

La teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental

Francisco Sacristán Romero

Facultad de Ciencias de la Información de la
Universidad Complutense de Madrid

La teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental

Francisco Sacristán Romero

Resumen *Abstract*

La Teledetección ofrece grandes posibilidades para la realización de progresos en el conocimiento de la naturaleza, aunque todavía no se ha logrado todo lo que de ella se esperaba debido a que se deben realizar perfeccionamientos en el nivel de resolución espacial, espectral y temporal de los datos. Además, es necesario un mayor rigor científico en la interpretación de los resultados obtenidos, tratando de no extraer conclusiones definitivas de los estudios medioambientales realizados mediante técnicas de Teledetección. Los modelos que se elaboran para interpretar los datos de Teledetección, deberán tener como objetivo eliminar los efectos ocasionados por la variabilidad en las condiciones de captación, la distorsión provocada por la atmósfera, y la influencia de parámetros tales como la posición del Sol, pendiente, exposición, y altitud.

Teledetection offers great possibilities to achieve progress in our knowledge about nature, although not everything has yet been achieved that was expected of it. This is because improvements are needed in the level of the spatial, spectral and temporal resolution of the data. In addition, greater scientific rigor is needed in the interpretation of the results obtained, trying not to draw definitive conclusions from the environmental studies made by means of Teledetection techniques. The models that are elaborated to process Teledetection data will have to have as their objective the elimination of the effects caused by the variability in the conditions of pick up, the distortion caused by the atmosphere and the influence of parameters such as the position of the Sun, slope, exposure and altitude.

Palabras clave: Teledetección, tecnología, medio ambiente, satélites de comunicación.

Key words: Teledetection, technology, ecology, communication satellites.

1. Introducción

La preocupación de los ciudadanos por la escasez creciente de los recursos naturales y energéticos, así como las degradaciones que ha realizado el ser humano en su medio ambiente a través de sus actuaciones, muchas veces irracionales y contra natura, han planteado en el mundo entero la imprescindible necesidad de un mejor conocimiento de su hábitat natural dentro del cual se desenvuelve.

La adecuada planificación de las actividades humanas que las circunstancias actuales exigen, han de descansar en la realización de un inventario más completo y actualizado de las riquezas naturales nacionales e internacionales, ya sean agrícolas, forestales, hidrológicas, mineras, etc. De igual forma, la vigilancia sobre el medio ambiente debe ser mayor, ya que esta actitud producirá una reducción en los impactos sufridos por el medio hasta la fecha.

Los datos procedentes del servicio conocido como teledetección son una gran fuente de información y desempeñan un importante papel en la consecución de los dos objetivos anteriormente apuntados.

Centrándonos más específicamente en el caso español, una de las acciones más importantes debe enfocarse a la calidad de las aguas y la detección de incendios, dos problemas de todos. El agua es una de las grandes riquezas de la Península Ibérica, indispensable para la vida y la ontogenia del ser humano. Si su calidad se deteriora, todos sufrimos las consecuencias: hombres, animales y plantas.

Preservar y mejorar la calidad del agua de nuestros ríos es cuidar el medio ambiente para todos y para todo. Los ríos españoles tienen una longitud total de 172.000 kilómetros, más de cuatro veces la vuelta al mundo. Vigilar su situación, impedir cualquier vertido contaminante, requiere un sistema moderno de análisis, que utilice las tecnologías de comunicación más avanzadas. Es preocupante que hoy un tercio de la longitud de nuestros ríos necesite una atención y saneamiento inmediato, según la información suministrada por el Centro de Publicaciones del Ministerio de Medio Ambiente.

Para que todos dispongamos de agua en la cantidad precisa, en el momento y lugar en que sea necesaria, hace falta una actuación planificada, global, de regulación de recursos. Pero junto a ella es indispensable también conservar la calidad del agua. Depurando por una parte, el agua utilizada, y a la vez vigilando su calidad, impidiendo su deterioro. Una tarea que hay que realizar de forma continua las 24 horas de cada día.

Otro asunto en el que existe una especial preocupación es el de los vertidos urbanos. En poco más de diez años, las grandes ciudades españolas en su inmensa mayoría, han abordado este problema de forma conjunta al de la depuración de las aguas residuales. Hacia mediados de los años 70, el 60% de nuestra población estaba ya conectada a sistemas de depuración. La Directiva Europea 91/271/CEE planteaba importantes retos: antes del año 2000 debían depurar sus aguas todas las poblaciones con más de 10.000 habitantes. Antes del año 2005 debían hacerlo las poblaciones con más de 2.000 habitantes.

Las empresas públicas y privadas españolas no podrán competir ni en Europa ni en el mercado interior si no asumen los costos de depuración. Por todo ello, el Plan de Regularización de Autorizaciones de Vertidos y Gestión del Canon, previsto en el Plan Hidrológico Nacional, necesita fundamentarse en sistemas altamente fiables de control y vigilancia.

El uso de fertilizantes y plaguicidas en la agricultura provoca graves alteraciones en la calidad del agua. En consonancia con lo acordado en la Directiva Europea 91/676/CEE sobre la contaminación producida por los nitratos, el Ministerio de Medio Ambiente y el de Agricultura están desarrollando en nuestro país la necesaria normativa.

Gracias a los trabajos realizados a través del sistema SAICA (Sistema Automático de Información de Calidad de las Aguas), que se hace posible vía HISPASAT desde 1994, la reutilización de las aguas residuales, se ha convertido en una actuación básica en la calidad de las aguas. Existen ya importantes programas piloto en las Islas Canarias y en Madrid. Esta nueva aplicación de las aguas permite liberar recursos cada vez mayores para abastecimientos y otros usos, asegurando las necesidades en agricultura, en el riego de parques y jardines y en la recarga de acuíferos.

La estrecha relación que la Universidad Complutense de Madrid tiene con la sociedad HISPASAT S.A. ha permitido que dispongamos de una información muy detallada de lo que constituye el núcleo central de este artículo sobre medio ambiente: el Sistema Automático de Información de Calidad de las Aguas (SAICA). Adelantamos aquí algunos de los objetivos más importantes de este programa nacional:

1. Detectar y controlar la contaminación de los ríos y acuíferos, con carácter preventivo.
2. Cumplir y hacer cumplir las Directivas de la Unión Europea sobre la calidad de las aguas.
3. Control exhaustivo de los niveles de calidad por tramos de río en función de los requisitos establecidos para cada uso (abasteci-

miento, regadío, vida piscícola, etc.) y llegar a los objetivos finales de calidad de los Planes Hidrológicos de cuenca.

4. Protección de vertidos indeseados las 24 horas del día respecto a determinados empleos específicos, sobre todo los abastecimientos a núcleos de población.
5. Aplicación de forma eficiente de la normativa española, en particular de la Ley de Aguas, sancionando de forma ágil a los responsables empresariales y particulares de vertidos contaminantes para la salud.
6. Nuevas tecnologías y procedimientos modernos de gestión, que permitan, con poco personal de vigilancia, realizar una amplia cobertura de control de nuestra red hidrográfica de forma continua.

El SAICA constituye, dentro de su género, uno de los sistemas más avanzados y pioneros de Europa, en concepción y tecnología. Es a la vez un sistema extremadamente económico, permitiendo la cobertura de todas nuestras Cuencas Hidrográficas con un presupuesto de 10.000 millones de pesetas, para el que cuenta con apoyo de fondos de la Unión Europea. Ha recibido el beneplácito de la Comisión Europea.

Este programa es un sistema de ámbito nacional, que recibe y procesa durante las 24 horas del día la información procedente de las Redes Integrales de Control de Calidad de las Cuencas Hidrográficas. Permite el control continuo y sistemático de la cantidad y calidad de las aguas de los ríos, según el uso a que estén destinados: abastecimiento, regadío, baños, etc.

El Sistema SAICA permite tener una información real e inmediata de lo que sucede en nuestros ríos y acuíferos. Por ello se pueden desgranar, entre otras, las siguientes funciones:

1. Alerta automática de protección, principalmente para abastecimientos.
2. Diagnósticos continuos de calidad por tramos de río, según los usos de cada segmento de terreno.
3. Datos estadísticos, informes temáticos, realizando el seguimiento de los diferentes tipos y niveles de contaminación.
4. Estrategias de control, vigilancia y sanción de vertidos contaminantes.
5. Simplificación de procedimientos, informatización, mayor agilidad en las autorizaciones de vertido y expedientes sancionadores.
6. Informes a la Unión Europea para el cumplimiento de las diferentes Directivas sobre la Calidad de las Aguas.

A modo de apunte general en esta introducción, que posteriormente desarrollaremos con más amplitud y detalle, precisaremos que en cada Cuenca Hidrográfica, el SAICA cuenta con una red de información de Calidad de las Aguas. En total, el sistema se compone de:

- Estaciones de Muestreo Periódico (EMP).
- 200 Estaciones de Muestreo Ocasional (EMO).
- 115 Estaciones Automáticas de Alerta (EAA).
- 9 Centros Periféricos de Proceso (CPP), uno en cada Cuenca Hidrográfica.
- Una Unidad Central en el Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
- El enlace entre todo el sistema se realiza usando el sistema HISPASAT.

Las “estaciones automáticas de alerta” realizan mediciones de forma continua de los diferentes parámetros elegidos sobre la calidad de las aguas. Realizan el alerta cuando detectan que determinados parámetros de calidad superan los valores exigidos por la normativa vigente.

Disparada una alarma, el sistema pone en marcha automáticamente mecanismos de interrupción de tomas de suministro de agua a poblaciones, a la vez que lleva a cabo los análisis que permiten identificar el vertido causante de la alarma y su posible origen, facilitando así las medidas sancionadoras.

Las Estaciones de Control, instaladas en los puntos más conflictivos de los ríos, transmiten a los Centros de Proceso de cada cuenca y a la Unidad Central del Ministerio de Medio Ambiente la información sobre la calidad de las aguas a través del satélite español HISPASAT, mediante el sistema VSAT. En los Centros de Control se investigan las causas, se analizan las posibles consecuencias de cada contaminación y se advierte a la inspección. Entran así en funcionamiento los mecanismos de policía de agua previstos en nuestras leyes.

En estos momentos, el funcionamiento normal del sistema SAICA pasa por ser la mejor opción para mantener y mejorar la calidad de las aguas de nuestros ríos y acuíferos. Este sistema tiene en cuenta las responsabilidades en materia de saneamiento y depuración de las Administraciones Locales y Autonómicas. Hace posible la coordinación con la Administración Central del Estado que es a quien corresponde el control, vigilancia y conservación del dominio público hidráulico, garantizando así la calidad de las aguas continentales.

