

# INTEGRACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN ESPACIAL EN UN PROGRAMA ARQUEOGEOGRÁFICO

Ángel L. Rodríguez Alcalde\*

*RESUMEN.*- Este artículo presenta la estructura general de un proyecto arqueogeográfico que toma, como una de sus fuentes principales, datos obtenidos mediante sensores montados en plataformas espaciales de observación de la Tierra, esto es, la discriminación y descripción de la variabilidad del espacio será realizada a partir de la información que proporcionan las imágenes de satélite. Los datos así recibidos son el punto de partida de un Análisis Locacional definido en términos de un Sistema de Información Arqueo-Geográfica.

*ABSTRACT.*- The aim of this paper is to show the general structure of an archaeo-geographic project. Taking as one of its principal sources some data got through sensors situated in Earth observation satellite. Since this point of view, the discrimination and description of the variability of the space it will be realized with the information that digital images give us. Obtain this territorial information increase the precision, the quality and the quantity of data basics for huge regions. This data also allow the definition of the Locational Analysis as a Archaeo-Geographical Information System.

*PALABRAS CLAVE:* Teledetección, Arqueogeografía, Análisis Locacional, Resolución, Curva espectral, SIG.

*KEY WORDS:* Remote Sensing, Archaeo-geography, Locational Analysis, Resolution, Spectral Reflectance Curve, GIS.

## 1. INTRODUCCIÓN A LOS PROGRAMAS DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA

Ya desde el comienzo de la aeronáutica, existe una inclinación no poco importante a obtener una visión de la superficie terrestre al margen de la limitación humana de observación de la misma. Los globos aerostáticos primero, y los acroplanos posteriormente, fueron las plataformas utilizadas para realizar las primeras fotografías de la Tierra desde una perspectiva aérea.

La utilización de la fotografía aérea tiene un origen fundamentalmente militar —el reconocimiento de las posiciones enemigas— de modo que serán las dos guerras mundiales las que representarán saltos cualitativos en el desarrollo de los sistemas de captación de imágenes y darán lugar al nacimiento de las técnicas de fotorreconocimiento y fotointerpretación. En los años 40 de nuestro siglo, durante la II Guerra Mundial, se monta sobre una plataforma el primer sistema de película infrarroja —cuyo fin era

ayudar al bombardeo nocturno— si bien no se aplica aún al registro de imágenes. Al finalizar la guerra, el sistema infrarrojo, resultó de gran utilidad en el estudio y seguimiento de la vegetación y los cultivos.

En los años 50 la Agencia Espacial Norteamericana (NASA), ubica los primeros sensores remotos en plataformas espaciales, si bien no será hasta los años 60 cuando se produzca un verdadero programa de registro sistemático de observación de la Tierra, con el lanzamiento del satélite meteorológico TIROS.

Los buenos resultados obtenidos por los norteamericanos en esa y otras misiones llevaron a su gobierno a establecer un plan de observaciones sistemáticas de la superficie terrestre orientada al estudio de recursos de todo tipo. Este programa constituyó la base del primer Landsat. Los tres primeros satélites de la serie fueron lanzados entre los años 1972 y 1978 y, por sus características, se les considera la 1ª generación, frente a los Landsat 4 y 5, lanzados en los años 1982 y 1984 respectivamente, que son la 2ª generación. Las diferencias son apreciables, pero la

\* Departamento de Prehistoria. Universidad Complutense de Madrid. Ciudad Universitaria s/n. 28040 Madrid.

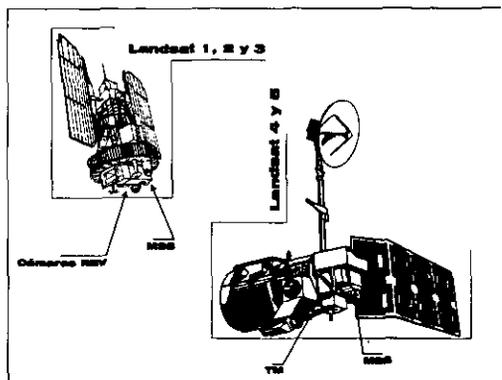


Fig. 1.- Plataformas de las diferentes misiones Landsat y la localización de los sensores (Fuente: EOSAT, 1991).

más importante es que montan sensores diferentes: los Landsat 1, 2 y 3 llevaban un equipo de barrido multiespectral llamado MSS (*Multispectral Scanner*) y un conjunto de tres cámaras de vidicon. En los dos últimos se cambian las cámaras por un nuevo sistema denominado TM (*Thematic Mapper*) que proporciona mayor resolución, tanto espectral como espacial<sup>1</sup> (Fig. 1).

El sistema Landsat no es el único que interesa a un proyecto de las características que veremos más adelante, entre otros destacaremos tres: el sistema SPOT (*Système Probatoire d'Observation de la Terre*) desarrollado por Francia, Bélgica y Suecia. Este sensor tiene una mejor resolución espacial que TM aunque una menor espectral, el sistema permite, además, adquirir información estereoscópica. El segundo, denominado Tiros-NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration Satellite*), tiene en origen una función netamente atmosférica, característica que le confiere una resolución temporal muy pequeña pero que permite observaciones muy cortas, —temporalmente hablando—. Estos satélites poseen varios sensores, de los cuales debemos destacar el AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), que con resolución de 1,1 km. en el nadir, y debido a la buena cobertura temporal y bajo coste da buenos resultados en estudios medioambientales a pequeña escala.

Finalmente debemos considerar las plataformas que portan sensores activos en la región de microondas; estos instrumentos se denominan activos porque no dependen de la radiación solar para operar, pues emiten un haz de microondas y reciben la respuesta de los objetos con los que choca en la superficie. Destaquemos el satélite europeo ERS-1 (*European Remote Sensing Satellite*) que monta un Radar de apertura sintética o SAR (*Synthetic Aperture Radar*) operativo en la banda de 5.3 GHz y posee una resolución espacial similar a la serie Landsat. Estos

sistemas son útiles en zonas permanentemente cubiertas de nubes —como las áreas tropicales o más próximo a nosotros, toda la fachada cantábrica— y han empezado a utilizarse en diversos campos de investigación, aunque, bien es cierto, que aún tímidamente.

Existen otros programas de observación remota de la superficie terrestre como los sistemas japoneses, canadienses o indios, no obstante sólo nos hemos referido a los que tienen tanto una mayor utilidad en un análisis arqueogeográfico como una mejor disponibilidad de las imágenes que registran.

