

INVERSIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN DE LA REFLECTIVIDAD PARA LA ESTIMACIÓN DEL ESTADO HÍDRICO DEL COMBUSTIBLE VIVO EN MATORRALES Y PASTIZALES DE LA ARGENTINA

M. Yebra (*); M.E. Beget (**); P. Oricchio (**) y C. Di Bella (**)

(*) Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, Colegios 2, 28801 Alcalá de Henares. marta.yebra@uah.es

(**) Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) – Argentina. cdibella@cnia.inta.gov.ar

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 de la reflectividad a nivel de hoja (PROSPECT) y a nivel de dosel (SAILH), la utilización de imágenes de satélite (sensor 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, así como en técnicas de regresión múltiple. Dichas metodologías fueron validadas en un total de 6 parcelas de matorral semiárido de la región fitogeográfica del Monte y 5 de pastizales subhúmedos de la Región Pampeana. Los resultados mostraron que el FMC puede ser estimado con precisión, tanto para el caso de las áreas de matorral semiárido (RMSE≈16%) como para el caso de los pastizales subhúmedos (RMSE≈10%), de manera operativa y sin necesidad de tener amplios conocimientos de programación.

Palabras Clave: FMC, MODIS, Riesgo incendio, Modelos de transferencia radiativa y Clasificador por ángulo espectral.

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 as well as multiple regression techniques. These methodologies are validated in a total of six plots of shrubland from Monte region and five plots of humid temperate grasslands from Pampa region. The results show that FMC can be accurately and operatively retrieved without a deep knowledge of programming for both semiarid shrublands (RMSE≈16%) and sub-humid temperate grasslands (RMSE≈10%).

Key Words: FMC, MODIS, Fire Risk, Radiative Transfer Models, Spectral Angle Mapper.

1.- INTRODUCCIÓN

El contenido de humedad de los combustibles 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 sólo aplicables a escala local (Yebra *et al.*, 2008a). Estudios recientes han estimado el FMC mediante la inversión de modelos de simulación de la reflecti-

vidad (RTM) (Colombo *et al.*, 2008; Yebra *et al.*, 2008b). Para ello se ha empleado una función de error que evalúa la similitud entre cada espectro observado a partir de la imagen de satélite y los espectros 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 sencilla, para llevarla a cabo de forma operativa en la totalidad de una imagen de satélite, se precisa de amplios conocimientos de programación, ya que cada píxel de la imagen hay que compararlo con todos los espectros simulados o espectros de referencia. En este trabajo se propone aplicar técnicas de clasificación supervisada de imágenes y técnicas de regresión múltiple para la estimación de FMC en matorrales de la región semiárida del

Monte y en pastizales subhúmedos de la Región Pampeana sin la necesidad de amplios conocimientos en programación.

La necesidad de estimar el FMC en la región semiárida de la Argentina, radica en la frecuente ocurrencia de incendios de gran duración y tamaño. Si bien los incendios en esta región tienen su origen en causas antrópicas, ya que el fuego es utilizado como una herramienta de manejo por los productores ganaderos para mejorar la calidad de los recursos forrajeros (Kunst y Moscovich, 1996), la propagación de los mismos está relacionada con las condiciones previas de la vegetación (Fischer 2008). Fischer *et al.* (2007) observaron que dentro de la región semiárida, la mayor densidad de incendios ocurre en presencia de arbustos y en períodos de balance hídrico negativo (primavera-verano), por este motivo, centramos nuestro estudio en el área de matorral de la provincia de La Pampa. Por otro lado, se han incorporado sitios ubicados en pastizales templados, a pesar de que no es un área con gran ocurrencia de incendios, debido a que en otras regiones del mundo, como en Sudáfrica y las grandes planicies de Estados Unidos, el fuego es un disturbio importante.

2.- MÉTODOS

2.1.- Área de Estudio

Para la validación de la metodología se seleccionaron dos áreas de estudio: un área de matorral, situada al oeste de la Provincia de La Pampa, y un área de pastizal, situada al noreste de la provincia de Buenos Aires (Figura 1). En La Pampa se ubicaron 6 parcelas de matorral homogéneo. El área corresponde a la Región Fitogeográfica del Monte donde la vegetación es arbustiva de poca altura, con predominancia de los géneros *Larrea spp.* y *Prosopis spp.* (Cabrera, 1971). El clima es semiárido y las precipitaciones son escasas y presentan alta variabilidad interanual (100-400 mm). Si bien están concentradas en los meses de primavera y verano, las altas temperaturas en verano limitan el crecimiento de la vegetación.