Este sistema contribuye de forma importante a la realización del Plan Hidrológico Nacional, convirtiendo a España en uno de los países europeos con más y mejores recursos hidrológicos, a pesar de los pasados años de sequía pertinaz. En suma, una buena herencia para las próximas generaciones si saben aprovecharlo con racionalidad y coherencia.

Aparte del Sistema SAICA, ampliaremos información con apartados sobre el avance más reciente de la “teledetección”, una tecnología abanderada en el estudio de los impactos medioambientales. Nos centraremos en algunos de los antecedentes, características de los datos estadísticos de teledetección, satélites de recursos naturales anteriores a HISPASAT, para luego exponer con más profundidad nuestra explicación sobre el SAICA.

2. La función de la teledetección en el estudio del medio ambiente

La teledetección de recursos naturales se basa en un sistema de adquisición de datos a distancia sobre la biósfera, que está basado en las propiedades de la radiación electromagnética y en su interacción con los materiales de la superficie terrestre.

Todos los elementos de la Naturaleza tienen una respuesta espectral propia que se denomina “signatura espectral”. La teledetección estudia las variaciones espectrales, espaciales y temporales de las ondas electromagnéticas, y pone de manifiesto las correlaciones existentes entre éstas y las características de los diferentes materiales terrestres. Su objetivo esencial se centra en la identificación de los materiales de la superficie terrestre y los fenómenos que en ella se operan a través de su signatura espectral.

La información se recoge desde plataformas de observación que pueden ser aéreas o espaciales, pues los datos adquiridos a partir de sistemas situados en la Tierra constituyen un estadio preparatorio de la teledetección propiamente dicha, y se consideran como campañas de verdad terreno.

Las plataformas de observación portan los captadores, es decir, aquellos instrumentos que son susceptibles de recibir y medir la intensidad de la radiación que procede del suelo en una cierta gama de longitudes de onda, y para transformarla en una señal que permita localizar, registrar y digitalizar la información en forma de fotografías o imágenes numéricas grabadas en cinta magnética compatibles con un ordenador (CCT).

Los captadores pueden ser cámaras fotográficas, radiómetros de barrido multiespectral (MSS), radares y láseres. Estos aparatos generan imágenes analizando la radiación emitida o reflejada por las formas y objetos de la superficie terrestre en las longitudes de onda en las cuales son sensibles (ultravioleta, visible, infrarrojo próximo, infrarrojo técnico, hiperfrecuencias) con el fin de reconocer la variada gama de formas y objetos.

2.1. Satélites de recursos naturales LANDSAT

Con objeto de hacer un breve recorrido histórico sobre los satélites con servicios destinados al cuidado del Medio Ambiente, empezamos este apartado por el sistema que se considera uno de los pioneros: el LANDSAT, primer satélite de recursos naturales lanzado por la NASA en julio del ya lejano 1972. Con posterioridad a este lanzamiento, fueron puestos en órbita los satélites LANDSAT 2 y LANDSAT 3, en enero de 1975 y marzo de 1978 respectivamente, con la finalidad de asegurar la recogida de datos para ulteriores estudios. Los satélites LANDSAT están situados en una órbita casi polar y sincrónica con el Sol, a 920 kilómetros de altura sobre la superficie de la Tierra. Tardan en efectuar una órbita completa 103 minutos, barren la superficie terrestre cada 18 días y obtienen información simultánea de zonas de la Tierra de 185 x 185 Km. (aproximadamente 34.000 Km.).

Los satélites LANDSAT están provistos de sensores remotos de varios tipos. El primero es el RBU (Return Beam Vidicon) que consiste esencialmente en un sistema de cámaras de televisión. El segundo sensor es un equipo de barrido multiespectral o MSS (Multiespectral Scanner) que registra la energía reflejada por la superficie terrestre en las regiones verde, roja e infrarroja del espectro electromagnético. La unidad elemental de información tiene una resolución espacial de 79 metros.

Las señales analógicas registradas por los sensores se convierten a un formato digital y se transmiten a la Tierra. Los datos del LANDSAT se comercializan bien en forma de productos fotográficos, bien en forma de imágenes digitales grabadas en cintas magnéticas compatibles con ordenador.

2.2. Características de los datos de teledetección

El conjunto de los datos adquiridos mediante procedimientos de teledetección de aviones o naves espaciales comprenden siempre tres tipos de información (Goillot, 1976):

1. Una información espacial que representa la organización en el espacio físico de los elementos que constituyen la imagen.
2. Una información espectral que caracteriza y puede conducir al conocimiento de la naturaleza de la superficie terrestre.
3. Una información temporal que permite la detección de los cambios operados en la superficie de la Tierra con el transcurso del tiempo.

Además, los sensores remotos, especialmente los radiómetros de barrido multiespectral de la serie de satélites LANDSAT, realizan una percepción muy particular del Medio Ambiente y del paisaje que se caracteriza porque existe una homogeneización de la imagen que es función del nivel de resolución de los sensores o captosres.

La información elemental o *píxel* (contracción de “*picture element*”) tenía, a principios de la década de los ´80, para el satélite LANDSAT unas dimensiones sobre el terreno de 56 m. x 79 m. Estas unidades informativas se disponen en la superficie terrestre a modo de malla geométrica con una cierta inclinación respecto a meridianos y paralelos, pareciéndose en cierto modo a la malla UTM o LAMBERT. La malla del LANDSAT no tiene ninguna relación con los límites geográficos de los objetos situados en la superficie terrestre.

En estas condiciones, lo más normal es que un *píxel* tenga una naturaleza heterogénea, pudiendo englobar en el caso de una zona urbana, a una manzana de casas, un jardín o una autopista. Las diferencias locales se diluirán en la respuesta promedio, y este efecto crea una ilusión sobre la existencia de zonas de transición y zonas de contacto gradual entre distintas unidades de paisaje. Dicho efecto no se manifiesta cuando existe un contraste brusco entre dos usos del suelo contiguos; por ejemplo, un movimiento de tierras reciente en el interior de un bosque cerrado. La existencia de un contraste brusco puede permitir observar en una imagen objetos cuyas dimensiones sean inferiores a las de un *píxel*.

En definitiva, los datos adquiridos a través de teledetección se caracterizan por las siguientes propiedades (Tricart, 1979):

1. Posibilidad de obtener información sobre aspectos del medio natural que escapan totalmente a nuestros sentidos (ondas de radar, infrarrojo de LANDSAT, etc.). La experiencia natural del hombre es, por lo tanto, nula en estos dominios espectrales, y por esta razón se

realizan visualizaciones que tienen una función y utilidad análogas a las fotografías aéreas, y que se denominan imágenes para evitar la confusión.

2. Estas informaciones que son registradas por los sensores, y que miden la cantidad de energía reflejada o emitida por los objetos naturales que componen el paisaje son de tipo numérico, y se prestan al tratamiento matemático. Por otro lado, su extremada abundancia obliga al empleo de grandes ordenadores y métodos de tratamiento de datos muy sofisticados y potentes.
3. Los datos extraídos de los servicios de teledetección nos revelan ciertos aspectos de los ecosistemas difíciles de estudiar, prácticamente desconocidos, contribuyendo de una forma eficaz al conocimiento de los mismos y de su funcionamiento (detección de enfermedades en las plantas, efectos del stress debido a la falta de agua, transpiración, régimen térmico, etc.).
4. Por último, la teledetección permite seguir la evolución de las grandes extensiones forestales que persisten en la superficie del globo, tener una visión de conjunto sobre los efectos producidos por las grandes catástrofes (como por ejemplo, las sequías aterradoras de las regiones saharianas de África) y reconocer ciertos fenómenos de polución a gran escala en el cielo y en el mar.

2.3. Resolución espacial de los satélites de protección medioambiental

En la década de los años '70, la mayoría de las imágenes de satélites empleados en el estudio de los fenómenos terrestres pertenecían a la serie LANDSAT.

Muchos científicos han realizado aplicaciones empleando dichas imágenes, sobre todo en los Estados Unidos, pero también muchos otros se dieron un compás de espera debido a la baja resolución espacial de dichas imágenes con respecto a la fotografía aérea convencional. La mayoría de los satélites de recursos naturales que se han diseñado y construido para ser lanzados al espacio en la década de los '80, han proporcionado imágenes con mejoras sustanciales en la resolución espacial con respecto a los satélites pioneros.

La necesidad de disponer de imágenes con mejor definición espacial quedó parcialmente satisfecha con el lanzamiento, en 1982, del LANDSAT D, y por el satélite SPOT (Sistema Probatorio de Observación de la Tierra) que fue puesto en órbita en 1984. Además, el lanza-

dor COLUMBIA dispuso de cámaras métricas con resoluciones inferiores a los 10 metros.

Estos avances en la tecnología de los sensores remotos permitieron decir a Allan, hacia mediados de los años '80, que la mapificación de las grandes áreas a partir de las imágenes satelitales estaría muy extendida. (Allan, 1977: 7-14)

En un principio, las imágenes se construían por medio del movimiento de un espejo situado transversalmente a la órbita del satélite. La imagen final estaba constituida por una matriz de elementos de imágenes o *píxeles*. Este método se empleó en el sistema multiespectral scanner MSS de los satélites LANDSAT 1, 2 y 3, y se empleó en el mapeado temático del LANDSAT D. En los radiómetros de barrido ("*pushbroom radiometers*") no es necesario el espejo oscilante antes mencionado pues, un "chip" monolítico de silicón posee cientos o miles de detectores en línea con amplificadores y circuitos electrónicos multiplexados (Thompson, 1979: 47-55).

Estos detectores hacen un muestreo electrónicamente, de tal forma que un vector que contiene toda una línea de la imagen, se registra al mismo tiempo que el satélite avanza a lo largo de la órbita un elemento de resolución.

Las carreteras y ríos de anchura inferior a 79 metros son frecuentemente detectables en las imágenes LANDSAT. La alineación de los objetos es también muy importante, y la eficacia en la detección depende mucho de que el eje central del objeto se encuentre en la mitad de una línea de barrido o en la frontera entre dos líneas de barrido. En el segundo caso, la detección es más difícil.

Mientras hay objetos inferiores a 79 metros que se pueden detectar, muchos objetos de tamaño igual o mayor no son detectables. En las imágenes LANDSAT se ha mostrado que los objetos de bajo contraste sólo son detectables si tienen una longitud superior a 250 metros.

