

LOCALIZACIÓN DE ANOMALÍAS PRODUCIDAS POR ACTIVIDAD ANTRÓPICA, EN LAS ZONAS DEL BAJO LLOBREGAT Y CUBETA DE LA LLAGOSTA

V. FERRER-VIDAL Y I. SOLÉ.
Institut de Ciències de la Terra (Jaume Almera). C.S.I.C. Barcelona

RESUMEN

En dos áreas de la provincia de Barcelona, se han probado dos técnicas de percepción remota para la detección y control de las alteraciones del medio ambiente debidas a la presencia de vertederos de residuos urbanos y/o industriales, próximos a áreas de cultivo o en áreas de extracción de áridos. Las alteraciones producidas se reflejan en una respuesta anómala principalmente en vegetación, que se manifiesta por un nivel de actividad fotosintética y producción de biomasa inferior al esperado para un vegetal sano. Los análisis permiten no sólo el control de las áreas actualmente problemáticas, sino también llevar a cabo un seguimiento en aquellas áreas teóricamente regeneradas.

ABSTRACT

Two Remote Sensing techniques have been tested in two areas near Barcelona to detect and control environmental alterations due to urban and/or industrial dumping near cultivated fields or in areas of sand extractions. These alterations produce an anomalous response mainly in vegetation, evidenced by a lower photosynthetic activity level and biomass production compared to healthy vegetation. These Remote Sensing Techniques allow monitoring of at present problematic areas and also monitoring of assumedly regenerated areas.

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio fue realizado a petición del Institut Cerdà, y forma parte de un trabajo comparativo realizado por dicho Instituto, para la localización, reconocimiento y seguimiento de áreas extractivas problemáticas, así como de vertederos incontrolados de residuos urbanos y/o industriales. El objetivo del trabajo, incluye una aproximación a la respuesta anómala de la vegetación y suelos en esas áreas.

Las dos zonas de estudio, el Bajo Llobregat y la Cubeta de la Llagosta, se enmarcan en el cinturón industrial de Barcelona, respectivamente al W y N de su núcleo urbano. En la primera zona, el volumen de actividad industrial se desarrolla básicamente a lo largo del río Llobregat, mientras que en la segunda zona, se realiza a lo largo del río Besós.

En estas dos áreas, se ha ensayado dos técnicas de percepción remota basadas en sensores satelarios y aerotransportados, que permiten dos niveles distintos en la detección y control de las alteraciones del medio ambiente, debidas a la utilización de vertederos urbanos e industriales en áreas de cultivo o próximas a las mismas, y en antiguas áreas de extracción de áridos, en llanuras aluviales suburbanas.

Las escalas que se han utilizado, corresponden a imágenes multispectrales obtenidas con el sensor de barrido DÉDALUS aerotransportado, y a imágenes multispectrales obtenidas con el sensor Thematic Mapper instalado en el satélite orbital LANDSAT-5 (Tabla 1).

Tabla 1.- Bandas Espectrales correspondientes a los canales ATM. (Richards, 1986).

CANAL	RANGO DE λ (μm)	EQUIVALENCIA TM
1	0,42 - 0,45	
2	0,45 - 0,52	1
3	0,52 - 0,60	2
4	0,605 - 0,625	
5	0,63 - 0,69	3
6	0,695 - 0,75	
7	0,76 - 0,90	4
8	0,91 - 1,05	
9	1,55 - 1,75	5
10	2,08 - 2,35	7
11	8,5 - 13,0	6

En el primer caso, el análisis se ha mostrado más eficaz. Con un altura de vuelo de 1.500 metros y una resolución de $2,5 \times 2,5$ m por píxel, se obtienen excelentes imágenes de trabajo a escalas del orden de 1:5.000 a 1:10.000, lo que permite situar con toda precisión los distintos puntos de interés. La nitidez de las imágenes obtenidas por procesado de los productos digitales facilita extraordinariamente la ubica-

ción de cualquier punto sobre ortofotogramas o sobre mapas a escala detallada (1:10.000), sin necesidad de correcciones geométricas costosas.

