edades muy tempranas.

Dehesas de *Quercus ilex* y/o *Quercus suber* en producción agrícola o ganadera.

Estructura compuesta por mezcla de dos estratos simples con tendencia o clara continuidad vertical. Estrato principal dominado por una especie y secundario de escasa diversidad.

Dehesas de *Quercus ilex* y/o *Quercus suber*, con sotobosque dominado por especies del género *Cistus spp.* Corresponde a dehesas donde se han abandonado los usos agrícolas.

B. Arbustado o matorral arbustivo. Talla entre 3 y 7 m. Formado por especies leñosas con distribución en un tronco único y copa.

B.1. Masa densa con estructura compuesta por uno o más estratos pero con clara continuidad vertical.

Composición del estrato principal dominado por una especie. Estrategia domi-

nante de reproducción por rebrote basal o de tallo. Los individuos tienen garantizada su capacidad reproductiva desde edades muy tempranas.

Matorral de *Quercus ilex* y/o *Quercus suber*.

Composición del estrato principal y/o secundario de gran diversidad. Las especies presentan diferentes estrategias de reproducción y tienen garantizada su capacidad reproductiva desde edades muy tempranas.

Mancha. Matorral de gran diversidad con presencia de *Quercus ilex*, *Quercus suber*, *Olea europaea*, *Arbutus unedo*, *Myrtus communis*, etc.

C. Matorral. Talla entre 0.5 y 3 m. Formado por especies leñosas que no llegan a diferenciarse en tronco y copa, presentándose en general muy ramificada.

Masa densa con estructura compuesta por uno o más estratos, pero siempre con clara continuidad vertical. Estrato principal dominado por una especie.

Estrategia dominante de reproducción por frutos y/o semillas.

Jarales, con dominancia de *Cistus ladanifer*.

Estrategia dominante de reproducción por semilla y/o rebrote basal.

Retamares, formaciones poco densas con dominancia de *Retama sphaerocarpa*.

Coscojares, formaciones de densidad variable dominadas por *Quercus coccifera*.

Masa densa con estructura compuesta por uno o más estratos, pero siempre con clara continuidad vertical. Estrato principal de gran diversidad. Las especies presentan diferentes estrategias de reproducción y tienen garantizada su capacidad reproductiva desde edades muy tempranas.

Garriga. Formación clara de matorral con presencia de *Quercus coccifera*, *Pistacia lentisscus*, *Juniperus oxycedrus*, *Genista hispanica*, *Retama sphaerocarpa*, etc.

El objetivo final de esta tipificación es asignar un **índice del potencial para la regeneración natural**, que indique la capacidad ideal que tiene un tipo particular de vegetación para recuperar su estructura y composición original, después de la perturbación producida por un incendio. La asignación de este índice se hace mediante la combinación de dos criterios:

1. RESILIENCIA DEL SISTEMA

| | |
|----------|------------|
| A. Baja | 30-50 AÑOS |
| B. Media | 10-30 AÑOS |
| C. Alta | < 10 AÑOS |

2. ALTERACIÓN DE LA ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN ORIGINAL

1. Pérdida completa de la vegetación inicial en todos los estratos.
2. Pérdida completa de la vegetación arbórea inicial, con o sin cambios significativos en la composición específica de los otros estratos.
3. Cambios moderados en el estrato arbóreo, y sin cambios en los otros estratos.
4. Recuperación total de la vegetación en todos los estratos.

En otros trabajos se han definido índices potenciales de regeneración de acuerdo a criterios diferentes. Por ejemplo, el proyecto Phoenix (PHOENIX, 1995) establece un índice de regeneración basado en:

1. PROFUNDIDAD DEL SUELO

| | |
|----------|---------|
| A. Baja | < 5 cm |
| B. Media | 5-30 cm |
| C. Alta | > 30 cm |

2. EXPOSICIÓN

| | |
|---|----------------|
| N | 0-45°/315-360° |
| E | 45-135° |
| S | 135-225° |
| W | 225-315° |

La elaboración de los mapas de vegetación para la asignación de este índice puede realizarse de diferentes formas. Hasta el momen-

to ha podido comprobarse que las imágenes de satélite pueden ser utilizadas con suficiente precisión para distinguir los diferentes estados de cobertura del suelo. Sin embargo, no existen trabajos adaptados a las condiciones particulares de la vegetación mediterránea, lo cual se complica si se pretende un análisis estructural de la vegetación. Esto hace más recomendable, y siempre que no se disponga de documentación previa al incendio, el recurrir a fotografías aéreas junto con la consulta de gestores y personal de los servicios forestales. En algunos casos el recorrido posterior de la zona incendiada puede complementar la información elaborada mediante su contraste con los restos de vegetación.

En esta etapa se elabora una cartografía básica del área, la cual proviene de las bases de datos del Sinamba y de las cartografías realizadas específicamente para este estudio. Se incluirán así:

1. Mapa topográfico.
2. Mapa de pendiente y exposición.
3. Mapa de información específica (tratamientos de la vegetación, evolución del incendio, etc.)
4. Información general (Datos climatológicos, edafológicos, etc.)

