

UTILIZACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA CARTOGRAFÍA DE SUELOS.

M^a del Pilar GARCÍA RODRÍGUEZ* y Carmen MUÑEZ LEÓN**

* Dep. Geografía Física y A.G.R. Fac. Geografía e H. Univ. Complutense. Ciudad Universitaria, 28040 Madrid.

** Escuela Univ. Ingeniería Tecn. Agrícola. Ronda de Calatrava s/n. Ciudad Real.

Abstract: The aim of this work is to discuss the use of remote sensing applications -from our own experience and a literature review- on studies about soil distribution and cartography. The digital and analogic remote sensing imagery supports the conventional soil researchs based on aerial photography, field data and physico-chemical analysis. Soil survey can easily be improved and simplified by using Geographical Information Systems containing some representative soil parameters, which can be related to digital numbers, obtained through sensors: soil colour, organic matter content, soil texture, iron, moisture, salinity, mineralogy, temperature and degree of erosion.

Key words: Remote sensing, geographical information systems, soil survey.

Resumen: El objetivo de este estudio es discutir las aplicaciones de la teledetección (basándonos en nuestra propia experiencia y en una revisión bibliográfica) en los estudios sobre distribución de los suelos y su cartografía. El análisis digital y analógico de imágenes de satélite sirve de apoyo a los tradicionales estudios edafológicos mediante fotografía aérea, datos de campo y análisis físicoquímicos de laboratorio. La cartografía de suelos se puede mejorar y simplificar utilizando un Sistema de Información Geográfica en el que se incluyan algunos de los valores más representativos de los pedones, que pueden relacionarse con los números digitales obtenidos por los sensores: color, materia orgánica, textura, contenido en hierro, humedad, salinidad, mineralogía, temperatura y grado de erosión.

Palabras clave: Teledetección, sistemas de información geográfica, cartografía de suelos.

INTRODUCCIÓN

La cartografía de suelos, disciplina con gran importancia en España durante los años sesenta y setenta, ha sido cuestionada en la última década debido, entre otros, a problemas económicos y técnicos (IBÁÑEZ *et al.*, 1992).

En la actualidad, esta disciplina vuelve a cobrar importancia, tanto por su interés científico como por su vertiente aplicada: problemas

agrícolas, erosión del suelo, contaminación, etc., la hacen indispensable en los estudios integrados sobre medio ambiente. Por ello, se están intentando introducir nuevas técnicas (análisis geoestadístico, estudios de variabilidad espacial, teledetección, sistemas de información geográfica, modelos digitales del terreno, etc.), que faciliten su desarrollo y permitan aglutinar los numerosos datos disponibles.

La Unión Europea ha gestionado y finan-

ciado diferentes programas de investigación: MARS (VOSEN y MEYER, 1995), CORINE (CORINE, 1992), etc. en los que la Teledetección y los SIG han jugado un papel relevante. Asimismo, está tratando de obtener una base de datos homogénea (LE BAS y JAMAGNE, 1996) con las propiedades físicas, químicas y morfológicas de los perfiles más representativos de cada país. Esta base permitirá elaborar una cartografía temática aplicada a diferentes campos: agricultura, uso de suelo, contaminación, etc.

Mediante los sistemas de información geográfica se pueden combinar todos estos datos con los obtenidos, en formato digital, por los satélites (Landsat, Spot, Noaa, etc.) y los sensores aeroportados (AIS, AVIRIS, GER, PMI, etc.), que son capaces de discriminar más de 200 bandas en el espectro del visible e infrarrojo próximo (Palacios y Ustin, 1995), creando una base siempre actualizada (García, 1992). Numerosos autores investigan la relación que existe entre Teledetección y SIG, con los problemas que conlleva su integración y los beneficios que se obtienen de la interconexión de ambos (Ehlers et al., 1989; Jong, 1990; Raafat et al., 1991; Jackson, 1992; Estes, 1992; Fabri, 1992). En este campo, y sus aplicaciones a la cartografía de suelos, se comenzó a trabajar a principios de los años noventa (Gfeller, 1990; Kunijn et al. 1990; Oosterom et al., 1990; Skidmore et al. 1991; González, et al., 1993; Moreira et al., 1995; Legros, 1996). El desarrollo de diversos sistemas, tanto ráster como vectorial, permiten elegir aquél que más se ajuste a la finalidad del trabajo de los especialistas, y escoger también el sensor que resulte más útil considerando siempre la escala del trabajo a efectuar: satélites con alta resolución espacial como el SPOT, espectral como el LANDSAT, o temporal como NOAA, radares que permiten penetrar en el suelo, como los portados por los satélites ERS, etc. El problema de la escala es uno de los más importantes: hay que considerar que los satélites convencionales aún no disponen de una gran resolución espacial por lo que no se puede trabajar con

escalas grandes; sin embargo, para estudios a pequeña escala, pueden resultar muy útiles puesto que ofrecen una visión global y la posibilidad, debido a la alta resolución temporal, de hacer un seguimiento continuado; asimismo, su elevada resolución espectral permite discriminar más fácilmente los materiales y las áreas erosionadas.