2. ANÁLISIS DIGITAL IMÁGENES ATM

Para deducir o seleccionar visualmente las áreas de interés dentro del conjunto de la zona de estudio, se han realizado diversas combinaciones en falso color B-G-R, siendo las más apropiadas, las 5-7-10, representando el canal ATM 5 en el azul, el ATM 7 en el verde y el ATM 10 en el rojo, y la 10-7-11, representando también respectivamente los canales en el azul, verde y rojo.

Las imágenes obtenidas con la combinación 5-7-10, muestran en tonos azules, superficies con cierto nivel de humedad, con escasa o nula vegetación. En rosas claros, caminos y suelos desnudos. Las superficies cubiertas de vegetación, aparecen en color verde, siendo la luminosidad de este color proporcional a la cantidad de biomasa fotosintética activa. Los suelos desnudos más o menos degradados en zonas próximas a vertederos, se muestran en tonos rosas grisáceos, y lo que son áreas de vertedero, aparecen en coloraciones rojizas más reflectantes en el infrarrojo medio. Las áreas urbanas, presentan una coloración marrónácea.

En las imágenes obtenidas con la combinación 10-7-11, se muestran en tonos rojos las áreas concretas de vertedero, en azules grisáceos los suelos degradados próximos a esas áreas. También en color verde con luminosidad variable en función de la actividad, aparecen las superficies cubiertas de vegetación. En algunas zonas, la vegetación próxima a áreas de vertido se muestran en tonos rojizos.

Otras combinaciones interesantes son: 10-9-7; 9/10-7/5-5/2; 2-7-9; 5/2-7-10/9.

El análisis de estas imágenes pone perfectamente de manifiesto la presencia de excavaciones para la extracción de áridos y aquellas zonas utilizadas como vertederos de residuos urbanos y/o industriales de toxicidad variable, tanto por simple reconocimiento de las formas, por inspección visual de la imagen, como por la fuerte alteración radiométrica que tales prácticas provocan en los suelos de cultivo.

Muchas de estas zonas figuran, según el Plan General Metropolitano de Ordenación Urbana de Barcelona (aprobación definitiva, 14-7-1976), como Sistemas de protección de sistemas generales, zonas de renovación urbana y suelos no urbanizables correspondiente a rústico protegido de valor agrícola.

La deposición de vertidos en estas zonas y la compactación de los mismos, ha sido irregular, lo que ha causado importantes asientos diferenciales en el terreno, adquiriendo en conjunto un aspecto de degradación elevado, impidiendo una correcta utilización de las tierras y llevando consigo a la destrucción del suelo fértil.

En algunas extracciones rellenas con residuos sólidos, se han manifestado pequeñas emanaciones de gas en la superficie producidas por la fermentación anaerobia de dichos residuos. Así en estos puntos, se aprecia una reflectancia ya visiblemente alta en el infrarrojo medio y más elevada en el in-

frarrojo térmico.

Las zonas afectadas desprovistas de cobertera vegetal y edáfica, retienen mal la humedad del suelo, aumentando fuertemente la reflectancia de las radiaciones infrarrojas y produciendo recalentamientos locales. En algún caso el tipo de material vertido puede influir directamente en el incremento o disminución de alguna longitud de onda en particular, pero es difícil identificar el tipo de residuo de este modo, ya que los productos de vertido suelen estar muy mezclados y no reproducen una signatura espectral característica.

Por otra parte, la presencia de agua en el fondo de algunas explotaciones, cuando se sobrepasa el nivel freático, es fácilmente detectable en este tipo de imágenes multispectrales. Este es un aspecto importante y a destacar, en cuanto a las graves consecuencias, referidas a contaminación del acuífero, que se podrían producir cuando el futuro vertedero entre en contacto directo con el mismo, disminuyendo en mucho la calidad de las aguas subterráneas. En las imágenes que se han analizado, se detectan ciertas zonas de extracción y vertido que afectan directamente al nivel freático, tanto en áreas del Bajo Llobregat como de la cubeta de la L.L. gosta.