Toda la información se incorpora a un Sistema de Información Geográfica como una serie de coberturas independientes. Basándose en la información recogida en el terreno se pueden realizar comparaciones entre los mapas temáticos y crear las bases cartográficas adecuadas para los pasos siguientes de la metodología.

3.3 Estudio de daños producidos por el incendio.

Una vez se han obtenido las bases cartográficas de las zonas incendiadas, así como el mapa de vegetación anterior al incendio, es necesario estimar el nivel de daños producidos por la acción del fuego sobre la vegetación. Para ello se procede de la siguiente forma:

- A. Estimación detallada del área quemada, lo que define los daños generales del incendio.
- B. Comparación del área incendiada con el mapa de vegetación a fin de conocer los tipos de vegetación que han sido dañados.
- C. Discriminación de los niveles de daños.

La urgencia con que necesitan actuar los responsables de la gestión forestal requiere una estimación rápida de los daños, sobre todo en grandes incendios (>500 ha). En esta situación es difícil recurrir exclusivamente a inventarios de campo, que tienen un coste muy elevado y demandan bastante tiempo, lo que hace de ellos una alternativa en general inviable.

Las imágenes de satélite han demostrado, por el contrario, una gran capacidad para analizar los daños sobre la vegetación. Para ello se han desarrollado una serie de *índices de vegetación*, que son combinaciones matemáticas entre bandas cuyo fin es mejorar la información espectral sobre el fenómeno en estudio, atenuando por tanto los efectos que la geometría de observación, el relieve o la atmósfera ejercen sobre la respuesta espectral de la cubierta. Los índices de vegetación más utilizados en la evaluación de superficies afectadas por incendios forestales son los siguientes:

1. Relación infrarrojo cercano-rojo.
2. Índice de vegetación.
3. Índice de vegetación transformado (ITV).
4. Índice de vegetación normalizado (NDVI).

$$\text{NDVI} = [a (\text{TM4} - \text{TM3}) / (\text{TM4} + \text{TM3})] + b$$

Las plantas quemadas tienden a tener altos valores en la banda roja y bajos en el infrarrojo cercano, por lo que el NDVI debería suministrar un buen indicador de daños sobre la vegetación original.

A partir de ellos se pueden estudiar otras alternativas como la clasificación mediante la banda térmica (TM6), o combinación de las anteriores (NDVI/TM6).

Hasta la fecha, y para el inventario de daños causados por los grandes incendios forestales en Andalucía desde 1991, los índices de vegetación utilizados han sido:

- NDVI (bandas 3 y 4).
- Un índice de cambios, basado en la diferencia entre dos NDVI: uno, de un año de referencia anterior, que describe las condiciones de la vegetación antes del incendio; y el otro, posterior al incendio.

Para las nuevas campañas, está prevista la aplicación de dos índices nuevos, diseñados a partir del NDVI, para atenuar la influencia atmosférica y del suelo respectivamente (KAUFMAN, J. & TANRE, D. 1992).

- ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index), se basa en la corrección del efecto atmosférico en la banda roja mediante el uso de la banda azul, la cual describe las condiciones de la atmósfera.
- SARVI (Soil Adjusted and Atmospherically Resistant Vegetation Index) es un índice derivado del ARVI y del SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), que minimiza el efecto atmosférico y del suelo. Este índice, aún atenuando en menor proporción el efecto atmosférico que el ARVI, corrige la influencia que el suelo ejerce dentro del pixel, con lo cual puede resultar de mayor utilidad que el anterior en la evaluación de superficies quemadas, donde muchas zonas de suelo desnudo quedan descubiertas.

Sin embargo, las imágenes de satélite presentan algunas dificultades para la evaluación de áreas incendiadas (CHUVIECO, E & CONGALTON, R.G. 1988):

1. Confusión entre zonas ligeramente quemadas y vegetación no afectada.
2. Dificultad para separar la vegetación quemada de otras zonas no cubiertas por vegetación así como confusión entre zonas quemadas y zonas en sombra o las superficies de agua. Esta dificultad se puede solucionar con algunas variables auxiliares: en el caso de las superficies de agua y zonas de suelo desnudo, el Mapa de Uso de Suelo de Andalucía (*Landcover '91*)

aporta una información que permite localizar estas áreas que presentan confusión. En el caso de las zonas en sombra, el problema sigue siendo difícil de solucionar ya que los ratios y el Índice de Vegetación Normalizado sólo atienden en parte la influencia topográfica por el efecto de normalización que introducen en las imágenes y otra alternativa es la simulación de la geometría de observación mediante el cálculo de los ángulos acimutal y cenital del Sol y un Modelo Digital del Terreno, lo que permitiría por lo menos determinar las zonas que efectivamente están en sombra y su diferenciación de las zonas que han sido realmente quemadas.

