

## INVERSIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN DE LA REFLECTIVIDAD PARA LA ESTIMACIÓN DEL ESTADO HÍDRICO DE COMBUSTIBLES EN LA REGIÓN SEMIÁRIDA DE LA ARGENTINA

M. Yebra (\*), E. Chuvieco (\*), P. Oricchio (\*\*) y C. Di Bella (\*\*).

(\*) Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, Colegios 2, 28801 Alcalá de Henares.  
[marta.yebra@uah.es](mailto:marta.yebra@uah.es)

(\*\*) Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) – Argentina.

### RESUMEN

En este trabajo se explora la posibilidad de estimar el contenido de humedad de los combustibles vivos (FMC) a partir de la inversión de los modelos de simulación PROSPECT (nivel de hoja) y SAILH (nivel de dosel), imágenes MODIS e información auxiliar medida en campo. La metodología propuesta para llevar a cabo la inversión se basa en técnicas de clasificación supervisada de imágenes, tradicionalmente empleadas para la obtención de cartografía de usos del suelo. Los resultados muestran que el FMC puede ser obtenido con precisión ( $RMSE \approx 16\%$ ) y de manera operativa sin la necesidad de tener amplios conocimientos de programación.

### ABSTRACT

This paper explores the possibility of estimating Live Fuel Moisture Content (FMC) from the inversion of PROSPECT (leaf level) and SAILH (canopy level) Radiative Transfer Models, MODIS imagery and ancillary information measured on field. The methodology proposed for the inversion is based on image supervised classification techniques traditionally used for land-cover cartography. The results show that FMC can be accurately ( $RMSE \approx 16\%$ ) and operatively retrieved without a deep knowledge of programming.

**Palabras clave:** FMC, MODIS, riesgo incendio, RTM y SAM.

### INTRODUCCIÓN

El contenido de humedad de los comestibles vivos (FMC) es un parámetro clave para evaluar el peligro de incendios ya que afecta tanto a la ignición como a la posterior propagación del fuego (Nelson, 2001). En los últimos años ha surgido un interés creciente por desarrollar sistemas de evaluación de riesgo de incendio de aplicación global donde la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) juegan un papel fundamental (Nieto et al., 2008). Por ello, se buscan nuevas metodologías de estimación de FMC que reemplacen a los tradicionales modelos empíricos solo aplicables a escala local (Yebra et al., 2008a).

Estudios recientes han estimado el FMC mediante la inversión de modelos de simulación de la reflectividad (RTM) (Colombo et al., 2008; Yebra et al., 2008b), es decir, a partir de la reflectividad medida por un sensor, han estimado cuánto FMC estaba presente en el área observada. Para ello se debe emplear una función de error que evalúe la similitud entre cada espectro observado y unos de referencia previamente simulados con los RTM para, posteriormente, extraer el más similar y su

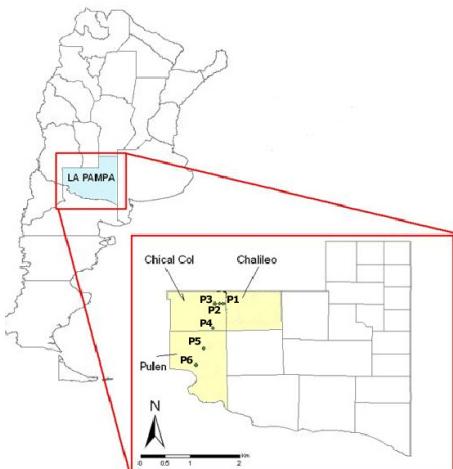
correspondiente FMC. Aunque a simple vista la inversión parece una metodología simple, para llevarlo a cabo de forma operativa para la totalidad de una imagen satélite se precisa de amplios conocimientos de programación. En este trabajo se propone aplicar técnicas de clasificación supervisada de imágenes, tradicionalmente empleadas para la obtención de cartografía de usos del suelo, para la estimación de FMC en matorrales de una región semiárida de Argentina.

### MÉTODOS

#### Área de estudio

Como área de estudio se seleccionó la Provincia de La Pampa (Argentina) donde se ubicaron 6 parcelas homogéneas de matorral para la validación de la metodología propuesta en este trabajo.