Uno de los aspectos más interesantes en la utilización de este tipo de imágenes, se refiere a los resultados obtenidos del análisis de la actividad de la vegetación. En efecto, en el caso de la vegetación es donde se pueden percibir respuestas más claramente anómalas.

La respuesta espectral de la vegetación es muy característica y se diferencia bien de la de otros aspectos presentes en la superficie terrestre. En el comportamiento de la vegetación existen varias zonas bien diferenciadas según la longitud de onda de la radiación.

En el dominio visible, sabemos que está principalmente ligada a la presencia de pigmentos en la planta, principalmente en las hojas. En este dominio, la mayor parte de la radiación que llega a una planta, es absorbida, poca se transmite y el resto es reflejada.

La vegetación sana presenta dos bandas de absorción situadas a 0,48 μm y 0,68 μm (azul y rojo), que son resultado de la fuerte absorción de la clorofila. Entre estas dos bandas, se percibe otra en donde la absorción es menor y la reflectancia es mayor, entre 0,52 - 0,60 μm (verde).

En el dominio del infrarrojo próximo, la vegetación sana presenta una reflectancia muy alta (0,7 μm), así como una alta transmitancia y baja absorción. La estructura interna de las hojas es la que básicamente controla estas características.

En el infrarrojo medio (1,3 - 2,5 μm), la respuesta de la vegetación se caracteriza por las bandas de absorción debidas a la presencia de agua contenida en la vegetación (Goetz, Rock, Rowna, 1983).

En el dominio del infrarrojo térmico, la vegetación reemite una cantidad de radiación solar para mantener un balance energético adecuado. En este proceso, una planta, por lo general, mantiene una temperatura en las hojas que está aproximadamente 10°C ó 15°C por encima de la temperatura del aire con luz solar, y aproximadamente 5°C por debajo de la temperatura del aire durante el período más frío

de la noche. La temperatura de las hojas sigue un ciclo dentro de estos extremos que depende de los factores locales del entorno (Saraf and Cracknell, 1988).

En el área de estudio, tanto del Bajo Llobregat como de la Cubeta de la Lagosta, en terrenos, algunos de ellos destinados al uso agrícola, se han observado diferencias entre los valores de reflectancia espectral, en campos de cultivo inmediatamente cercanos a las áreas afectadas, como son aquellas antiguas áreas de extracción de áridos que posteriormente se aprovecharon como vertederos y que en la actualidad han sido prácticamente en su totalidad rellenas con tierra, y otras zonas teóricamente sanas y no afectadas.

La respuesta espectral de la vegetación en estas zonas denota la presencia de anomalías, que se reflejan en variaciones importantes respecto de la curva característica de un vegetal sano (Figura 1 y Figura 2).

En general, estas anomalías reflejan decrementos en el nivel de clorofila del vegetal, por lo que la absorción de energía en las respectivas bandas de absorción clorofílica será menor, produciéndose en estas zonas un incremento de los valores de reflectancia.

Se observa, además, una baja actividad fotosintética, los valores de reflectancia en los canales ATM 6, ATM 7 y ATM 8, son bastantes bajos, lo que denota además un estado de sanidad de la planta no del todo satisfactorio.

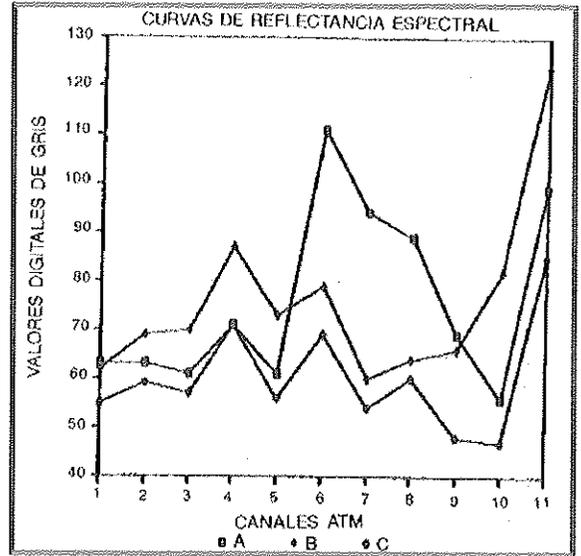
La anomalías en el vegetal, se reflejan también por un menor contenido en agua de las hojas, reflejando por incrementos importantes en el canal ATM 9.