Por otro lado, se seleccionaron 5 parcelas de pastizal en la Pampa Deprimida, correspondiente a la Región Fitogeográfica Pampeana. En esta zona el paisaje está conformado por un mosaico de comunidades vegetales, entre las que se destaca la

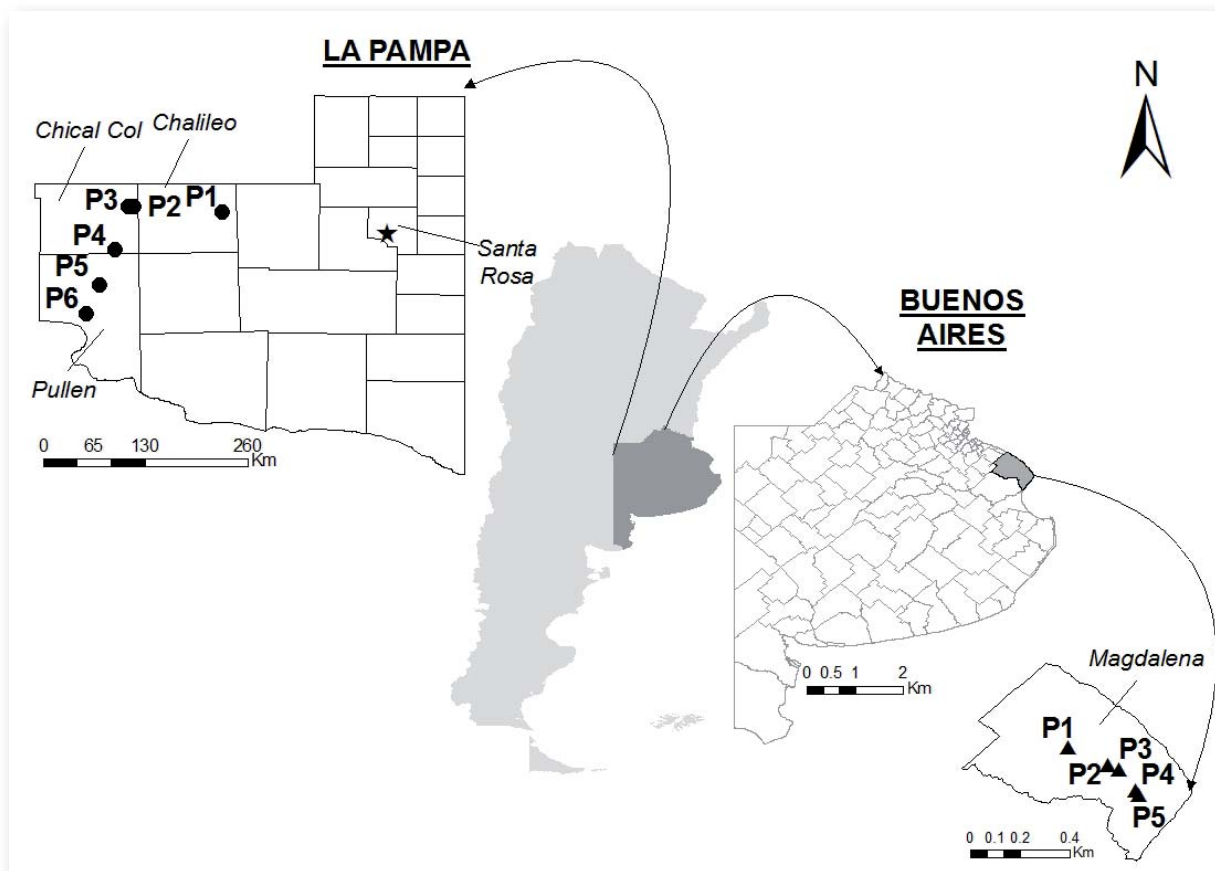


Figura 1.- Localización de las parcelas de validación y la estación meteorológica de Santa Rosa (La Pampa).

pseudoestepa de gramíneas (Cabrera 1968). Predominan las gramíneas cespitosas de medio metro de altura y entre ellas crecen hierbas bajas no graminiformes. La cobertura vegetal oscila entre 50 y 100% según las estaciones del año, llegando a ser máxima a fines del invierno y principios de la primavera y reduciéndose durante el verano y el otoño. El clima es templado húmedo y las precipitaciones anuales alcanzan los 900 mm. No obstante, estas precipitaciones están concentradas en los meses más cálidos, en enero y febrero presentan una disminución relativa que intensifica el periodo seco estival.