## 2. ELEMENTOS DE TELEDETECCIÓN

El término *Teledetección* es la eficaz traducción castellana del término inglés *Remote Sensing*. En el título del presente artículo hemos introducido una matización al vocablo: *Espacial*. Con ella restringimos la definición a aquellos sistemas montados sobre plataformas espaciales debido a que son éstos los que, desde el punto de vista de la Arqueología española, nos parecen más viables<sup>2</sup>.

Una definición clásica de teledetección podría ser la siguiente: *ciencia y arte de obtener información de un objeto, área o fenómeno a partir del análisis de los datos adquiridos mediante un instrumento que no toma contacto con el objeto, área o fenómeno bajo observación* (Lillesand y Kiefer 1994: 1).

Bajo esta definición es fácilmente entendible que nuestros propios ojos son un sistema de teledetección, y aunque efectivamente es el sistema de teledetección primario, debemos matizar aún para que la definición se ajuste a la idea que proponemos.

En nuestro caso llamaremos teledetección espacial a la *ciencia de la obtención, procesado y análisis de información de la superficie terrestre y su dinámica mediante sensores situados en plataformas espaciales*. Estamos pues entendiendo la Teledetección en un sentido amplio, ya que englobamos en ésta tanto el procesado como las diferentes aplicaciones que utilizan como fuente sus datos, ya que éstas son específicas de esta técnica.

En los términos de esta definición suponemos que entre la superficie a analizar y el propio sensor existe una interacción energética que éste es capaz de registrar y enviar a tierra donde se almacena, procesa y analiza. De este modo, un sistema de teledetección se puede dividir en los siguientes elementos (Fig. 2):

• *Fuente de energía*, origen del flujo energético

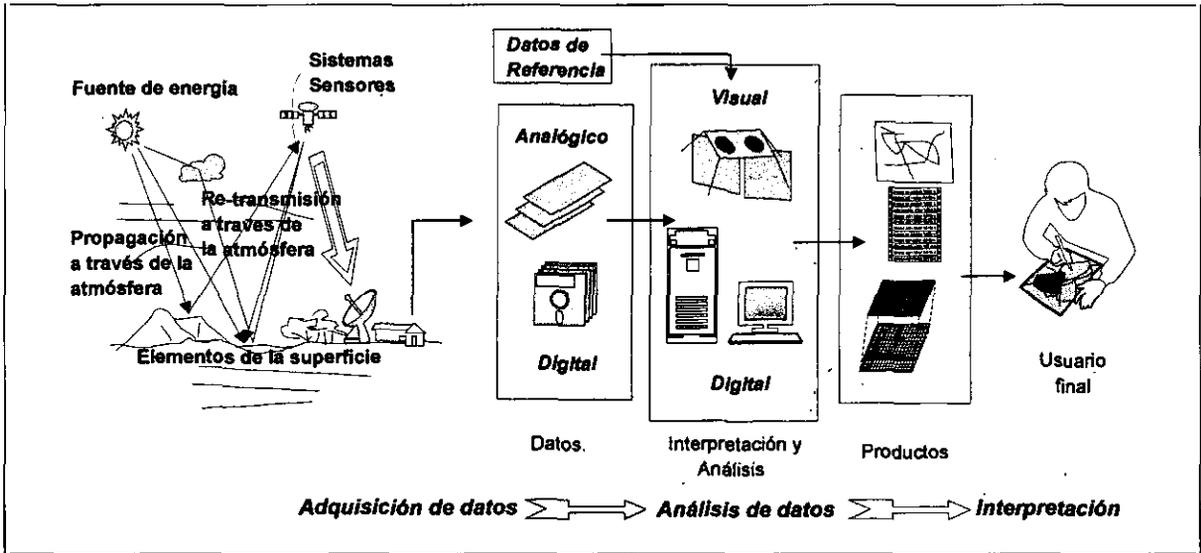


Fig. 2.- Esquema general de un sistema de teledetección espacial.

detectado por el sensor. La fuente más importante, en nuestro caso, es el Sol.

- *Superficie terrestre.* Refleja la radiación procedente del Sol o emite de acuerdo a sus propias características.
- *Sistema sensor.*
- *Estación de recepción* y comercialización de los datos obtenidos por el sistema sensor.
- *Intérprete.* Analiza y codifica la información. Los productos que genera pueden ser mapas en formato analógico, tablas o ficheros informáticos formando parte de un Sistema de Información Geográfica (SIG).
- *Usuario final.* Encargado de la toma de decisiones.

La tarea fundamental de un sistema de teledetección es caracterizar los elementos que forman parte de la superficie terrestre. Esta caracterización viene determinada por la interacción del flujo de radiación solar con ésta. Un modelo general de teledetección podría ser el que aparece en la figura 3.

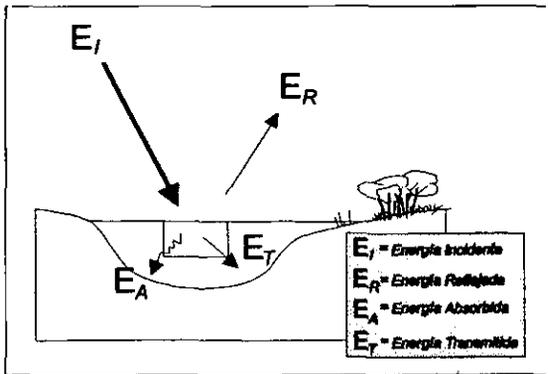


Fig. 3.- Interacciones básicas entre la energía electromagnética y una superficie terrestre.

Si aplicamos el Principio de Conservación de la Energía tenemos que:

$$E_i = E_r + E_a + E_t$$

La relación entre estas magnitudes no es constante respecto de la longitud de onda, de modo que debemos representar esta ecuación de la forma siguiente

$$E_i(\lambda) = E_r(\lambda) + E_a(\lambda) + E_t(\lambda)$$

de manera que las proporciones de energía reflejada, absorbida y transmitida variarán para las diferentes cubiertas dependiendo del tipo de material y su condición. Es ésto lo que nos permite distinguir las diferentes cubiertas en una imagen. Además, debido a la dependencia de la longitud de onda podemos conocer el comportamiento de una cubierta concreta en varias bandas del espectro.