Las especies dominantes de estas parcelas son *Prosopis alpataco*, *Condalia microphylla*, *Junellia seriphoides*, *Larrea cuneifolia*, y *Monthea aphylla*, todas ellas características de un clima semiárido.



**Figura 1.-** Localización de las parcelas de validación.

#### Trabajo de campo

Para la obtención de los datos de humedad necesarios para la validación de la metodología propuesta, se llevaron a cabo tres campañas de campo; (1) el 18 y 19 de noviembre de 2008, (2) el 11 de febrero y (3) el 17 de marzo de 2009. La parcela 6 fue añadida en la segunda campaña de campo, por ello sólo se tienen datos de las dos últimas campañas. Los muestreos de vegetación en todas ellas se realizaron bajo el mismo protocolo estandarizado. Así, en cada campaña de campo se recolectaron entre las 12:00 y las 16:00 horas (hora de mínimo FMC y máximo riesgo de incendio), 4 muestras de peso comprendido entre 80 y 100 gr. en cada una de las parcelas de muestreo. Las muestras así recogidas se introdujeron en bolsas herméticas y fueron llevadas al laboratorio para su pesado en fresco ( $P_f$ ) y seco ( $P_s$ , tras 48h introducidas en una estufa a 60° C). Los valores de humedad se expresaron como FMC según la siguiente expresión:

$$FMC(\%) = \frac{P_f - P_s}{P_s} \times 100$$

#### Imágenes satélite

Para este trabajo se empleó el producto de reflectividad MOD09 (Vermote y Vermeulen, 1999), compuesto de 8 días de las 7 primeras bandas del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer, resolución 500 m), y otras con información auxiliar. Las imágenes MOD09 correspondientes a las fechas de las que teníamos información de campo fueron solicitadas al servidor

de la NASA (<https://wist.echo.nasa.gov/api/>, abril 2009).

#### Estimación de FMC mediante la inversión de modelos de simulación

La estimación de FMC mediante la inversión de los RTM se llevó a cabo en dos fases: (i) obtención de espectros simulados de referencia y (ii) clasificación de imágenes.

Los espectros de referencia empleados en este trabajo para la estimación de FMC fueron simulados por Yebra y Chuvieco (2008) utilizando dos RTM: PROSPECT (Jacquemoud, 1990) y SAILH (Kuusk, 1985). El modelo PROSPECT simula la reflectividad y la transmisividad de la hoja a partir de cuatro parámetros de entrada (parámetro estructural N, contenido de clorofila a+b, espesor equivalente de agua y materia seca). El modelo SAILH permite simular la reflectividad del dosel a partir de la reflectividad y transmisividad de la hoja, la reflectividad del suelo, el LAI, LAD, el aporte de radiancia difusa por parte de la atmósfera y los ángulos de observación e iluminación. También incorpora un parámetro denominado “hot-spot” que evalúa el tamaño de las hojas y los efectos asociados de sombras.

Como las propiedades ópticas de las hojas se obtienen de PROSPECT y son necesarias para el SAILH, estos dos RTM se vienen usando conjuntamente (PROSAILH) para simular la reflectividad de dosel en múltiples aplicaciones desde más de 16 años (Jacquemoud et al., 2009). Como puede apreciarse, la variable de interés (FMC) no es un parámetro directo de ninguno de los modelos empleados pero se puede obtener a partir del cociente de los parámetros EWT y DMC del modelo PROSPECT.

Yebra y Chuvieco (2008) emplearon mediciones de campo tomadas en especies de vegetación Mediterránea para parametrizar PROSAILH y simular los espectros de referencia. Todas las simulaciones las llevaron a cabo entre 400 y 2400 nm (con intervalos de 10 nm) pero fueron remuestreadas a la resolución espectral de MODIS. En este estudio, los espectros simulados por Yebra y Chuvieco (2008), cada uno correspondiente a un determinado valor de FMC, se utilizaron para formar una librería espectral de referencia. Para extraer qué espectro incluido en esta librería resultaba más similar a cada píxel de la imagen, utilizamos el clasificador angular (Spectral Angle Mapper, SAM), disponible en ENVI. El algoritmo SAM minimiza el ángulo espectral entre el espectro observado (extraído de la imagen) y el simulado (de la librería

espectral) y es insensible a las condiciones de iluminación y efectos de albedo (Bakker y Schmidt, 2002).