Los cambios que se producen al resultar afectada la filosofía de la planta, se hacen también evidentes en el infrarrojo térmico. La respuesta espectral de la vegetación afectada, en este dominio es anómala, mostrando valores de reflectancia en esta porción del espectro más altos de lo normal, lo que denota una temperatura superior a la esperada para una vegetación teóricamente sana.

Estos análisis, permiten no sólo detectar bajos niveles de actividad fotosintética en las inmediaciones de áreas activas de extracción y/o vertido, sino que incluso en aquellos casos en los que tales actividades finalizaron hace algunos años, y son zonas de nuevo cultivadas, el estudio de la vegetación presenta un nivel de actividad y producción de biomasa inferior al de las áreas circundantes más alejadas. Así, en algunos casos, las prácticas de regeneración dejan el suelo en un estado de permeabilidad tal, que hacen difícil la retención del agua pudiendo provocar déficit hídrico en las plantas, con la consiguiente disminución de la producción vegetal. En otros casos, los vertidos utilizados en el relleno, contienen abundancia de cationes movilizables, que pueden influir negativamente en la fisiología de las plantas. Este sería un aspecto importante y a tener en cuenta para el seguimiento del nivel de recuperación de la vegetación en áreas regeneradas.

3. CLASIFICACIÓN

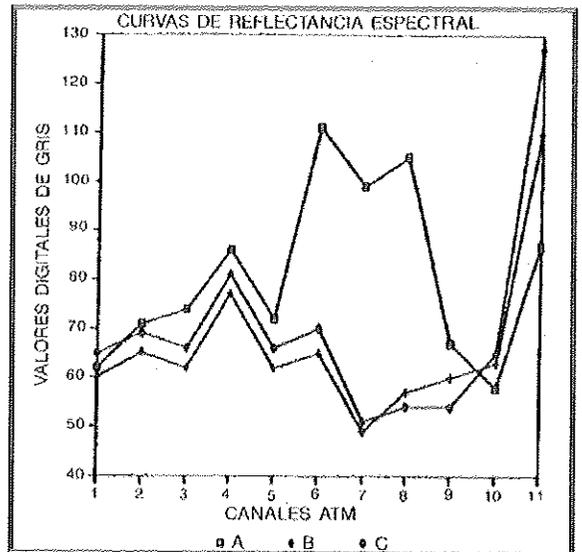
Las técnicas de clasificación, tienen por objeto categorizar cada elemento de resolución individualmente, signándolo a cada clase temática o informacional que mejor se adecue.



BAJO LLOBREGAT

- A. Respuesta espectral para vegetación sana.
 B. Respuesta espectral anómala para vegetación en zonas afectadas. Contenido en agua bajo. Temperatura elevada. Actividad fotosintética baja.
 C. Respuesta espectral anómala para vegetación con baja actividad fotosintética. Temperatura elevada.

Figura 1.- Curvas de Reflectancia Espectral comparativas para vegetación sana y vegetación en zonas afectadas.



LA LLAGOSTA

- A. Respuesta espectral para vegetación sana.
 B. Respuesta espectral anómala para vegetación afectada. Contenido en agua bajo. Temperatura elevada. Actividad fotosintética baja.
 C. Respuesta espectral anómala para vegetación con baja actividad fotosintética. Temperatura elevada.

Figura 2.- Curvas de Reflectancia Espectral comparativas para vegetación sana y vegetación en zonas afectadas.



Imagen 1.- LA LLAGOSTA, (10-7-11) . Véase Anexo de color.