Como todos los sistemas de teledetección operan en regiones del espectro en las que predomina la energía reflejada, las propiedades de reflectancia de la superficie terrestre son muy importantes, de modo que podemos expresar el balance de energía anterior como:

$$E_r(\lambda) = E_i(\lambda) - [E_a(\lambda) + E_t(\lambda)]$$

o lo que es lo mismo, *la energía reflejada por una cubierta es igual a la energía que incide sobre la misma mitigada por la que ésta absorbe o transmite.*

Las características de reflectancia de una superficie puede ser cuantificada midiendo la proporción de energía incidente que es reflejada; esta medida es función de la longitud de onda y se conoce como *reflectancia espectral*,  $\rho_\lambda$ , y podemos formalizarla del siguiente modo

$$\rho_\lambda = \frac{E_r(\lambda)}{E_i(\lambda)} = \frac{\text{energía de longitud de onda } \lambda \text{ reflejada por el objeto}}{\text{energía de longitud de onda } \lambda \text{ recibida por el objeto}} \times 100$$

La representación gráfica de la reflectancia

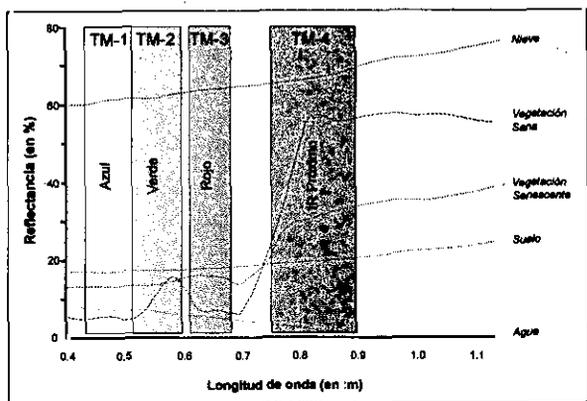


Fig. 4.- Curvas espectrales para diferentes cubiertas realizadas a partir de medidas de laboratorio (Fuente: Chuvieco 1990: 59).

espectral<sup>3</sup> en función de la longitud de onda se conoce como *curva de reflectancia espectral* o simplemente *curva espectral* (Fig. 4).

En una representación de tal tipo aparece reflejada la *signatura espectral* de una o varias cubiertas. Este término puede ser definido como *un conjunto de valores de la reflectancia o la radiancia de una cubierta en el que cada valor se corresponde con la reflectancia o radiancia promediada sobre un intervalo diferente y bien definido de longitudes de onda* (Slater 1980: 57). En general diremos que este conjunto de valores de reflectancia es característico de la *Irradiancia* y de la *geometría de la observación* en el momento de la toma.

Acabamos de mencionar algunos de los elementos que inciden en los valores de reflectancia, sintéticamente destacaremos los factores que influyen en la señal recibida por el sensor:

1. Reflectancia del objeto iluminado.
2. Efecto de las interacciones atmosféricas. En cuanto a la interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera, podemos resumirla del siguiente modo:

- A. La interacción depende de:
  - a. Características de las Ondas ( $\lambda$ ).
  - b. Características físicas de la atmósfera:
    - Presión.
    - Temperatura.
    - Partículas en suspensión.
  - c. Composición de la atmósfera (gases, aerosoles y nubes).
- B. Los mecanismos de interacción son:
  - a. Dispersión (cambios de dirección).
  - b. Absorción.
  - c. Emisión.
  - d. Refracción.

Los efectos atmosféricos son patentes en las longitudes de onda correspondientes al espectro visible y del infrarrojo, siendo prácticamente inexistentes en la región de las microondas (Ormeño 1993: 51).

3. La pendiente y orientación de la cubierta.
4. Ángulo de observación. Relacionado con la órbita del satélite y las características del sensor.
5. Ángulo de iluminación solar. Este dato depende de la estación y del momento de paso del satélite por la zona capturada.

En opinión de P.J. Curran (1985), la correcta utilización de los datos de teledetección necesita del conocimiento de la respuesta espectral de las superficies a estudiar y de las perturbaciones introducidas por la atmósfera. Ésta es la razón de que hayamos puesto en consideración esta gran cantidad de variables. Los métodos que se utilicen para gestionar los datos obtenidos de esta forma son una de las piedras angulares de cualquier trabajo de teledetección, y esa metodología depende de la incidencia relativa de estos factores.

### 3. BASES PARA UN ENFOQUE GEOGRÁFICO EN ARQUEOLOGÍA

En esta sección trataremos de presentar las bases fundamentales de una perspectiva geográfica en arqueología, bien es cierto que no vamos a desarrollar *in extenso* ni la metodología ni las relaciones conceptuales que la Geografía Prospectiva ha puesto de manifiesto.

El paisaje, entendido como resultado de la actuación biológica y cultural de los seres vivos sobre el espacio geográfico —en nuestro caso *espacio agrario*— es una síntesis de componentes que han sido definidos y clasificados como *elementos y factores*.

Entendemos por *elemento* la componente formal y visible del espacio agrario y por *factor* la componente potencial de los paisajes, el substrato modificable y el agente modificador que moldea los elementos (Díaz 1984: 19). Es decir, los elementos son descriptores mientras que los factores explican los paisajes.

Como hemos dicho más arriba, el paisaje agrario, por su propio contenido, es un paisaje *humanizado*, puesto que es el Ser Humano quien modifica el medio físico mediante la elección del cultivo o la utilización del suelo. En esencia, la estructura de un paisaje agrario puede ser la de la Figura 5.

Veamos brevemente en que consisten estos componentes:

#### A. Factores.

1. *Factores Físicos:*

a. Clima. Su importancia viene determinada por las condiciones bióticas que calor y humedad ofrecen para las plantas.

b. Relieve. Influye a través de las modificaciones climáticas que genera debido a la existencia del gradiente termométrico vertical.

c. Suelos y cubierta vegetal. Se pueden considerar como factores derivados pues tienen su causa en la interacción clima-relieve.

2. Factores Humanos:

Esta categoría no puede ser abordada «observacionalmente»; las categorías que se utilizan para su análisis están derivadas de la teoría social considerada, explícita o implícitamente por el discurso.

Desde nuestro punto de vista, no se trata de realizar una enumeración de factores independientes, sino de los grupos de ellos que se articulan en lo que llamamos sistema social. Así podemos considerar factores *Demográficos, Tecno-económicos, Sociales y Culturales*.

B. Elementos.

1. *Ager*. Espacio explotado.

2. *Saltus*. Espacio no cultivado. Puede ser permanente o temporal.

3. *Hábitat rural*. Áreas agrarias ordenadas con la finalidad de servir de asentamiento humano estable.