2.2.- 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 en las seis parcelas de matorral de los departamentos de Chalileo, Chical Co y Pulen, al oeste de la provincia de La Pampa; (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. La campaña de campo en pastizales se realizó el 6 de abril de 2009 en las cinco parcelas del departamento de Magdalena. Sólo se cuenta con una fecha de campaña en Buenos Aires ya que se decidió incorporar estos sitios al estudio posteriormente.

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), 2 ó 4 muestras de vegetación con pesos comprendidos entre 80 y 100 gr. en cada una de las parcelas de muestreo. Los muestreos de vegetación en todas ellas se realizaron bajo el mismo protocolo estandarizado (Viegas *et al.* 1992). Las muestras así recogidas se introdujeron en bolsas herméticas y fueron llevadas al laboratorio para su pesado en fresco (Pf) y seco (Ps), tras 48h introducidas en una estufa a 60° C. Los valores de humedad se expresaron como FMC según la siguiente expresión:

$$FMC(\%) = \frac{Pf - Ps}{Ps} \times 100$$

2.3.- Imágenes Satélite

Para este trabajo se eligió el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), embarcado en el satélite TERRA, lanzado en 1999.

Este sensor presenta una buena resolución espacial para estudios regionales (250 m, 500 m y 1000 m), con amplia cobertura espectral (36 bandas espectrales, con longitudes de onda que van desde los 0.4 μm a los 14.4 μm). Además, las imágenes MODIS son de descarga gratuita, a través del servidor de la NASA LP DAAC ("Land Processes Distributed Active Archive Center of United States Geological Survey") (<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>, julio 2005) y recientes estudios, han mostrado su capacidad para detectar cambios en contenidos de humedad de la vegetación (Zarco-Tejada *et al.*, 2003; Dennison *et al.*, 2003; Trombetti *et al.*, 2008; Yebra y Chuvieco, 2009). Las imágenes MODIS son convertidas por diferentes equipos de la NASA en productos derivados. De todos los disponibles (Justice *et al.*, 2002), para este trabajo se seleccionaron los denominados MOD09 (Vermote *et al.*, 1999) y MOD15 (Knyazikhin *et al.* 1999). El primero, se trata de un compuesto de reflectividad de 8 días a 500 metros de resolución, que incluye las 7 primeras bandas del sensor MODIS y otras con información auxiliar (ángulos solares y de observación, día del compuesto, etc.). El segundo producto corresponde al producto que da información sobre el índice de área foliar (LAI). Este producto consiste en un compuesto de 8 días a una resolución espacial de 1 km.

Una vez adquiridas todas las imágenes, fueron re-proyectadas de sinusoidal a WGS84 y en el caso del producto LAI, remuestreadas a una resolución de píxel de 500 m (Figura 2).

2.4.- 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) procedimiento de inversión.

Los espectros de referencia empleados en este trabajo para la estimación de FMC del matorral fueron simulados por Yebra y Chuvieco (2008), mientras que los empleados para pastizales por Yebra *et al.* (2008b). Sendos estudios utilizaron para la simulación dos modelos: PROSPECT (Jacquesmoud, 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 (C_{a+b}), espesor equivalente de agua (EWT) y materia seca (DMC). El modelo SAILH permite simular la reflectividad del dosel a partir de la reflectividad y transmisividad de la hoja, la re-

