

MODELOS DE SIMULACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL COMBUSTIBLE FINO VIVO DE *Cistus monspeliensis*

F.X. CASTRO A. TUDELA M.T. SEBASTIÀ
(1) (1) (2)

- (1) Direcció General de Patrimoni Natural i del Medi Físic. Conselleria de Medi Ambient, Generalitat de Catalunya. Finca Torreferrussa, Apartat de correus, 119. 08130 Santa Perpètua de Mogoda
- (2) Àrea d'Ecologia Vegetal i Botànica Forestal. Centre Tecnològic Forestal de Catalunya. Pujada del seminari s/n. 25280 Solsona; y Dpt. d'Hortofructicultura, Botànica i Jardineria. Universitat de Lleida. Avinguda Rovira Roure, 177. 25198. Lleida

RESUMEN

Se midió la humedad de combustible fino vivo de *Cistus monspeliensis* en cuatro localidades de la zona mediterránea de la comunidad autónoma de Catalunya, de 1998 al 2000. El objetivo del trabajo era la modelización de la humedad del combustible fino vivo del jaguarzo en base a variables meteorológicas procedentes de estaciones automáticas cercanas y a diversos componentes del índice canadiense de peligro de incendio forestal. Se quiere generalizar las estimaciones de la humedad de combustible fino vivo de esta especie a otras localidades del territorio en función de los datos meteorológicos de la red de estaciones automáticas. Los dos modelos obtenidos incluían componentes relacionados con la temperatura, la disponibilidad hídrica y la humedad atmosférica. Uno de los modelos, que no incluía la fecha, sería más generalizable, pero la consideración del factor tiempo mejoró la capacidad de predicción en el segundo modelo.

P.C.: incendios forestales, combustibles vivos, índices de sequía, jaguarzo.

SUMMARY

We measured live fine fuel moisture of *Cistus monspeliensis* in four Mediterranean locations of Catalonia, from 1998 to 2000. The aim of the study was to model the live fine fuel moisture based on meteorological variables from automatic stations close-by, and several components of the Canadian index of forest fire danger. We wanted to generalize the estimates of live fine fuel moisture from this species to other localities throughout the territory from the data obtained by the net of automatic stations. The two models developed included variables related to air temperature, water availability and air moisture. The first model, independent of the actual sampling date, is more general, but the addition of the temporal component improved the predictive ability of the second model.

K.W.: forest fire, live fine fuel moisture, drought index, *Cistus monspeliensis*

INTRODUCCIÓN

La humedad del combustible fino vivo (HCFV) está relacionada con factores ligados a la biología vegetal y condicionada por factores del medio físico como climatología, orografía y suelos. Las plantas disponen de mecanismos tanto morfológicos como fisiológicos de regulación del contenido hídrico. En las zonas mediterráneas, con una marcada estación seca estival, estos mecanismos son especialmente importantes. Diversos autores han relacionado la HCFV de varias especies con su inflamabilidad (Elvira & Hernando, 1989; Valette, 1993; Moro & Le Corre, 1993; Rochas, 1994). Puesto que esta variable integra múltiples factores relacionados con los incendios forestales, la HCFV se ha considerado como un índice de riesgo y, por tanto, su interés no se reduce únicamente al de un valor de entrada de simuladores como BEHAVE (Burgan & Rothermel, 1984) o FARSITE (Finney, 1995). Con todo, su determinación directa es compleja y requiere la recogida y procesado de muestras. El Servei d'Agents Rurals i Prevenció d'Incendis Forestals (SARPIF) estableció en 1995 un grupo de parcelas de seguimiento de la HCFV de diferentes especies leñosas, determinando periódicamente la HCFV, con adaptaciones de los métodos de Countryman & Dean (1979) y Norum & Miller (1984).

