

ESTIMACIÓN DE LA HUMEDAD DEL COMBUSTIBLE COMO PASO PREVIO A LA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE INCENDIOS Y A LA EXPLICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL FUEGO.

A.D.RUIZ; T.VIADOR; B.DIAZ

Departamento de Ingeniería Agroforestal. Escuela Politécnica Superior de Lugo. Universidad de Santiago de Compostela.

RESUMEN

Se relacionan las humedades de los combustibles forestales muertos de menor grosor del suelo de masas de *Pinus radiata* D. Don, con diversos factores del medio. Se pretende obtener ecuaciones de predicción de la humedad que sean aplicables a los Sistemas de Determinación del Peligro de Incendios y de Simulación del Comportamiento de Fuego. El estudio se desarrolla en dos masas de distinta edad y manejo selvícola, pero análogas en cuanto a los factores del tiempo atmosférico pues son masas colindantes, y a los factores fisiográficos de altitud, pendiente y orientación.

P.C.: humedad del combustible, peligro de incendio, comportamiento del fuego, *Pinus radiata*

SUMMARY

Fine, dead, ground forest fuels moistures are related with different environmental factors in *Pinus radiata* D. Don plantations. It's pretended to obtain moisture prediction equations that can be applied to Fire Risk and Fire Behavior Prediction Systems. The study takes place in two plantations with different age and stand management but with similar weather conditions (the stands are adjacent) and physiographics factors such as elevation, slope and aspect.

K.W.: fuel moisture, fire risk, fire behavior, *Pinus radiata*

INTRODUCCIÓN

La probabilidad de inicio de un incendio forestal es mayor cuanto más secos estén los combustibles finos en el monte. Una vez iniciado el fuego, de nuevo la humedad del combustible juega un papel determinante en la propagación del incendio. Estos son los motivos por los que los Sistemas de Determinación del Peligro de Incendios empleados en los distintos países, así como los diversos Sistemas de Simulación del Comportamiento del Fuego existentes, incluyen la humedad del combustible como dato fundamental para sus cálculos. Sin embargo, si queremos estimar la probabilidad de ignición en un momento dado o pronosticar la velocidad de avance del frente de un incendio en activo, el cálculo directo de la humedad del combustible no es de utilidad práctica pues no se puede efectuar con suficiente rapidez. Ante esta situación, surge la necesidad de elaborar métodos de estimación rápida de la humedad a partir de variables que se puedan medir fácilmente en el monte.

MATERIAL Y METODOS

Descripción de las parcelas

El estudio se ha llevado a cabo en el monte vecinal en mano común "Lamablanca, Lagoa y Paramelo" situado en la parroquia de Coeses, municipio de Lugo y cubierto por masas de repoblación de *Pinus radiata* con diferentes edades. El trabajo se centra en dos rodales, de 7 y 30 años de edad. El rodal de menor edad al que se denominará "masa joven", tiene una densidad superior a los 1000pies/ha, una altura media de 6.4 m y se caracteriza además por no haber sido sometido a tratamiento selvícola alguno desde su instalación, manteniéndose claramente marcadas las líneas de

plantación y los espacios entre ellas. El rodal de mayor edad designado como "masa adulta" tiene una densidad de 560 pies/ha, una altura media de 19.3 m y se encuentra aclarado y podado, estando los pies uniformemente distribuidos por el rodal. Ambos rodales se encuentran a unos 480 m de altitud y sobre terreno llano.

Descripción del ensayo

El estudio de predicción de la humedad de los combustibles finos del suelo se basa en los datos de humedad obtenidos de muestras tomadas diariamente entre las dos y las cuatro de la tarde durante los meses de febrero a septiembre del año 2000. Se recogieron combustibles superficiales (acículas) y subsuperficiales (mantillo) y se impuso como condición no tomar muestras si estaba lloviendo en ese momento, de forma que se redujo bastante el número de días adecuado, muestrándose un total de 52 días en cada parcela. Las muestras de combustible se recogían siempre en una misma zona de cada rodal (con una superficie aproximada de 1 ha), efectuando recorridos a lo largo de la misma y recogiendo combustible de distintos puntos del itinerario. Las muestras se introducían rápidamente en botes de vidrio pirex con cierre hermético para evitar variaciones en su humedad.

