



Congreso Nacional del Medio Ambiente
Cumbre del Desarrollo Sostenible

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Uso de radiometría de campo VNIR para determinar propiedades en suelos mediterráneos de zonas áridas y semiáridas

Autor: Patricia Córdoba Sola

Institución: Grupo de Edafología Ambiental, Dpto. de Agroquímica y Medio Ambiente. Universidad Miguel Hernández de Elche
E-mail: pcordova@umh.es

Otros autores: Jose NAVARRO-PEDREÑO (Universidad Miguel Hernández), Ignacio MELENDEZ-PASTOR (Universidad Miguel Hernández), M^a Belén ALMENDRO-CANDEL (Universidad Miguel Hernández), Ignacio GÓMEZ-LUCAS (Universidad Miguel Hernández).



RESUMEN:

Una parte importante de la superficie del territorio español está amenazada por procesos de desertificación (INCD, 1994). Las regiones más afectadas y en las de mayor riesgo se localizan al Sureste de la Península Ibérica (López Bermúdez, 1999). La determinación de propiedades edáficas apuesta por las nuevas tecnologías, siendo necesario mejorar las metodologías que usan datos espectrales (Ben-Dor et al., 1999). La radiometría de campo VNIR es una técnica basada en la respuesta espectral que emiten las superficies frente a la radiación. Estas regiones abarcan las longitudes de onda en que la vegetación (Riaño et al., 2003; Lillesand et al., 2004; Aronoff, 2005) y los componentes del suelo (Demattê et al., 2004) poseen un comportamiento espectral distintivo que permite su detección, cuantificación y discriminación entre ellos. El objetivo fue determinar la relación entre propiedades edáficas: textura, carbonatos y materia orgánica, y las reflectividades espectrales. Para ello, se estudio el entorno del PPNN de El Hondo de Crevillente-Elche. Se realizaron dos muestreos (febrero y abril 2007) tomando siete muestras de suelo situadas en tres zonas del perímetro del Parque Natural: 1), 2) y 3) en una zona de saladar asentado sobre cultivos abandonados hace 50 años, 4) y 5) en un extenso campo de cultivo con alfalfa (*Medicago sativa*), 6) y 7) en un área dedicada al cultivo de avena en el primer muestreo, segado y sembrado en el segundo muestreo. Se efectuaron cinco medidas radiométricas a cada una de las muestras inalteradas de suelo, se les aplicó un análisis derivativo (1ª y 2ª derivada) y posteriormente se empleó el estadístico de coeficiente de correlación a los resultados analíticos obtenidos en laboratorio y las segundas derivadas de reflectancia de los espectros originales de las muestras de suelo. Los resultados del estadístico revelaron para los carbonatos y materia orgánica (%) su máxima correlación ($r=0,88$ y $r=0,94$, respectivamente) en $\lambda=947\text{nm}$. Las partículas de arcilla presentaron dos máximos ($r=0,89$) en $\lambda=528\text{nm}$ y $\lambda=772\text{nm}$. La fracción de arena alcanzó su máximo ($r=0,96$) en $\lambda=836\text{nm}$. Por último, la fracción de limo alcanzó su máximo ($r=0,97$) en $\lambda=419\text{nm}$. A partir de los resultados aquí obtenidos y sabiendo que reflectividades y longitudes de onda se pueden asociar a determinados parámetros edáficos, se pueden estimar cuantitativamente. Referencias Aronoff, S. (2005): Remote sensing for GIS managers. New York, USA. ESRI Press. 487 p. Ben-Dor, E. y Banin, A. (1995): Near Infrared Analysis (NIRA) as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. Soil Sci. Soc. of America J. 59, 364-372. Demattê, J.A.M., Campos, R.C., Alves, M.C., Fiorio, P.R., Nanni, M.R. (2004): Visible-NIR reflectance: a new approach on soil evaluation. Geoderma 121(1-2), 95-112. INCD (1994): Elaboration of an International Convention to Combat Desertification in Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification and Particular in Africa. Final Negotiations Text of the Convention. Unites Nations, Geneva Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., Chipman, J.W. (2004): Remote sensing and image interpretation. New York, USA. Wiley. 763 p. López Bermúdez, F. (1999): Indicadores de la Desertificación: Una propuesta para las tierras mediterráneas amenazadas. Murgetana 100, 113-128. Real Academia Alfonso X El Sabio. Murcia. Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J., Aguado, I. (2003): Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 41(5), 1056-1061.



INTRODUCCIÓN

El Convenio de Naciones Unidas de lucha contra la Desertificación (INCD, 1994), que entró en vigor a finales de 1996, insta a la reflexión sobre las causas climáticas y socioeconómicas de la desertificación, sobre sus consecuencias y la necesidad de establecer estrechos lazos entre la ciencia y los programas de acción para su control, mitigación y prevención. Especialmente, en las regiones más afectadas y en las de mayor riesgo, como es el caso del Sureste de la Península Ibérica (López Bermúdez, 1999).

Falta información básica sobre la variabilidad geográfica de los suelos, que se pone particularmente de manifiesto en el caso de precisar el impacto del cambio climático (Vallejo *et al.*, 2005). Por consiguiente, deberían promoverse estudios básicos para intentar detectar las tendencias en la evolución de los suelos y sus respuestas a las perturbaciones, especialmente en relación con los eventos de baja periodicidad.

Una primera necesidad sobre los recursos edáficos es el inventariado de los mismos a una escala útil, la evaluación de su estado, planificar su gestión y proyectar las tendencias de cambio. Sería necesaria la investigación en sistemas informáticos que faciliten la transferencia de la información y el conocimiento sobre los recursos edáficos a los políticos y los usuarios directos del territorio, tanto para los escenarios actuales como para aquellos de cambio climático (EC). Los sistemas de apoyo a la toma de decisiones en la planificación de usos de suelos, así como en la formulación de prácticas de manejo a la medida de cada suelo (por ejemplo: Micro LEIS DSS, De la Rosa *et al.* 2004), constituyen una realidad con extraordinarias posibilidades de aplicación y adaptación.