En este trabajo se ha recogido la bibliografía e información que se ha considerado más importante, ya que nuestro objetivo no es efectuar una exhaustiva revisión, sino incluir aquellos trabajos que consideramos más significativos para introducir la Teledetección en los estudios de suelos publicada en los últimos años sobre la relación Teledetección, SIG y Edafología. También se describen, en nuestra opinión, las propiedades que hay que escoger, de todas las utilizadas en la descripción y análisis de los perfiles, a la hora de hacer un tratamiento digital y analógico de las imágenes de satélite.

SELECCIÓN DE DATOS

Uno de los grandes problemas en estos trabajos es la selección de los datos. Los satélites artificiales y sensores aeroportados generan un gran volumen de información difícil de tratar por los métodos tradicionales y susceptible de integrarse en un SIG, junto con datos de suelos obtenidos en el campo, análisis de laboratorio, información analógica, etc. Esto ha conducido a discutir qué bandas conviene escoger en cada sensor (Satterwhite et al., 1989) y qué tipo de datos es aconsejable seleccionar a la hora de efectuar un estudio sobre la distribución y variabilidad de las distintas propiedades de los suelos. Distintos autores (Cipra et al., 1980; Baumgardner et al. 1985; Mulders, 1987; Vergara et al. 1987; Irons et al., 1989; Labrandero et al. 1989; Hinse et al. 1990; Narayanan et al. 1992; García, 1992; Boluda et al., 1993; Silgestrom et al. 1993; Muller y James, 1994; Arquero et al., 1995; Ascaso y García, 1995; Rodríguez et al. 1995; Santos et al., 1995, etc.) están de acuerdo en afirmar que

las propiedades del suelo que más influyen en la respuesta espectral son: color, contenido en materia orgánica, textura, contenido en hierro, humedad, salinidad, composición mineralógica, temperatura y erosión. Otras propiedades como situación, pendiente, profundidad del perfil, composición química, etc. también pueden llegar a jugar un papel importante. Son pues, estos datos, los que conviene analizar detalladamente, con trabajo de campo, análisis de laboratorio, medidas radiométricas, etc., con el fin de seleccionarlos e integrarlos en el SIG.

Color del suelo

Es quizás la propiedad del horizonte superficial que tiene más influencia en los valores digitales (Escadafal et al., 1989). De los parámetros tradicionales incluidos en las tablas Munsell hay que considerar fundamentalmente el valor espectral (matiz), aunque tanto el brillo como la intensidad inciden en la respuesta de los sensores. En general, los suelos con valores de brillo e intensidad más elevados tienen números digitales más altos. Cipra et al. ya señalaron, en 1980, la relación del color con otras propiedades del suelo: contenido en materia orgánica, humedad, elementos químicos, textura, etc., y cómo esto queda reflejado en los valores espectrales, de manera que el color nos puede ofrecer información indirecta sobre ellas.

Materia orgánica

En general, cuanto más elevado es el contenido en materia orgánica, más bajos son los valores digitales, pero interviene también su grado de descomposición: la reflectancia disminuye al aumentar ésta. Las diferencias en el contenido de materia orgánica se observan mejor en las bandas visibles y en el infrarrojo próximo, especialmente en el intervalo 0.76-0.90 micrómetros (Stoner et al. 1980 b).

También, según estudios efectuados por las autoras, es buena la relación entre las bandas 5 y 4 del TM, o la obtención de componentes principales. Se puede establecer una relación indirecta que hay que tener en cuenta a la hora

de analizar los valores espectrales: el contenido en materia orgánica afecta, sobre todo, a color, capacidad de calor, contenido en agua, intercambio catiónico, estructura y erosionabilidad.

Para discriminarla de la humedad se utiliza el infrarrojo térmico: el agua tiene una alta emisividad, por lo que en los suelos afectados por hidromorfismo se modifica considerablemente este valor en la banda térmica. Considerando estos aspectos, los datos de laboratorio que se deben integrar en el SIG son: contenido total de carbono, relación carbono/nitrógeno y fraccionamiento de la materia orgánica.

Textura

Es una de las propiedades físicas que más incidencia tiene en la reflectancia, aunque su análisis es complejo, ya que, además del tamaño de las partículas y de las relaciones entre ellas, influye la rugosidad, agregados, contenido de humedad, esfericidad, redondez, etc. Montgomery y Baumgardner (1974) señalaron que el contenido en limo es el parámetro más significativo para explicar variaciones en las propiedades espectrales de suelos, ya que ofrecen superficies lisas, con una alta reflexión. En general, los suelos arcillosos tienen valores digitales más bajos que los arenosos. Para discriminar texturas son buenas las bandas del infrarrojo próximo y medio, especialmente las comprendidas entre longitudes de onda de 0.73-0.76, 0.88-0.90, 2.07-2.09 y 2.16-2.19 micrómetros (Stoner et al., 1980 a). También se pueden establecer índices de brillo que relacionen estas bandas espectrales.