4. *Elementos de organización de los paisajes agrarios*. Relaciones de complementariedad, fronteras, redes viarias, etc.

La utilización de esta distinción elemental y factorial del paisaje agrario ha sido aplicada a la Arqueología del Paisaje en lo que J. M. Vicent (1991: 67) ha llamado un *enfoque experimental del A.C.E.*<sup>4</sup> Este autor propone tal planteamiento como una representación abstracta de los términos del problema que permite predicciones sobre el comportamiento probabilístico de las variables que lo constituyen en una situación empírica determinada.

Desde un punto de vista como el propuesto, la noción geográfica de factor que hemos dado con-

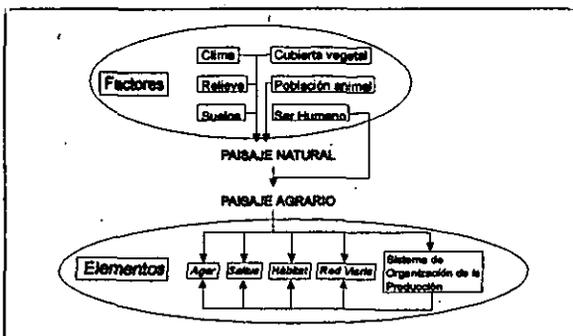


Fig. 5.- Organización y estructura de los paisajes agrarios (Fuente: Díaz 1984: 25).

tiene íntegramente su dimensionalidad explicativa, predictiva y matemática. De esta forma, un análisis locacional presupone una *representación factorial del paisaje agrario* (Vicent 1991: 49), a partir de la que puede conformarse una explicación de los patrones de localización.

Es claro que, esta perspectiva, en la medida de que exista la posibilidad de especificar cuantitativamente todos los componentes relevantes del paisaje, configurando un modelo matemático de éste, permite una buena generalización de la estructura.

Podemos esquematizar en dos pasos la formalización de un problema de analítica locacional a partir de una representación factorial de paisaje:

1. Análisis de los problemas locacionales individuales. Este paso se puede enfocar como la construcción de una *matriz factorial simple*, siendo ésta una representación de la expresión cuantificada de la influencia de cada factor en cada unidad espacial elemental.

2. Interpretación de los patrones de decisión locacional en el conjunto de un paisaje diferenciado. Esta etapa del análisis, implica la construcción de un modelo factorial generalizado. Un paisaje puede expresarse como un modelo matemático definido por la combinación lineal resultante de la de todos los elementos (Díaz 1984: 108).

El diseño muestral propuesto por J. M. Vicent (1991: 32-117) para la Comarca Noroeste de Murcia está descrito de forma completa en la obra citada y no nos detendremos más en él, valga la breve exposición de los puntos singulares del diseño experimental.

La investigación que propone este autor ha sido sintetizada en el cuadro siguiente (Fig. 6) donde podemos observar como ésta se completa con tres programas diferenciados —aunque interrelacionados— de captación de información.

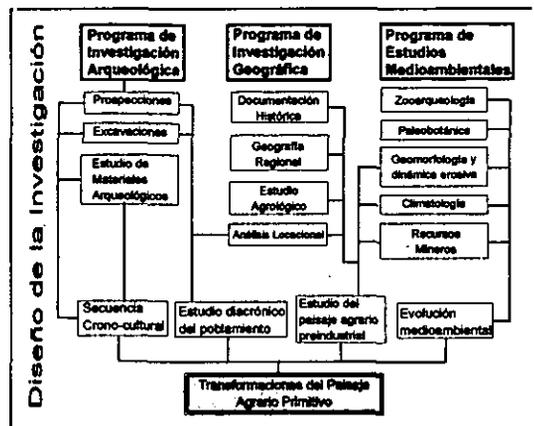


Fig. 6.- Diseño de la investigación del Proyecto ID-831 (Fuente: Vicent 1991:109).

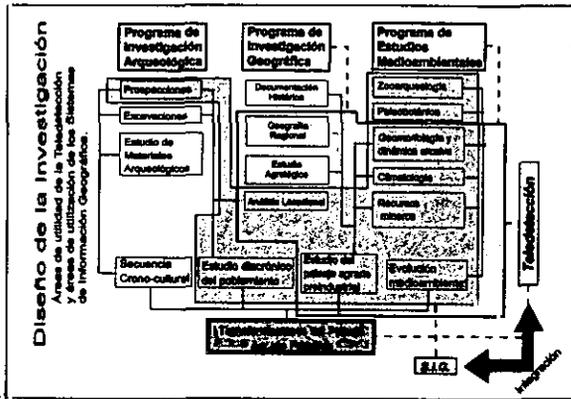


Fig. 7.- Integración de la Teledetección en un Programa de Investigación Arqueogeográfico. Formación de un SIG.

La figura 7 muestra las áreas de la investigación donde la teledetección puede ser aplicada con garantías de éxito. Como se puede ver, esta técnica permite informar sobre una gran parte del trabajo que implica un programa arqueogeográfico. Se han señalado asimismo, las secciones que pueden ser abordadas totalmente o en parte con un Sistema de Información Geográfica. La superposición que se observa es sólo aparente puesto que la teledetección y los S.I.G. están en planos de información y acción distintos, si bien, en una investigación como la que presentamos, su interrelación se hace imprescindible (Pinilla 1995: 285).

Un trabajo arqueogeográfico basado en teledetección tendría cinco fases fundamentales, a saber:

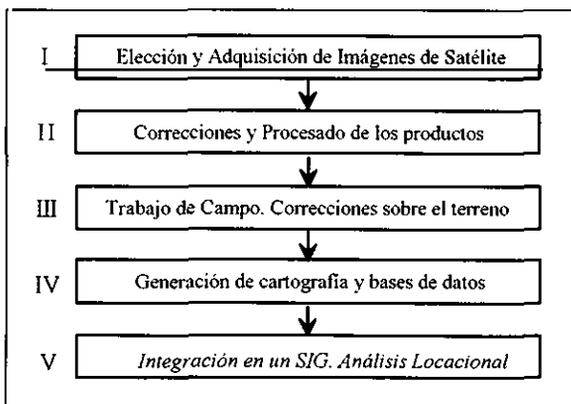


Fig. 8.- Fases de un Análisis Locacional basado en Teledetección.

