

DETERMINACION DE LA RELACION SUPERFICIE/VOLUMEN DE LAS ACICULAS MUERTAS

C. HERNANDO

M. GULJARRO

J. A. DE LOS SANTOS¹

Area de Selvicultura y Mejora Forestal. CIFOR-INIA
Apdo. 8111. 28080 Madrid. ESPAÑA

RESUMEN

Se ha puesto a punto un método para la determinación de la relación superficie/volumen de las acículas muertas. El método se basa en la simplificación propuesta por Brown (1970), pero obteniendo los valores requeridos (superficie y perímetro de las secciones), en cortes micrométricos, mediante un analizador de imagen. El método propuesto aúna las condiciones de precisión y rapidez necesarios.

La relación superficie/volumen (σ) está íntimamente relacionada con el comportamiento del fuego en los diferentes tipos de combustible forestal. En consecuencia, esta característica física se determina para partículas de combustible fino muerto que intervienen, frecuentemente, en los incendios forestales.

Los valores obtenidos para *Pinus pinaster* Ait., *P. pinea* L. y *P. halepensis* Mill. son, respectivamente, de 48,24, 57,80 y 79,93 cm⁻¹.

Los resultados ponen de manifiesto las variaciones existentes entre especies. Sin embargo, no se encuentran diferencias derivadas de los distintos lugares de muestreo.

PALABRAS CLAVE: Relación superficie/volumen
Inflamabilidad
Comportamiento del fuego
Pinus pinaster Ait.
Pinus pinea L.
Pinus halepensis Mill.

INTRODUCCION

La importancia que tiene la relación superficie/volumen « σ » de los combustibles en el inicio y propagación del fuego ha sido puesta de manifiesto por diferentes autores (Brown, 1970; Rothermel, 1983; Daligault, 1991; etc.), considerando que es la característica que mejor describe la geometría de las partículas. En este sentido, diversos modelos de predicción de la propagación del

¹ Dirección actual: Subdirección General de Investigación Agraria. Consejería de Economía. Comunidad de Madrid. Apdo. 127. 28880 Alcalá de Henares. Madrid.

Recibido: 22-3-95

Aceptado para su publicación: 20-5-95

fuego (Thomas, 1967; Rothermel, 1972; etc.) otorgan un papel fundamental a este parámetro.

Los intercambios de energía y de materia con la fase gaseosa, que tienen lugar durante el proceso de combustión, son tanto más rápidos cuanto mayor es el valor de σ , por lo que este parámetro resulta de gran utilidad a la hora de valorar la inflamabilidad de las especies.

En los combustibles finos, con una relación superficie/volumen elevada, la temperatura y el contenido de humedad de los mismos fluctúan más rápidamente que en los combustibles más gruesos, con una baja relación superficie/volumen. Estudios de combustiones controladas han puesto en evidencia que el tiempo de inflamación y la velocidad de propagación del fuego varían inversamente con σ (Rothermel, Anderson, 1966).

Existen numerosos trabajos (Johnson, 1984; Ohmart, Thomas, 1986; Brand, 1987) que abordan el estudio de la superficie foliar, por ser ésta una característica frecuentemente utilizada en Fisiología Vegetal y Ecología. Sin embargo, la determinación de la superficie de las acículas, por su estructura tridimensional preponderante, presenta ciertas dificultades al no poder aplicar correctamente la planimetría óptica, que es la técnica que se utiliza de forma rápida y satisfactoria en el caso de las hojas planas.

Para paliar este problema, se han desarrollado diversos métodos (véase la revisión realizada por Daligault, 1991) en los cuales la determinación de la superficie foliar se realiza indirectamente, a partir de relaciones matemáticas existentes entre dicha superficie y otras magnitudes, o directamente, estimando la superficie por asimilación de ésta a modelos geométricos simples.

Aunque estos métodos son generalmente de ejecución rápida, no poseen gran precisión, en especial aquellos que suponen constante la sección transversal de las acículas de una misma especie e incluso de un mismo género. Sin embargo, existen variaciones ligadas a la edad, condiciones de crecimiento del individuo, etc., que hacen que este postulado no resulte cierto (Brand, 1987).

En cuanto a la determinación del volumen, la mayoría de los autores coinciden en su medición a través del volumen de agua desplazado.

Con el método desarrollado para la determinación de σ , que se describe a continuación, se pretende conjugar dos requisitos básicos para su validez, como son la precisión que proporciona y el tiempo necesario para la obtención de los resultados.

Se ha determinado, con este método, la relación superficie/volumen de las acículas muertas de varias especies con gran protagonismo en los incendios forestales que tienen lugar en los países del área mediterránea.

MATERIAL Y METODOS

Puesta a punto de la metodología

De acuerdo con lo expuesto en la Introducción, se ha puesto a punto un método que permite determinar de manera rápida y fiable la relación superficie/volumen de las acículas muertas.