Contenido en hierro

Los mejores intervalos para determinar la presencia de hierro en suelos están entre 0.63 y 1.30 micrómetros (Obukhov y Orlov, 1964). En general, al aumentar el contenido en hierro disminuye la reflectancia; sin embargo, los valores digitales pueden dar lugar a confusión sobre el contenido total de óxidos, ya que si éstos se encuentran en pátinas puede interpretarse que tiene contenidos más altos y

dar lugar a error cuando estos datos se integran en un SIG; por ello sería conveniente incluir los datos referentes a las diferentes formas del hierro, libre-total, amorfo-cristalino, etc., e incluso la composición de los minerales ricos en este elemento.

Este parámetro es especialmente importante en los suelos de regiones mediterráneas, tropicales y ecuatoriales. Además conviene establecer las relaciones entre óxidos de hierro y materia orgánica, debido a las conexiones entre clima y edafogénesis: en los suelos situados cerca del ecuador repercute más el contenido de hierro en los valores digitales, mientras que en áreas más frías tienen más repercusión los valores en materia orgánica; Coleman y Montgomery (1987) presentan información y datos cuantitativos sobre este interesante tema.

Contenido de agua

El intervalo de longitud de onda entre 2.08 y 2.35 es muy útil para determinar la humedad en el suelo (Baumgardner et al. 1985). En el Thematic Mapper la relación entre las bandas 7 y 5 discrimina los suelos en relación al drenaje: en general, al aumentar la humedad decrecen los valores digitales, por lo que los suelos bien drenados tienen reflectancia alta. Sobre la humedad se puede obtener información, haciendo estudios indirectos de vegetación (incluyendo la medida de índices NDVI de NOAA, Cihlar et al., 1991), relieve, pendiente, riego, agua encharcada, etc. La banda térmica es muy útil al existir una estrecha relación entre humedad y temperatura.

Para relacionar estos datos con información de laboratorio conviene incluir la densidad real y aparente, porosidad y permeabilidad. Estas investigaciones son útiles al efectuar estudios sobre suelos gleicos y pseudogleicos y sobre necesidades de agua, especialmente en áreas semiáridas.

Para hacer estudios sobre humedad, al ser un parámetro muy variable, conviene hacer seguimientos multiestacionales y multianuales. También conviene observar sus repercusiones

en los horizontes superiores y los patrones de drenaje superficiales.

Salinidad

Es una de las propiedades más fácilmente detectables mediante satélite, si bien las grandes variaciones estacionales, especialmente en aquellas zonas con fuertes fluctuaciones hídricas, exigen análisis muy continuados y es aconsejable la elección de sensores con alta resolución temporal. Los suelos salinos tienen valores más elevados en el espectro visible e infrarrojo próximo, por lo que se utiliza el intervalo 0.4-0.9 micrómetros (Mulders, 1987; Sharma y Bhargava, 1988), o la relación entre bandas del espectro visible e IR próximo. La diferencia entre suelos salinos y no salinos se observa también en la superficie de suelo (eflorescencias salinas), estructura, color, densidad y tipo de cubierta vegetal.

Los datos más importantes de campo y laboratorio que debemos contrastar con la información digital son: presencia de vegetación halófila, patrones de distribución superficial de sales, conductividad eléctrica y composición de las sales.

Evidentemente una cartografía y análisis de la distribución de los distintos grupo y unidades de suelos (Solonchaks, Solonetz) resulta muy complicada, no sólo por la limitada resolución de los sensores y la, en ocasiones, escasa repercusión superficial de los horizontes nátricos, sino porque en los suelos españoles, ambas unidades se encuentran a menudo asociadas de forma compleja sobre distancias muy pequeñas. Más útil y sencillo resulta, sin embargo, hacer un seguimiento temporal de la influencia de las sales en los cultivos y la salinización producida en suelos sometidos a riego continuado.