Se han propuesto tres modelos en la dinámica de variación de la humedad del combustible vivo (Piñol & Ogaya, 1997). Las plantas esclerófilas presentan variaciones de HCFV durante el periodo de brotación, manteniendo relativamente constante su contenido de humedad durante el resto del año; las plantas malacófilas muestran una elevada variación de HCFV durante todo el año; *Pinus halepensis* mantiene constante su HCFV siempre. Estos resultados incrementan el interés por especies como *Cistus monspeliensis*, ya que los cambios en su contenido de humedad en función de las condiciones del medio son indicadores del riesgo de incendio. Se sabe que la HCFV en *Cistus monspeliensis* decrece linealmente con el aumento del índice *Draught Code* (DC) durante el periodo estival (Viegas *et al.*, 1998), con una buena correlación en cada localidad entre la HCFV y el DC calculado en una estación meteorológica asociada. El objetivo de este trabajo es encontrar una ecuación que relacione la HCFV en *Cistus monspeliensis* con variables meteorológicas, y que sea independiente de la localidad. Dispondremos así de un algoritmo de cálculo extensivo a otras zonas del territorio a partir de estaciones meteorológicas, con valor de predicción en función de la meteorología.

METODOLOGIA

El SARPIF dispone de varias parcelas repartidas por todo el territorio de la Catalunya Mediterránea, donde se determina la HCFV de especies leñosas con una misma metodología desde 1998. Las parcelas están situadas en solanas con

pendientes inferiores al 30 % y con un porcentaje de cobertura arbórea inferior al 10 %. En este estudio seleccionamos 4 localidades de suelos ácidos donde *Cistus mospeliensis* era abundante (Tabla 1). En cada localidad, al mediodía solar, se recogieron 20 ramas de plantas diferentes, con diámetros comprendidos entre 0,4 y 0,6 cm, a lo largo de transectos. Las muestras se recogieron quincenalmente de abril a setiembre y mensualmente el resto del año. De cada rama se eliminaron los frutos y las partes muertas. Las ramas se introdujeron en recipientes de plástico herméticos y se transportaron en nevera portátil al laboratorio donde se pesaron, se secaron en estufa hasta peso constante y se determinó su contenido de humedad de acuerdo con la fórmula:

$$\text{HCFV} = (\text{Peso fresco} - \text{Peso seco}) * 100 / \text{Peso seco}$$

Tabla 1: Localidades de recogida de muestras y estación meteorológica relacionada

Localidad	Coordenadas UTM	Altitud	Observatorio	Vegetación
Collserola, Barcelona	31 T DF285 889	310	Viladecans	<i>Cisto-Sarothamnetum scoparii</i>
Can Matetes, Caldes	31T DG875 294	160	Cassà de la Selva	<i>Lavandulo-Ericetum scopariae</i>
Ca n'Orpí, Piera	31T CF939 982	340	Sta Coloma de Queralt	<i>Erico-Thymelaetum hirsutii</i>
Montperdut, Vilajuïga	31T EG084 885	150	Cabanes	<i>Cisto-Sarothamnetum scoparii</i>

Para cada localidad de muestreo se asignó una estación de la red meteorológica automática del Departament de Medi Ambient que se consideró representativa de la zona (Tabla 1). De las estaciones se extrajeron inicialmente 36 variables meteorológicas (Tabla 2).

Tabla 2: Definición y codificación de las variables meteorológicas utilizadas

Variabes	Nombre asignado a las variables
Temperatura máxima, mínima y media del aire en °C	Tmáx., Tmín., Tmit
Integrales térmicas de T max, Tmin y T mit de los 3, 7 y 15 días anteriores al muestreo	Tmax3, Tmax7, Tmax15, Tmin3, Tmin7, Tmin15, Tmit3, Tmit7, Tmit15
Humedad relativa en %, media y mínima diaria	HRmit y Hrmin
Medias de HRmit y Hrmin de los 3, 7 y 15 días anteriores al muestreo	HRmit3, HRmit7, HRmit15, HRmin3, HRmin7, HRmin15
Velocidad máxima diaria del viento en m/s	Vvmax
Medias de VVmax a los 3, 7 i 15 días anteriores al muestreo	VVmax3, VVmax7, VVmax15
Lluvia del día acumulada en mm y en los 3, 7 y 15 días anteriores al muestreo	PPV, PPV 3, PPV7, PPV 15
Evapotranspiración Penman-Monteith (mm) del día de la recogida de muestras y acumulada durante los 3, 7 y 15 días anteriores al muestreo	Eto, Eto3, Eto7, Eto15
Radiación global (Megajulios/m ²) del día y acumulada en los 3, 7 y 15 días anteriores al muestreo	RG, RG3, RG7, RG15