En las dos áreas de estudio, se ha llevado a cabo un proceso de clasificación, que ha permitido distinguir diferentes niveles de actividad de la vegetación, incluyendo clases definidas como cultivos en diferentes estados, zonas de herbáceas, arboleda baja y bosque, niveles de vegetación con anomalías importantes y bien definidas, suelos estériles, referidos a suelos desnudos en donde no se puede desarrollar cobertura vegetal, que incluyen suelos más o menos degradados y en la mayoría de los casos identificados con áreas de extracción de áridos explotadas, algunas de ellas utilizadas como vertederos en la actualidad, o antiguamente siendo después rellenas. Así mismo, se han diferenciado también, las zonas urbanas y suelos desnudos.

En el proceso de clasificación, se ha utilizado un clasificador de máxima probabilidad, y se han seleccionado todos los canales, excepto el ATM1 y el ATM8, así mismo se ha seleccionado también la combinación siguiente, $-0,2848(\text{ATM}2) - 0,2435(\text{ATM}3) - 0,5436(\text{ATM}5) + 0,7243(\text{ATM}7) + 0,0840(\text{ATM}9) - 0,1800(\text{ATM}10)$, que representa un índice de verdor de la transformación Tasseled Cap de Kauth - Thomas (Banninger, 1986, Richards, 1986).

En la zona de estudio del Bajo Llobregat, los puntos más problemáticos se localizan localmente y de forma dispersa, mientras que en la Cubeta de La Llagosta se puede apreciar que en conjunto la zona está bastante afectada, observándose bien el nivel de degradación de las antiguas áreas de extracción, que también fueron utilizadas para el posterior vertido de residuos de distinta naturaleza y que en algunos casos, también fueron después rellenas.

La imagen 1, corresponde a una composición en falso color de los canales ATM 10, ATM 7 y ATM 11, de parte de la zona de estudio de la cubeta de La Llagosta, concretamente la situada junto al polígono industrial de La Llagosta. La figura 2 es el resultado de la clasificación realizada en es-

ta zona.

En ambos casos, se pueden observar los focos más contaminantes de este área, que son las zonas de relleno y el polígono industrial. Las zonas de relleno, se extienden a lo largo del cauce del río Besòs, de forma bastante continua, mayoritariamente en su margen derecha, entre el río y el polígono industrial. En estas zonas se tomaron puntos para su análisis, detectándose la presencia del nivel de clorofila, nivel bajo de humedad en las hojas, baja actividad fotosintética, incrementos elevados de temperatura y un estado de sanidad del vegetal no satisfactorio. En algunos puntos, se detectan así mismo, una serie de anomalías relacionadas directamente con la presencia de determinadas concentraciones de elementos. Así, por ejemplo, en puntos concretos se puede deducir la presencia de concentraciones de hierro, reflejadas por la existencia de una banda

de absorción en el canal ATM 7 ($0,76 - 0,90 \mu\text{m}$) más o menos acentuada, absorción en el canal ATM 5 ($0,63 - 0,69 \mu\text{m}$) y valores de reflectancia superiores en el canal ATM 2 ($0,45 - 0,52 \mu\text{m}$).

Localmente, en algunas de estas zonas, se observa la presencia de agua. Para aquellos suelos que tengan un contenido en humedad alto, la firmeza de los posible residuos depositados será menor, por lo que para estas regiones, se puede esperar que el proceso de degradación sea más intenso.

Otro de los focos potenciales de contaminación, como se ha citado antes, es el área donde se halla ubicado el polígono industrial.

En esta zona, los posibles contaminantes están en función de la actividad industrial, siendo uno de los mecanismos de contaminación, el lixiviado de residuos depositados junto a las instalaciones industriales. Aquí, mayoritariamente, se concentra industria química con diferente volumen de actividad, e industria metalúrgica y de transformación de metales con volumen de actividad media.

En la imagen clasificada de La Llagosta (imagen 2), se puede apreciar, en su conjunto, el alto nivel de degradación de la zona, diferenciándose bien el dominio definido como "bosque", "matorral" y vegetación intermedia entre matorral y árbol bajo, espacio definido como "nivel de vegetación A", y las zonas de relleno y el polígono industrial.