Composición mineralógica

La mineralogía de un suelo está estrechamente relacionada con la de su material original. Suelos con diferente origen dan valores espectrales distintos. La mayor parte de los

estudios mineralógicos aplicados a teledetección se han efectuado en laboratorio (Hunt y Salisbury, 1970; Mulders, 1987; Clark, 1990, etc.) mediante espectrorradiómetros, con el objetivo de investigar si estos datos serían extrapolables a la naturaleza. De los estudios de estos investigadores se deduce que numerosos minerales poseen bandas de absorción características que permiten discriminarlos: cuarzo y feldespatos tienen valores altos en el visible e infrarrojo, sin picos de absorción característicos salvo que posean impurezas; la moscovita tiene bandas de absorción características en 1.4, 2.2 y 2.6 micrómetros, debido a la presencia de grupos hidroxilo. En la biotita hay también bandas en 0.6 y 1.5 debido a los iones ferroso y férrico. Los filosilicatos están, en general, afectados por los grupos hidroxilo; la caolinita tiene espectro con valores altos, debido a que no posee cantidades apreciables de agua; por el contrario, la montmorillonita tiene valores pequeños con bandas de absorción en 1.4 y 1.9 micrómetros. Piroxenos y anfíboles se caracterizan por las bandas de absorción del hierro y los grupos hidroxilo. También la limonita tiene una banda de absorción en 0.9 debido a su contenido en hierro. Otro mineral característico es la calcita, con reflectancia muy alta y bandas de absorción de carbonato en 1.8 y 2.5.

Todos estos datos, obtenidos por radiómetros o por plataformas espaciales, se podrían incluir en una base de datos, junto con los análisis efectuados por rayos X y fluorescencia, absorción atómica y microscopios petrográficos, con el fin de tener un conocimiento detallado de la mineralogía del suelo, tanto en su fracción arcillosa, como en limos y arenas.

El problema surge al encontrarnos que en la naturaleza es raro que aparezcan suelos monominerales, por lo que se suelen producir interferencias entre los diferentes picos de absorción; en este caso, las curvas espectrales ya no son tan representativas. Por esto, se están efectuando investigaciones en proyectos de colaboración (p. ej. NASA-ITGE) con sensores aeroportadas de altísima resolución espectral

(Antón-Pacheco, 1992), ya que son los que pueden establecer una mejor discriminación entre los distintos materiales. Por el contrario, las plataformas espaciales, debido a su menor resolución espacial y espectral, sólo pueden establecer cartografías litológicas a pequeña escala: separar intrusiones ígneas, diferenciar distintas bandas de metamorfismo, discriminar materiales con un contenido muy elevado en un determinado mineral, etc.

Otros parámetros químicos

Aunque no está muy claro que se pueda establecer una relación directa entre los parámetros químicos y la reflectancia de los suelos, estas propiedades tienen, evidentemente, una repercusión en los valores espectrales. Además de los contenidos en hierro y materia orgánica, hay que considerar: pH, contenido en carbonatos, sílice, manganeso, potasio y fósforo asimilables y capacidad de intercambio catiónico. Muchos de estos parámetros se relacionan entre sí y la mayoría tienen repercusión en el color del suelo, tipo y estado de la vegetación y evolución del pedión.

Temperatura

Para medir la temperatura del suelo se utilizan sensores con bandas térmicas; así, el TM tiene el canal 6, aunque es más frecuente emplear radiómetros o sensores activos. La temperatura del suelo es una de las propiedades más importantes que controla el crecimiento de las plantas y procesos de formación del suelo. La absorción de la radiación calorífica depende del color, contenido en agua, textura, composición, porosidad, rugosidad, etc. Esta temperatura ofrece una doble oscilación que es utilizada para discriminar los suelos: diurna y estacional. La temperatura de superficie puede dar indicaciones sobre condiciones subsuperficiales. El uso de sensores puede ser de gran ayuda para determinar el microclima de los suelos.

El satélite NOAA, con su sensor AVHRR, que tiene dos bandas térmicas, puede ofrecer mayor información espectral en estas longitu-

des de onda (entre 10.30 y 12.50 micrómetros), si bien su pequeña resolución espacial ocasiona dificultades al tratar de establecer el microclima en áreas pequeñas y heterogéneas.

Erosión

Se puede cuantificar la velocidad de erosión del suelo mediante el análisis continuado de imágenes Landsat. Sobrino et al. (1993) han establecido una correlación entre bandas del TM y la ecuación universal de pérdida del suelo, la aplicabilidad de la cual en áreas mediterráneas es muy discutida, concluyendo que la relación entre las bandas 4 y 5 es la que ofrece mayores ventajas para medir la erosión. Moreira et al. (1995) señalan que existen numerosas adaptaciones y modificaciones de esta ecuación para su uso en cuencas hidrográficas o parcelas de cultivo: "el uso de la tecnología de SIG y de imágenes de satélite permite abordar con eficacia la adaptación de estos modelos universales para obtener evaluación de pérdidas de suelo para territorios extensos".

En general, según estudios de las autoras, los suelos erosionados tienen valores más elevados en las bandas del visible e infrarrojo, especialmente en éste último. Puede haber formas de erosión visibles en la imagen o deducibles por diferencias de color, configuración o uso (Santos et al., 1995). También se utilizan estas imágenes para analizar degradación de suelos por erosión eólica, salinidad, alcalinidad, etc. En las áreas incendiadas la respuesta espectral tiene valores característicos (Chuvieco y Martín, 1995; Illera et al. 1995), aunque las repercusiones son mayores por las pérdidas de vegetación que por los suelos en sí.