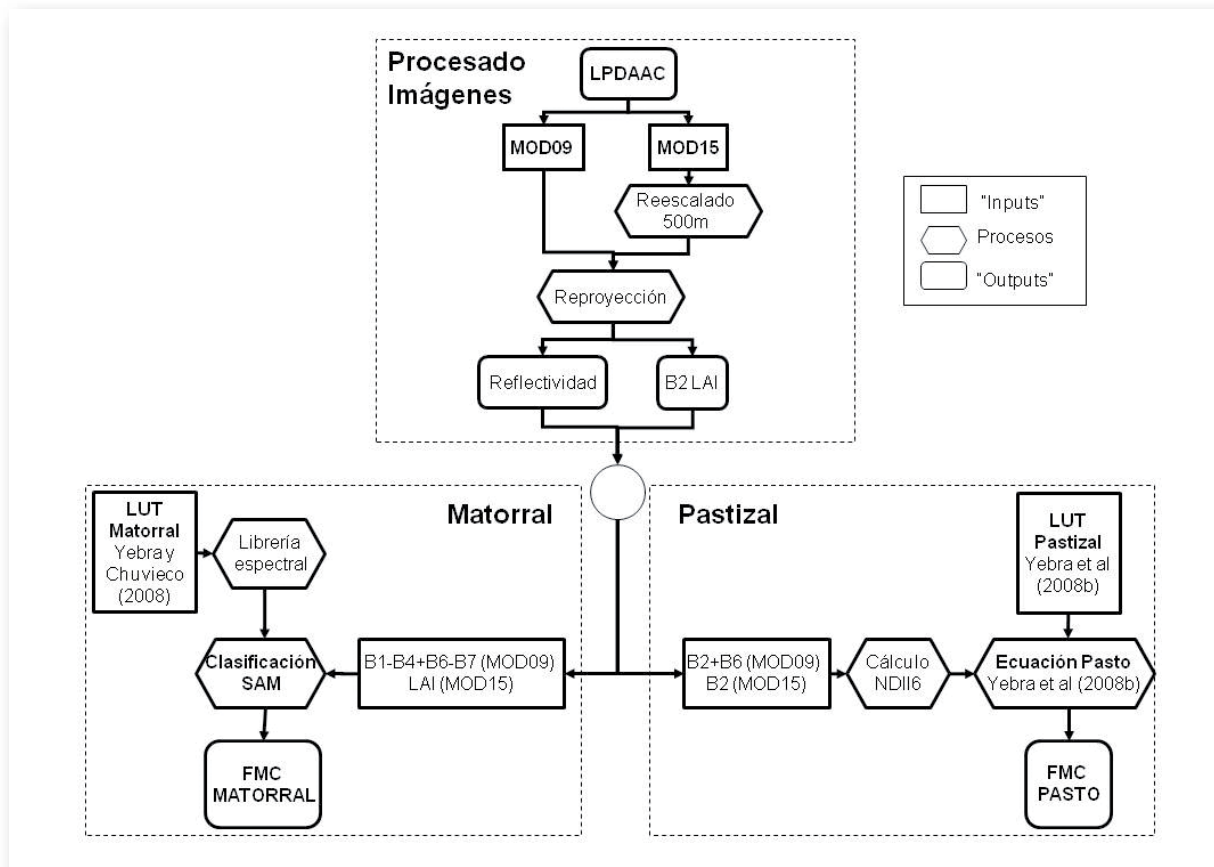


Figura 2.- Diagrama de flujo de la metodología empleada para la estimación de FMC para matorrales y pastizales.

reflectividad del suelo, el LAI, la función de distribución de las hojas (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 hace 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) y Yebra *et al.* 2008b emplearon mediciones de campo tomadas en especies de matorral y pastizal mediterráneo, respectivamente, para parametrizar el modelo PROSAILH y simular los espectros de referencia.

Todas las simulaciones las llevaron a cabo en el rango espectral comprendido entre 400 y 2400 nm (con intervalos de 10 nm) pero fueron remuestreadas a la resolución espectral de MODIS empleando para ello los ficheros de respuesta del sensor MODIS.

En este estudio, los espectros simulados para el matorral por Yebra y Chuvieco (2008), correspondientes cada uno a un determinado valor de FMC, se utilizaron como librería espectral de referencia. Los valores de FMC estimados se obtuvieron a partir de la comparación de los espectros observados en la imagen con aquellos de la librería de referencia. Para identificar qué espectro incluido en la librería resultaba más similar a cada espectro extraído de la imagen, se utilizó 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). La información de entrada a la clasificación incluyó todas las bandas de reflectividad del MODIS (ex-

cepto la Banda 5 que presenta problemas radiométricos) y el LAI, extraído del producto MOD15. El LAI fue incluido para la clasificación, como si de una banda de reflectividad se tratase, con el objetivo de disminuir los posibles problemas de indeterminación derivados de compensaciones entre los parámetros LAI y FMC. Varios autores han demostrado que la inclusión de esta información en el procedimiento de inversión mejora considerablemente las estimaciones de contenido en humedad de la vegetación (Yebra *et al.* 2008a; Zarco-Tejada *et al.* 2003).