Una consecuencia obvia de todo esto es que la habilidad del sensor para detectar objetos depende del contraste con los alrededores, y está en relación con la sensibilidad que posea el captor para detectar pequeñas diferencias. El tamaño mínimo de los objetos que son detectables en una imagen también está en función de las condiciones atmosféricas locales. (González Alonso y Cuevas Gózaló, 1982: 15)

Finalmente, para que la utilidad de los satélites sea mejor entendida y los futuros sistemas se diseñen de una manera más eficiente, Townshend indicaba que sería necesario investigar dos áreas principales (Townshend, 1981: 31-55):

1. Elaboración de medidas de resolución que reflejen mejor la cantidad y calidad de la información que puede extraerse de los datos.
2. Desarrollo de índices que midan las propiedades espaciales de los atributos (vegetación, geología, etc.) en el terreno.

3. Métodos de tratamiento para la extracción de información de los datos de teledetección

El lanzamiento del satélite LANDSAT 1 en 1972 inauguró una nueva era para los estudios del medio ambiente, proporcionando datos de alta calidad que se pueden obtener a intervalos frecuentes sobre cualquier zona de la superficie terrestre. Sin embargo, la capacidad de obtener información desde los satélites es mayor que la capacidad que hasta hace poco tiempo se tenía para analizar e interpretar los datos de una forma totalmente eficaz.

En los albores iniciales del programa LANDSAT, se estableció una especie de diálogo de sordos entre los promotores de la teledetección (que a menudo tenían una formación en ingeniería técnica o superior, en física o en informática) y los usuarios potenciales (geólogos, geógrafos, agrónomos forestales, hidrólogos, etc.) debido a que los primeros interpretaban las imágenes de forma demasiado ingenua, según la opinión de los usuarios, que a su vez hacían gala de gran escepticismo, alimentado por una cierta inercia de cara a su necesario reciclaje.

De una forma progresiva estas barreras tienden a desaparecer y así, cada vez más, profesionales de formación académica muy diferente tienden a las colaboraciones mutuas y al intercambio de informaciones. Además, en teledetección, existe muy a menudo una interacción grande entre las técnicas y las aplicaciones, debido a que estas últimas permiten frecuentemente replantearse los métodos empleados.

Las técnicas de tratamiento de datos en teledetección tienen como objetivo esencial ayudar al investigador en la interpretación de los datos procedentes de sensores remotos.

3.1. *La interacción hombre-máquina*

Desde hace más de una década, los esfuerzos realizados para extraer información a partir de sensores remotos multispectrales van dando progresivamente resultados.

Dichos esfuerzos se han centrado esencialmente en la aplicación de las técnicas de reconocimiento automático de patrones a las medidas de multiespectro que caracterizan a los elementos de resolución. Generalmente, las escenas son clasificadas *pixel a pixel* basándose en los vectores de medidas espectrales que están asociados a los elementos que componen la imagen, empleando para este proceso ordenadores y programas desarrollados al efecto.

Los sistemas completamente automáticos de tratamiento de imágenes digitales, no han proporcionado resultados del todo satisfactorios en las aplicaciones relativas a la mapificación de usos del suelo.

La perfección del ojo humano es muy grande y el papel que ha de desarrollar el analista como fotointérprete es esencial, tanto en la interpretación de las imágenes fotográficas, como en el proceso automático de las imágenes digitales. Por ello, cada vez más, los sistemas de tratamiento se diseñan de tal forma que intervienen más activamente en el proceso especialistas de las ciencias medioambientales.

El papel del especialista consiste en incorporar al sistema su conocimiento del medio ambiente, particularmente las peculiaridades regionales de las imágenes en cuestión, localizando en el espacio los distintos tipos de cubierta u otros fenómenos que estén acordes con las relaciones ecológicas y/o antropógenas que se manifiestan en las imágenes.

Los progresos que preferentemente se han llevado a cabo en la cuestión del tratamiento numérico, consisten en la puesta a punto de dispositivos de visualización que permiten un diálogo permanente del investigador con el ordenador, pudiendo escoger aquél los tratamientos numéricos adecuados, y una vez aplicados, controlar los resultados, apreciando la concordancia existente entre dichos resultados y sus conocimientos. (Tricart, 1979)

3.2. Clasificación automática de los datos de teledetección

La clasificación automática de los datos digitales de teledetección es una gran ayuda para el investigador en la interpretación de imágenes multiespectrales.

El objetivo de toda clasificación es el reconocimiento de clases o grupos cuyos miembros tengan ciertas características en común. El resultado ideal sería la obtención de clases mutuamente excluyentes y exhaustivas. En teledetección, las clases obtenidas cuando se realiza una clasificación deben ser espectralmente diferentes unas de otras, y

además deben contener un valor informativo de interés para la investigación de que se trate.

Tradicionalmente, se han seguido dos enfoques en la realización de las clasificaciones: uno de tipo supervisado y otro de tipo no supervisado. El enfoque de tipo supervisado supone un entrenamiento de clasificador a través de un conocimiento a priori de la verdad terreno que se ha seleccionado como representativa de las clases informacionales que se quieran reconocer en la imagen. El enfoque no supervisado no precisa el conocimiento previo de una verdad terreno, y tiene la pretensión de segmentar la imagen en una serie de clases por procedimientos exclusivamente numéricos, basándose sólo en la estructura que posean los datos espectrales.

En las clasificaciones supervisadas, normalmente se parte de la hipótesis de que la distribución de los datos espectrales es normal multivariante, lo que permite la utilización de procedimientos paramétricos, tales como los clasificadores bayesianos.

Ahora bien, suele ocurrir que los datos espectrales no se ajustan bien a la distribución multinormal, pudiendo ser arriesgado sustentar la hipótesis anterior. Maynard y Strahler propusieron el clasificador Logit (Maynard y Strahler, 1981), un clasificador no paramétrico. En una simulación realizada con ordenador generando datos no normales, el clasificador Logit fue significativamente superior al bayesiano, mejorando la exactitud en un 34 %. Cuando se utilizó dicho procedimiento en una zona agrícola, y con datos LANDSAT reales, el incremento de precisión experimentado fue del 39%.

Los mayores problemas que subyacen a las clasificaciones de tipo supervisado son:

1. Validez de las clases espectrales, construidas en la fase de entrenamiento de los clasificadores, para representar a las clases informacionales que se quieren reconocer.
2. Elevado costo (desde el punto de vista del tiempo de cálculo) que puede suponer la realización de tales clasificadores. Una forma eficaz de reducir el costo de las clasificaciones consiste en el empleo de las tablas de clasificación. Estas tablas están basadas en la alta correlación que presentan las cuatro bandas del radiómetro del LANDSAT, lo que reduce el número de combinaciones espectrales distintas que se pueden presentar en la imagen. De esta forma, normalmente en una imagen LANDSAT, sólo se presentan varios miles de combinaciones de las aproximadamente 16 millones de combinaciones espectrales posibles.

La fiabilidad de las clasificaciones realizadas mediante este procedimiento suele tener el mismo orden de magnitud que la obtenida mediante los métodos convencionales, pero el tiempo de cálculo es sensiblemente inferior.

3.3. Técnicas de mejora de las clasificaciones de datos en teledetección

La modesta y limitada precisión que se obtuvo desde un punto de vista estrictamente estadístico, en la realización de clasificaciones convencionales de una sola imagen LANDSAT, fue un estímulo esencial en los investigadores para la realización de estudios multitemporales y de análisis que tuviesen en cuenta el contexto o información espacial de la imagen, además de la información espectral que es la característica.

3.3.1. Estudios multitemporales

El objetivo principal de los estudios multitemporales es encontrar una forma de combinar o integrar en el proceso varias imágenes correspondientes a diferentes fechas, con distintos estados fenológicos en la vegetación, de cara a la obtención de un incremento en la precisión de las clasificaciones.

La integración de imágenes de satélite relativas a una misma área pero de fechas sucesivas, se realiza a través de un procedimiento de registro multitemporal de las imágenes. Este proceso consiste, en líneas generales, en obtener la posición de una imagen con respecto a otra que proporciona la máxima correlación en el espacio de los datos radiométricos. El resultado final que se obtiene es una sola imagen que posee tantos canales espectrales como bandas suman las imágenes procesadas.

En los estudios multitemporales se pueden emplear diversas metodologías, pero conviene tener en cuenta algunas consideraciones:

1. La intersección de clasificaciones de imágenes pertenecientes a distintas fechas reduce generalmente las clasificaciones erróneas, en el sentido de que un elemento que no posea cierta cualidad puede ser clasificado como poseedor de ella, pero también aumenta los errores en el sentido de que un individuo que tiene dicha cualidad puede ser clasificado como que no la posee.

2. La superposición o integración de las imágenes previamente a la clasificación reduce generalmente los errores de clasificación en ambos sentidos.
3. El producto de las probabilidades de clasificación por separado en ambas imágenes, generalmente proporciona mejores resultados que el método anterior, estando además mejor adaptado a la metodología de clasificación supervisada, pues permite mayor libertad en la elección de las áreas de entrenamiento en cada una de las imágenes por separado.

Expondremos algún ejemplo que ayude a la explicación de todo lo anterior. Así, Megier ensayó los procedimientos anteriores en un problema referente al inventario de choperas en el valle del río Po, y consiguió mejorar la ratio: número de *píxeles* de chopo en la realidad, del 0,94 (estudio unitemporal) al 0,96 (estudio multitemporal). (Megier, 1977: 135-140)

3.3.2. Clasificaciones de contexto

Las imágenes de teledetección se pueden considerar como un proceso aleatorio en dos dimensiones, y las características de este proceso se pueden incorporar a la estrategia de clasificación. Mientras los datos espectrales se han empleado en la mayoría de las aplicaciones de LANDSAT, algunos investigadores han fijado su atención en el contexto espacial de los mismos.

Una de las razones por la que en los inicios de la investigación de cuestiones medioambientales no se tomó con la debida consideración la información espacial, estuvo en que los datos espectrales pueden analizarse fácilmente *píxel a píxel*, mientras el empleo de la información del contexto ecológico requiere la consideración de varios o muchos *píxeles* para obtener una estructura espacial significativa.

El análisis espacial de los datos es más difícil que el análisis espectral, pues requiere el conocimiento de complejas técnicas matemáticas para poner de manifiesto la estructura de los datos. La denominación de “clasificadores de contexto” alude a aquellas técnicas de clasificación que tienen en cuenta las características ecológicas y espectrales de las imágenes de teledetección, con el objetivo de obtener resultados más precisos.

Las características espaciales incluyen factores tales como la forma, la textura y las relaciones estructurales. Una manera de incorporar la información espacial puede consistir en la hipótesis de que el tipo de cubierta asociado a un *píxel* determinado no es independiente

del tipo de cubierta que presentan los *píxeles* vecinos. Por ejemplo, determinados tipos de cubierta del suelo aparecen con mayor frecuencia en un contexto dado.