Los otros niveles de vegetación definidos, son los siguientes:

- "píxel de vegetación B", localizado en puntos próximos al río y en algunas zonas de relleno.
- "nivel de vegetación C", que corresponde a nivel muy bajo de vegetación mayoritariamente extendido de forma dispersa en zonas de relleno, y en el que se han registrado anomalías en la respuesta espectral de la planta, denotando contaminación por presencia de metales y otro tipo de residuos.

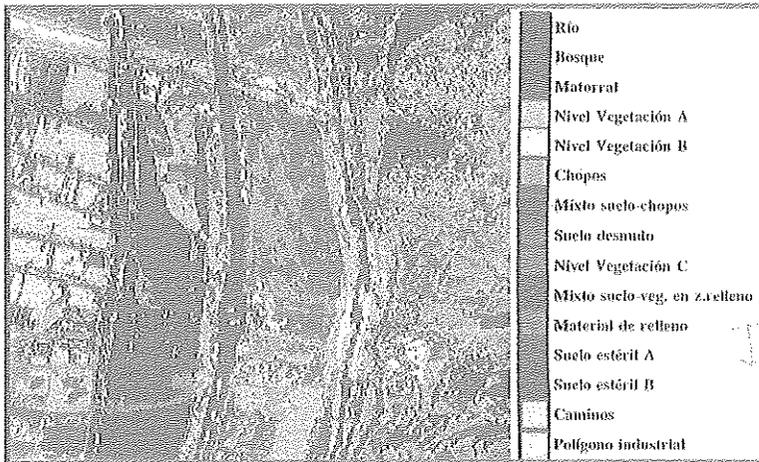


Imagen 2.- Clasificación LA ILAGOSTA. Véase Anexo de color.

La clase definida como "chópos", corresponde a una alameda combinada con zonas mixtas, donde se registraron marcadas anomalías, que reflejan, concretamente exceso de hierro de antiguos vertederos.

Las clases definidas como suelos estériles, reflejan amplias zonas donde no es posible el desarrollo de una cobertura vegetal. Mayoritariamente se encuentran en una gran zona de relleno situada en el margen derecho del río Besós, bajo la cual se asienta un vertedero de residuos urbanos. La variación entre los dos tipos de suelo estéril definido, se debe al uso de un material de relleno variable. Estas dos clases, en algunos puntos se solapan con las clases definidas como "polígono industrial" y "autopista", debido a que en dichos puntos, pueden presentar valores de reflectancia muy próximos. La clase definida como "material de relleno", se distribuye junto a zonas con desarrollo de vegetación.

4. MAPAS DE ÍNDICES

Los mapas de índices, permiten visualizar claramente en una zona determinada, la distribución de una serie de índices, como pueden ser, el índice de vegetación, índice de humedad, índice de oxidación del hierro, etc.

En la zona de estudio, se obtuvieron mapas de índices que muestran la variación espacial del índice de vegetación, obtenido por la normalización de la diferencia entre los canales ATM7 y ATM5. El índice de vegetación, es indicativo del nivel de actividad fotosintética y del estado de la vegetación. El índice se obtuvo de la manera siguiente:

$$IV = (ATM 7 - ATM 5 / ATM 7 + ATM 5 + 1) \times 50$$

consiguiéndose un rango de variabilidad entre 1 y 100.

A partir de la combinación de los canales ATM 5, ATM 7, ATM 10, se creó una imagen falso color sobre la que se identificaron visualmente los cultivos y vegetación. A continuación, sobre los distintos niveles de vegetación, se toma-

ron puntos para extraer el valor digital de gris para los canales que interesa y obtener el índice de vegetación.

A partir de estos datos, se crearon mapas que permitían distinguir las zonas en donde los índices de vegetación registraban niveles anormalmente bajos, de aquellas zonas donde los valores de los índices eran normales. Como se ha dicho, este índice es un indicador de la actividad fotosintética y del grado de salud de la planta, por lo que en principio es orientativo para discriminar aquellos cultivos o niveles de vegetación que muestren alteraciones y presenten un nivel de actividad o estado de salud (nivel de deshidratación) por debajo de los considerados normales, o respecto de otras zonas vecinas teóricamente no afectadas.