Bajo estas premisas, considerando el aumento de la presión por parte de la población por todo el mundo y la necesidad de una producción agrícola creciente, existe una necesidad definida de una mejor administración de los recursos edáficos.

Atendiendo a estas necesidades, el conocimiento y caracterización de los suelos mediterráneos se ha convertido en un campo de investigación científica y medioambiental prioritario. La determinación de sus propiedades de forma efectiva y concisa lleva a un planteamiento científico-tecnológico práctico mediante la apuesta por las nuevas tecnologías, siendo necesario mejorar las nuevas metodologías que usan datos espectrales (Ben-Dor *et al.*, 1999).

La radiometría como parte de la Teledetección, es la técnica que permite obtener información de objetos a distancia sin que exista un contacto material. Para que esta observación sea posible es necesario que exista algún tipo de interacción entre los objetos (cubiertas) y el sensor. En este caso la interacción es un flujo de radiación que parte de los objetos y se dirige hacia el sensor. Este flujo es, en cuanto a su origen, fundamentalmente la radiación solar reflejada por los objetos.

La radiometría de campo VNIR está relacionada con la medición de la radiación electromagnética en la región del visible (350nm – 750nm) e infrarrojo cercano (750nm – 2500nm). Esta técnica está basada en la respuesta espectral que emiten las superficies frente a la radiación. Estas regiones abarcan las longitudes de onda en que la vegetación (Riaño *et al.*, 2003; Lillesand *et al.*, 2004; Aronoff, 2005) y los componentes del suelo (Demattê *et al.*, 2004) poseen un comportamiento espectral distintivo que permite su detección, cuantificación y discriminación entre ellos.



La reflectancia, definida como la relación entre la intensidad de luz reflejada por una muestra y la intensidad de luz incidente sobre ella, se mide mediante espectrofotómetros de reflexión específicos o de amplio espectro (Stoner y Baumgardner, 1981; Galvão y Vitorello, 1998) compuestos por una fuente de luz y un prisma que separa la fuente de luz en distintas longitudes de onda, obteniéndose un espectro continuo de reflectancia de la muestra. El empleo de estos sensores puede facilitar la determinación de propiedades claves para el estudio del estado de conservación de los suelos mediante la obtención de un espectro electromagnético, que se puede asociar a las características de la cubierta edáfica. Esta técnica permite, de forma rápida e *in situ*, analizar muchas muestras en poco tiempo, sin necesidad de eliminar suelo en los muestreos y esperar a los resultados analíticos posteriores (Stark *et al.*, 1986, Mathieu *et al.*, 1998; Chang *et al.*, 2001, Li *et al.*, 2005; de Rosnay *et al.*, 2006; Genú y Dematté, 2006; Saleh *et al.*, 2007). Se ha empleado para la estimación en distintos tipos de suelos de propiedades como: materia orgánica, arcilla, óxidos de hierro (Coleman *et al.*, 1991); capacidad de intercambio catiónico "CIC" (Ben-Dor y Banin 1995a); calcio, magnesio, fósforo, y contenido en potasio (Janik *et al.*, 1998); pH, ratio Ca:Mg (Dunn *et al.*, 2002); humedad del suelo (Lobell y Asner, 2002); SiO₂, TiO₂, Fe₂O₃ y Al₂O₃ (Fioro, 2002); contenido en nitrógeno (Vagen *et al.*, 2006); conductividad eléctrica del suelo (Shrestha, 2006).

El uso de esta técnica espectral para la evaluación de los recursos naturales, en especial de la cobertura vegetal y del suelo, permiten una mejor microzonificación de la distribución de la vegetación, obteniendo como resultado información tanto numérica como cartográfica de mayor detalle. Esta información, junto con las ventajas en la utilización de los sistemas de información geográfica, facilitan la actualización, análisis, desarrollo y dinámica del recurso, información fundamental para la correcta toma de decisiones en cuanto a las políticas de manejo de recursos naturales, tanto a corto como a largo plazo.

Su aplicación puede proporcionar datos más actualizados y determinar por ejemplo, cómo un cultivo está creciendo en la actualidad, ajustar sus prácticas de riego, determinar dónde tomar muestras del suelo o colocar sensores de humedad, y entender los problemas de drenaje superficial o subterráneo. Adicionalmente, debido a que los patrones de superficie pueden cambiar durante la época de cultivo debido a la lluvia, labranza o riego, los datos espectrales del suelo pueden actualizarse cada vez que se realiza una medición de la superficie tratada.

El presente estudio propone la aplicación de radiometría de campo VNIR como técnica no destructiva para la determinación, evaluación y monitorización de propiedades de la cubierta edáfica de suelos mediterráneos.

Los objetivos son establecer la correlación o transferibilidad de datos radiométricos entre muestras de suelo inalteradas y muestras preparadas para su análisis en laboratorio. Con ello se pretende obtener la sensibilidad a la variación del espectro según si se ha efectuado la medida mediante sensores radiométricos en condiciones de campo o tras su tamizado preparativo en laboratorio (separación de elementos gruesos y paso por tamiz 2mm). En segundo lugar, una vez obtenido los resultados de correlación entre espectros, determinar la relación entre parámetros edáficos: textura, carbonatos y materia orgánica, y reflectividades espectrales de las muestras de suelo inalteradas, obteniéndose de este modo las longitudes de onda con las que se establece una mayor relación y que



permitirían estimar de forma rápida las propiedades asociadas a dichas longitudes de onda.