A priori, es fácil aceptar que una parcela de trigo es más probable que esté al lado de una de cebada, que contiguamente a una zona urbana de alta densidad. Desde el punto de vista de la clasificación estadística, existirán más posibilidades de clasificación correcta de un *pixel* si, además de la información espectral asociada al mismo, se tienen en cuenta sus relaciones con las medidas de reflectancia y/o las clases asignadas a los píxeles de su vecindad.

Swain realizó experiencias usando clasificadores de contexto y obtuvo los siguientes resultados: empleando un conjunto de 50 x 50 *píxeles* situados en una zona agraria de Williston (Norte de Dakota), con una resolución espectral y espacial semejante a la del Thematic Mapper del LANDSAT D, produjo porcentajes de clasificación correcta que oscilan entre el 82,5 (en el caso del clasificador convencional) y el 96 (en el caso del clasificador de contexto). (Swain, 1979: 343-353)

Con el empleo de un conjunto de datos relativos a una zona urbana en Grand Rapids (Michigan), obtenidos de una imagen LANDSAT, los resultados de clasificación correcta variaron entre el 54% (clasificador convencional) y el 96% (clasificador de contexto). Cuando se realizó un experimento en una situación real sobre un área extensa de Grand Rapids, en el que se emplearon muestras para comprobar el porcentaje de clasificación correcta, el uso de información espacial mejoró este porcentaje del 81,6 al 84,6.

Por último, debemos reseñar que el tiempo de cálculo en el empleo de los clasificadores de contexto puede ser sensiblemente superior que en el caso de los clasificadores convencionales, sobre todo si se emplean imágenes de alta resolución espacial.

4. Integración de información de teledetección en bases de datos medioambientales

La amplia gama de sistemas de teledetección existentes (películas sensibles, radiómetros, radares, etc.) y las diversas plataformas desde donde actúan (globos, aviones, satélites, etc.) constituyen un avanzado sistema integrado de informaciones de gran apoyo logístico y científico para el estudio del medio natural en diferentes niveles, tales como usos del suelo, costas, bosques, recursos acuáticos, cuestiones biofísicas, paisaje, calidad de los distintos nichos ecológicos animales y

humanos, impacto de grandes obras públicas civiles, catástrofes naturales, etc.

El conjunto de los datos obtenidos vía teledetección tienen una naturaleza geográfica, física y radiométrica y, en consecuencia, distinta de las informaciones recogidas por los métodos convencionales. La información de teledetección es repetitiva, global y sintética, pues toma en consideración de forma simultánea un elevado número de variables relativas al medio ambiente.

Cada administración, ya sea local, regional autónoma o estatal, recoge informaciones sobre el medio ambiente y realiza un archivo y almacenaje en bancos de datos geográficos, a menudo incompatibles unos con otros. La teledetección, que debe apoyarse en datos complementarios de verdad terreno para la producción de informaciones válidas, tiene pocas posibilidades para desarrollarse normalmente si este contexto no cambia.

Para superar estas trabas es básico que los datos relativos al medio ambiente puedan circular con fluidez de una institución a otra, esencialmente a través de las avanzadas tecnologías electrónicas e informáticas.

La teledetección completa los sistemas de información tradicionales, y además permite la posibilidad de incluir los límites administrativos convencionales o geográficos en los resultados derivados de su análisis e interpretación. De esta forma, se puede disponer de documentos adaptados a las necesidades de los planificadores y gestores de los recursos naturales.

Como es lógico deducir, para que esta herramienta de recolección de datos relativa al medio ambiente sea tan eficiente como su potencial deja entrever, es necesaria la transferencia y la integración de los métodos tradicionales de gestión de las informaciones medioambientales en los sistemas de información ya existentes.

Este proceso es fundamental para la conveniente actualización de los inventarios de recursos naturales, y para llevar una contabilidad adecuada en términos físicos, detectando los cambios que se vayan produciendo en el transcurso del tiempo sobre el recurso en cuestión.

Un sistema integrado de información geográfica debe estar complementado en un ordenador (generalmente de gran capacidad de almacenamiento en disco), y debe poseer un soporte lógico suficiente (software) que le permita almacenar, manipular y recuperar la información localizada geográficamente.

Los sensores son una fuente muy importante para los sistemas de información geográfica, y éstos a su vez proporcionan un uso y diseminación de aquellos más eficiente.

4.1. Los modelos de paisaje

La denominación de “modelos de paisaje” se refiere a la integración de los datos de sensores remotos en un sistema de información geográfico (SIG). Esta combinación sinérgica produce un banco de datos multivariantes y multitemporales que posibilitan una configuración matemática del paisaje, de la misma forma que un modelo en tres dimensiones del terreno se representa por un mapa topográfico.

El uso de una base de datos geográficos puede mejorar los resultados de las clasificaciones automáticas realizadas con datos de teledetección, al incorporarse a modo de nuevas variables espectrales.

De forma recíproca, la utilización de datos espectrales puede proporcionar ventajas en aquellos problemas referentes a la mapificación de tipos de cubierta del suelo y en los modelos de planificación física del territorio. Se han desarrollado técnicas de proceso automático que combinan los datos LANDSAT con información de tipo geográfico-altitud, pendiente, exposición, insolación, etc., con el objetivo, por ejemplo, de obtener mapificaciones más precisas de las especies forestales en áreas de montaña.

En un trabajo minucioso realizado por Fleming M. y Hoffer R. sobre una región abrupta de las Montañas Rocosas en Estados Unidos, con el objetivo de estudiar los tipos de cubierta forestal se llegó a las siguientes conclusiones (Fleming y Hoffer, 1979: 377-390):

1. La elaboración de un modelo de distribución topográfica de las especies proporciona una descripción cuantitativa estadísticamente significativa. Además, este modelo proporciona una descripción espectral más detallada de los tipos de vegetación, porque considera la variabilidad de las condiciones ecológicas. Esta técnica permite la reducción notable de los tiempos de cálculo precisos para el entrenamiento de los clasificadores.
2. El uso de datos geográficos conjuntamente con datos espectrales, mejora significativamente el porcentaje de clasificación correcta de las clases de cubierta forestal, con respecto a los resultados obtenidos usando exclusivamente los datos espectrales.
3. El empleo de la altitud conjuntamente con los datos espectrales, proporciona una mejora en la precisión de los clasificadores del 15%, aproximadamente. Los datos de sensores remotos proceden-

tes de satélites espaciales, son una fuente importante de información para la gestión y toma de decisiones dentro del sector agrícola y forestal como lo son las fotografías aéreas.

Es esencial prestar mucha más atención a las técnicas de teledetección que se manifiestan útiles y eficaces para la gestión forestal en el ámbito geográfico local, dado que las decisiones locales pueden ser más importantes que los resultados de una planificación genérica a pequeña escala realizada más en términos burocráticos.

La evolución experimentada por la teledetección desde las plataformas aéreas hasta los satélites espaciales es un paso muy significativo respecto a la creación de una base de datos de recursos terrestres más completa que la existente hoy en día. Para conseguir este objetivo, es imprescindible resolver muchos problemas relativos a la continuidad en la adquisición de los datos, su oportunidad y adaptación a las necesidades actuales, costo, etc.

5. Aplicaciones operacionales de la teledetección

El amplio conjunto de imágenes obtenidas desde plataformas aéreas y espaciales, permiten la obtención de informaciones acerca de las circunstancias ecológicas y socioeconómicas de la superficie terrestre.

Esta información debe ser correctamente localizada geográficamente (información normalmente ausente en las imágenes de teledetección), y además es necesario tomar en consideración una cierta información temática complementaria. Los sensores remotos proporcionan imágenes con una distorsión espacial despreciable que se pueden emplear para estudiar y comparar áreas, siempre que la resolución del satélite permita la identificación del fenómeno temático en cuestión.

Atendiendo a los datos aportados por Allan, la teledetección a partir de las imágenes de satélite no tiene restricciones en las zonas mediterráneas desde el punto de vista de la resolución, del medio ambiente y del costo, para la mapeación de grandes áreas en escalas comprendidas entre 1/100.000 y 1/250.000, debido esencialmente a que se trata de áreas libres de nubes durante muchos días al año. (Allan, 1977)

En esta zona del Mediterráneo, Van Genderen ha realizado clasificaciones de usos de la tierra, basado en imágenes LANDSAT (Van Genderen y Lock, 1976) en el sudeste de España (Murcia) y Cole analizó los problemas que planteaba la resolución de los sensores en áreas

del oeste de España, como la región de Extremadura. (Cole, 1974: 243-398)

Los datos que los sensores remotos proporcionan son especialmente necesarios en aquellas partes del mundo donde el inventario y seguimiento de los cultivos y la vegetación natural, es inadecuado para una planificación racional de los usos de la tierra y los recursos naturales. Aunque las aplicaciones más apropiadas de los satélites parecen ser que deben localizarse en los países semiáridos en vías de desarrollo, los estudios más profundos y completos relativos a este tipo de imágenes se han desarrollado en los Estados Unidos en aplicaciones referentes a problemas agrarios, forestales y de usos de la tierra cultivable y no cultivable.

5.1. Proyecto LACIE

Uno de los primeros proyectos de carácter internacional de más reconocido prestigio y profundamente elaborado que se ha desarrollado hasta la fecha, es el proyecto norteamericano LACIE (Large Area Crop Inventory Experiment), cuya meta consistió en la evaluación de la producción anual de trigo en los Estados Unidos, la desaparecida Unión Soviética, Sudamérica e India, sobre la base de la información adquirida a través del LANDSAT.

En lo concerniente a los Estados Unidos, se obtuvieron estimaciones de la producción de trigo con un 90% de precisión respecto a los métodos de estimación convencionales. En la ex Unión Soviética los resultados no pudieron contrastarse, y en la India la abundante fragmentación de los cultivos en parcelas impidió la realización de estimaciones estadísticas fiables.

5.2. Sistema EDITOR

Desde 1975, el E.S.C.S. (Economics Statistics and Cooperatives Service) del USDA (U.S. Department of Agriculture) realiza trabajos de estimación en las zonas cultivadas empleando el sistema informático EDITOR. Este sistema usa datos de los satélites LANDSAT 2 y LANDSAT 3, junto con información procedente de encuestas realizadas por entrevistadores del USDA en ciertas zonas de muestreo.