Quizás es en este campo de degradación y erosión de suelos y desertificación (Bolle et al. 1993; Courault et al. 1994; Melia et al. 1993), donde la relación SIG-Teledetección puede ofrecer ayudas más significativas debido a la importancia que este problema tiene en la actualidad, en el desarrollo y mantenimiento de los diferentes ecosistemas. Satélites como el NOAA, con alta resolución temporal, están siendo muy uti-

lizados para medir el avance de la desertización en las áreas áridas y semiáridas del planeta.

Profundidad del suelo y situación

Estas características tienen también una gran repercusión en los procesos edafogenéticos y en la respuesta espectral de los suelos. Tienen influencia no sólo por su situación respecto al sensor y al ángulo solar, sino también por las condiciones de drenaje, evolución del suelo, etc. En general, los suelos poco profundos tienen colores claros y los profundos oscuros, aunque la incidencia de otros factores (materia orgánica, etc.) pueden hacer variar estos parámetros.

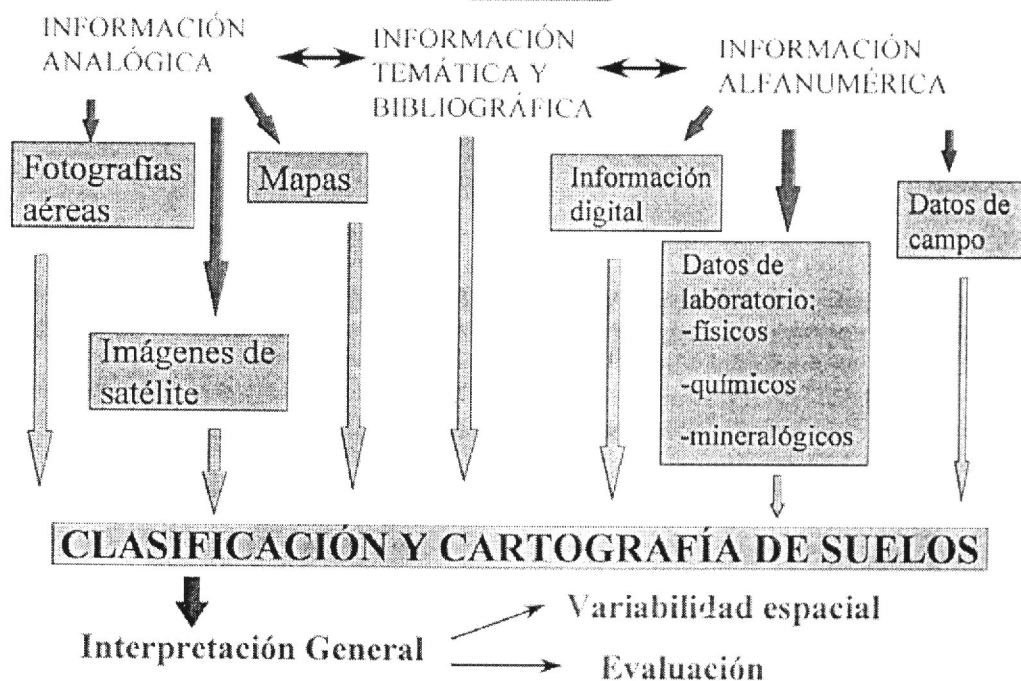
CONCLUSIONES

Con los datos enviados por los satélites se obtiene un gran volumen de información, por lo que es necesario utilizar sistemas de análisis digital, para efectuar un tratamiento efectivo de los mismos. Los resultados obtenidos por teledetección son la mejor fuente de datos para los SIG, integrándolos junto con otros resultados morfológicos y analíticos de suelos, vegetación, relieve, clima, etc. y con la información analógica de mapas y fotografías aéreas (fig.1). De esta forma, los resultados de las investigaciones podrán estar siempre actualizados y ser de utilidad en el estudio de los recursos naturales.

Al seleccionar la información más útil, susceptible de ser contrastada tanto por las imágenes de satélite, como por los trabajos de campo y análisis de laboratorio, en un estudio sobre variabilidad y distribución de suelos interesan, como propiedades más significativas: color, materia orgánica, contenido en hierro, textura, humedad, salinidad, composición mineralógica, temperatura, grado de erosión, situación y profundidad de los pedones.