3. Criterios para discriminar la intensidad de los daños en las zonas afectadas.

3.4 Seguimiento y evaluación de la regeneración

La tipificación previa de la vegetación y su interpretación ecológica, en conjunción con la estimación de los daños producidos por el incendio, determinan el ciclo y características de la regeneración dentro de un ecosistema forestal. Debido a la similitud de las condiciones ecológicas, puede considerarse que típicamente va a darse un mismo tipo de regeneración como respuesta a los daños producidos por el fuego. Sin embargo, esto permitiría interpretar la dinámica de la vegetación a largo plazo, pero no a corto y medio plazo. Una serie de factores va a condicionar esa respuesta de forma inmediata, como son:

1. Características de la estación en la cual se encuentra un tipo particular de vegetación.
2. Evolución de las variables climáticas en los meses anteriores y posteriores al incendio, con especial relevancia en lo que se refiere a la estación del año durante la cual se ha producido.
3. Tratamientos a la vegetación, dirigidos a promover o mejorar las condiciones idóneas para la regeneración.

Para el estudio de la respuesta de la vegetación al fuego se utilizará, al igual que en el

caso anterior, imágenes de satélite LANDSAT-TM. Los trabajos realizados hasta el momento con este tipo de imágenes sobre vegetación mediterránea (LÓPEZ GARCÍA, M.J. & CASELLES, V. 1991) muestran pequeñas variaciones en la curva espectral de la vegetación de referencia, hasta corresponder a una curva típica de un área cubierta de vegetación en un periodo de seis años después del incendio. Estos trabajos, aceptables cuando se habla de regeneración en términos generales, necesitan de algunas apreciaciones cuando se consideran tipos específicos de vegetación (ver 3.1). Será necesario por tanto, buscar correlaciones más precisas entre ambas variables: tipo de vegetación/índice de regeneración real; y ver la capacidad del satélite para discernir con precisión esta relación. Hasta el momento las referencias encontradas sugieren el empleo de (FIORELLA, M. & RIPPLE, W. 1993):

1. Las bandas del infrarrojo cercano (TM4), que han demostrado una relación directa con la edad de la vegetación hasta el cierre de las copas, y una relación muy débil después de que se cierren.
2. El índice estructural que presenta una fuerte correlación con la edad del rodal y debe estudiarse más profundamente para su aplicación en el estudio de la estructura de la vegetación y su evolución posterior al incendio.

4. CONCLUSIONES

La metodología propuesta en este trabajo, basada en la combinación de los trabajos de campo y las imágenes de satélite, supone una primera aproximación al estudio de la regeneración después de un incendio desde una perspectiva instrumental que facilite su interpretación y seguimiento para la toma de decisiones. Esto supone que la situación real puede conocerse de forma rápida y con suficiente precisión, teniendo siempre presente la influencia de los numerosos factores que intervienen en el proceso, y que lo hacen complejo y a veces difícil de predecir.

El desarrollo del trabajo específico se viene realizando en dos áreas de estudio:

AREA I

Monte los madroñales
Aznaalcóllar (Sevilla)

Superficie quemada: 2.700 ha.

Fecha del incendio: 30-V-95/3-VI-95

AREA II

Varios montes
Grazalema (Cádiz)

Superficie quemada: 877 ha.

Fecha del incendio: 6-IX-92/9-IX-92

Esto permitirá conocer la capacidad de la metodología propuesta y ofrecer resultados que puedan ser utilizados por los responsables forestales, para definir medidas correctoras adecuadas en los plazos más idóneos.

5. BIBLIOGRAFÍA

CURRAS, R. *El pirofitismo de la vegetación mediterránea ibérica*.

CHUVIECO, E. & CONGALTON, R.G. (1988). *Mapping and Inventory of Forest Fires from Digital Processing of TM Data*. En Geocarto International N1 4: 41-53.

FIORELLA, M. & RIPPLE, W. (1993). *Analysis of Conifer Forest Regeneration Using Landsat Thematic Mapper Data*. En: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 59, N1 9: 1383-1388.

KAUFMAN, J. & TANRE, D. (1992). *Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 30, N1 2:261-270

LÓPEZ GARCÍA, M.J. & CASELLES V. (1991). *Mapping Burns and Natural Reforestation Using Thematic Mapper Data*. En Geocarto International N1 1: 31-37.

NAVEH, Z. (1975). *The evolutionary signifi-*

R. M. NAVARRO & al.

«Regeneración de la vegetación después de un incendio»

cance of fire in the mediterranean region.
En: Vegetatio. Vol. 29. 3: 199-208. Kluwer
Academic Publishers.

PHOENIX, (1995). Project Phoenix: A GIS
decision support system for the prevention of
desertification resulting from forest fires.
Doc.1.

RUIZ DE LA TORRE, J. (1990). *Mapa Forestal
de España. Memoria General.* Ministerio de
Agricultura, Pesca y Alimentación. ICONA

TRABAUD, L. (1981). *Man and fire: impact
on mediterranean vegetation.* En:
Ecosystems of the world, 11: 523-537.
Elsevier Edit.