El método estadístico utilizado se basa en un estimador de regresión, en lugar de usar un estimador de expansión directa como se hace en las estadísticas convencionales. Las estimaciones se han rea-

lizado en el ámbito de Estado, de Distrito (conjunto de Condados) y de Condado.

En el estudio de Estado y de Distrito, las estimaciones realizadas usando datos LANDSAT y encuestas de forma combinada, son bastante más precisas que las estimaciones convencionales realizadas por expansión directa a partir de los datos de las encuestas (se han llegado a conseguir estimaciones trece veces más exactas).

Los Estados analizados a partir del sistema EDITOR han sido: Illinois (maíz y soja); Kansas (trigo); Iowa (maíz y soja) y Arizona (algodón y alfalfa).

5.3. Programa AGRISTARS

Dentro de los programas de investigación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, se ha destacado el denominado AGRISTARS (Agriculture and Resource Inventory Surveys Aerospace Remote Sensing), diseñado para la evaluación y valoración de las aplicaciones de la tecnología aeroespacial en los campos agrícola y forestal.

Los objetivos concretos de AGRISTARS incluyen el desarrollo, comprobación y evaluación de los procedimientos necesarios para la adopción de la tecnología espacial de sensores remotos, de cara a:

- Mejorar la capacidad del USDA para la obtención rápida de una información eficaz sobre los cambios producidos en las condiciones de cultivos.
- Disponer de predicciones más objetivas y exactas sobre la producción de los grandes cultivos.
- Mejorar el inventario y valoración de los recursos naturales.
- Valoración del costo de viabilidad y oportunidad de integrar los datos de teledetección en las bases de datos existentes.

Para conseguir los objetivos propuestos por AGRISTARS se han definido proyectos específicos cuya misión es mejorar la información del USDA sobre las siguientes cuestiones:

1. Valoración rápida de cosechas.
2. Pronósticos sobre la producción de los cultivos en el extranjero.
3. Desarrollo de modelos de rendimiento de cultivos.
4. Cultivos autóctonos.
5. Contenido en humedad del suelo.
6. Inventario de recursos naturales.

7. Conservación del medio ambiente y contaminación.
8. Investigación de apoyo.

5.4. Proyecto MIMPT

Otro gran proyecto de investigación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos fue el denominado M.I.M.P.T. (Multiresource Inventory Methods Pilot Test) cuya meta principal fue comprobar, evaluar y transferir la nueva tecnología de sensores remotos (basada fundamentalmente en los satélites) al Servicio Forestal (Forest Service), para de esta forma mejorar los inventarios de recursos naturales y la gestión de las tierras en los procesos de planificación.

Este objetivo de tipo general se podría concretar en el desarrollo y comprobación de un sistema de información que permitiese realizar clasificaciones óptimas del territorio basadas en las siguientes informaciones:

1. Una verdad terreno constituida por:
 - a) Variables continuas.
 - b) Variables discretas.
2. Datos de teledetección que posean:
 - a) Variabilidad estacional.
 - b) Diversidad espectral.
 - c) Diversidad textural.
 - d) Cambios espaciales.
 - e) Variabilidad anual.
3. Una base de datos que incluya:
 - a) Límites administrativos.
 - b) Cartografía de tipos de suelo.
 - c) Cartografía de usos de la tierra.
 - d) Cartografía de tipos de vegetación.
4. Un modelo topográfico del terreno.
5. Datos meteorológicos.

6. Principales aplicaciones forestales de la teledetección

La teledetección a partir de los sistemas de satélites de recursos naturales, desempeña un papel primordial en lo que se refiere a la protección y gestión racional de los recursos naturales del planeta. En el campo de aplicación del ámbito forestal, es preciso una optimiza-

ción de la gestión económica y una minimización de los riesgos ecológicos debidos a sus características especiales:

- Formación múltiple de los montes.
- Crecimientos lentos y períodos largos para su beneficio.
- Áreas de gran extensión.
- Equilibrio ecológico amenazado.

Pero, dicha optimización requiere periódicamente una revisión de la planificación, y en consecuencia, una actualización de todos los factores que entran en juego en el proceso de planificación (distribución de los tipos de bosque, estado sanitario, red de acceso, etc.).

Los datos de teledetección, y en mayor medida las fotografías aéreas, son una de las mayores fuentes de información en el proceso anteriormente descrito. Las principales aplicaciones forestales de la teledetección se pueden encuadrar en las siguientes áreas:

1. Cartografía de los tipos de cubierta forestal.
2. Aplicaciones al inventario forestal.
3. Estudio de los incendios forestales.
4. Patología forestal.

6.1. Cartografía de los tipos de cubierta forestal

Los trabajos empíricos que mejores resultados han dado en esta apartado se han desarrollado esencialmente en Canadá y en los Estados Unidos. El Centro de Investigaciones Forestales de Lauréntidas (Canadá) ha realizado una cartografía de la vegetación actual en la zona de Québec sobre una extensión superior a 80.000 millas cuadradas, en el marco de un inventario biofísico preliminar a futuras ordenaciones hidroeléctricas. Mediante técnicas de clasificación supervisada, se han distinguido las siguientes clases de cubierta vegetal:

- 1) Coníferas densas.
- 2) Coníferas claras.
- 3) Landas arboladas.
- 4) Landas abiertas.
- 5) Frondosas.
- 6) Masas mezcladas.
- 7) Turberas.

La cartografía obtenida fue relativamente precisa y bastante comparable con los mapas temáticos existentes sobre la zona, excepto en el caso de las masas mezcladas, donde la precisión disminuía de forma considerable. Heller llegó a la conclusión de que los datos del LANDSAT podían servir como fuente de datos en un primer nivel de información, en el caso de inventarios polietápicos de bosques y praderas. (Heller, 1975)

Aldrich señalaba que las tierras forestales pueden separarse de las no forestales y las superficies de agua con una precisión del 95%, y los bosques y praderas son separables en el ámbito regional en un rango que oscila entre el 92% y el 99% de los casos.

Las experiencias realizadas en Canadá y en los Estados Unidos demuestran que los datos del LANDSAT diferencian bien los terrenos forestales de los no forestales, pero existen dificultades respecto a la distinción entre coníferas y frondosas, aunque también debe especificarse que la mayoría de los resultados negativos se han dado en experiencias que no usaban imágenes diacrónicas.

Con dos o tres pasadas del satélite se puede llegar a la definición del perfil estacional de las cubiertas vegetales desde un punto de vista espectral, y luego extrapolar los resultados obtenidos al conjunto de toda la imagen empleando una serie de muestras de estudio.

De una forma general, se puede decir que la precisión en las clasificaciones de los tipos de cubierta se mejora cuando se combinan dos o más imágenes LANDSAT pertenecientes a distintas fechas, siendo muy importante la selección de las imágenes en el tiempo. Kalensky, en un estudio realizado en Canadá, empleó doce bandas espectrales (cuatro bandas de cada fecha), y comparó los resultados de dicho estudio con los obtenidos al emplear sólo cuatro bandas (Kalensky, 1974). La precisión para las clases agrícola, frondosas y coníferas fue del 83 % en el primer caso, y del 68% al 81% en el segundo.

Lachowski realizó otro estudio interesante acerca de la distribución geográfica de los recursos forestales en las más de siete mil islas que comprenden el archipiélago filipino, a escala 1/500.000. Los tipos de cubierta forestal que fueron considerados son:

- 1) Cubierta completa de Dipterocarpa (Philippine mahoganies).
- 2) Cubierta parcial de Dipterocarpa.
- 3) Bosque de mangrove.
- 4) Bosque de alta montaña.
- 5) Tierras no forestales (marismas, marjales, cuerpos de agua).

Los resultados de este estudio demostraron que el uso de los datos LANDSAT, fueron en un momento la única vía posible para efec-

tuar un control eficaz de los recursos forestales en zonas de complejidad y extensión de Filipinas.

Dentro del ámbito europeo, el proyecto AGRESTE, patrocinado por la entonces Comunidad Económica Europea, investigó la mapificación de bosques naturales de montaña (hayedos y castaños), y se han obtenido precisiones en la clasificación del orden del 60%.

También se investigó la identificación e inventario de masas de abeto de Francia, con resultados parcialmente satisfactorios; y la identificación y clasificación en tipos de masas de choperas en Italia y Francia. El estudio pormenorizado de clases de edad avanzada parece factible, y los resultados mejoraron sensiblemente cuando se realizó un análisis multitemporal. Estas experiencias continuaron posteriormente en Italia por Lapietra y Cellerino sobre áreas extensas. (Lapietra y Cellerino, 1980)

Finalmente, Riom realizó trabajos acerca de las masas de pino marítimo de la región de Las Landas francesas, y aunque este tipo de monte ofrece ventajas para ser estudiado mediante técnicas de teledetección (relieve poco importante, parcelas grandes separadas por anchos cortafuegos, edad y densidad de la población homogénea en amplios tramos), su monoespecificidad también generó ciertas dificultades a la hora de discriminar los diferentes estados de la masa de pino marítimo. Se comprobó que la teledetección clasifica bien las poblaciones de frondosas y coníferas, detecta las cortas a matarrasa (localización y superficie), y es una técnica que informa sobre la evolución de las claras, permitiendo una vigilancia anual y a bajo costo, lo que presenta un gran interés para la gestión forestal en el ámbito regional.

Respecto a la clasificación de las poblaciones en tres o cuatro clases de edad, pueden presentarse dificultades. En el caso de Las Landas, donde las masas son relativamente claras, es difícil de realizar, pues existen perturbaciones espectrales ocasionadas por las labores culturales.

6.2. La teledetección y los inventarios forestales

En la estimación de volúmenes de madera, las imágenes LANDSAT tienen menos que ofrecer, y su principal contribución consiste en permitir realizar una buena estratificación del monte que será muestreado posteriormente por otros métodos. Así, productos fotográficos de buena calidad obtenidos electrónicamente a partir de imágenes digitales LANDSAT, se pueden emplear de forma conjunta con

productos fotográficos convencionales en la realización de dicha estratificación.

Hacia 1974, el Ontario Center for Remote Sensing realizó un estudio para estimar el volumen de madera en una zona de 32 Km. de radio alrededor de la ciudad de Attawa Piskat, situada en la región de la Bahía de Hudson. Para realizar este estudio, se emplearon fotografías aéreas a escala 1/24.000 que cubrían un 35% del área total de estudio e imágenes LANDSAT de toda la zona. En esta área de Canadá las condiciones de topografía, hidrología, clima y vegetación son muy homogéneas, y esta circunstancia permitió extrapolar la información recogida de las fotografías aéreas al resto de la zona.