El análisis granulométrico representa el dato más preciso para interpretar la génesis y las propiedades de los suelos. En todas las clasificaciones de suelos, la textura es un carácter diferenciante ampliamente utilizado para definir el tipo de suelo. Igualmente, a nivel de evaluación, la textura del suelo es un parámetro evaluador de la calidad ya que la gran mayoría de las propiedades físicas, químicas y fisicoquímicas están influenciadas por la granulometría: estructura, consistencia, permeabilidad, retención de agua, lavado, color, capacidad de cambio y reserva de nutrientes.

Los suelos arenosos son inertes desde el punto de vista químico, carecen de propiedades coloidales y de reservas de nutrientes. En cuanto a las propiedades físicas presentan mala estructuración, buena aireación, muy alta permeabilidad y nula retención de agua. Por el contrario, los suelos arcillosos son muy activos desde el punto de vista químico, adsorben iones y moléculas, floculan y dispersan, muy ricos en nutrientes, retienen mucha agua, bien estructurados, pero son impermeables y asfixiantes. Los suelos limosos tienen nula estructuración, sin propiedades coloidales, son impermeables y con mala aireación. Los suelos francos son los equilibrados con propiedades compensadas (Dorransoro, 2008).

La relación de estos parámetros y determinados procesos de degradación en suelos como la erosión, desertificación y contaminación, se pone de manifiesto ya que las partículas de arcilla se pegan, los limos no se unen y las partículas de arena son arrastradas por el viento y agua siendo, por tanto, muy erosionables.

La determinación de la materia orgánica también es determinante ya que contribuye, entre otras cosas, al crecimiento vegetal mediante sus efectos en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. Desempeña una función biológica a través de sus efectos en la actividad de la microflora y microfauna y, una función física y fisico-química que proporciona una buena estructuración, mejora la aireación y retención de humedad e incrementa la capacidad amortiguadora y de intercambio de los suelos. Mediante una medición directa e *in situ* se puede conocer el tipo/cantidad de enmienda orgánica a aplicar, su grado de descomposición y por tanto tomar decisiones relativas al manejo y gestión de la materia orgánica del suelo.

Los carbonatos son minerales frecuentemente formados por el proceso de edafogénesis, aunque debido a su alta solubilidad su acumulación no suele producirse en el horizonte más superficial. De hecho, los carbonatos pueden formarse en los horizontes A o C, pero su acumulación efectiva se produce solo en el horizonte B o de acumulación, como consecuencia de los procesos de intercambio que se producen en el mismo. Una excepción corresponde a los suelos de regiones de climatología semiárida y con abundantes rocas carbonatadas. En estas regiones, los procesos de intercambio con el suelo suelen ser “en ascenso”, es decir, las aguas subterráneas ricas en carbonatos ascienden hasta la superficie del terreno por capilaridad o por gradiente de humedad, depositando los carbonatos, y originando los denominados “caliches”, auténticos escudos de color blanco que recubren la superficie del suelo (Higueras *et al.*, 2004) hecho que se pone de manifiesto en esta zona de estudio.



La importancia de la determinación de los carbonatos está relacionada con la influencia que ejercen sobre el pH de los suelos. Un suelo con abundantes carbonatos tendrá un pH neutro o ligeramente alcalino mientras que un suelo sin carbonatos suele tener un pH ácido. Carbonatos comunes, como la calcita y dolomita, proporcionan un fuerte amortiguamiento frente a la acidificación de los suelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la zona de estudio

El área de estudio se encuentra en el entorno del Parque Natural de El Hondo, ubicado entre los términos municipales de Elche y Crevillente, ambos pertenecientes a la comarca del Bajo Vinalopó, al sur de la Comunidad Valenciana, España.

El área considerada ocupa una extensión total de 2.387 ha, de las que 1.245,88 pertenecen a Elche y el resto a Crevillente. La mayor parte de esta extensión es de propiedad privada, reduciéndose la estatal a 3,84 ha (0,16 % del total). Sus coordenadas geográficas son 38° 12' latitud norte y 0° 42' longitud oeste. Como gran propietario destaca la Comunidad de Riegos de Levante, que cuenta con una superficie de 1.556 ha, mientras que el resto está distribuida en 140 parcelas, la gran mayoría (más del 70 %) menores de 5 ha.

El Hondo fue declarado Paraje Natural de la Comunidad Valenciana, en base a la Ley de la Generalidad Valenciana 5/1988, de 24 de junio, mediante el Decreto 187/1988, de 12 de Diciembre. Posteriormente ha sido recalificado como Parque Natural mediante Ley 11/1994, 27 de diciembre (D.O.G.V. 24-23, 29 de enero, 1995) de Espacios Naturales Protegidos de la Comunidad Valenciana. En la actualidad, el pantano de El Hondo también goza de la protección derivada del régimen urbanístico, ya que está integrado en el Plan General de Ordenación Urbana de Elche y Crevillente, que califica el suelo, bajo el epígrafe 44 en el primer caso, como Suelo No Urbanizable, Protección de Saladares, y bajo el epígrafe 1.5 en el segundo caso, como Suelo No Urbanizable de Protección Especial.

En el momento de su inclusión en el tratado de RAMSAR (05/12/1989) se encontraba en fase de elaboración el Plan Rector de Uso y Gestión del Parque Natural de El Hondo, que debería definir los usos permitidos y los planes de actuación previstos en la zona.

Planificación del estudio

La elección del entorno de este espacio Natural como zona de estudio se debe, entre otras, a cuestiones principales relacionadas con la importancia de esta zona húmeda, su gestión, presión antrópica, su accesibilidad y principalmente, por ser un área de escasa pluviosidad, con elevado riesgo de desertificación y muy sensible a los cambios que puedan derivarse de la variación del clima.