En todo caso, no es sencillo establecer una relación entre las propiedades físicas y químicas de los suelos y sus curvas espectrales características, puesto que son muchos los factores

INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN DE SUELOS EN UN S.I.G.



que inciden en la variabilidad espectral y espacial: suelos parecidos pueden tener respuesta espectral diferente debido a variaciones superficiales, y suelos con propiedades químicas dispares pueden dar una respuesta similar. Evidentemente es el horizonte superficial el que mejor se refleja en las características espectrales, aunque pueden influir las condiciones subsuperficiales. Sólo los estudios con radares que penetren en el terreno pueden ofrecer información fidedigna sobre las características de los horizontes profundos. La dificultad para establecer esta relación conduce a investigar qué tipo de sensor (espacial o aeroportado) puede resultar más útil para los estudios de suelos, teniendo en cuenta la escala a la que se trabaja.

Así, pensamos que para hacer estudios detallados, a grandes escalas, es conveniente utilizar sensores aeroportados, junto con los datos de radiómetros de campo; si no existe

esta posibilidad, se puede utilizar la banda pancromática del SPOT y/o radares de apertura sintética. Para escalas medias, el sensor más utilizado es el TM de Landsat, por su alta resolución espacial y espectral. Para estudios globales, a pequeña escala, puede utilizarse el satélite NOAA que ofrece una altísima resolución temporal, que lo hace además muy útil para investigar problemas de erosión y degradación, considerando la interferencia del suelo sobre los valores de NDVI (Ascaso y García, 1995).

En cuanto a la resolución espectral, los experimentos que se están realizando con sensores aeroportados muestran buenos resultados en la discriminación de distintas litologías, lo que podría llevar a incluirlos en naves espaciales, abaratando así su coste.

En todo caso, y a pesar de los numerosos trabajos publicados en las últimas décadas so-

bre la relación suelos- teledetección y las expectativas con ello creadas, consideramos que esta técnica es, simplemente, un apoyo en los estudios sobre suelos. El tratamiento de los datos, tanto analógico como digital, hay que integrarlo con los datos obtenidos por fotointerpretación, de campo y laboratorio. Quizás la mayor ventaja, en nuestra opinión, se obtiene al hacer estudios globales que relacionen la distribución de suelos con otros factores ambientales, dentro de las unidades de paisaje.

Además, el desarrollo de nuevos satélites y sensores aplicados a la teledetección, la generalización de los Sistemas de Información Geográfica y la unificación de bases de datos, permitirán dar un impulso a la cartografía de suelos y homogeneizar los numerosos datos analizados por los edafólogos. La utilización de SIG permite tener la información ya digitalizada y en todo momento actualizada. Esto facilitará su integración con otros datos sobre el medio físico, beneficiando las investigaciones globales sobre el medio ambiente.

REFERENCIAS

- Anton-Pacheco, C. y Gumiel, J.C. (1992). Nuevos sensores multispectrales aeroportados de alta resolución en estudios geológicos: GER y AVIRIS en el Macizo ultrabásico de Ronda. Actas VIII Congreso Latinoamericano de Geología, Salamanca, 1992, 471-475.
- Arquero, A.; Martínez, E; Gonzalo, C. y Ormeño, S. (1995). Características espectrales de los suelos. Relación con sus propiedades físicas y químicas. VI Reunión Científica Asociación española de Teledetección. Valladolid, 1995, 98-99.
- Ascaso, P. y García, M.P. (1995). Relación de los NDVI procedentes de imágenes NOAA y parámetros biogeográficos en el valle del río Gállego (Aragón). Actas VI Reunión de la As. Esp. Teledetección, 240-241.
- Baumgardner, L.; Silva, L.; Biehz, L. y Stoner, E. (1985). Reflectance properties of soils. *Advances in Agronomy*, **38**.
- Bolle, H.J.; Streckenbach, B. (edit.). (1993). EFEDA: European field experiment in a desertification threatened area. *Ann. Geophysicae*, **11**, 173-189.
- Boluda, R.; Colomer, J.C.; Morell, C. y Sánchez, J. (1993). Estudio de las curvas de reflectancia y su relación con las propiedades de los suelos en una zona semiárida (Castilla - La Mancha, España). Actas XII Congr. Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Salamanca, 1993, 1248-1255.
- Cihlar, J.; St. Laurent, L.; L. Dyer, J. A. (1991). The relation between Normalized Difference Vegetation Index and Ecological Variables. *Remote Sensing of Environment*, **35**, 279-298.
- Cipra, J.E.; Franzmeier, D.P.; Bauer, M.E. y Boyd, R.K. (1980). Comparison of multispectral measurements from some non vegetated soils using Landsat Digital Data and a Spectroradiometer. *Soil Sc. Soc. Amer. Jour.*, **44**, 80-84.
- Clark, R.N.; King, T. V. V.; Klejwa, M.; Swayze, G. A. (1990). High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research*, vol. **95**, 12653-12680.
- Coleman, T.L. y Montgomery, O.L. (1987). Soil moisture, organic matter and iron content effect on the spectral characteristics of selected vertisols and alfisols in Alabama. *Photogram. Engen. Rem. Sens.* **LIII**, 1659-1663.
- CORINE (1992). Corine Soil Erosion Risk and Important Land Resources in the Southern Regions of the European Community. EUR 13233 EN, 97 pp.
- Courault, D.; Clastre, P.; Guinot, J. P.; Seguin, B. (1994). Analyse des secheresses de 1988 a 1990 en France à partir de l'analyse combinée de données satellitaires NOAA-AVHRR et d'un modele agrometeorologique. *Agronomie*, **14**, 14-56.