La baja resolución de las imágenes LANDSAT sólo permitía realizar una clasificación de los principales tipos de vegetación, pero la combinación de los datos LANDSAT con la información extraída de las fotografías aéreas permitió la realización de estimaciones del volumen de madera.

La distribución y extensión de la cubierta forestal se determinó a partir de las imágenes LANDSAT, empleando un analizador de imágenes VP-8, y los valores promedio de existencias maderables en m/ha para el área forestal se determinaron interpretando las fotografías aéreas y empleando tablas de cubicación. El volumen total de madera se obtuvo multiplicando las cantidades anteriormente citadas.

Esta metodología puede darnos estimaciones del volumen de madera rápidas, económicas y suficientemente precisas en aquellas zonas forestales donde apenas existen fotografías aéreas a gran escala (Jano, 1975).

6.3. Estudio de incendios forestales mediante teledetección

Una de las aplicaciones más operativas en materia de teledetección forestal es la relativa a los incendios forestales. La aplicación de la técnica de componentes principales sirvió para la localización de las especies forestales más susceptibles de ser afectadas por los incendios, lo que puede permitir la realización de una vigilancia más intensa de las zonas más peligrosas.

Desde 1977, la O.P.I.T. (Comisión Interministerial Francesa para el desarrollo de la teledetección) tiene un programa de estudio sobre teledetección e incendios forestales, cuyo objetivo es la evaluación de las posibilidades que ofrecen las imágenes LANDSAT para una mejor comprensión de los incendios forestales en la región mediterránea, así

como la comparación de estos datos con las informaciones adquiridas a través de métodos más convencionales. (Husson, 1980)

La evaluación de las superficies incendiadas es una operación difícil. Generalmente, estos trabajos son realizados por los métodos convencionales-partes de incendio que conducen a una sobreestimación de las superficies más o menos importantes; así el incendio de Aspres, el mayor incendio forestal francés de 1976, se estimó en 6.600 ha por la DDA de los Pirineos Orientales y en sólo 4.100 ha mediante teledetección.

Estas diferencias se deben a las modificaciones en el parámetro del fuego, pero esencialmente a que mediante teledetección sólo se tienen en cuenta las superficies realmente destruidas, sin ser consideradas las zonas simplemente recorridas por las llamas. La resolución espacial de las imágenes LANDSAT es de 0,4 ha, pero para distinguir correctamente un objeto, éste debe cubrir de seis a diez *píxeles*. En consecuencia, los incendios con una superficie inferior a 3 ó 4 ha generalmente no son apreciables en las imágenes LANDSAT.

La extensión mínima a partir de la que se pueden realizar evaluaciones de la superficie quemada con una buena precisión depende del tipo de vegetación afectado, de la antigüedad del incendio, de la topografía y del contraste entre la zona quemada y el medio ambiente circundante. Esta extensión mínima se puede fijar en 10 ha para cualquier incendio forestal.

Normalmente, los incendios producidos en montes altos se perciben mejor que los ocurridos en matorrales y zonas arbustivas (garriga, maquis). Las zonas quemadas suelen tener una gran heterogeneidad espectral que aumenta con el transcurso del tiempo; por esta razón el satélite sólo permite distinguir bien los incendios ocurridos en el período de un año.

Los incendios que afectan a vegetaciones parecidas tienen firmas espectrales similares, lo que obliga a reagruparlas en dos grandes categorías: incendios en montes altos e incendios en matorrales leñosos (se ha detectado que los incendios de estos últimos no son perceptibles si la imagen es de una fecha tres o cuatro meses posterior al incendio).

La respuesta espectral de todos los objetos presentes en un *pixel* influye en la respuesta espectral del mismo. Por ello, un incendio sólo será perceptible cuando el fenómeno fuego tenga una respuesta suficientemente fuerte. El fenómeno fuego responde esencialmente a la presencia de árboles y matorrales calcinados: por lo tanto, la percepti-

bilidad del incendio vendrá en función de la densidad de árboles quemados.

Los bosques incendiados suelen aparecer como zonas de sombra debido a que los troncos quemados absorben el infrarrojo, por lo que el contraste entre bosques incendiados y no incendiados está muy marcado en la zona del infrarrojo.

En el estudio de los incendios forestales, la fecha ideal para elegir la imagen LANDSAT parece ser finales de septiembre o comienzos de octubre, pues es cuando suele acabar la temporada de los grandes incendios forestales.

Por último, debemos destacar que los datos LANDSAT también se han venido empleando respecto a los incendios forestales bajo una perspectiva muy diferente: la de contribuir al establecimiento de cartografías de tipos de combustible, integradas en modelos matemáticos de previsión de la conducta del fuego. Un proyecto de este tipo fue realizado en el Lolo National Forest de Montana (Estados Unidos) por Shasby, aportando unos resultados satisfactorios. (Shasby, 1981)

La cartografía de tipos de combustible se llevó a cabo a través de un proceso clasificatorio bietápico. En la primera clasificación se usaron sólo datos LANDSAT para la obtención de clases espectrales, que son posteriormente clasificadas independientemente en clases de combustible, a través de una selección de variables fisiográficas. Este proyecto es un buen ejemplo de la integración de bases de datos LANDSAT y geográficos.

6.4. Aplicaciones forestales de la teledetección en España

La aplicación a cuestiones forestales de las imágenes de satélites y en concreto del LANDSAT fueron muy reducidas en España hasta mediados de la década de los '80. Se hizo entonces necesaria la realización de trabajos pilotos que permitiesen apreciar las posibilidades y limitaciones concretas de las imágenes LANDSAT en la variada geografía forestal española, y conocer a qué problemas concretos nos enfrentaríamos en el futuro inmediato (falta de resolución, relieve acentuado, etc.).

Se estimó que el uso de imágenes vía satélite en el ámbito forestal debía generalizarse. No debía pensarse sólo en proyectos específicos y de alta complejidad, sino que progresivamente la información ofrecida por los satélites debía incorporarse, bajo formas más o menos elaboradas, al conjunto de datos disponibles por el gestor de un área determinada, al igual que ocurrió con la fotografía aérea convencional.

Entre los asuntos concretos en que los datos ofrecidos por los satélites LANDSAT y SPOT podían, no sólo demostrar su utilidad, sino facilitar resultados difícilmente obtenidos por métodos más convencionales, se pueden nombrar los siguientes:

1. Seguimiento de las masas naturales o de repoblación de especies de crecimiento rápido o semirápido (pino marítimo, pino insignis y eucaliptus en el Norte y Noroeste, eucaliptus en el Suroeste). Estas masas evolucionan muy rápidamente, no sólo en sus existencias, sino en las superficies ocupadas. En un período superior a cinco años se puede considerar anticuado un vuelo que cubra estas áreas; por otro lado, su fotointerpretación es difícil, y la cartografía resultante deficiente debido al pequeño tamaño de las parcelas.
2. Seguimiento e inventario de choperas. En otros países, como Italia, se han realizado experiencias que mostraron la utilidad de los datos LANDSAT para distinguir tipos de masa según cada cubierta (edad), siendo buenos los resultados en las masas cercanas a la madurez.
3. Evaluación de incendios forestales. Las imágenes de satélites aparecen como insustituibles para el cálculo rápido, económico y fiable de superficies quemadas por su periodicidad y actualidad.
4. Estimación y localización de superficies afectadas y daños ocasionados en masas atacadas por la procesionaria u otras plagas y enfermedades.
5. Mejora y actualización de la cartografía forestal a media o pequeña escala, con la posibilidad de incorporación de información sobre las formaciones vegetales no arbóreas.

En definitiva, fueron útiles todos aquellos trabajos relativos al medio ambiente natural en zonas donde se producen cambios rápidos y difícilmente controlables, pudiéndose citar proyectos relativos a: estudios de dehesas, mapificación de cubiertas de nieve, evaluación de procesos erosivos, estudios de zonas inundables, mapas de usos actuales de la Tierra, impactos de actividades humanas en el paisaje, etc.

7. VIGÍA 2000 por satélite. Sistema de detección inmediata de incendios

En España, la llegada del verano va acompañada de la inexorable y fatal compañía de los incendios forestales, una cruel plaga devastadora que año tras año destruye miles de hectáreas de arbolado, pastos

y cultivos, de muy difícil y lenta recuperación. La repercusión de los efectos ambientales en las zonas quemadas es tremendamente negativa, alcanzando algunas veces las fatalidades de estos hechos hasta la pérdida de vidas humanas y materiales. Existen dos factores básicos en la capacidad de destrucción propia de un incendio forestal que se deben analizar de forma detallada:

1. Los medios humanos y técnicos, en actuación coordinada, empleados en su extinción y la rapidez con que éstos se pongan en marcha y acceden al foco generador del incendio.
2. La rapidez en la detección del incendio, de forma que se pueda realizar la intervención en su extinción antes de que haya alcanzado una extensión considerable de terreno.

Todo aquel método, sistema o herramienta que haga posible la mejora de la detección inmediata o la extinción de cualquier incendio tendrá cruciales beneficios ecológicos y evitará la pérdida de vidas humanas de amplio alcance y perjuicios ecosociales.

La empresa TELEFÓNICA SISTEMA DE SATÉLITES (TSS), perteneciente al grupo TELEFÓNICA DE ESPAÑA, S.A., trabajó e integró un sistema completo de detección inmediata de incendios vía satélite cuyo uso pone a entera disposición de las instituciones públicas competentes.

7.1. Descripción del sistema VIGÍA 2000

La estructura y configuración de este sistema permite la detección inmediata de incendios, en estado conocido como de “conato”, de una extensión de 1 a 2 m (en función de la distancia) y desde un margen de hasta 20 kilómetros, y realiza la transmisión vía satélite en tiempo real de señales de alarmas de presencia de potenciales incendios e imágenes de video de la evolución del suceso. El conjunto de estas alarmas e imágenes, recibidas de forma inmediata en un Centro de Vigilancia y Control de Incendios, permiten la rápida organización de los elementos logísticos imprescindibles para la extinción antes, de que el incendio alcance magnitudes insospechadas.

Este sistema está basado en la ubicación, en una serie de puntos estratégicos de la zona que se debe vigilar, de un conjunto de unidades de vigilancia compuestas por dos sensores motorizados y una unidad de proceso de señales, más una Estación Terrena VSAT de transmisión por satélite. En el Centro de Vigilancia y Control de Incendios se instala una Estación Central de una red VSAT, que va recibiendo las alarmas de todas las Unidades de Vigilancia y las imágenes

de video generadas por éstas, y realiza la entrega a una Unidad de Presentación sobre cartografía digital y a un conjunto de monitores que presentan de forma gráfica la localización y evolución del incendio.