#### Validación

Previo al ejercicio de validación, se realizó un análisis exploratorio de los FMC medidos en las diferentes zonas de validación.

Posteriormente, la precisión de las estimaciones fue cuantificada basándose en coeficientes de determinación ( $R^2$ ), pendiente y ordenada en el origen del ajuste lineal entre valores observados ( $FMC_{Obs}$ ) y estimados ( $FMC_E$ ), así como en el error cuadrático medio total (RMSE), sistemático (RMSEs) y no sistemático (RMSEu) y el índice de acuerdo (d) (Willmott, 1982). Este último índice compara el acuerdo entre los valores promedios observados y los estimados.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### Muestreos de campo

Los mayores valores de FMC fueron registrados en los muestreos de noviembre en todas las parcelas menos en la P1 (Figura 2).

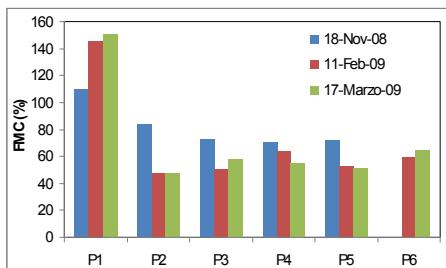


Figura 2.- Valores de FMC medidos en las parcelas de validación.

En noviembre las plantas todavía no sufren el estrés estival ya que las precipitaciones son abundantes y las temperaturas medias relativamente bajas (Figura 3).

Sin embargo, la disminución de las precipitaciones y el aumento de las temperaturas durante el mes de enero genera condiciones de estrés en la vegetación, lo que quedó reflejado en una disminución considerable de los valores de FMC muestreados en el mes de febrero. Por último los valores de FMC medidos en marzo fueron ligeramente mayores que los de febrero en la mayoría de las parcelas de muestreo, lo que muestra la recuperación de la vegetación tras las lluvias de los meses de febrero y marzo.

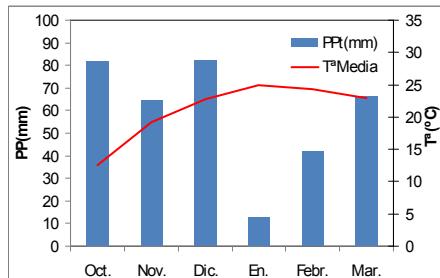


Figura 3.- Diagrama ombrotérmico de la zona de estudio. Datos de la estación meteorológica de Santa Rosa (La Pampa); PPT= Precipitación acumulada, T<sup>a</sup>Media: Temperatura media mensual.

#### Validación

Los resultados muestran que la metodología propuesta en este estudio permite obtener valores de FMC con precisión adecuada para aplicaciones de riesgo de incendio. En primer lugar, la ecuación de ajuste entre  $FMC_{Obs}$  y  $FMC_E$  fue cercana a 1:1 ( $FMC_E=0,7xFMC_{Obs}+20,422$ ) y con un  $R^2$  elevado (0,9). En segundo lugar, el índice de acuerdo fue elevado ( $d=0,9$ ). Por último, el error de las estimaciones fue de 11,93%. Este error muestra que el método se puede considerar suficientemente preciso ya que varios autores han señalado un error del 15% como umbral aceptable para aplicaciones de riesgo de incendios (Danson y Bowyer, 2004). No obstante, la porción sistemática de este error ( $RMSEs=9,63$ ) resultó mayor que la porción no sistemática ( $RMSEu=7,04$ ).

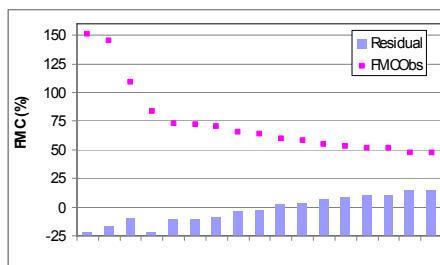


Figura 4.- Valores de FMC observados en las parcelas de muestreo (ordenados de mayor a menor) y residuales de las estimaciones.

Si nos fijamos en los residuales de las estimaciones ( $FMC_{Obs}-FMC_E$ ) podemos ver que el modelo tiene una tendencia sistemática a infraestimar los valores de FMC mayores del 60% mientras que sobreestima los valores de FMC menores que dicho umbral (figura 4).