Simultáneamente a la toma de muestras de combustibles en cada rodal se realizaban observaciones sobre la humedad relativa y la temperatura del aire, la velocidad del viento, el porcentaje de nubosidad, los días transcurridos desde la última vez que llovió en la parcela y los días transcurridos desde la última vez que hubo niebla en la misma. Para obtener la humedad relativa y la temperatura se utilizó un psicrómetro centrífugo y unas tablas psicrométricas (XUNTA DE GALICIA, 1992) y para medir la velocidad del viento se empleó un anemómetro de cucharas portátil. Ambos aparatos son los más frecuentemente utilizados por los Servicios de Defensa Contra Incendios Forestales para cálculo de índices meteorológicos de peligro de incendio forestal.

Una vez tomadas las muestras y realizadas las observaciones de las variables ambientales se trasladaban las muestras en nevera hasta el laboratorio donde se pesaban para obtener su peso húmedo. Acto seguido se introducían en una estufa de convección forzada para su desecación durante 24 horas (NORUM & MILLER, 1984). Una vez eliminada toda el agua libre e higroscópica se pesaba de nuevo la muestra para obtener su peso seco. Finalmente, el contenido en humedad del combustible expresado en porcentaje respecto a su peso seco se calcula con la siguiente expresión:

$$\text{Humedad del combustible (\%)} = \frac{\text{Peso Húmedo} - \text{Peso Seco}}{\text{Peso Seco}} 100$$

Tratamiento estadístico de datos

Para la obtención de modelos de estimación de la humedad del combustible a partir de variables ambientales se ajustaron relaciones lineales entre las humedades observadas en los distintos combustibles y los valores medidos de las variables ambientales (en el caso de las acículas se incluyó también la humedad del mantillo). La elección de las variables a incluir en cada modelo se ha llevado a cabo mediante los siguientes análisis efectuados con el programa estadístico SASTM:

- Estimación de los coeficientes de correlación lineal de Pearson de la humedad del combustible con las distintas variables ambientales.
- Ajuste de regresión lineal por mínimos cuadrados ordinarios con el método de selección de variables "stepwise" (paso a paso).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Coefficientes de correlación lineal de Pearson

En la tabla 1 se muestran los coeficientes de correlación entre la humedad observada en las acículas y el mantillo y las variables ambientales. Para analizar la posible influencia de la fecha de medición sobre la humedad del combustible se ha incluido como variable numérica el mes en que se

realizaron las tomas de muestras.

Masa	Combust.	H. relativa (%)	Temp. (°C)	H. del mantillo (%)	Días sin lluvia	Días sin niebla	Nub. (%)	V. viento (Km/h)	Mes
Joven	Mantillo	0.297*	-0.646*	---	-0.373*	-0.157	0.120	---	-0.818*
	Acículas	0.460*	-0.729*	0.788*	-0.442*	-0.147	0.333*	---	-0.638*
Adulta	Mantillo	0.236	-0.654*	---	-0.345*	-0.023	0.190	0.053	-0.758*
	Acículas	0.497*	-0.660*	0.707*	-0.406*	-0.127	0.518*	-0.058	-0.436*

Tabla 1. Coeficientes de correlación lineal entre la humedad de los combustibles y las variables ambientales. (* Indica correlaciones significativas al 5%).

La correlación de las humedades de los combustibles con la humedad relativa y la temperatura resultó en general significativa y lo mismo se puede decir para la correlación entre la humedad de las acículas y la del mantillo. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por POOK & GILL (1993) al comparar las mismas variables en masas de *Pinus radiata* de características semejantes en Australia.

A continuación se analizan los coeficientes de correlación obtenidos para cada variable ambiental:

Humedad del combustible-humedad relativa: con la excepción del mantillo en la masa adulta, se aprecia una correlación significativa y positiva entre ambas variables. La correlación es mayor para la humedad de las acículas que para la humedad del mantillo, lo cual es lógico al ser este un combustible más compacto, mal ventilado y con pocos espacios de aire a través de los cuales intercambiar humedad con la atmósfera. Además, la elevada humedad observada en el mismo a lo largo de todo el estudio enmascara su dependencia de la humedad relativa. POOK & GILL (1993) obtuvieron mayores coeficientes de correlación para las acículas superficiales que en este estudio (del 0.88 en masas sin tratamientos selvícolas y del 0.57 en masas aclaradas y podadas) pero no lo calcularon para el mantillo.

Humedad del combustible-temperatura: se aprecia una correlación significativa de signo negativo en todos los casos. Los coeficientes de correlación resultaron superiores a los coeficientes de correlación humedad del combustible-humedad relativa. POOK & GILL (1993) obtuvieron correlaciones semejantes (no estudiaron el caso del mantillo).