El Sistema se compone de tres partes en su configuración esencial:

A) “Unidades de Vigilancia”

Esta parte se compone de una torre de vigilancia giratoria, en la que se integra una cámara sensora de rayos infrarrojos, una cámara de video y un sistema de control de la Unidad de Vigilancia. La función de la cámara sensora de infrarrojos se centra en la detección de focos de calor más intensos que un nivel determinado predefinido, y la cámara de video se encarga de la filmación permanente de imágenes del foco de calor que la primera ha detectado.

La torre de vigilancia realiza continuos giros barriendo un ángulo de 360° en acimut y un ángulo variable en elevación, en función de las condiciones orográficas del horizonte. El alcance máximo de detección varía entre 10 y 20 kilómetros para fuegos de una extensión de 1 a 2 m. El tiempo en el que se refresca la información varía entre los 3 y 8 minutos, en función del ángulo de elevación y del acimut que se debe supervisar.

Desde el mismo instante en que el sistema de procesamiento da señal, a partir de los datos suministrados por la cámara de infrarrojos detecta un nivel de calor superior al umbral prefijado en una dirección determinada, y envía una alarma al Centro de Control. De forma simultánea, la torre de vigilancia detiene su giro y la cámara de video empieza la grabación en la dirección del foco de calor, proporcionando al Centro de control imágenes reales del foco de calor.

En el armario batidor se alojan los equipos de proceso digital de las señales captadas por ambas cámaras, los equipamientos de comunicaciones procesadores del protocolo de la aplicación, y los motores que hacen girar las cámaras. Todo este conjunto de elementos se integran de forma organizada, y están concebidos para funcionar al aire libre y diseñados para ser alimentados por paneles solares.

B) “Red VSAT de Comunicaciones por Satélite”

La extendida y útil Red VSAT (Very Small Aperture Terminals), es el medio de comunicación entre las Unidades de Vigilancia y el Centro

de Control. En las unidades denominadas de Vigilancia, se realiza la instalación de una Estación Terrena VSAT (ET VSAT) equipada con una antena elipsoide de 0,95 metros de diámetro equivalente, y un transceptor de 1 W. en el foco de la elipse. Dado el bajo consumo de energía de la ET VSAT, puede ser alimentada por una red de paneles solares de pequeñas dimensiones.

La ET VSAT usada dota al sistema de un canal de comunicaciones vía satélite bidireccional a 19,2 Kbit/s entre las Unidades de Vigilancia y el Centro de Control, con suficiente capacidad para cursar señales de alarma de incendios, imágenes digitalizadas del foco de calor (a 9,6 ó 14,4 Kbit/s) e información de supervisión, control y reconfiguración de los equipos de la Unidad de Vigilancia. El satélite empleado es el HISPASAT 1A, que proporciona unos adecuados niveles de potencia y sensibilidad sobre el conjunto del territorio español.

En el Centro de Control se encuentra una Estación Central o MiniHub, formada por una antena parabólica de 1,8 metros y un transceptor de 1 W. que recibe las señales procedentes de las ET VSAT y las entrega, perfectamente identificadas, al Centro de Control. También realiza la transmisión, de forma ordenada e identificada, de las señales del centro de control con destino a las ET VSAT.

Todas las redes VSAT implantadas con estos sistemas son supervisadas y se muestran operativas desde el Centro de Control de Redes por Satélite (CCRS) que TELEFÓNICA SISTEMAS DE SATÉLITE tiene en Madrid, atendido de forma permanente por personal especializado en Comunicaciones por Satélite.

El Servicio de operación y mantenimiento que hace posible la explotación de estas redes se conoce como MICRONET, y forma parte de la gama de servicios de comunicaciones por satélite de TELEFÓNICA DE ESPAÑA, S.A. Algunas de las ventajas del uso de una Red VSAT como vehículo de comunicación del sistema son las siguientes:

- Alta calidad y disponibilidad del enlace.
- Nulo impacto medioambiental (alimentación por paneles solares).
- Ausencia de interferencias y de necesidad de asignación de frecuencias.
- Control centralizado de la Red.
- Flexibilidad de asignación de capacidad espacial.
- Eliminación de cortes inesperados en la comunicación debidos a problemas con los enlaces de transmisión.

C) Centro de Vigilancia y Extinción de Incendios (Centro de Control)

En este Centro de Control permanece la aplicación software que recibe en tiempo real todas las alarmas y las imágenes de video, realiza un procesado y presentación, por un lado en un soporte de cartografía digital que hace posible la localización exacta del foco de calor, y por el otro, muestra las imágenes de video recibidas en uno o varios monitores, lo que permite distinguir la naturaleza y evolución del incendio y discernir de forma rápida si se trata de un incendio real o de una falsa alarma.

7.2. Unidades de vigilancia

Las Unidades de Vigilancia forman esencialmente los elementos remotos de un Sistema de Detección Automática de Incendios mediante imagen infrarroja, complementado con visión normal de la escena de interés. La Unidad de Vigilancia se divide en 4 subsistemas:

- Subsistema de sensorización.
- Subsistema de control.
- Subsistema de comunicación.
- Subsistema de supervisión y alarmas.

7.2.1. Subsistema de sensorización

La parte principal componente de este subsistema está constituida por una cámara de TV de imagen infrarroja de alta sensibilidad. Se trata de una cámara de nuevo diseño, totalmente en estado sólido (sensor CCD) y de bajo consumo.

Además de la cámara, existe otra de imagen normal de alta sensibilidad (válida para el día y la noche) también en estado sólido y de bajo consumo. Las dos cámaras están solidariamente fijadas a un eje de giro, que está asociado a un decodificador de posición mediante el que se conoce en cada momento los ángulos de posición de las cámaras o, lo que es lo mismo, la dirección del eje óptico de las mismas.

El sistema de cámaras procede a un barrido continuo de un área programada por el operador. Durante este movimiento digitaliza las imágenes proporcionadas por la cámara de infrarrojos; así buscamos continuamente un foco caliente. El movimiento de las cámaras será en zig-zag comenzando por el ángulo superior izquierdo del rectángulo

que limita el área de barrido programada, y de arriba hacia abajo para terminar en el ángulo inferior derecho; en este punto procederá a la inversa, de abajo hacia arriba para acabar en el ángulo superior izquierdo de nuevo. El movimiento será horizontal hacia izquierda y derecha, y vertical en pasos con sentido hacia arriba o abajo según el punto de partida, como se ha señalado.

El operador de control puede pasar a modo manual cuando estime oportuno, y en ese momento deja el barrido y queda centrado en la posición en que se encontraba cuando recibió la petición.

7.2.2. Subsistema de control

Este subsistema está igualmente ubicado en la Unidad de Vigilancia. Sus funciones básicas son las siguientes:

- Control del movimiento de las cámaras y barrido de un área de detección determinada.
- Digitalización de la imagen que es ofrecida por cualquiera de las dos cámaras.
- Análisis de la imagen digitalizada de infrarrojos para la detección de focos calientes.
- Transmisión de las imágenes digitalizadas de cualquiera de las cámaras.
- Detección e indicación de alarmas.

Para la realización de todas estas funciones el sistema se comunica mediante una red VSAT a través de la que el operador tendrá la posibilidad de programar los distintos parámetros de control para la ejecución de todas las funciones descritas. A continuación, vamos a repasar de forma más detallada algunas de las funciones, alarmas, y parámetros programables, así como todos los modos de operación.

7.2.3 Configuración

Desde el mismo instante de la puesta en marcha del sistema, existen una serie de parámetros ligados a la instalación o a la zona de supervisión que hay que introducir como datos (configuración de inicio). Estos son los siguientes:

- Nivel de umbral de detección. Corresponde al valor con el que se realiza la comparación de la lectura de la imagen digitalizada para

detectar un posible foco caliente. Este valor se introduce por teclado.

- Área de umbral para detección. Es el área umbral donde se constata la persistencia de un foco caliente para su validación. También se introduce por teclado.
- Topes de barrido horizontal y vertical. Para la programación del valor de los topes horizontales y verticales, el operador coloca el cuadro de visión de la cámara en el ángulo superior izquierdo del rectángulo que delimita la zona de barrido; a continuación indica al sistema la memorización de dicha coordenada. Finalmente, se coloca el cuadro de visión de la cámara en el ángulo inferior derecho del rectángulo que acota la zona de barrido, para después señalar al sistema la memorización de la coordenada.
- Pase de barrido vertical. El operador de control introduce el teclado un valor indicativo del solape de imagen en vertical, que señala al sistema el paso de barrido vertical.
- Zoom. El operador ajusta el zoom de la cámara hasta un valor determinado y señala su programación en el sistema; esta posición será la que tomará el zoom de la cámara tras una previa colocación.
- Foco. El operador ajusta el foco de la cámara hasta un valor determinado y señala su programación en el sistema; esta ubicación será tomada por el foco de la cámara tras un preposicionamiento.
- Zonas Excluidas. El operador señala al sistema el número de la zona de exclusión que se debe programar; luego coloca el centro del cuadro de visión de la cámara en el ángulo superior izquierdo del rectángulo que delimita la zona de exclusión.
- Coordenadas reales. El operador coloca la cámara en dos puntos cardinales distintos, indicando que tome la información tras cada ubicación.
- Tablas de distancia. El sistema contiene unas tablas indicativas de la distancia de cada posible foco caliente susceptible de ser detectado. Una vez localizado, un foco caliente de los parámetros de la alarma que se entrega será la distancia a ese foco, que se obtendrá a partir de las coordenadas dadas por el sistema.

7.2.4. Monitorización y control

El control local de cada Unidad de Vigilancia se realiza mediante un programa residente en la CPU de configuración, control y proceso.

Esta CPU tiene montada una tarjeta digitalizadora en la que la imagen de video procedente de la cámara IR se digitaliza. Una vez realizada esta operación, la imagen es sometida a un proceso de análisis que determina la posibilidad de que se haya iniciado un incendio.

A la CPU de proceso le llegan los datos de posición de la cámara en simultaneidad con la imagen. La producción de una alarma de incendio actúa sobre una salida del sistema que controla una Estación Terrena de satélite. A continuación pasará a modo manual de operación, para que las cámaras de la Unidad de Vigilancia puedan ser gobernadas de forma remota por el Operador Vigilante.

7.2.5. Control del movimiento de cámaras

El Subsistema de Control se encarga también del movimiento automático de la cámara de IR en el margen de variación angular fijado por el procedimiento de configuración (cuando ese procedimiento finaliza, el ordenador hace la transferencia de datos de variación angular correspondientes a las zonas a vigilar).