- Chuvieco, E. y Martin, M.P. (1994). Global fire mapping and fire danger estimation using AVHRR images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **60**, 563-570.
- Ehlers, M.; Edwards, G. y Bedard, Y. (1989). Integration of Remote Sensing with Geographic Information System: a necessary evolution. *Photographic Engineering and Remote Sensing*, **25**, 1619-1627.
- Escadafal, R.; Girard, M.C. y Courault, D. (1989). Munsell Soil Color and Soil Reflectance in the Visible Spectral Bands of Landsat MSS and TM data. *Remote Sensing of Environment*, **27**, 37-46.
- Estes, J.E. (1992). Remote sensing and GIS integration: research needs, status and trends. *ITC Journal*, 2-10.
- Fabri, A.G. (1992). Remote sensing, geographic information systems and the environment: a review of interdisciplinary issues. *ITC Journal*, 119-126.
- García, G.J.; Valerio, M. & Pinto, S. (1995). Updating maps of soils through Landsat images. *Revista Española de Teledetección*, **5**, 12-17.
- García, M.P. (1992). Aplicaciones de la teledetección a la Edafología: estudio de la distribución de suelos. Actas III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano, Salamanca, 1992, 493-497.
- Gfeller, M. (1990). Tests with GIS for soil mapping in Switzerland. Proceeding first European Conference on Geographical Information Systems, Amsterdam, 1990, 366-371.
- Girard, M.C. (1995). Apports de l'interprétation visuelle des images satellitaires pour l'analyse spatiale des sols. *Etude et Gestion des Sols*, **2**, 1, 7-24.
- González, A.; Fernández, A.; Lobato, A.; Moreira, J. M. (1993). Cartografía y estadística de cultivos en riego en el entorno de Doñana mediante la integración de SIG y clasificación de imágenes Landsat TM. Teledetección y Medio Ambiente. Acta IV. Reunión Española de Teledetección.
- Hinse, M.; Badraoui, M.; Merzouk, A. y Bonn, F. (1990). Application des données Landsat-TM pour l'étude des caractéristiques pédologiques d'une région semi-aride du Maroc. *Photointerprétation*, 53-64.
- Hunt, G.R. y Salisbury, J.W. (1970). Visible and near infrared spectra of minerals and rock: silicate minerals. *Modern Geology*, **1**, 283-300.
- Ibáñez, J.J.; Boixadera, J. y Jiménez, R. (1992). El reconocimiento e inventario de suelos en España. Problemas y posibilidades actuales. Fourth meeting of the support group "Soil and G.I.S.", Madrid, 1992.
- Illera, P.; Fernández, A. y Delgado, J.A. (1995). Fire monitoring in Spain using NOAA thermal data and NDVI. Sensor and Environmental Applications of Remote Sensing. *Proceed. of the 14th EARSeL Symposium Gotenberg. Sweden*.
- Irons, J.R. (edit.). (1989). Soil reflectance, theory and applications of Optical Remote Sensing. Wiley and Sons.
- Jackson, M.J. (1992). Integrated Geographical Information Systems. *Intern. Journ. Remote Sensing*, **13**, 1343-1351.
- Jong, S.M. (1990). Integration of Remotely Sensed and GIS Data to determine SPOT. *Proc. first European Conference on Geographical Information Systems, Amsterdam, 1990, 517-525*.
- Kunijn, N.T. y Loedeman, J.H. (1990). Computer supported activities for Soil Survey with Aerial-Activities for Soil Survey with aerial-photointerpretation: case study Antequera (Southern Spain). *Proc. first European Conference on Geographical Information Systems, Amsterdam, 1990, 595-604*.
- Labrandero, J.L.; García, M.P.; Carvelaris, J.J. y de Lera, O. (1989). Variabilidad espectral de los suelos de raña. III Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección, Madrid, 1989, 151-156.