La última fase es el Análisis Locacional, la cual representa una generalización del Análisis de Captación Económica en su definición para los paisajes agrarios primitivos propuesto por Gilman y Thornes (1985: 35) en su conocido estudio sobre el Sureste de la Península Ibérica.

Es evidente que la visión ofrecida por el diagrama anterior es un tanto general y limitada. Trata-

remos de desglosar la figura 8 y completar la idea que nosotros tenemos sobre un análisis locacional basado en teledetección espacial.

La figura 9 presenta el diagrama de flujo de una investigación cuya fuente principal de datos geográficos es la teledetección. Evidentemente no se detallan las áreas de carácter estrictamente arqueológico puesto que éstas han sido explicitadas en la obra de Vicent (1991). Lo que plantea el gráfico es la generalización de un sistema particular, como el que desarrolla este autor y donde se toma como fuente principal un método diferente. El desarrollo del Análisis Locacional se define desde la filosofía de los sistemas de información geográfica modernos, más flexibles y adaptados a la resolución de cuestiones más generales, en los que no podríamos enmarcar los sistemas desarrollados por el equipo de J.M. Vicent, los cuales, aún siendo herramientas orientadas a la producción de Bases Cartográficas Numéricas (BCN), adolecen de una gran especificidad y resultarían poco eficaces en la aplicación a otro tipo de problemas.

De este modo, la utilización de BCN es imprescindible en el estudio y generalización de problemas de carácter arqueogeográfico y en la toma de decisiones sobre el medio y su interacción con el Ser Humano debido a la enorme complejidad que entraña ésta, ejemplo de lo cual es el propio análisis que realiza el equipo del proyecto que hemos comentado más arriba.

No podemos olvidar que desde el punto de vista del análisis locacional —lo que es lo mismo, una perspectiva arqueogeográfica—, la teledetección no es más que una técnica de información territorial. Un estudio del paisaje antiguo necesita de otras, además de ella, para cumplir el objetivo de un conocimiento preciso que ayude a interpretarlo. Es desde este punto de vista desde el que decimos que un análisis locacional se puede entender en términos de un Sistema de Información Geográfica<sup>3</sup>.

La integración de los datos de teledetección con datos de tipo arqueológico se produce en el final del flujo de información del esquema de la figura 9. Hasta ese momento se realiza el procesado de la imagen de satélite hasta la realización de una cartografía numérica, entre otras, se generan mapas de clases agrícolas, de suelos, etc.

Cuando se ha obtenido una síntesis previa de las condiciones geográficas del paisaje a analizar conviene realizar el trabajo de informar las clasificaciones, es decir, aplicar una "verdad terreno" a una clase que es meramente matemática (obtenida mediante la aplicación de un algoritmo de agrupamiento concreto). Este es el momento de cruzar los datos de localización de yacimientos, de hábitat rural histó-

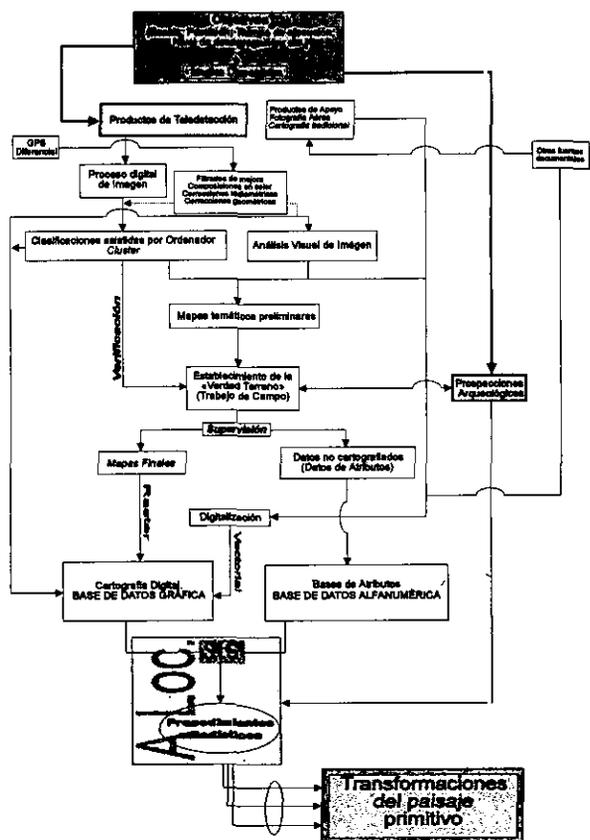


Fig. 9.- Propuesta para la realización de un programa de investigación arqueogeográfica basado en teledetección.

co y contemporáneo con los resultados del procesado de las imágenes. El resultado es una serie de bases de datos: entendamos así tanto los resultados de los análisis sobre la información digital, como los obtenidos por otros medios. Son éstas las fuentes desde las que realizamos el Análisis Locacional. A partir de una serie de herramientas de carácter estadístico —como el Análisis de la Varianza o el Análisis Factorial— podemos estudiar las relaciones de los factores y elementos con la propia estructura del paisaje humanizado.

Para efectuar esta labor de cruce de información y, debido tanto a la complejidad del propio paisaje, como a la fragmentación de la información arqueológica, se hace necesario recurrir a una herramienta potente en tres aspectos: flexibilidad en la toma de datos, potencia de cálculo y facilidad de representación de resultados (Moldes 1995: 19). Hablamos de un Sistema de Información Geográfica.

La ventaja más importante de tal tipo de herramientas es que permiten tanto la modelización como la introducción de nuevos puntos a valorar ofreciéndonos la posibilidad de realizar simulaciones va-

riando factores y elementos del modelo generado.

En definitiva un Sistema de Información Geográfica aplicado a la arqueología —en nuestro caso, arqueología del paisaje— o Sistema de Información Arqueo-Geográfico (SIAG), es la herramienta más potente que existe a disposición del arqueólogo para responder a las preguntas que éste le pueda formular.

La teledetección brinda a los SIAG una de las fuentes de información más útiles y rentables que hoy tenemos a nuestra disposición.

#### 4. ELECCIÓN Y ADQUISICIÓN DE IMÁGENES PROCEDENTES DE SATÉLITES

Después de profundizar en la dinámica particular del trabajo en teledetección pensamos que es importante detenernos brevemente en el primer punto del diagrama de flujo (Fig. 9): la elección y la adquisición de las imágenes, puesto que este punto es crítico en el desarrollo posterior de la investigación. Será la toma de decisiones aquí lo que marque definitivamente el resultado que obtengamos.