## CONCLUSIONES

El contenido de humedad de la vegetación es una variable clave a considerar en diversas aplicaciones, entre las que destacamos en este estudio la estimación de condiciones de riesgo de incendio. Los resultados muestran que el FMC puede ser obtenido con precisión ( $\text{RMSE} > 12\%$ ) y de manera operativa sin la necesidad de tener amplios conocimientos de programación. Los mapas que pueden derivarse aplicando esta metodología resultan una herramienta fundamental para la planificación de las acciones de prevención de incendios.

No obstante, la metodología presentada conduce a subestimaciones sistemáticas de los valores de FMC menores al 60%. Aunque estas sobreestimaciones presentan residuales bajos ( $< 14\%$ ), se debe mejorar la precisión en este intervalo de FMC, ya que es el más crítico para la estimación de riesgo de incendio.

En este trabajo, se han empleado como espectros de referencia para la clasificación con SAM los espectros generados por Yebra y Chuvieco (2008) para vegetación mediterránea. En futuros trabajos se refinará la parametrización de los RTM para que simulen condiciones más similares a las observadas en la vegetación semiárida de la Pampa. Con ello se espera obtener estimaciones todavía más precisas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bakker, W. H. y Schmidt, K. S. 2002. Hyperspectral edge filtering for measuring homogeneity of surface cover types. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 56: 246–256.
- Colombo, R., Meroni, M., Marchesi, A., Busetto, L., Rossini, M., Giardino C. y Panigada, C. 2008. Estimation of leaf and canopy water content in poplar plantations by means of hyperspectral indices and inverse modeling. *Remote Sensing of Environment*, 112, Issue: 1820-1834.
- Danson, F. M. y Bowyer, P. 2004. Estimating live fuel moisture content from remotely sensed reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 92: 309-321.
- Jacquemoud, S. 1990. PROSPECT: a model to leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34: 74-91.
- Jacquemoud, S., Verhoef, Baret, F., Bacour, C., Zarco-Tejada, P.J., Asner, G.P., François, C. y Ustin, S.L. 2009. PROSPECT + SAIL Models: A Review of Use for Vegetation Characterization. *Remote Sensing of Environment*, in press.
- Kuusk, A. 1985. The hot spot effect of a uniform vegetative cover. *Soviet Journal of Remote Sensing*, 3: 645– 658.
- Nelson, R. M. 2001. Water Relations of Forest Fuels, en *Forest fires : behavior and ecological effects* (editado por E. A. Johnson y K. Miyanishi). San Diego, Calif., Academic Press: 79-149.
- Nieto, H., Chuvieco, E., Aguado Suarez, I., Yebra Álvarez, M., García Alonso, M., Salas Rey, J., Martín Isabel, M. P., Vilar del Hoyo, L., Martínez Vega, J., Padrón Paredes, D., Martín y Fernández, S. 2008. Propuesta de un sistema espacialmente explícito para evaluar el peligro de incendios. *Serie Geográfica*, 14: 109-130.
- Vermote, E. F. y Vermeulen, A. 1999. *Atmospheric correction algorithm: Spectral Reflectances (MOD09)*, NASA.
- Willmott, C. J. 1982. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63: 1309-1313.
- Yebra, M. y Chuvieco, E. 2008. Modelos de Simulación de Reflectividad en ecología. *Ecosistemas*, 17: 23-28.
- Yebra, M., Chuvieco, E. y Aguado, I. 2008. Comparación entre modelos empíricos y de transferencia radiativa para estimar contenido de humedad en pastizales: Poder de generalización. *Revista de Teledetección*, 29: 73-90.
- Yebra, M., Chuvieco, E. y Riaño, D. 2008. Estimation of live Fuel Moisture Content from MODIS images for fire risk assessment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148: 523-536.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha llevado a cabo gracias al proyecto IAI (CRN II -031), “Land use change in the Rio de la Plata Basin linking biophysical and human factors to understand trends, assess impacts, and support viable strategies for the future” que financió el trabajo de campo y al MECT que financió la estancia de 2 meses en Argentina de Marta Yebra bajo el Programa de Formación de Profesorado Universitario (FPU-MEC).