- LeBas, C. and Jamagne, M. (1996). Soil databases to support sustainable development. Joint Research Centre. European Commission. EUR 16371 EN. INRA.
- Legros, J.P. (1996). Cartographie des sols. Press Polytech. Univ. Romandes.
- Melia, J.; Gilabert, M.A. y Younis, M.T. (1993). Contribución de la teledetección en el estudio de las regiones semiáridas. En: La Teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. *Climatología y desertificación*. Ed. Univ. Valencia, **10**, 239-268.
- Montgomery, O.L. y Baumgardner, M.F. (1974). The effects on the physical and chemical properties of soil on the spectral reflectance of soils. LARS Tech. Report 112674. Lab. Applic. Remote Sensing. Purdue Univ. West Lafayette. Indiana. EE.UU.
- Moreira, J.M.; Rodríguez, M.; Sánchez, J. D.; Navarro, C.; Villar, L. (1995). Elaboración de un modelo de evaluación de pérdida de suelo utilizando imágenes de satélite de alta y baja resolución (Landsat TM y NOAA AVHRR). VI Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección, Valladolid, 1995, 170-171.
- Mulders, M.A. (1987). Remote sensing in soil science. Elsevier. Amsterdam.
- Muller, E. y James, M. (1994). Seasonal variation and stability of soil spectral patterns in a fluvial landscape. *Int. Jour. Remote Sensing*, vol. 15, **9**, 1885-1900.
- Narayanan, R.M.; Green, S.E. y Alexander, D.R. (1992). Soil classification using mid-infrared off-normal active differential reflectance characteristics. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **58**, 193-199.
- Obukhov, A.I. y Orlov, D.S. (1964). Spectral reflectivity of major soil groups and possibility of using diffuse reflections in soil investigations. *Soviet Soil Science*, **2**, 174-184.
- Oosterom, A.P.; Stuiver, H.J. y Wielemaker, W.G. (1990). Application of GIS in reconnaissance soil survey. Proc. first European Conference on Geographical Information Systems, Amsterdam, 1990, 821-828.
- Palacios, A. y Ustin, S. (1995). Discriminación entre suelos mediante la utilización de espectrometría de alta resolución (AVIRIS). Comparación entre medidas tomadas desde AVIRIS y medidas tomadas en el laboratorio. VI Reunión Científica Asoc. Esp. Teledetec., Valladolid, 1995, 108-109.
- Raafat, H.M.; Xiao, Q. y Gauthier, D.A. (1991). An extended relational database for remotely sensed image data management within GIS. *Geoscience and Remote Sensing*, **29**, 651-655.
- Rodríguez, A.; Siljeström, P.; Clemente, L.; Rodríguez, J. y Moreno, A. (1995). Caracterización de las pautas geomorfológicas de la flecha litoral de Doñana. *Revista Españ. de Teledetección*, **5**, 29-33.
- Santos, F.; Fernández, J.M. y Alonso, P. (1995). Estudio de la distribución de suelos y sus procesos de erosión en Valladolid, utilizando imágenes de satélite Landsat-5 (TM). VI Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección, Valladolid, 1995, 66-67.
- Satterwhite, M.B. y Henley, J.P. (1987). Spectral characteristics of selected soils and vegetation in northern Nevada and their discrimination using band ratio techniques. *Remote Sensing of Environment*, **23**, 155-175.
- Sharma, R.C. y Bhargava, G.P. (1988). Landsat imagery for mapping saline soils and wet lands in North-West India. *Intern. Journal Remote Sensing*, **19**, 39-44.
- Siljeström, P.; Moreno, A.; García, L.V. y Clemente, L. (1993). Diferenciación de unidades edáficas en base a imágenes TM. *Revista Asociación Española de Teledetección*, **2**, 4-11.
- Skidmore, A.K.; Ryan, P.J.; Dawes, W.; Short, D. y O'Loughlin, E. (1991). Use of an expert system to map forest soils from a Geographical Information System. *Intern.*

- Journal Geographical Information Systems*, **5**, 431-445.
- Sobriño, P.; Boluda, R. y Caselles, V. (1993). Aplicación del sensor Thematic Mapper del satélite Landsat-5 al estudio de la erosionabilidad del suelo en la comarca La Plana de Requena-Utiel (Valencia-España). Actas XII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, 1408-1416.
- Stoner, E.R.; Baumgardner, M.E.; Biehl, L.L. y Robinson, B.F. (1980 a). Atlas of Soil Reflectance Properties. Dep. of Agronomy and the Lab. for Applications of Remote Sensing. Purdue Univ. Res. Bull., 962 pp.
- Stoner, E.; Baumgardner, M.F.; Weissmiller, R.A.; Biehl, L.C. y Robinson, B.Y. (1980 b). Extension of laboratory measured soil spectral to field conditions. Soil Sci. Soc. Amer. Jour. **44**, 572-574.
- Vergara, N. y Farias, M. (1987). Empleo de imágenes satelitarias para la clasificación termal de suelos forestales. *Ciencia e Investigación Forestal*, vol. 1, **2**, 61-73.
- Vossen, P. and Meyer, J. (1995). Crop monitoring and yield forecasting activities of the MARS project. In: European land information systems for agro-environmental monitoring. King, D., Jones, R.J.A. and Thomasson, A.J. (Eds.). CEC-JRCDGXII, Luxembourg. 11-29.