También se utilizaron como predictores algunos componentes del *Canadian Forest Fire Danger Rating System* (Van Wagner, 1987): FFMC (*Fine Fuel Moisture Code*), DMC (*Duff Moisture Code*), DC (*Drought Code*) y BUI (*Buildup Index*), calculados según Van Wagner & Pickett (1985). Finalmente, se introdujeron las reservas de agua del suelo, R150 y R10, que se utilizan para el cálculo del índice I87 (Carrega 1991), adaptadas al cálculo horario. Además, se utilizó la variable fecha, según el día del año, a la cual se aplicó la transformación siguiente:

$$\text{Fecha} = \text{COS}(\text{DIA} * 2 * \text{PI} / 360 - 0.59)$$

Debido al elevado número de variables meteorológicas iniciales, se llevó a cabo un análisis de componentes principales con rotación ortogonal de factores VARIMAX, introduciéndose en los modelos de regresión de la HCFV iniciales la variable que más contribuía a cada uno de los ejes considerados (Hair *et al.* 1999). Además de las variables meteorológicas resultantes y de la fecha, se incorporó la localidad a las variables explicativas introducidas en el modelo lineal generalizado de la HCFV, así como las interacciones de segundo orden. Para hacer la modelización más generalizable, se construyó un segundo modelo en el que no interviniera la fecha.

RESULTADOS

En el modelo 1 se obtuvo que el efecto de la temperatura y de la humedad atmosférica sobre la humedad del combustible fino vivo (HCFV) está modulado por la época del año (Tabla 2). También fue importante la disponibilidad de agua en el suelo (R150). En el modelo 2, se sustituyó la fecha por una componente cuadrática de la integral térmica de 15 días de la temperatura máxima, que resultó significativa (Tabla 2). Por otra parte, también se introdujo el índice BUI (*build up index*), que integra conceptos de temperatura, reserva de agua en el suelo y humedad atmosférica). Con estos dos modelos se consiguió la independencia de la localidad.

Tabla 2: Variables y coeficientes para un modelo de simulación de la humedad del combustible fino vivo para un nivel de significación de 0.05. Los valores de t y su significación han sido omitidos para las variables que intervienen en una interacción que es significativa

Modelo	Variables	Coeficientes		T	Sig.	B Int. Confianza 95 %	
		B	Std. Error			Inferior	Superior
1 R ² a=.82 N=150	Coordenada	99.053	7.823	12.661	.000	83.588	114.518
	Tmin15	-1.593E-02	.040	.	.	-9.566E-02	6.379E-02
	R150	.345	.041	8.346	.000	.263	.426
	DATAMOD	10.367	8.834	.	.	-7.096	27.829
	Hrmin7	1.642E-02	.128	.	.	-.237	.270
	TMIN15*DATAMOD	.228	.030	7.490	.000	.168	.288
	Hrmin7*DATAMOD	-.506	.167	-3.033	.003	-.836	-.176
2 R ² a=.79 N=150	Coordenada	68.352	15.971	4.280	.000	36.788	99.916
	BUI	-.296	.032	-9.362	.000	-.358	-.233
	Tmax15	.600	.107	5.601	.000	.388	.812
	Tmax15 ²	-1.213E-03	.000	-7.005	.000	-1.555E-03	-8.707E-04

Las mayores desviaciones en la modelización coincidieron con el periodo de brotación, momento para el cual ambos modelos subestimaron el contenido de humedad (Figura 1), principalmente el segundo. Es aceptable pensar que las componentes intrínsecas de la planta debida a su propia fenología no sean bien recogidas por las variables meteorológicas.