Las estimaciones de FMC en las parcelas de pastizal fueron obtenidas mediante un modelo de regresión lineal propuesto por Yebra *et al.*, (2008b) y derivado de los espectros simulados por estos mismos autores:

$$FMC_{sim} = -6,74 + 296,751 \times NDII + 131,41 \times LAI$$

donde *NDII* corresponde al índice espectral asociado al contenido de humedad y fue calculado con las bandas 2 y 6 de MODIS (en inglés *Normalized Difference Infrared Index*, Hunt y Rock 1989) (Figura 2).

2.5.- 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 (RMS_E), sistemático ($RMSE_s$) y no sistemático ($RMSE_u$) y el índice de acuerdo (d) (Willmott, 1982). Este último índice compara el acuerdo entre los valores promedios observados y los estimados.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.- Muestreos de Campo

Para las especies de matorral, los mayores valores de FMC fueron registrados en los muestreos de noviembre en todas las parcelas menos en la P1 (Figura 3). En esta región las precipitaciones presentan alta variabilidad espacial asociada a un gradiente este-oeste. Probablemente, el comportamiento diferencial, y los mayores valores de FMC observados en este sitio, sean debidos a que el mismo está situado hacia el este del gradiente, donde las precipitaciones son mayores.

En noviembre las plantas todavía no sufren el estrés estival ya que las precipitaciones son abundantes y las temperaturas medias relativamente bajas (Figura 4). Sin embargo, la disminución de las precipitaciones y el aumento de las temperaturas durante el mes de enero genera condiciones

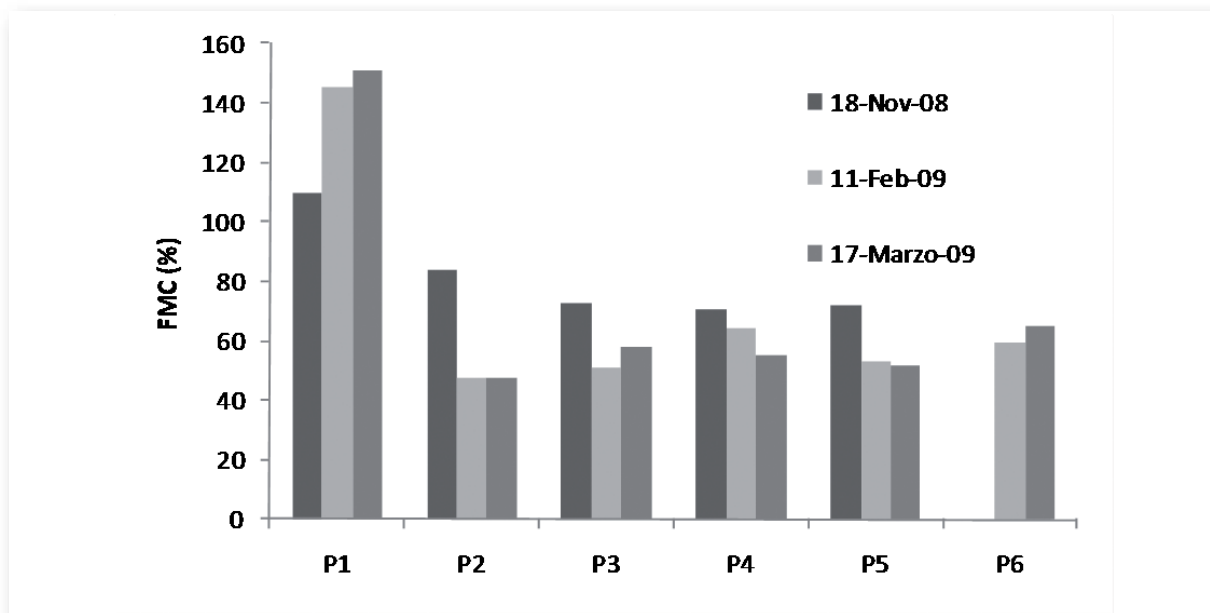


Figura 3.- Valores de FMC medidos en las parcelas de validación de matorral.