La relación superficie/volumen (σ) se define numéricamente como:

$$\sigma = S/V = (P \cdot L + 2 \cdot A) / (A \cdot L) = (P/A) + (2/L)$$

siendo:

L = longitud de la acícula.

P = perímetro medio de la sección transversal perpendicular a la longitud.

A = superficie media de la sección transversal perpendicular a la longitud.

Las superficies de los extremos de la acícula, cuya forma es alargada y estrecha, no contribuyen de forma apreciable al valor de σ , por lo que se pueden despreciar, siendo entonces σ igual a P/A (Brown, 1970).

Por ello, el método seleccionado se basa en la obtención de secciones transversales de las acículas, de las que se determinan simultáneamente el área y el perímetro, mediante un analizador de imagen.

Estas secciones se obtienen realizando, con microtomo, cortes transversales de las acículas, previamente incluidas en parafina. Con el fin de conseguir cortes limpios y sin desgarros, las acículas se acondicionan, antes de su inclusión en parafina, hasta alcanzar un contenido de humedad comprendido entre el 15 y el 40 p. 100.

Con objeto de definir el número de acículas y de cortes necesarios para determinar la relación superficie/volumen, se ha trabajado con acículas de *Pinus pinea* L., procedentes de la capa superior de la cubierta muerta de un pinar situado en la provincia de Madrid (Tabla 1).

TABLA 1
AREA DE MUESTREO Y CARACTERISTICAS DE LAS MASAS

Sampling area and characteristics of the stands

<i>Pinus halepensis</i>	Granada	30	15
<i>Pinus halepensis</i>	S.E. de Francia	30	17,5
<i>Pinus pinaster ssp. atlantica</i>	Pontevedra	27	14
<i>Pinus pinaster ssp. mesogeensis</i>	Granada	30	15
<i>Pinus pinaster ssp. mesogeensis</i>	S.O. de Francia	20	11,3
<i>Pinus pinea</i> (*)	Madrid	23	8
<i>Pinus pinea</i>	S.E. de Francia	80	17,5

(*) Población utilizada para la determinación del tamaño de muestra
Population used for determining sample size

Se toman aleatoriamente 100 pares de acículas. De una de las dos acículas de cada par, se mide su longitud (L) y su diámetro, éste en varios puntos a lo largo de la acícula, considerando la media de estos valores (D). La muestra presenta una distribución normal para ambas variables (L y D).

Se define el parámetro adimensional E como el cociente D/L. Este valor no presenta una distribución normal. Al existir correlación entre E y L (coeficiente de correlación = -0,75), pero no entre E y D (coeficiente de correlación = 0,07), se definen cinco clases de acículas en función de su longitud:

Clase 1: 7,1- 9 cm

Clase 2: 9,1-11 cm

Clase 3: 11,1-13 cm

Clase 4: 13,1-15 cm

Clase 5: 15,1-17 cm

De cada clase se seleccionan diez acículas. En cada una de ellas se realizan cuatro cortes en cada una de las tres secciones situadas a 25 p. 100 (sección basal b), 50 p. 100 (sección central c) y 75 p. 100 (sección apical a) de la longitud de la acícula a partir de su base. Para el análisis de los resultados se toma, para cada sección, el valor medio de los cuatro cortes.

El análisis de la varianza de σ para el factor «sección» pone de manifiesto (Tabla 2) que existen diferencias significativas al 5 p. 100 entre las tres secciones consideradas ($p = 0,0157$; $F > F^*_{(0,05,2,147)}$).

TABLA 2

RELACION SUPERFICIE/VOLUMEN DE LAS ACICULAS DE *PINUS PINEA*: ANALISIS DE VARIANZA PARA EL FACTOR SECCION

Ratio of surface area to volume for Pinus pinea needles: ANOVA for the factor section

Entre secciones	727,19	2	363,59	4,272	0,0157
Dentro secciones	12.512,06	147	85,12		
Total	13.239,24	149			

El valor medio y el error típico de σ son:

- Con los datos obtenidos en las tres secciones consideradas, $58,72 \pm 0,77 \text{ cm}^{-1}$.
- Con los datos de la sección central, $58,78 \pm 1,41 \text{ cm}^{-1}$.

Además, el coeficiente de correlación entre los valores de σ , calculados con los datos obtenidos para las tres secciones y los calculados con los valores de la sección central, es de 0,92

Estos resultados permiten tomar, como valor de σ de cada acícula, el determinado en su sección central, reduciendo el tiempo necesario para la preparación de las muestras.

Considerando únicamente el valor de las secciones centrales, el análisis de su varianza para el factor «clase» pone de manifiesto (Tabla 3) que existen

diferencias significativas al 1 p. 100 entre las clases consideradas ($p = 0,0096$; $F > F^*_{(0,1,4,45)}$).