Cuando pensamos en realizar un estudio a partir de Teledetección, lo primero que se necesita es elegir el tipo de imagen y por ende, el satélite que utilizaremos —antes es necesario tener claro los problemas que trataremos de solucionar, pero partimos de la base de que esta fase es siempre cumplida—, ya que hay una gran cantidad de variables que intervienen en la obtención de una imagen, como vimos al comienzo.

El elemento más importante a tener en cuenta a la hora de adquirir una imagen de satélite es la *resolución*. Podemos definir este término como la capacidad de un sensor para capturar y registrar, discriminándola, información de detalle (Mather 1991: 36).

La resolución de un sistema sensor implica, como mínimo, cuatro manifestaciones de la información:

1. *La resolución espacial*. Se suele medir en metros e ir referida al tamaño del *pixel*<sup>6</sup>: la unidad mínima de información o del elemento imagen. De modo que cuanto más pequeño sea el tamaño del *pixel*, mayor resolución espacial tendremos y, por tanto, mayor cantidad de datos.

2. *Resolución espectral*. Indica la cantidad y la anchura de las bandas espectrales que un sensor es capaz de discriminar. Como vimos al principio, un sensor será mejor cuanto mayor número de bandas registre a la vez, y que estas bandas sean suficiente-

mente estrechas para recoger señales sobre regiones coherentes del espectro (Chuvieco 1990: 93).

3. *Resolución radiométrica.* Es la sensibilidad de un sensor, esto es, su capacidad para detectar variaciones en la radiancia recibida. En las imágenes digitales, esta resolución se identifica con el número de *Niveles Digitales* de la imagen. Suelen estar entre los 64 del Infrarrojo próximo en el MSS y los 1024 del NOAA-AVHRR. La mayoría de los sensores actuales utilizan 8 bits, de modo que tenemos 256 niveles digitales (SPOT y Landsat-TM).

Algunos autores opinan que no hay una mejora importante entre 64 y 256, puesto que el ojo humano detecta difícilmente algo más de 64 niveles de gris y menos de 200.000 tonalidades de color. Así pues no parece sino superfluo contar, para un análisis visual, con más de 64. En un tratamiento digital resulta más adecuado, pero tampoco determina los resultados<sup>7</sup> (Tucker 1979).

4. *Resolución temporal.* Frecuencia de cobertura que realiza el sensor, o lo que es lo mismo, la frecuencia con que éste adquiere imágenes de la misma zona. Esta variable está relacionada íntimamente con los objetivos que marcaron su puesta en órbita. La resolución temporal varía entre los 30 minutos que ofrecen los satélites geostacionarios (meteorológicos, como el Meteosat) y los 26 días del SPOT. NOAA adquiere imágenes cada 12 horas y Landsat cada 16 días.

Todo estudio arqueogeográfico se desarrolla en una serie de etapas, como hemos visto más arriba. La elección y adquisición de las imágenes tiene una fuerte dependencia de la escala del trabajo a realizar<sup>8</sup>. Sobre este particular, la Asociación Cartográfica Internacional considera que las escalas límite para los diferentes sensores son

- 1:2.000.000 para NOAA (AVHRR)
- 1:200.000 para Landsat-MSS
- 1:100.000 para Landsat-TM
- 1:50.000 para SPOT-Panromático

Evidentemente que mediante algún tratamiento, como la integración de imágenes Landsat-TM y SPOT-P se puede conseguir que las combinaciones de bandas realizadas a partir de TM puedan tener escalas como las de SPOT-P.

En trabajos de geología y geobotánica, así como en la caracterización de cubiertas en general, creemos debe primar la resolución espectral sobre la espacial y, aunque este dato no se contemple normalmente, eligiéndose en ocasiones las mejores resoluciones espaciales creyendo que éstas implican la mayor calidad de los datos, desde esta perspectiva, en trabajos de Arqueogeografía, consideramos de mayor utilidad de las imágenes obtenidas por el sensor TM

Sensores a bordo del programa Landsat	
MSS	TM
Bandas	Bandas
Resolución espectral 4 (0.5-0.6 $\mu$ m) 5 (0.6-0.7 $\mu$ m) 6 (0.7-0.8 $\mu$ m) 7 (0.8-1.1 $\mu$ m) 8 (10.4-12.6 $\mu$ m)	Resolución espectral 1 (0.45-0.62 $\mu$ m) 2 (0.52-0.60 $\mu$ m) 3 (0.63-0.69 $\mu$ m) 4 (0.76-0.90 $\mu$ m) 5 (1.55-1.75 $\mu$ m) 6 (10.40-12.50 $\mu$ m) 7 (2.08-2.35 $\mu$ m)
Resolución espacial Bandas 4 a 7: 79 m. Banda 8: 240 m.	Resolución espacial Bandas 1 a 5 y 7: 30 m. Banda 6: 120 m.
(1) Sólo en Landsat-3	

Fig. 10.- Detalle de las características de resolución espectral y espacial de los sensores a bordo del programa Landsat.

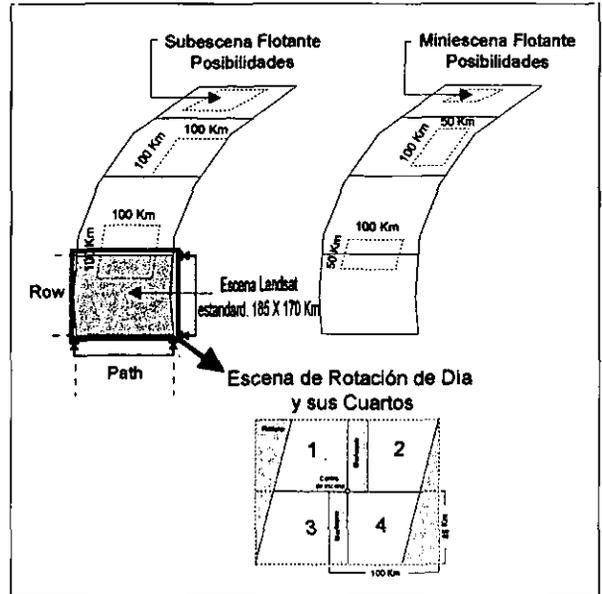


Fig. 11.- Productos Landsat-TM ofrecidos por EOSAT (Fuente: NPOC Español, INTA).

de la misión Landsat.

Terminaremos este paréntesis comentando cuales son algunos de los productos que se pueden obtener de este sensor. Las imágenes son distribuidas por diferentes centros, tanto públicos como privados.