El estudio de la respuesta espectral de suelos de zonas áridas y semiáridas presenta un enorme interés en la actualidad, dada la presión antrópica a la que están sometidos los suelos de estas áreas, especialmente en la cuenca mediterránea. El hecho de que este Parque Natural es un humedal de morfología y funcionamiento artificial regido por una comunidad privada de regantes ajenos a la administración pública y, por último, tal y



como se define en los correspondientes Planes Rectores de Uso y Gestión, está sujeto a un especial régimen de uso, incidiendo en el trámite de evaluación y estimación de impacto ambiental para ciertas actuaciones en estos suelos dependiente en este caso de las disposiciones establecidas por las administraciones públicas.

Muestreos

Los muestreos se realizaron entre febrero y abril de 2007. Durante este periodo se tomaron siete muestras de suelo, representativas e independientes, situadas en el perímetro del Parque Natural, en tres zonas:

- Muestra 1, 2 y 3, en una zona de saladar asentado sobre cultivos abandonados hace 50 años.
- Muestra 4 y 5, en un extenso campo de cultivo con alfalfa (*Medicago sativa*).
- Muestra 6 y 7, en un área dedicada al cultivo de avena en el primer muestreo, segado y sembrado en el segundo muestreo.

Las muestras para el análisis de laboratorio fueron tomadas de la capa superficial de suelo a una profundidad de entre 0-15cm. A continuación, las muestras se introdujeron en bolsas de plástico cerradas y, previamente rotuladas.

Previo al análisis espectral, las muestras de suelo obtenidas se pusieron sobre papel en una zona ventilada del laboratorio para así proceder a su secado a temperatura ambiente (20-30°C). Una vez finalizado el secado de las muestras se procedió a la realización de los análisis.

Obtención de datos radiométricos

El análisis espectral se realizó en el laboratorio de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Teledetección, ubicado en el Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

La reflectancia fue obtenida con el espectrómetro Field Spec Hand Held VNIR radiometer de ASD (Analytical Spectral Devices Inc., Boulder (CO), USA) de alta resolución, de 325nm a 1075nm. Este espectrómetro posee la ventaja de su facilidad de manejo, su pequeño tamaño y la rápida respuesta, frente a otros modelos mucho más pesados de manejar en condiciones de campo.

Para la obtención de la línea base, se realizaron mediciones del estándar de referencia, Spectralon 99% (Labsphere, North Sutton NH, USA), (blanco de referencia).

La fuente luminosa fue suministrada por dos lámparas halógenas de 650W, colocadas ambas a 61cm del contenedor de la muestra formando un ángulo cenital de 15° (Demattê *et al.*, 2004; Genú y Demattê, 2006).

La reflectancia especular se redujo al mínimo usando un ángulo de 45° entre el rayo de luz y el eje normal a la superficie de la muestra (Melville y Atkison, 1985). Asimismo, las



interferencias por reflexiones múltiples fueron reducidas usando el espacio oscuro y cubriendo el dispositivo con material negro (Mathieu *et al.*, 1998).

Tras este acondicionamiento, se realizó el análisis espectral, el sensor se colocó verticalmente a una distancia de 25-30cm de la muestra de suelo. A continuación, las muestras fueron situadas, una a una, sobre un recipiente formando una capa de aproximadamente 1,5cm de espesor. Se efectuaron cinco medidas radiométricas para cada una de las muestras de suelo. Cada conjunto de cinco medidas fue promediado para obtener un único espectro representativo corregido utilizando como línea base el blanco de referencia (Spectralon 99%) ejecutada antes y después de las cinco medidas.

Obtenidos los resultados espectrales de las muestras inalteradas, pasaron por tamiz de malla de 2mm, y se realizó nuevamente las mediciones radiométricas para obtener e interpretar, mediante la comparación de los espectros y tras un análisis estadístico y derivativo, el efecto del tamizado.

Análisis de laboratorio

Análogo al análisis espectral, se realizó la determinación analítica de los parámetros edáficos propuestos para este estudio en los laboratorios del Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

La determinación de textura se realizó mediante el método del densímetro de Bouyoucos, basado en que la densidad de una suspensión depende de la cantidad suspendida, pudiendo evaluar la variación de dicha densidad con el tiempo y relacionarla con la velocidad de deposición y tamaño de las partículas suspendidas (Primo y Carrasco, 1980).

La determinación de carbonatos equivalentes se llevó a cabo mediante el método del calcímetro de Bernard. El principio de este método es tratar los carbonatos con ácido en un dispositivo cerrado, a presión y temperatura constante, el incremento de volumen es una medida directa del CO₂ desprendido cuando no se produzcan otros gases.

Por último, la estimación de materia orgánica se realizó mediante el método del LOI (Loss-on-ignition). El método de pérdida por ignición se basa en determinar la pérdida de peso de una muestra de suelo al someterla a una temperatura determinada en un horno-mufla durante un periodo de tiempo determinado.

Análisis derivativo

El análisis espectral derivativo ha sido recomendado para el estudio de datos hiperespectrales adquiridos bajo condiciones de iluminación natural (Andréfouët *et al.*, 2003; Talsky, 1994), y descrito como el mejor para inhibir los efectos de fondo de la línea base (Duckworth, 1998).

Mediante la modelación del espectro inicial, se puede obtener una resolución espectral mucho más amplia, con una magnificación de la estructura de la curva y obtener con gran exactitud el valor de la longitud de onda de máxima reflectancia mediante la primera derivada, $d\Delta/d\lambda$ (Owen, 1987; Hruschka, 1987); y del mismo modo, alcanzar un valor mínimo que también permite establecer con gran exactitud el máximo de reflectancia del



espectro mediante la segunda derivada, $d^2\Delta/d^2\lambda$. Por tanto se podría observar una posible correspondencia en la reflectancia emitida en VNIR, en este caso, por muestras inalteradas y tras su tamizado.

Partiendo de esta base, se aplicó un análisis derivativo a los espectros electromagnéticos de las muestras inalteradas y de las muestras preparadas para su análisis en laboratorio con la finalidad de obtener la sensibilidad a la variación del espectro a través de puntos de inflexión y, posteriormente, relacionar parámetros edáficos con las reflectividades originales y reflectividades de la primera y/o segunda derivada de las muestras de suelo.