Cuando se produce una alarma de incendio, el sistema transfiere los datos de posición correspondientes a la zona donde se ha producido el incendio.

7.2.6. Subsistema de transmisión

Este Subsistema está constituido en las Unidades de Vigilancia por una Estación Terrena VSAT de Comunicaciones por Satélite, de pequeño diámetro (90 cm.), que forma parte de una Red VSAT y que facilita un canal de comunicaciones por satélite con capacidad bidireccional permanente, suficiente para cursar el tráfico que se genera entre cada Unidad de Vigilancia y el Centro de Vigilancia y Control de Incendios, tanto cuando se envían alarmas como cuando se envía señal de video digitalizada.

7.2.7. Subsistema de supervisión y alarma

Cuando se acaba cada barrido este Subsistema comprueba automáticamente el correcto funcionamiento de su cámara de infrarrojos; para ello procede a la generación y detección de un foco caliente externo. En caso de anomalía dará la alarma de que la cámara de infrarro-

jos funciona incorrectamente, y el sistema pasará a modo manual de operación.

Detección de foco caliente. Esta alarma contiene las coordenadas reales (cartográficas) del foco caliente detectado, así como la distancia del mismo al sistema, y procederemos a actuar sobre un contador externo a la salida prevista para esta función para posible activación de un transmisor. El sistema guarda la coordenada de la última alarma que ha sido detectada, para un posible preposicionamiento posterior sobre esta zona a petición del operador.

Alarma de generadores. Se activa si los sistemas generadores de energía no funcionan.

Alarma de baterías. Se da un aviso si la tensión de baterías ha bajado de un determinado valor.

7.3. Operatividad-alcance: factores limitativos

El Sistema de detección Automática de Incendios forestales VIGÍA 2000 por Satélite, está desarrollado y fabricado para trabajar de forma continua. Debido a la independencia de las ubicaciones del punto de observación y del Centro de Vigilancia y Control, se pueden vigilar las zonas más recónditas. Es importante destacar el bajo consumo de los equipos que componen la Unidad de Vigilancia, pudiendo ser alimentados sin ningún problema por paneles solares.

Para poder obtener el mayor rendimiento posible de las elevadas prestaciones que nos ofrece el equipo de la Unidad de Vigilancia (por ejemplo, a 20 Km. de distancia puede llegar a la localización de un fuego de 1 m.), es fundamental la correcta ubicación de ésta. Si el punto de vigilancia no se coloca en un lugar adecuado, será la orografía la que nos limite la visión de la extensión de terreno deseada. Así, el punto de observación, normalmente, deberá estar situado en zonas de gran altura para no ver dificultada su visión por montañas o colinas vecinas y dominar mayor extensión de terreno.

8. Conclusiones

La teledetección ofrece grandes posibilidades para la realización de progresos en el conocimiento de la naturaleza, aunque todavía no se ha logrado todo lo que de ella se esperaba, debido a que se deben realizar perfeccionamientos en el nivel de resolución espacial, espectral y temporal de los datos.

Además, es necesario un mayor rigor científico en la interpretación de los resultados obtenidos, tratando de no extraer conclusiones definitivas de los estudios medioambientales realizados mediante técnicas de teledetección.

Los modelos que se elaboran para interpretar los datos de teledetección, deberán tener como objetivo eliminar los efectos ocasionados por la variabilidad en las condiciones de captación, la distorsión provocada por la atmósfera, y la influencia de parámetros tales como la posición del Sol, pendiente, exposición, y altitud.

El papel de los modelos consiste en poner de manifiesto los parámetros dominantes y en estudiar su variabilidad tanto espacial como temporal. La variabilidad espacial de los datos de reflectancia pondrá de manifiesto los efectos de escala, y la variabilidad temporal informará sobre la evolución biológica de los seres vivos.

Para que las informaciones recogidas a través de técnicas de teledetección sean válidas, se debe seleccionar cuidadosamente el momento óptimo para la adquisición de los datos y la combinación adecuada de bandas espectrales que mejor se adapte al objetivo perseguido.

La teledetección es una ciencia de carácter marcadamente multidisciplinar, en la que las informaciones que aportan los distintos implicados (ingenieros, biólogos, físicos, informáticos) tienen todas su interés y ayudan a una mejor comprensión de las imágenes procedentes de sensores remotos. Por este motivo deben estrecharse mucho más las relaciones entre los investigadores de sensores remotos (aspecto físico del problema: firmas espectrales), los usuarios de sensores remotos (aspecto aplicado del problema: Interpretación de imágenes, clasificación automática supervisada) y los ingenieros de sensores remotos (fabricación y calibración de instrumentos).

La teledetección presenta cualidades muy notables; entre ellas se pueden citar las siguientes:

1. Permite la adquisición de datos relativos al medio ambiente con una gran rapidez, poniendo a disposición de los investigadores un gran volumen de información que es susceptible de ser almacenada y analizada con posterioridad.
2. Da una visión sinóptica de los fenómenos naturales, y en el caso de la teledetección espacial, su visión global de la cubierta terrestre pone de manifiesto las interacciones que existen entre los distintos fenómenos o sectores de actividad.
3. La repetición de las observaciones permite dar un contenido dinámico a los estudios, y seguir la evolución de la ocupación del espa-

cio y de los fenómenos que allí se operan, pues las informaciones están perfectamente localizadas y por tanto se pueden comparar en el tiempo.

4. Tiene un costo menor que los sistemas de información convencionales en zonas de la tierra de poca accesibilidad y gran extensión, como suele ocurrir en los países en vías de desarrollo.

Por otra parte, la teledetección también tiene sus limitaciones debido a factores físicos, a la naturaleza de los fenómenos observables, a las condiciones meteorológicas, a la precisión o poder de resolución en el suelo y a la sensibilidad de los captores.

Las plataformas aéreas y los satélites espaciales proporcionan datos de un gran valor para determinar la localización de los tipos de cubierta y los cambios que en ella se producen con el transcurso del tiempo, pero la obtención de este tipo de datos presenta ciertos problemas que es conveniente considerar.

En primer lugar existen países que presentan dificultades climatológicas para la obtención de datos LANDSAT, incluso a lo largo de toda una estación. Esta circunstancia ha orientado hacia la tecnología de radar a países tales como Brasil y Nigeria, que poseen grandes problemas concernientes al inventario de recursos naturales en extensas zonas de su territorio. Las regiones del mundo que plantean menos problemas en este aspecto son las zonas áridas y semiáridas de África, Oriente Medio y Asia.

En segundo lugar, hay razones de tipo económico que también favorecen el empleo de los datos LANDSAT en las regiones anteriormente citadas. Efectivamente, en dichas regiones existen extensas zonas con una baja productividad agrícola, en las que no se justificaría la implantación de un sistema muy sofisticado de ordenación e inventariado de recursos naturales.

En tercer lugar la utilización de imágenes procedentes de aviones y satélites espaciales siempre tiene connotaciones militares, por lo que muchos gobiernos de países en vías de desarrollo muestran sus reticencias sobre la disponibilidad de imágenes LANDSAT relativas a su territorio y al futuro desarrollo de los programas espaciales.

Bibliografía

- Allan, J. A., 1977: "Land use changes in land use in the Ural area of Aegean Turkey", en *Monitoring Environmental Change by Remote Sensing*, Londres: Van Genderen and W. G. Collins, Remote Sensing Society.

- Cole, M. M., 1974: "Recognition and interpretation of spatial signatures of vegetation from aircraft and satellite imagery in Western Queensland, Australia" en *proceedings of the Frascati Symposium*, Paris: ESRD.
- Fleming, M. D. y Hoffer, R. M., 1979: "Machine processing of LANDSAT MSS data and DMA topographic data for forest cover type mapping" en *proceedings of the 1979 Symposium of Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Indiana: Purdue University, West Lafayette.
- Goillot, C.H., 1976: "Rapport de Synthese, C. R. Table ronde C.N.R.S" en *Ecosystems bocagers*, s/c: Rennes.
- González Alonso, F., y Cuevas Gózalo, J. M., 1982: *Los satélites de recursos naturales y sus aplicaciones en el campo forestal*, Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias.
- Heller, R. C., 1975: Evaluation of ERTS-1 data for forest and rangeland survey USDA for Serv. Res. Rap., PSW, Southwest For and Range, Exp. Stn, Berkeley, California.
- Husson, A., 1980: "teledetección de los incendios forestales en la región mediterránea" en *Les cahiers de l'OPIT*, Paris: s/e.
- Jano, A. P., 1975: "Timber volume estimate with LANDSAT-1 imagery, proceedings of the workshop on Canadian forest inventory methods", Ottawa: University of Toronto.
- Kalensky, Z., 1974: "ERTS thematic map from multirate digital images 2", in *Proc. Comm. VII, int. soc. Photogram*, Ottawa: Can. Inst. Surv.
- Lapietra, G. y Cellerino, G. P., 1980: "Elaborazione di immagini LANDSAT mediante il sistema ER-MAN II per un inventario della Pioppicoltura italiana", en *Cellulosa e Carta* 6, s/c: s/e.
- Maynard, P. T. y Strahler, A. H., 1981: "The logit classifier a general maximum likelihood applications", en *proceedings of the Fifteenth International Symposium on Remote Sensing of Environment, An Arbor*, Michigan: s/e.
- Megier, J., 1977: "Multi-temporal digital analysis of LANDSAT data for inventory of poplar planted groves in North Italy" en *proceedings of the International Symposium on image Processing, Interactions with photogrammetry and Remote Sensing, Graz*.
- Thompson, LL., 1979: "Remote Sensing using solid state array technology", en *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 45, s/c: s/e.
- Townshend, J. R., 1981: "The spatial resolving power of earth resources satellites", en *Progress in Physical Geography* 5 (1), s/c: s/e.
- Tricart, J. L., 1979: "Paisaje y ecología" en *Revue de Géomorphologie Dynamique*, XXVIII, 3, s/c: s/e.
- Shasby, M. B. y otros, 1981: *Broad area forest fuels and topography mapping using digital LANDSAT and terrain model. U.S.*, South Dakota: Department of Interior, Geological Survey, Sioux Falls.
- Swain, P. H., 1979: "A method for classifying multispectral remote sensing data using context. Processings of the 1979" en *Symposium on Ma-*

Francisco Sacristán Romero

chine Processing of Remotely Sensed. Data, Purdue Indiana: University, West Lafayette.

Van Genderen, J. L. y Lock, B. F., 1976: "Methodology small scale rural land use maps in semi-arid developing countries using orbital imagery" en *Final Report to NASA, investigation 9680*, London: Department of Industry.