Las figuras 10 y 11 muestran los productos estandarizados disponibles para imágenes Thematic Mapper así como las características resolutivas de las imágenes servidas por las misiones Landsat 4 y 5. Las escenas pueden ser elegidas con cualquier proyección y para cualquier clipsoide<sup>9</sup>.

En la elección de una escena se solicitan, por parte del organismo o la empresa servidora una

serie de datos que es necesario valorar:

1. Año de la toma.
2. Coordenadas del centro de escena (si es flotante).
3. Cobertura nubosa.
4. Fecha de la toma (localización en un ciclo estacional).

Estos datos dependen, junto con los que vimos más arriba, del tipo de trabajo y de los productos cartográficos a realizar. La mayor parte de las variables que se han tenido en consideración aquí sirven para la adquisición de imágenes de otros satélites como SPOT o NOAA, aunque cada uno posee especiales características que habrán de ser consultadas en los centros servidores de productos.

Finalmente, como es evidente que la realización de estos trabajos solo puede ser realizada con la ayuda de un ordenador, debemos detenernos brevemente en el equipo necesario para realizar un proceso completo como el que hemos visto en apartados anteriores.

Desde nuestro punto de vista proponemos un sistema informático basado en ordenadores personales tipo PC; esta opinión tan particular dentro del panorama profesional de la teledetección se fundamenta en dos razones: el *precio* y la *portabilidad*.

Los sistemas basados en estaciones de trabajo son más eficaces en cuanto al tiempo de cálculo pero no mucho más que los ordenadores compatibles más avanzados (con procesadores Pentium o Power PC). La grave dificultad es que una estación es mucho más cara que un buen PC y además, el software tiene también un precio más elevado. El otro problema es la portabilidad de los programas de tratamiento puesto que siempre es más sencillo conseguir un PC cerca de la zona de trabajo de campo que una estación, y esto es no poco importante.

Debido a que las máquinas evolucionan a una enorme velocidad si diéramos una indicación sobre el procesador ésta sería ya anticuada, así pensamos que servirá con el componente mínimo que proponga el diseñador del programa de tratamiento. El software debe elegirse cuidadosamente ya que la formación del personal que se dedica al tratamiento de la información es largo y tedioso, por lo que en aras de una rentabilidad mayor debe elegirse uno con un buen *interface* gráfico y una buena programación de los algoritmos de cálculo. En general los paquetes informáticos comerciales son un SIG que contiene un módulo de tratamiento de imágenes *raster*. Aunque existen SIG vectoriales en el mercado, si vamos a trabajar con imágenes de satélite, no son una buena opción.

Uno de los mayores problemas que surgen a la hora de realizar tratamiento digital de imagen es

el enorme tamaño de los ficheros que se manejan, por lo que la máquina debe tener una gran cantidad de memoria RAM (cuanta más mejor, y esto sólo depende del presupuesto). Además, gran parte de la información procesada es necesario guardarla, de manera que se necesita un dispositivo de almacenamiento masivo, por ejemplo una buena unidad de disco Magneto-óptico además de un disco duro de capacidad mediana o alta (entre 1 y 2 Gb).

Otro elemento importante del equipo de tratamiento de imágenes es el periférico desde el que cargamos los datos recibidos del servidor comercial. Nuestra experiencia nos dice que el mejor es una unidad de CD-ROM sin discusión alguna. La Agencia Espacial Europea envía sus imágenes, si se desea, en este soporte, con lo que se ahorra una gran cantidad de tiempo.

Como hemos visto anteriormente, la imagen de satélite no es ni puede serlo —en el estado actual de desarrollo— la única fuente de información, otras fuentes en formato analógico como la fotografía aérea o la cartografía tradicional son fundamentales en cualquier estudio arqueogeográfico. Esto implica la necesidad de convertir la información analógica en digital, para lo cual se hacen necesarias herramientas como las digitalizadoras o los escáneres. En cuanto a las primeras, una de tamaño DIN-A3 no es muy costosa y se adapta bien a las necesidades derivadas de la teledetección. En cuanto al escáner, debemos decir que la variable más importante a tener en cuenta es la sensibilidad. Actualmente hay aparatos que dan resoluciones de más de 4000 puntos por pulgada pero no compensan económicamente en trabajos de arqueología, pensamos que un aparato plano de tamaño DIN-A4 color, con 2400 ppp será más que suficiente.

Muchos SIG y programas de proceso de imagen utilizan sistemas de doble monitor, pero no todos, en general no depende de esto la calidad del programa, pero nos obliga a adquirir una buena pantalla además de la que tengamos. En nuestro caso creemos que es necesario un monitor de alta definición de un mínimo de 17".

Capítulo aparte merecen los dispositivos de salida. La mayor parte de la información que se genera mediante una metodología como la que hemos expuesto, es en color con lo que necesitamos un dispositivo capaz de hacerlo<sup>10</sup>. Nos inclinamos por las impresoras de inyección de tinta porque son muy eficaces y a la vez tienen precios razonables, tanto en su coste inicial como en su mantenimiento. Un mínimo de 720 x 720 ppp y un tamaño DIN-A3 en color, es lo más recomendable, pero puede utilizarse una buena impresora de inyección en blanco y negro. En cuanto a la adquisición de un trazador, son dema-

siado caros, pero si se dispone de financiación, un plotter de inyección de tinta en color y tamaño DIN-A0 es la mejor solución.

En general el equipo informático necesario depende de las condiciones económicas y de la continuidad en el futuro del método de trabajo. Con los instrumentos que hemos visto, se tiene la infraestructura para empezar un buen laboratorio de proceso digital de imagen y arqueogeografía que seguro será rentable a medio y largo plazo.

La figura 12 muestra los elementos fundamentales de un sistema de tratamiento de imágenes, y su localización en la cadena de procesado. Evidentemente, existe una continua realimentación en el flujo de la información. En esencia el sistema se compone de tres módulos: captura, procesado y representación (Domingo 1994: 24).