Análisis estadístico

Para establecer si existe correlación o transferibilidad de datos radiométricos entre muestras de suelo inalteradas y muestras preparadas para su análisis en laboratorio, se aplicó un análisis estadístico a los datos de reflectancia de las muestras iniciales, a los datos de las muestras tratadas y a los obtenidos tras la modelación del espectro mediante la primera y/o segunda derivada. El estadístico realizado fue la prueba t de Student o T-test para muestras relacionadas. Se requirió estadísticos descriptivos de las diferencias emparejadas, la prueba t, la significación bilateral y el intervalo de confianza del 95%. Este diseño se aplicó asumiendo que los datos estaban emparejados, obtenidos antes y después del tratamiento preparativo de la muestra. Los análisis fueron desarrollados con el programa estadístico informático, Statistical Package for the Social Sciences 15.0 (SPSS Inc., 2005).

Para determinar la relación entre parámetros edáficos y el espectro electromagnético de las muestras de suelo, se aplicó la función estadística de coeficiente de correlación entre los resultados analíticos obtenidos en laboratorio y las segundas derivadas de reflectancia de los espectros originales de las muestras de suelo, ya que estas ponen de manifiesto los puntos donde hay inflexión en la curva espectral.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra los resultados analíticos de las muestras de suelo para los parámetros que han sido objeto de control en este estudio: carbonato equivalente (%), materia orgánica (%) y distribución de tamaños de partícula de las siete muestras de suelo. En general, las muestras de suelo presentaron en su mayoría un contenido elevado de fracción arena (70-85%), materia orgánica entre 2-4% y un alto contenido en carbonatos (35-55%).

La Figura 1 expone los espectros originales y derivados de la muestra de suelo 1, ya que como se muestra en la tabla 2 (páginas posteriores), son los que presentan una mejor correlación ante el tratamiento derivativo de los espectros. Los resultados del análisis derivativo revelan que la primera derivada realza algunos rasgos espectrales débiles del total del espectro y la detección exacta del pico de reflectancia original usando el punto de eje de abscisas que se cruza en el espectro derivado. La aplicación de la segunda derivada, duplica la corrección del efecto de la línea base, y realza los rasgos espectrales débiles y muy pequeños que apenas son observados en los espectros originales (Bendor *et al.*, 1997).



La Tabla 2 muestra los resultados del análisis estadístico de comparación de espectros de reflectancia y la primera y segunda derivada antes y después del tamizado de los suelos. Los resultados de la *t* de Student o T-test para muestras relacionadas indican para todos los espectros originales una significación bilateral ($\alpha=0,000$), por lo que no se puede establecer una correlación y/o transferibilidad de datos radiométricos, y por tanto entre espectros electromagnéticos medidos antes y después del tratamiento preparativo de la muestra. Tras el procesamiento derivativo de los espectros, los resultados estadísticos revelan una alta relación para todas las muestras medidas antes y después de su tratamiento preparativo. La aplicación de la primera derivada proporciona una probabilidad del 95% de que se tratan de muestras relacionadas y por tanto se puede hacer una correspondencia con sus espectros electromagnéticos. Estos resultados están aún más relacionados con la aplicación de la segunda derivada, todas las muestras obtienen un $\alpha > 0,8$. La muestra que manifestó una mayor correlación espectral antes y después de su tratamiento, fue la muestra de suelo 1 con $\alpha=0,769$ y $\alpha=0,924$ respectivamente.

La Tabla 3 muestra las correlaciones entre los resultados analíticos de los parámetros edáficos y las longitudes de onda pertenecientes a la segunda derivada de reflectancia de los espectros originales de las muestras de suelo.

Los resultados del estadístico de Coeficiente de Correlación muestran similitudes en las correlaciones de carbonatos y materia orgánica (%). Los carbonatos muestran altas correlaciones con longitudes de onda pertenecientes a la región del visible, aunque muestra su máxima correlación ($r = 0,88$) en $\lambda = 947\text{nm}$ perteneciente al infrarrojo cercano. La materia orgánica (%) además de la región del visible, muestra alta correlación en determinadas longitudes de onda del infrarrojo cercano donde alcanza su máximo ($r = 0,94$) en la misma longitud de onda que los carbonatos, $\lambda = 947\text{nm}$.

En cuanto al tamaño de partícula, en líneas generales, las arcillas presentan una mayor correlación con longitudes de onda pertenecientes a la región del visible o muy próxima a esta región, donde presenta dos máximos ($r = 0,89$) en $\lambda = 528\text{nm}$ y $\lambda = 772\text{nm}$.

La fracción de arena, distribuye equitativamente las correlaciones entre ambas regiones, pero sin embargo, alcanza su máximo ($r = 0,96$) en $\lambda = 836\text{nm}$ perteneciente a la región del infrarrojo cercano. Por último, la fracción de limo, presenta altas correlaciones en ambas regiones pero su máximo ($r = 0,97$) lo alcanza claramente en $\lambda = 419\text{nm}$ perteneciente a la región del visible.

TABLA 1. RESULTADOS ANALÍTICOS DE LAS MUESTRAS DE SUELO.