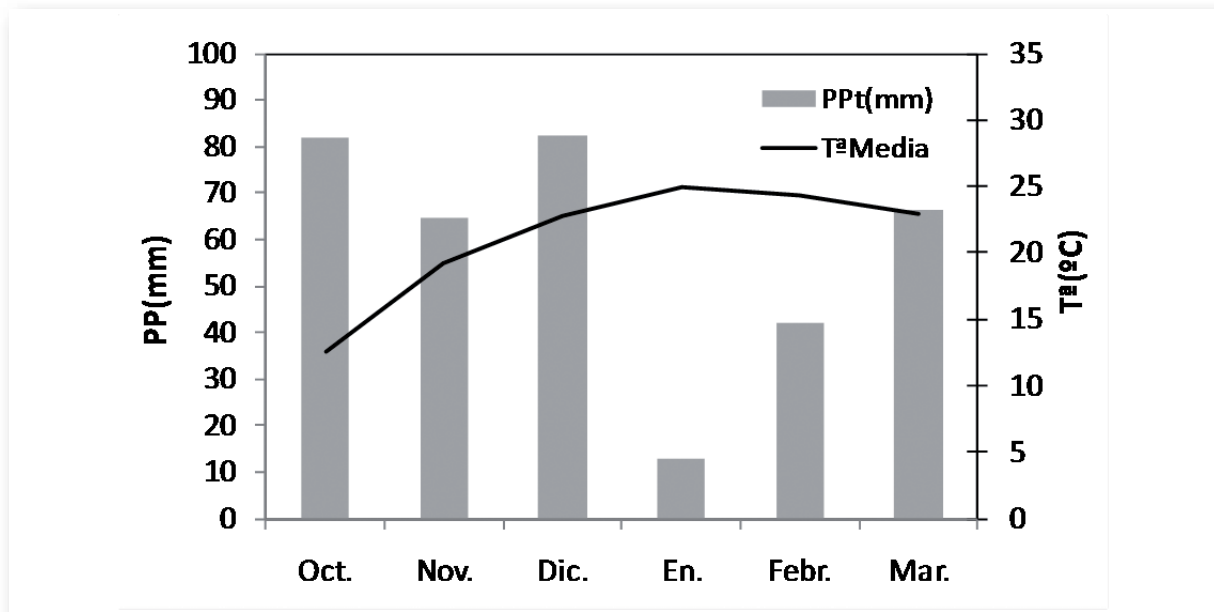


Figura 4.- Diagrama ombrotérmico de la zona de estudio. Datos de la estación meteorológica de Santa Rosa (La Pampa, Figura 1); PPT= Precipitación total acumulada, Tª Media: Temperatura media mensual.

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.

En las especies de pastizal se observaron valores de FMC entre 163 y 232% (Figura 5), con un promedio de 203%. Si bien durante el mes de la campaña de campo las precipitaciones fueron escasas (18 mm), durante los dos meses previos las precipitaciones alcanzaron los 200 mm, lo cual explica los altos valores de FMC.

3.2.- Validación

Si nos centramos en las parcelas de matorral, la ecuación de ajuste entre FMC_{Obs} y FMC_E fue cercana a 1:1 ($FMC_E = 0,7 \times FMC_{Obs} + 20,42$) 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 ($RMSE_s=9,63$) resultó mayor que la porción no sistemática ($RMSE_u=7,04$).

Si nos fijamos en los residuales de las estimaciones ($FMC_{Obs}-FMC_E$) podemos ver que el modelo tiene una tendencia sistemática a infra-estimar los valores de FMC mayores del 60% mientras que sobreestima los valores de FMC menores que dicho umbral (Figura 5).

En lo referente a las parcelas de pastizal, al igual que para la vegetación de matorral, los valores de FMC fueron obtenidos con un índice de acuerdo elevado ($d=0,96$). Asimismo, se obtuvo una ecuación de ajuste entre FMC_{Obs} y FMC_E similar ($FMC_E = 0,8732 \times FMC_{Obs} + 23,17$) con un R^2 de 0,88. La metodología presenta un error en las estimaciones del 9,4%, el cual puede ser considerado aceptable y está compuesto en mayor medida por la porción no sistemática ($RMSE_u=8,44\%$). Esto último implica que los errores en las estimaciones son predominantemente debido al azar y no ocurren de manera sistemática, características necesarias para un modelo adecuado (Figura 6).