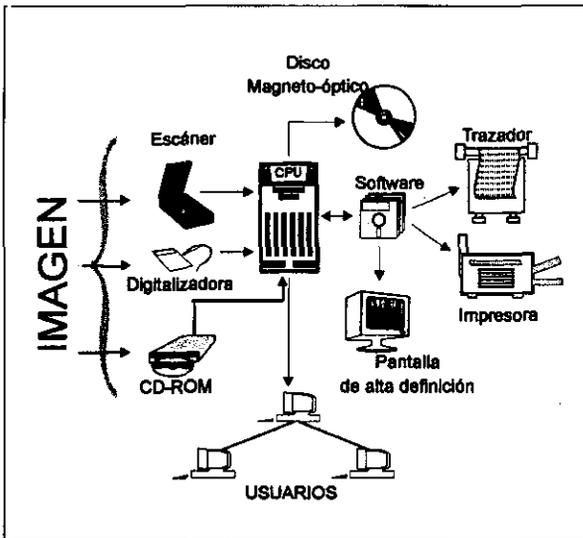


Fig. 12.- Elementos de un sistema de tratamiento digital de imagen.

## 5. CONSIDERACIONES FINALES

En general podemos decir que la interpretación visual y la cartografía automática deben considerarse técnicas complementarias, puesto que para algunas cubiertas es más precisa la fotointerpretación humana. Si bien podemos proponer como principio ésto, también hemos de decir que para trabajos de Arqueogeografía, donde la precisión en la distinción de diferentes cubiertas no es crítica, la teledetección y el cartografiado automático es una técnica que, hoy ya, proporciona buenos resultados. Es necesario incidir en la cuestión de la escala; para estudios locales —entendiendo por escala local el área de un yacimiento—, la teledetección no es, actualmente, rentable; sin embargo, la rentabilidad aumenta con la escala, de forma que para estudios regionales la proponemos como la técnica más ventajosa tanto en capital humano como económico.

Por otra parte, la integración de Sistemas de Información Geográfica en Arqueología es inevitable debido a la cantidad de datos que es necesario manejar. Es claro que algunas tentativas en la utilización de este tipo de sistemas de información a la arqueología no han resultado muy rentables pero, pensamos que una de las causas que más incidencia ha tenido en esta apreciación ha sido la utilización de sistemas poco flexibles, generalmente desarrollados para resolver un tipo de problemas y que se dejaban de utilizar en posteriores trabajos. Una forma de resolver este problema, por la que desde aquí abogamos, es la utilización de sistemas comerciales, programables, que permiten una gran cantidad de usos y tienen una probada eficacia en diversos ámbitos de estudio.

NOTAS

<sup>1</sup> Para asegurar la continuidad en la serie de datos se ha mantenido en los Landsat 4 y 5 el sensor MSS. El concepto de *Resolución* se estudia más adelante.

<sup>2</sup> En la actualidad son muy utilizados los sistemas *aeroportados* (la plataforma es un avión a mayor o menor altitud), en concreto el sistema ATM (*Airborne Thematic Mapper*). Varios centros españoles poseen estas plataformas: el INTA posee un sensor Daedalus 1268, al igual que el ICC. El mayor problema reside en que los productos derivados de estos sistemas son mucho más caros que los obtenidos a partir de plataformas espaciales.

<sup>3</sup> Deberíamos precisar más esta formulación puesto que ningún sistema sensor es capaz de registrar una única  $\lambda$ , sino un intervalo  $[\lambda, \lambda + d\lambda]$  —donde  $d\lambda$  puede ser tan pequeño como se quiera, según el sistema sensor— de modo que la reflectancia espectral sería

$$\rho_{\lambda} = \frac{\text{Energía incidente reflejada por el objeto en el intervalo } [\lambda, \lambda + d\lambda]}{\text{Energía recibida por el objeto en el intervalo } [\lambda, \lambda + d\lambda]} \times 100$$

<sup>4</sup> Análisis de Captación Económica.

<sup>5</sup> Quizá sería más acertado hablar de un Sistema de Información Ar-

queogeográfica, debido a las especiales características del mismo.

<sup>6</sup> Es más preciso el término de IFOV (*Instantaneous Field of View*) o *Campo de Visión Instantáneo*, definido como la sección a través de la cual un detector es sensible a la radiación angular (medida en radianes) observada en el momento de la toma. El *pixel* se podría considerar como la distancia sobre el terreno que corresponde a ese ángulo (Herrero 1995: 12).

<sup>7</sup> Pensemos que en una composición coloreada de tres bandas tendremos 16 millones de colores.

<sup>8</sup> Esto es general a todos los estudios que toman como base el medio físico, debido esencialmente a la necesidad de representar el mismo (CEOTMA 1983).

<sup>9</sup> Por defecto, el producto se envía con proyección UTM referida al Elipsoide Internacional.

<sup>10</sup> Ciertamente después podremos publicar el trabajo en estas condiciones, ya que la mayor parte de las publicaciones no reproducen las ilustraciones en color.

BIBLIOGRAFÍA

CEOTMA (1984): *Guía para la elaboración de estudios del medio físico: Contenido y metodología*. MOPU. Madrid.

CHUVIECO, E. (1990): *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Ed. Rialp. Madrid.

DÍAZ, J. R. (1984): *Geografía y agricultura. Componentes de los espacios agrarios*. Cuadernos de Estudio. Serie Geografía, 4. Ed. Cincel. Madrid.

DOMINGO, A. (1994): *Tratamiento digital de imágenes*. Colección Guías Monográficas. Anaya Multimedia.

EOSAT (1991): *Landsat spacecraft data sheet*. Lanhán.

GILMAN, A.; THORNES, J. B. (1985): *Land-use and Prehistory in South-East Spain*. George Allen & Unwin. Londres.

HERRERO, M. (1995): *Sistemas de captura de imágenes*. Instituto Geográfico Nacional. Madrid.

LILLESAND, TH. M.; KIEFER, R. W. (1994): *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley and Sons. New York. [3ª Edición].

MATHER, P. M. (1991): *Computer processing of remotely-sensed images. An introduction*. John Wiley and Sons. Chichester.

MOLDES, M. F. (1995): *Tecnología de los sistemas de Información geográfica*, Ed. Ra-Ma. Madrid.

ORMENO, S. (1993): *Teledetección Fundamental*. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Topográfica. U.P.M. Madrid.

PINILLA, C. (1995): *Elementos de Teledetección*. Ed. Ra-Ma. Madrid.

SLATER, P. N. (1980): *Remote Sensing: optics and optical systems*. Addison-Wesley, Reading. Massachusetts.

TUCKER, C. J. (1979): Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 18: 127-150.

VICENT, J. M. (1991): Fundamentos teórico-metodológicos para un programa de investigación arqueogeográfica. *El Cambio Cultural del IV al II Milenios a.C. en la Comarca Noroeste de Murcia* (P. López, ed.), Madrid: 31-117.