	CARBONATOS (%)	MATERIA ORGÁNICA (%)	ARENA (%)	LIMO (%)	ARCILLA (%)
SUELO 1	41,2	2,18	78,30	16,60	5,10
SUELO 2	37,7	2,21	78,30	16,55	5,15
SUELO 3	39,7	2,04	74,25	16,55	9,20
SUELO 4	47,8	3,34	80,40	12,60	7,00
SUELO 5	48,0	3,29	82,25	8,55	9,20
SUELO 6	52,9	4,09	82,20	8,60	9,20
SUELO 7	51,8	3,81	30,20	36,60	33,20

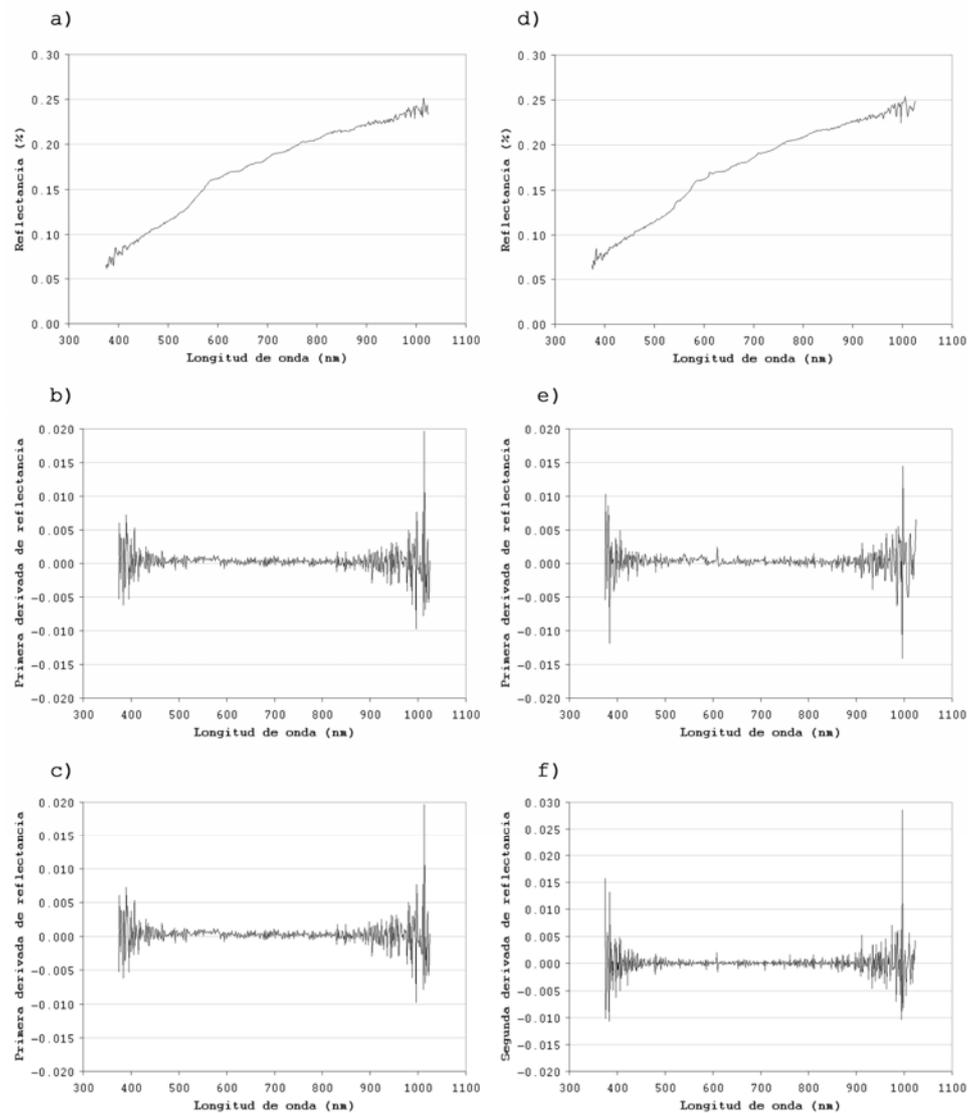


FIGURA 1. ESPECTRO ORIGINAL DE REFLECTANCIA, PRIMERA Y SEGUNDA DERIVADA DE REFLECTANCIA DE LA MUESTRA INALTERADA DE SUELO 1 (IZQUIERDA): A) ESPECTRO ORIGINAL; B) PRIMERA DERIVADA ESPECTRO ORIGINAL; C) SEGUNDA DERIVADA ESPECTRO ORIGINAL. ESPECTRO ORIGINAL DE REFLECTANCIA Y PRIMERA Y SEGUNDA DERIVADA DE REFLECTANCIA DE LA MUESTRA DE SUELO 1 TRAS LA TAMIZACIÓN (DERECHA): D) ESPECTRO ORIGINAL MUESTRA TAMIZADA; E) PRIMERA DERIVADA ESPECTRO TAMIZADO; F) SEGUNDA DERIVADA ESPECTRO TAMIZADO.

TABLA 2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE COMPARACIÓN DE ESPECTROS DE REFLECTANCIA Y LA PRIMERA Y SEGUNDA DERIVADA ANTES Y DESPUÉS DEL TAMIZADO DE LOS SUELOS.

	Reflectancia			Primera derivada de Reflectancia			Segunda derivada de Reflectancia		
	t*	gl*	sig*(bilateral)	t	gl	sig (bilateral)	t	gl	sig (bilateral)
1	-17,062	650	0	-0,294	649	0,769	-0,095	648	0,924
2	-107,157	650	0	-0,491	649	0,624	-0,09	648	0,929
3	-80,872	650	0	-1,296	649	0,195	0,053	648	0,958
4	-51,906	650	0	-0,292	649	0,771	-0,157	648	0,876
5	-41,167	650	0	-0,283	649	0,777	-0,212	648	0,832
6	-82,003	650	0	-0,443	649	0,658	-0,021	648	0,983
7	-29,494	650	0	-0,542	649	0,588	-0,016	648	0,987

t: estadístico t de student.

gl: grados de libertad.

sig: significación bilateral.

TABLA 3. CORRELACIONES ENTRE PARÁMETROS EDÁFICOS, SEGUNDA DERIVADA DE REFLECTANCIA Y LONGITUDES DE ONDA (VNIR).