Humedad de las acículas-humedad del mantillo: la elevada humedad observada en el mantillo llevó a pensar que podría afectar a la humedad de las acículas en contacto directo con el mismo. De hecho, se obtuvo una elevada correlación significativa de signo positivo en los dos casos. Los coeficientes de correlación obtenidos en el estudio para las acículas, que son 0.78 y 0.7 respectivamente para la masa joven y adulta, se asemejan bastante a los obtenidos por POOK & GILL (1993) que resultaron de 0.82 y 0.79 en masas similares.

Humedad del combustible-días sin lluvia: la correlación resultó significativa, negativa y de valor muy parecido en todos los casos.

Humedad del combustible-días sin niebla: no existe correlación significativa, aunque sí una tendencia general a la disminución de la humedad del combustible al incrementarse el número de días sin niebla.

Humedad del combustible-nubosidad: se obtuvo correlación significativa (de signo positivo) para la humedad de las acículas, pero no para la del mantillo. Este combustible, además de responder más lentamente que las acículas a los cambios en el ambiente, está menos expuesto al calentamiento solar, pues el propio lecho de acículas superficiales le protege del mismo.

Humedad del combustible-mes del año: se confirmó la influencia del mes en la humedad del combustible pues se obtuvo, en todos los casos, una correlación significativa de signo negativo. A medida que avanzan los meses, desde febrero cuando comenzó el estudio hasta septiembre cuando

terminó, va disminuyendo la humedad del combustible.

Ajustes de regresión lineal por el método de selección de variables "stepwise"

Se ha obligado a incluir en todos los modelos la humedad relativa y la temperatura puesto que son las variables habituales en todos los modelos de estimación ya existentes y además, en la mayoría de los casos, existe una clara correlación con las humedades observadas en los diferentes combustibles.

Se han efectuado dos tipos de ajustes, primero considerando todo el rango de humedades de los combustibles observadas durante el transcurso del muestreo de campo y después limitando el rango de humedades de los combustibles a los valores situados por debajo del 16%. WOODMAN & RAWSON (1982) proponen el 15% de humedad del combustible fino muerto en masas de *Pinus radiata* en Australia como el valor que separa los incendios de baja intensidad (humedad inferior al 15%) de los de intensidad moderada (humedad superior al 15%). En este estudio se ha querido seguir este criterio para limitar de alguna manera los datos con el propósito de mejorar los ajustes para aquellas situaciones de mayor importancia práctica. Se ha tomado como límite el 16% en vez del 15% porque había varios datos de humedad entre ambos valores que se ha creído adecuado incluirlos en el ajuste dada la escasez de observaciones dentro del rango analizado. Aún así los datos de humedad del mantillo quedaron todos fuera del análisis. Los resultados se muestran en la tabla 2.

Ajustes considerando todo el rango de humedades de los combustibles observadas			
Masa joven			
Combustible	Ecuación	R ²	C(p)
Mantillo	$m_{mj} = 668.971 - 1.591H - 17.578T - 5.456 Dsll - 0.495 Nub$	0.584	4.33
Acículas	$m_{aj} = 54.5964 + 0.232H - 2.013T + 0.117H_m - 1.035 Dsll$	0.766	3.68
Masa adulta			
Combustible	Ecuación	R ²	C(p)
Mantillo	$m_{ma} = 563.821 - 1.6233H - 15.109T - 4.5170 Dsll$	0.530	2.81
Acículas	$m_{aa} = 9.3467 + 0.237H - 0.378T + 0.086H_m - 0.5164 Dsll + 0.112 Nub - 3.175Vv$	0.724	6.17
Ajustes para humedades del combustible inferiores al 16%			
Masa joven			
Combustible	Ecuación	R ²	C(p)
Acículas	$m_{aj} = 9.06 + 0.024H + 0.195T$	0,994	---
Masa adulta			
Combustible	Ecuación	R ²	C(p)
Acículas	$m_{aa} = 12.544 + 0.092H - 0.182T + 0.024H_m - 0.974 Dsll$	0.727	2.62

Tabla 2. Mejores ajustes entre la humedad del combustible y las variables ambientales. m_{mj} y m_{ma} son las humedades en % estimadas para el mantillo en la masa joven y en la adulta respectivamente; m_{aj} y m_{aa} son las humedades en % estimadas para las acículas muertas de la superficie en la masa joven y adulta respectivamente; H es la humedad relativa del aire en %, T es la temperatura del aire en °C, $Dsll$ son los días transcurridos desde la última vez que llovió en la parcela, Nub es el % de nubosidad observado al recoger la muestra de combustible, H_m es la humedad del mantillo en % y Vv es la velocidad del viento en km/h.