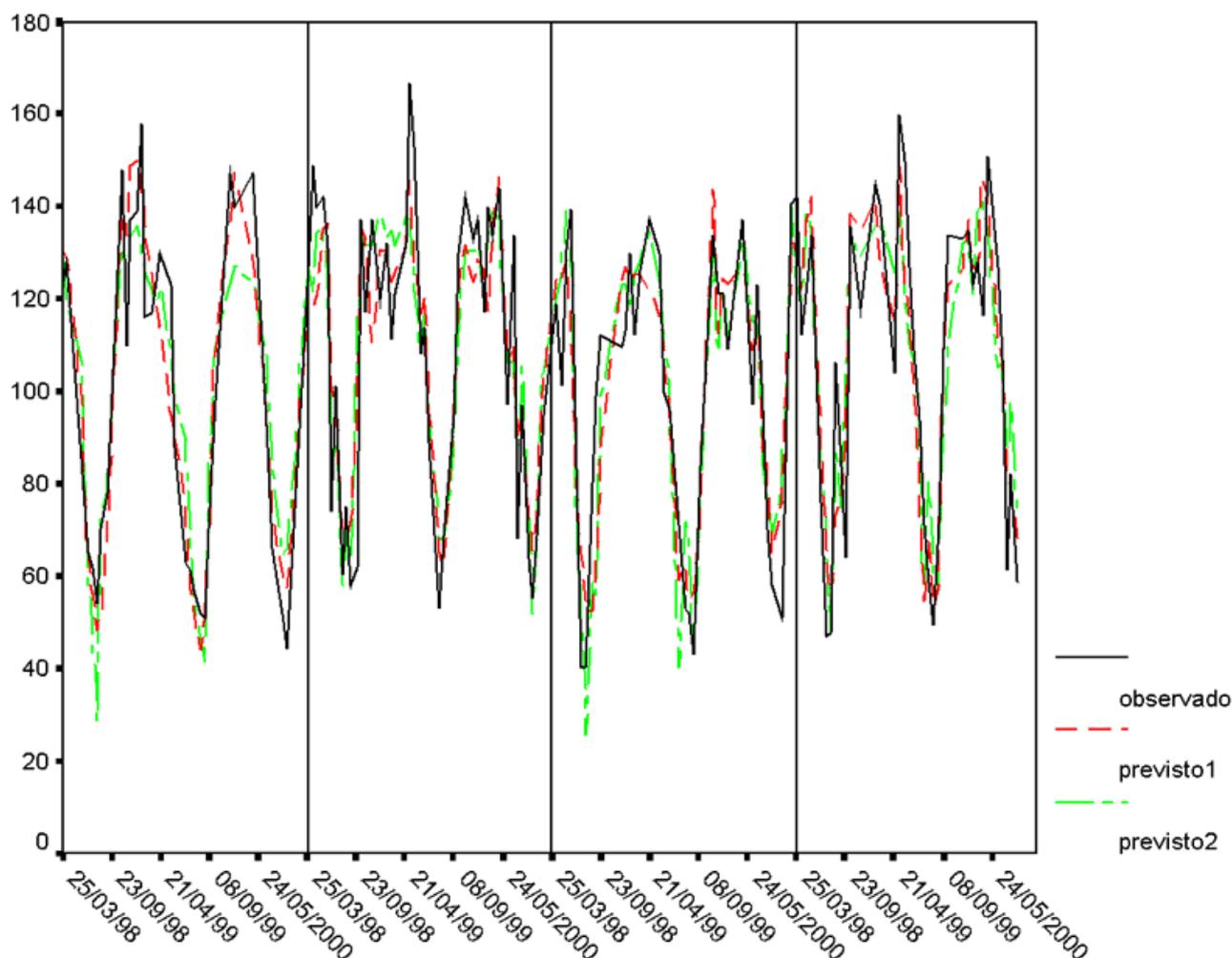


Figura 1: Valores de HCFV observados y previstos por los modelos. Las localidades son, de izquierda a derecha, Barcelona, Caldes de Malavella, Piera y Vilajuïga.

DISCUSIÓN

Los dos modelos finales incluyeron componentes relacionados con la temperatura, la disponibilidad hídrica y la humedad atmosférica. Estos factores están relacionados con la economía hídrica de las plantas, la cual es especialmente crítica en las zonas mediterráneas. Se sabe que tanto el déficit hídrico del suelo como el de la atmósfera pueden inducir el cierre estomático. Por otro lado, cabe destacar la dependencia de estos factores respecto a la fecha. En una primavera mediterránea, con valores medios o altos de R150, un aumento de la temperatura incrementa la producción primaria, estimulando el tamaño de los brotes. Los brotes tienen un contenido de humedad más alto que el resto de la planta y por tanto aumenta la HCFV. En cambio en la época seca los potenciales necesarios para extraer la poca agua disponible en el suelo son muy altos con lo cual, al aumentar la temperatura, la planta no puede compensar el agua perdida por un aumento de la transpiración, y disminuye la HCFV.

La inclusión del factor fecha en los modelos limita su generalización, pues en distintas localidades las plantas pueden seguir ritmos fenológicos desplazados en el tiempo. Por esta razón, las modelizaciones basadas en el calendario deben ser consideradas con prudencia (Conolly & Wachendorf, 2001). Sin embargo, para nuestra escala de trabajo, podemos dar como válido este modelo.