Longitud de Onda (nm)	Carbonatos	Materia orgánica	Arena	Limo	Arcilla
392	0,8	0,85	-	-	-
393		-	-	-	0,8
408	0,84	0,84	-	-	-
419	-	-	-	0,97	-
509	-	-	-	-	0,81
513	0,86	0,89	-	-	-
514	0,86	0,89	-	-	-
523	-	-	-	-	0,88
527	-	-	-	-	0,82
528	-	-	0,84	-	0,89
582	-	0,8	-	-	-
668	-	-	-	-	0,83
692	0,8	-	-	-	-
728	-	-	-	0,91	-
772	-	-	0,85	-	0,89
795	-	-	0,82	-	-
836	-	-	-	0,82	-
837	-	-	-	0,85	-
838	-	-	-	-	0,82
839	-	-	0,96	-	0,85
844	-	0,81	-	-	-
918	-	-	0,86	-	-
919	-	-	0,81	-	-
920	-	-	-	0,8	-
921	-	-	-	0,84	-
947	0,88	0,94	-	-	-
956	-	0,81	-	-	-
957	-	0,81	-	-	-



CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos en este estudio para poner de manifiesto el uso de una técnica rápida y sencilla para detectar en campo las propiedades de los suelos, se puede concluir que:

1. Se ha comprobado a través del análisis derivativo, una correspondencia espectral para una misma muestra de suelo, antes (inalterada) y después de su preparación física previamente al análisis en laboratorio.
2. Esta correspondencia espectral nos indica que no hay variaciones significativas en la respuesta espectral de reflectancia de las muestras de suelo (rasgos espectrales fundamentales), al menos en las regiones del espectro electromagnético utilizadas en este estudio.
3. Por otro lado, esta correspondencia espectral permite establecer además, una correlación entre parámetros edáficos y el espectro modelado de la muestra inalterada y, por tanto, asociarlo a las características de la cubierta edáfica determinadas mediante el análisis de la muestra por procedimientos de laboratorio habituales, tal y como se ha mostrado en este estudio.

A partir de los resultados aquí obtenidos y sabiendo qué reflectividades y longitudes de onda se pueden asociar a determinados parámetros edáficos, se podrían estimar cuantitativamente, (mediante la aplicación estadística de regresión múltiple u otra herramienta similar que lo permita). Habitualmente, se procederá al uso de una función o ecuación que nos permitiría cuantificar la propiedad edáfica y obtener su valor, simplemente utilizando rasgos espectrales característicos de las muestras, tabulados mediante funciones de relación.

Esto permite mediante la aplicación de radiometría de campo VNIR y los estudios que se realizan con esta técnica, desarrollar sistemas para nuevas aplicaciones que implican la generación de nuevos instrumentos tecnológicos y el desarrollo de herramientas de uso y aplicación inmediata en campos de agricultura y medio ambiente:

- Agricultura: gestión del riego, estudio del estado fenológico de la vegetación y, manejo del suelo.
- Medio ambiente y planificación territorial: incendios forestales, manejo y conservación del suelo y de espacios naturales, gestión del suelo y, toma de decisiones sobre planificación de usos del suelo.

Por otro lado, no es sencillo establecer una relación entre las propiedades físicas y químicas de los suelos y sus curvas espectrales, puesto que son muchos los factores que inciden en la variabilidad espectral y espacial (García *et al.*, 1997), por lo que resulta necesario el mantenimiento de líneas de investigación para la evaluación de los suelos que a partir de estas técnicas no destructivas, aporten resultados rápidos para el estudio, conservación y mejora de los suelos.

La ventaja de determinación *insitu*, de evitar la toma de muestras y de obtener la información en pocos segundos hace de esta técnica la más eficaz en la estimación y cuantificación de propiedades de los suelos en campo en un futuro.



BIBLIOGRAFÍA

- Andréfouët, S., Hochberg, E.J., Payri, C., Atkinson, M.J., Muller-Karger, F.E., Ripley, H. (2003): Multi-scale remote sensing of microbial mats in an atoll environment. *International Journal of Remote Sensing* 24(13), 2661-2682.
- Aronoff, S. (2005): *Remote sensing for GIS managers*. New York, USA. ESRI Press. 487 p.
- Ben-Dor, E. y Banin, A. (1995): Near Infrared Analysis (NIRA) as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. *Soil Sci. Soc. of America J.* 59, 364-372.
- Chang, C.W., Laird, D.A., Mausbach, M.J. y Hurburgh JR. (2001): Near-infrared reflectance spectroscopy-principal components regression analyses of soil properties. *Soil Sci. Soc. of America J.* 65, 480-490.
- Demattê, J.A.M. (2002): Characterization and discrimination of soils by their reflected electromagnetic energy. *Pesqui. Agropecu.*, 1445-1458.
- Demattê, J.A.M., Campos, R.C., Alves, M.C., Fiorio, P.R., Nanni, M.R. (2004): Visible-NIR reflectance: a new approach on soil evaluation. *Geoderma* 121(1-2), 95-112.
- de Rosnay, P., Calvet, J.C., Kerr, Y., Wigneron, J.P., Lemaître, F., Escorihuela, M.J., Sabater, J., Saleh, K., Barrié, J., Bouhours, G., Coret, L., Cherel, G., Dedieu, G., Durbe, R., Fritz, N.E.D., Froissard, F., Hoedjes, J., Kruszewski, A., Lavenu, F., Suquia, D., Waldteufel, P. (2006): SMOSREX: A long term field campaign experiment for soil moisture and land surface processes remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 102(3-4), 377-389.
- Dorronsoro (2008): *Introducción a la edafología*. Manual on-line: <http://edafologia.ugr.es/index.htm>.
- Duckworth, J. (1998): *Spectroscopic Qualitative Analysis*. En: *Applied Spectroscopy. A Compact Reference for Practitioners*. Workman Jr, J., Springsteen, A. (eds.). Academic Press. London, UK., 93-163.
- Dunn, B.W., Beecher, H.G., Batten, G.D., Ciavarella, S. (2002): The potential of near-infrared reflectance spectroscopy of soil analysis- a case study from the Riverine Plain of south-eastern Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 42, 607-614.
- Fiorio, P.R. (2002): *Datos radiométricos obtidos nos níveis terrestre e orbital na avaliação de solos, Piracicaba, Tese (Doutorado), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo*.
- Galvão, L.S. y Vitorello, I. (1998): Variability of laboratory measured soil lines of soil from southeastern Brazil. *Remote Sens. Environ.* 6, 166-181.
- García Rodríguez, M.P. y Muñoz León, C. (1997): Utilización de la Teledetección y Sistemas de Información Geográfica en la Cartografía de suelos. *Boletín de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo* 4, 95-105.
- Genú A.M. y Demattê J.A.M. (2006): Determination of soil attribute contents by means of reflected electromagnetic energy. *International Journal of Remote Sensing* 27(21), 4807-4818.
- Goy, J.L.; Zazo, C.; Somoza, L. y Dabrio, C. (1990): Evolución paleogeográfica de la depresión de Elche-Cuenca del bajo Segura (España) durante el Pleistoceno. *Estudios Geológicos*, 46, pp.227-244.
- Higuera, P; Oyarzun, R. (2004): *Curso de Mineralogía y Geoquímica Ambiental*. UCLM-UCM. Manual on-line: http://www.uclm.es/users/higuera/MGA/Port_MGA.htm.
- Hruscha, W.R. (1987): Wavelength selection methods. En: *Near Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*, P.C. Williams and K.H. Norris, (Eds.), American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN, 35-57.