Los modelos de estimación de la humedad de las acículas superficiales que consideran todo el rango de humedades tienen un elevado coeficiente de determinación R^2 (superior a 0.72 en los dos casos), sin embargo, presentan un inconveniente para su empleo práctico, y es que incluyen como variable la humedad del mantillo. Dicha humedad debería ser estimada por la imposibilidad de medirla directamente con suficiente rapidez, y los modelos de predicción de la humedad del mantillo no son muy precisos. El modelo para las acículas en la masa joven restringido a humedades inferiores al 16%, a pesar de su R^2 de 0.994 no es aceptable pues el número de datos en que se basa, después de

la restricción impuesta es de cuatro y no es una muestra suficiente como para dar validez al ajuste.

POOK & GILL (1993) ajustaron ecuaciones relacionando la humedad de las acículas de la superficie con diversas variables ambientales. En la tabla 3 se muestra un resumen de los modelos cuyas variables coinciden con los del estudio en curso y que por lo tanto se pueden comparar.

Variables del modelo	Masa joven		Masa adulta	
	R ² (Pook y Gill)	R ² (Est.en curso)	R ² (Pook y Gill)	R ² (Est.en curso)
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura (°C) • Humedad relativa (%) 	0.78	0.53	0.49	0.45
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura (°C) • Humedad relativa (%) • Humedad del mantillo (%) 	0.86	0.72	0.64	0.62

Tabla 3. Modelos de estimación de la humedad de las acículas comunes entre el estudio en curso y el de POOK & GILL (1993) y coeficientes de determinación R².

Como se observa los coeficientes de determinación de Pook y Gill resultaron superiores en la masa joven y muy semejantes en la masa adulta.

CONCLUSIONES

Los ajustes de regresión entre la humedad de las acículas y las variables ambientales mostraron que la temperatura, la humedad relativa y la humedad del mantillo combinadas explican gran parte de la variación de la humedad observada en las acículas. Sin embargo, los modelos mejoran al incluir otras variables, destacando entre ellas, los días sin llover.

Hay muchos factores que pueden contribuir a la variación de la humedad del combustible muerto sobre el suelo forestal y limitar la precisión de los modelos empíricos. A los procesos fundamentales que controlan los cambios en la humedad del combustible en general (intercambio de vapor con la atmósfera, precipitación y condensación, revisados por SIMARD (1968) y HATTON & VINEY (1988)) hay que añadir el suelo como fuente de humedad.

Por todo ello el estudio debe completarse con un mayor volumen de datos obtenidos fundamentalmente durante los meses de verano, que es cuando más interés práctico tiene la estimación de la humedad del combustible y cuando más importancia presenta el intercambio de vapor entre el combustible y la atmósfera, es decir, la dependencia entre la humedad del combustible y la humedad relativa y la temperatura frente al resto de los procesos. Bajo estas condiciones es de suponer que se conseguiría mejorar o al menos mantener la precisión de los modelos de estimación de la humedad de las acículas sin tener que incluir en los mismos la humedad del mantillo y, por otro lado mejorar los modelos predictivos de este último tipo de combustible.

BIBLIOGRAFIA

- HATTON, T.J. & VINEY, N.R.; (1988). *Modelling fine, dead, surface fuel moisture*. Proceedings of Conference on Bushfire Modelling and Fire Danger Rating Systems, Camberra, Australian Capital Territory 119-125.
- NORUM, R.A. & MILLER, M.; (1984). *Measuring Fuel Moisture Content in Alaska: Standard Methods and Procedures*. U.S.D.A. Forest Service. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station. General Technical Report PNW-171.34 p.
- POOK, E.W. & GILL, A.M.; (1993). *Variation of Live and Dead Fine Fuel Moisture in Pinus Radiata Plantations of the Australian Capital Territory*. Int. J. Wildland Fire 3(3): 155-168.
- SIMARD, A.J.; (1968). *The moistue content of forest fuels I. A review of the basic concepts*. Canadian Department of Forest and Rural Development, Forest Fire Research Institute, Information Report FF-X-14. Ottawa, Ontario. 47 p.
- WOODMAN, M. & RAWSON, R.; (1982). *Fuel reduction burning in Radiata Pine plantations*. Fire Management Branch, Research Report No.14. Dept. Conservation and Environment, Vic.
- XUNTA DE GALICIA; (1992). *A meteoroloxia e os incendios forestais*. Consellería de Agricultura, Gandería e Montes. 131 p.