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 ($RMSE < 12\%$ en matorral y

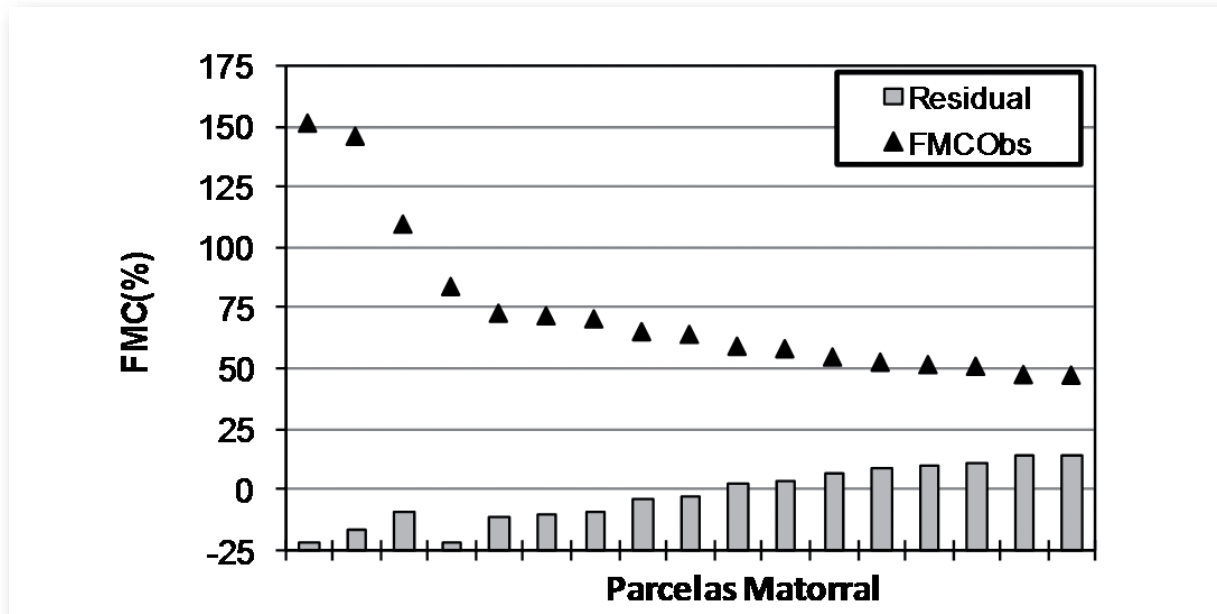


Figura 5.- Valores de FMC observados en las parcelas de muestreo de matorral (ordenados de mayor a menor) y residuales de las estimaciones.

RMSE<10% en pastos) 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 sobrestimaciones sistemáticas de los valores de

FMC menores al 60% en el caso de los matorrales. Aunque estas sobrestimaciones 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 cuanto a los pastizales, el modelo propuesto no presenta errores sistemáticos importantes, lo cual lo convierte en un modelo aceptable y aplicable a este tipo de pastizales.

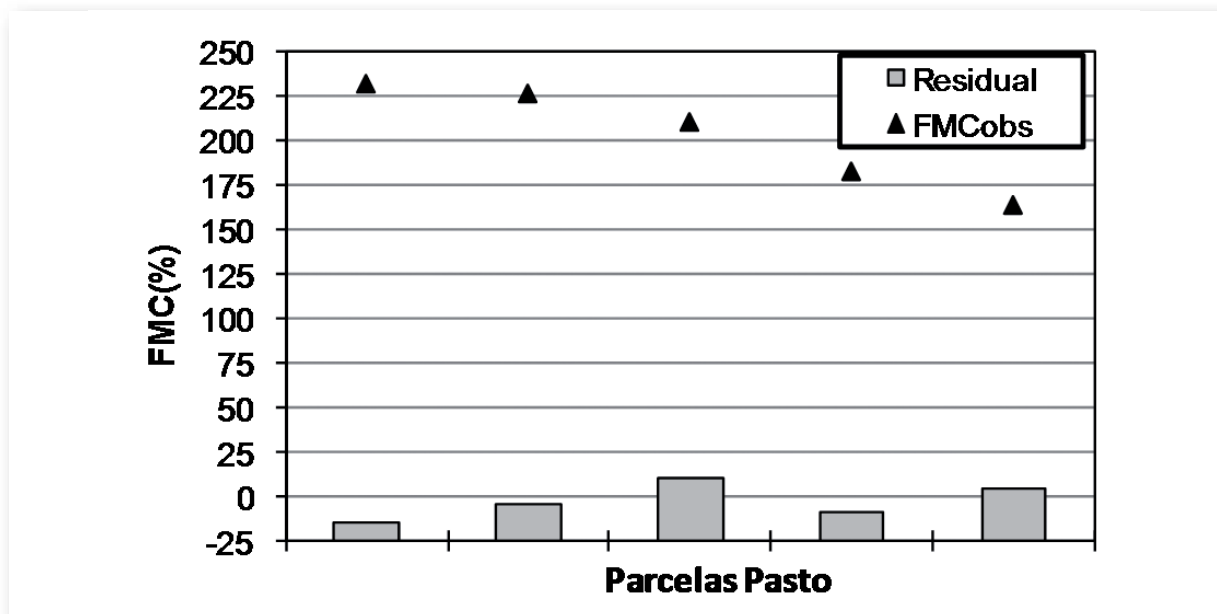


Figura 6.- Valores de FMC observados en las parcelas de muestreo de pastizal (ordenados de mayor a menor) y residuales de las estimaciones.