- INCD (1994): Elaboration of an International Convention to Combat Desertification in Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification and Particular in Africa. Final Negotiations Text of the Convention. Unites Nations, Geneva
- Janik, L.J., Merry, R.H., Skjemstad, J.O. (1998): Can mid infrared diffuse reflectance analysis replace soil extractions? *Australian Journal of Experimental Agriculture* 38, 681-696.
- Li, M., Zhao, P., Zhang, X. (2005): Estimation of soil moisture hyperspectral reflectance based on ground-based remote sensing. *Proceedings of SPIE* 5655:309-317.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., Chipman, J.W. (2004): *Remote sensing and image interpretation*. New York, USA. Wiley. 763 p.
- Lobell, D.B. y Asner, G.P. (2002): Moisture effects on soil reflectance. *Soil Sci. Soc. of America J.* 66, 722-727.
- López Bermúdez, F. (1999): Indicadores de la Desertificación: Una propuesta para las tierras mediterráneas amenazadas. *Murgetana* 100, 113-128. Real Academia Alfonso X El Sabio. Murcia.
- Mathieu, R., Pouget, M., Cervelle, B., Escadafal, R. (1998): Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typic soil color of an arid environment. *Remote Sensing of Environment* 66, 17-28.
- Melville, M.D. y Atkinson, G. (1985): Soil colour: its measurements and its designation in models of uniform colour space. *J. Soil Sci.* 36, 495-512.
- Ministerio de Medio Ambiente (2003): Documento de Trabajo del Programa de Acción Nacional contra la Desertificación.
- Owen, T. (1987): Advances in UV-VIS spectroscopy: derivative spectroscopy. *Int. Lab.* 4, 58-64.
- Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J., Aguado, I. (2003): Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(5), 1056-1061.
- Sabater, J., Saleh, K., Barrié, J., Bouhours, G., Coret, L. Cherel, G., Dedieu, G., Durbe, G., Dine Fritz, NE., Froissard, F., Hoedjes J., Kruszewski, A., Lavenu, F., Suquia, D., Waldteufel, P. (2006): A long term field campaign experiment for soil moisture and land surface processes remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 102(3-4), 377-389.
- Saleh, K., Wigneron, J.P., Waldteufel, P., de Rosnay, P., Shwank, M., Calvet, J.C., Kerr, Y.H. (2007): Estimates of surface soil moisture under grass covers using L-band radiometry. *Remote Sensing of Environment* 109(1), 42-53.
- Shrestha, R.P. (2006): Relating soil electrical conductivity to remote sensing and other soil properties for assessing soil salinity in northeast Thailand. *Land Degradation and Development* 17(6), 677-689.
- Soil Survey Staff.2006. Keys to soil taxonomy. Tenth Edition. Washington, DC, Natural ResourcesConservation Service, United States Department of Agriculture.
- Stark, E., Luchter, K., Margoshes, M. (1986): Near-infrared analysis (NIRA): A technology for quantitative and qualitative analysis. *Applied Spectroscopy Reviews* 22, 335-399.
- Stoner, E.R., Baumgardner, M.F. (1981): Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Sci. Am. J.* 45, 1161-1165.
- Talsky, G. (1994): *Derivative Spectrophotometry: Low and Higher Order*. VCH Verlagsgesellschaft. Weinheim, Federal Republic of Germany. 228 p.
- Vagen, T.G., Shepherd, K.D., Walsh, M.G. (2006): Sensing land Scape level change in soil fertility following deforestation and conversion in the highlands of Madagascar using Vis-NIR spectroscopy. *Geoderma* 133(3-4), 281-294.



Vallejo, V.R., Díaz Fierros, F., De La Rosa, D. (2005): Impacto sobre los recursos edáficos. En: Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático, J.M. Moreno (ed.), Secretaría General Técnica MMA, Madrid, 355-398.

Viñals, M.J. (1994): Funcionamiento hidrológico. En: Estudio de la Charca SE del Paraje Natural de El Hondo de Elche, Alicante. Proyecto realizado por TEYGE, S.A. Conselleria de Medio Ambiente, Generalitat Valenciana.

World Reference Base for Soil Resources (2006): A framework for international classification, correlation and communication. FAO (ed.), Roma, 132.