En las zonas de estudio, los valores de índices anormales, coinciden con zonas problemáticas, en cuanto que han sido objeto de extracciones de tierras y posterior vertido de residuos urbanos y/o industriales. Por otra parte, estos mapas pueden también mostrar áreas con valores anormales en zonas no controladas anteriormente o de las que no se tenía conocimiento de la presencia de anomalías.

Por los canales que se han utilizado en la obtención de este índice de vegetación, las insuficiencias que muestren los diferentes niveles de vegetación, se pueden deber tanto a lo que se denomina "stress hídrico", como a bajos niveles de contenido de nitrógeno. La causa íntima de estas deficiencias es difícil de determinar sin un análisis de cationes de las plantas, puesto que la presencia de ciertos elementos contaminantes pueden inducir sintomatologías del mencionado "stress hídrico", así como deficiencias de nutrición.

5. ANÁLISIS DIGITAL IMÁGENES TM

Las imágenes del sensor Thematic Mapper, instalado en el satélite LANDSAT-5, presentan una resolución espacial de 30 x 30 m. Estas imágenes muestran una amplia visión de las dos áreas de estudio, y permiten, tras su análisis, detectar con nitidez las extracciones de áridos actuales de mayor tamaño, así como los núcleos de contaminación industrial de mayor envergadura, sobre todo, cuando tales prácticas llevan consigo una disminución de la humedad del suelo y por tanto aumento de la reflectancia de las longitudes de onda infrarrojas medias o infrarroja térmica.

En algunos casos, debido al tamaño relativamente pequeño de las extracciones y de los vertederos, las alteraciones en la vegetación, se hacen difícilmente detectables en este tipo de imágenes, por lo que es difícil llegar a determinar con precisión, las áreas que fueron utilizadas como vertederos y que una vez rellenas, posteriormente, en algunos casos fueron de nuevo cultivadas. Así, el área de influencia de tales prácticas sobre la vegetación, es insuficiente para la detec-

ción de sus efectos a escala de resolución del Thematic Mapper.

En aquellas zonas afectadas de mayor tamaño, a partir de las imágenes TM, si se podrían registrar valores para su análisis, aunque su resolución no permita un análisis minucioso del estado de alteración del medio natural suburbano, y evidentemente, el detalle respecto de las ATM sería bastante menor. Es por esto, que dichas imágenes ATM, para este tipo de estudio, serían las apropiadas.

Sin embargo, una de las ventajas que ofrecen este tipo de imágenes, es la periodicidad de su captación, por lo que no

es necesario programar con antelación las campañas de control y obtención de imágenes. Además, permiten el análisis de situaciones pasadas (actualmente desde 1984) y realizar de este modo estudios multitemporales, permitiendo la actualización de las variaciones acaecidas.

En general, y en ambos casos, los resultados obtenidos en este estudio son complementarios a los estudios directos de campo, pero indudablemente orientan de forma decisiva hacia aquellas áreas más conflictivas, minimizando al máximo los muestreos y análisis necesarios.

6. BIBLIOGRAFIA

- ✓ BANNINGER, C. (1986): Optimal Thematic Mapper bands and transformations for discerning metal stress in coniferous tree canopies. *Symposium on Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management*. Enschede. pp 371-374.
- ✓ GOETZ, A., ROCK, B. & ROWAN, L. (1983). Remote Sensing for Exploration: An Overview. *Economic Geology*. 78: 573-590.
- ✓ RICHARDS, J. (1986): *Remote Sensing Digital Image Analysis An Introduction*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 281 p.
- ✓ SARAF, A. & CRACKNELL, A.P. (1988): Geological Applications of Thermal Infrared Characteristics of Vegetation. *Proceeding of IGARSS'88 Symposium*. Edinburgh. pp 1059-1060.