En este trabajo, se han empleado como espectros de referencia para la clasificación con SAM los generados por Yebra y Chuvieco (2008) y las ecuaciones calibradas por Yebra *et al.*, (2008b) para matorral y pastizal mediterráneo, respectivamente, obteniendo resultados aceptables en la validación de la metodología. En futuros trabajos se refinará la parametrización de los RTM para que simulen condiciones más similares a las observadas en la vegetación semiárida del Monte. Con ello se espera obtener estimaciones todavía más precisas.

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 ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología. También se ha conseguido apoyo del proyecto *FIREGLOBE* (CGL2008-01083), financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología y *SERENA* (CYTED 508AC0352).

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.

Cabrera, A.L. (1968). Vegetación de la Provincia de Buenos Aires. En: Flora de la Provincia de Buenos Aires. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires, 110-126.

Cabrera, A.L. (1971). Fitogeografía de la República Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 14(1-2): 1-42.

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.

Fischer, M.A., (2008). Condiciones de la vegetación que favorecen la ocurrencia, propagación y duración de los incendios en la Región Semiárida Argentina. Tesis Magister, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

Fischer, M.A.; Di Bella, C.M.; y Jobbágy, E.G. (2007). Factores que controlan la distribución espacio-temporal de los incendios en la Región Semiárida Argentina. En: XII Congreso de la Asociación Española de teledetección, Bs. As, Argentina.

Hunt, E.R. y Rock, B.N (1989). Detection of changes in leaf water content using near and middle-infrared reflectances. *Remote sensing of environment*, 30, 43-54.

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.

Knyazikhin, Y.; Glassy, J.; Privette, J.L.; Tian, Y.; Lotsch, A.; Zhang, Y.; Wang, Y.; Morisette, J.T.; Votava, P.; Myneni, R.B.; Nemani, R.R. y Running, S.W. (1999). MODIS Leaf Area Index (LAI) And Fraction Of Photosynthetically Active Radiation Absorbed By Vegetation (FPAR) Product (MOD15). Algorithm Theoretical Basis Document. <http://eos-pso.gsfc.nasa.gov/atbd/modistables.html>

Kunst, C. y Moscovich, F. (1996). Fuego prescripto: introducción a la ecología de fuego y manejo de fuego prescripto. En: Informes de INTA. Editado por: EEA Santiago del Estero, Facultad de Agronomía y Agroindustrias, Universidad Nacional de Santiago del Estero. AR, pp 134.

Kuusik, 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. y Martín y Fernández, S. (2008): Propuesta de un sistema espacialmente explícito para evaluar el peligro de incendios. *Serie Geográfica.*, 14: 109-130.

Trombetti, M.; D. Riano; M. A. Rubio; Y. B. Cheng y S. L. Ustin (2008): Multi-temporal vegetation canopy water content retrieval and interpretation using artificial neural networks for the continental USA. *Remote Sensing of Environment*, 112: 203-215.

Vermote, E. F. y Vermeulen, A. (1999). Atmospheric correction algorithm: Spectral Reflectances (MOD09), NASA.

Viegas D.X.; Viegas T.P. y Ferreira A.D. (1992) Moisture content of fine forest fuels and fire occurrence in central Portugal. *The International Journal of Wildland Fire* 2, 69-85.

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: potencialidades y problemas. *Ecosistemas*, 17: 23-28.

Yebra, M. y E. Chuvieco, (2009). Linking ecological information and radiative transfer models to estimate fuel moisture content in the Mediterranean region of Spain: solving the ill-posed inverse problem. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 113, No. 11, pp. 2403-2411.

Yebra, M.; Chuvieco, E. y Aguado, I. (2008a). 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. (2008b). Estimation of live Fuel Moisture Content from MODIS images for fire risk assessment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148: 523-536.

Zarco-Tejada, P.J.; Rueda, C.A. y Ustin, S.L. (2003). Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. *Remote Sensing of Environment*, 85, 109-124