El clima mediterráneo es un clima caracterizado en ciertos períodos por un régimen de lluvias de tipo tormentoso, fenómeno que pueden ser muy local, distorsionando los cálculos de disponibilidad hídrica. Esto podría ayudar a explicar la discrepancia entre las predicciones y los valores observados en determinados periodos en todas las estaciones.

CONCLUSIONES

Las variaciones estacionales del contenido de humedad de *Cistus monspeliensis* se pudieron simular utilizando modelos que incluían la temperatura, la humedad atmosférica y una estimación del agua disponible, y sus interacciones con el tiempo. Los ajustes así obtenidos se situaron en R^2 ajustadas alrededor de 0.8 que se considera un mínimo para la generalización de los cálculos al territorio. Valores inferiores se consideraron poco útiles dado que posibilitan valores estimados alejados de los valores reales, sobre todo en casos extremos (que son los problemáticos).

AGRADECIMIENTOS

Al cuerpo de Agents Rurals de Cataluña por su colaboración y en particular a los agentes que han muestreado con paciencia y han facilitado con sus conocimientos de campo nuestro trabajo. También al señor Manel Aragall del Laboratorio Agrario de Cabrils que ha procesado las muestras y nos ha dado valiosas indicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Burgan, R.E. and Rothermel, R. C. 1984. BEHAVE: Fire behavior prediction and fuel modeling system . Gen. Tech. Rep. INT-167. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station. 126 p.
- Carrega, P. 1991. A meteorological index of forest fire hazard in Mediterranean France. Int. J. Wildland Fire:76-86.
- Connolly J., Wachendorf M. 2001 .Developing multisite models of the evolution of mixed species plant communities.
- Countryman, C. M. And Dean, W.A., 1979 “Measuring moisture content in living Chaparral: a field user’s manual”. United States. Department of Agriculture. National Wildfire Coordinating Group.
- Elvira Martin LM & C Hernando Lara, 1989 Inflamabilidad y energía de las especies de sotobosque: estudio piloto con aplicación a los incendios forestales. Monografías INIA, n°68, Madrid, 99 p
- Finney, M. A. 1995. FARSITE: A fire area simulator for fire managers. In: Weise, D. R.; Martin, R. E.; tech. Coords. The Biswell Symposium: fire issues and solutions in urban interface and wildland ecosystems; 1994 February 15-17; Walnut Creek, CA. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-158. Albany, CA; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station: 55-56
- Hair J. F., Anderson R.E., Tatham R. L. & Black W. C. 1999. Analisis multivariante. Prentice Hall Iberia. Madrid. 382 p.
- Moro C. & I. Le Corre, 1993. Inflamabilité de la bruyère arborescente et de l’arbousier, campagne 1993. Rapport technique final. I.N.R.A./E.N.S.A.R. Document interne PIF9322, 23 p.
- Norum, R.A & Miller, M., 1984. “Measuring fuel moisture content in Alaska: Standard Methods and Procedures”. United States. Department of Agriculture. Forest Service. General Technical Report. 34 p.
- Piñol J. & Ogaya R. 1997. Humitat del combustíble fi viu a Catalunya els anys 1995 i 1996. Centre de Recerca Ecológica i Aplicacions Forestals. 23 p.
- Rochas L., 1994. Inflamabilité et indice de siccité de la bruyère arborescente et de l’arbousier Campagne 1994.

I.N.R.A./E.N.S.A.R. Document interne PIF9425, 43 p.

Valette, J. C. 1993. Flammabilities of Mediterranean species: I.N.R.A.'s Methodology. I.N.R.A Document interne PIF9328, 14 p.

Van Wagner, C.E., 1987. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian Forestry Service. Forestry Technical Report, 35. Ottawa, Canada.

Van Wagner, C.E., and T.L. Pickett. 1985. Equations and FORTRAN program for the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian Forestry Service. Forestry Technical Report 33. Ottawa, Canada.

Viegas, D. X., Piñol, J., Viegas, M.T. i Ogaya, R. 1998. "Moisture content of living forest fuels and their relationship with meteorological indices in the Iberian Peninsula". III International Confer. On Forest Fire research. 14 th. Conference on Fire and Forest Meteorology Luso.