TABLA 3

RELACION SUPERFICIE/VOLUMEN DE LAS ACICULAS DE *PINUS PINEA* (SECCION CENTRAL): ANALISIS DE VARIANZA PARA EL FACTOR CLASE

Ratio of surface area to volume for Pinus pinea needles: ANOVA for the factor class

Entre clas.	1.224,33	4	306,08	3,798	0,0096
Dentro clas.	3.623,36	45	80,59		
Total	4.850,69	49			

La Tabla 4 recoge la clasificación por medias de las secciones centrales de las acículas según el factor «clase» realizada por el método de Tukey, para $\alpha = 0,01$. Del resultado de esta clasificación se deduce que se puede considerar, como valor de σ , el obtenido para las acículas de la clase central, es decir, para las acículas cuya longitud es más próxima a la media.

TABLA 4

RELACION SUPERFICIE/VOLUMEN DE LAS ACICULAS DE *PINUS PINEA* (SECCION CENTRAL): TEST DE MEDIAS (METODO DE TUKEY: $\alpha = 0,01$) PARA EL FACTOR CLASE

Ratio of surface area to volume for Pinus pinea needles (central section): means test (Tukey Method: $\alpha = 0.01$) for the factor class

1	66,54	3,66	*
2	61,78	2,73	**
3	56,90	1,73	**
4	56,23	2,41	**
5	52,22	3,25	*

Teniendo en cuenta la variabilidad de las acículas y la precisión requerida, el tamaño muestral para estimar la relación superficie/volumen es 24.

Material vegetal

Se ha determinado la relación superficie/volumen de las acículas muertas de tres coníferas frecuentemente afectadas por los incendios forestales. Las especies seleccionadas son: *Pinus halepensis* Mill., *Pinus pinea* L. y *Pinus pinaster* Ait.; de esta última especie se consideran sus dos subespecies: *Pinus pinaster* ssp. *atlantica* y *Pinus pinaster* ssp. *mesogeensis*.

La Tabla 1 presenta, para cada una de las especies consideradas, las áreas de muestreo y las características de las masas en que se ha recogido el material vegetal.

Las muestras proceden de la capa superior de la cubierta muerta (capa L), seleccionándose para el estudio, en laboratorio, las acículas intactas.

Se ha determinado, además, esta característica geométrica en acículas verdes de *Pinus pinea*, mantenidas en laboratorio hasta un 38 p. 100 de contenido de humedad.

Método operatorio

Como consecuencia de los resultados obtenidos en el estudio previo realizado con las acículas de *Pinus pinea*, la metodología seguida para la determinación de la relación superficie/volumen de las acículas de las distintas especies consideradas es la que a continuación se describe.

Para cada especie, se toman aleatoriamente 100 pares de acículas, de las que se mide su longitud y su diámetro, calculándose los valores medios respectivos, \bar{L} y \bar{D} . Se seleccionan para el estudio los 24 pares de acículas cuya longitud y diámetro son más próximos a \bar{L} y \bar{D} .

De una de las dos acículas de cada par se realizan cuatro cortes de la sección central, siguiendo el procedimiento expuesto anteriormente. La relación superficie/volumen de cada acícula viene dada por el valor medio de los obtenidos en los cuatro cortes. Para cada una de las especies consideradas, el valor de σ es igual a la media de los valores de las 24 acículas seleccionadas.

RESULTADOS Y DISCUSION

Las Figuras 1 a 4 muestran el aspecto de las secciones transversales de las acículas de las especies estudiadas. En estas figuras se observa que existen diferencias en la forma y las dimensiones de la sección entre las distintas especies, e incluso entre acículas de una misma especie recogidas en la misma zona (Figs. 1 y 2).

Este hecho apoya el postulado de Brand (1987), quien afirma que no puede atribuirse a las acículas un único modelo geométrico, contradiciendo la suposición de Johnson (1984) de que las acículas de una especie dada presentan una sección constante (aproximadamente, la de un sector de cilindro).

La Tabla 5 presenta, para las acículas de cada una de las especies estudiadas, según su área de muestreo, los valores medios y errores típicos de la longitud, el diámetro y la relación superficie/volumen.



Fig. 1.- Acícula de *Pinus Pinaster*.
Sección transversal.
Pinus pinaster needle. Cross section

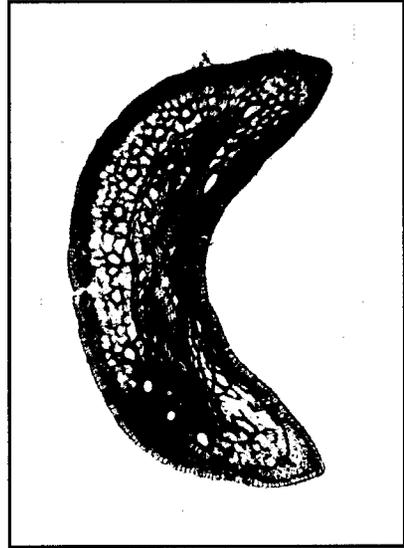


Fig. 2.- Acícula de *Pinus Pinaster*.
Sección transversal.
Pinus pinaster needle. Cross section

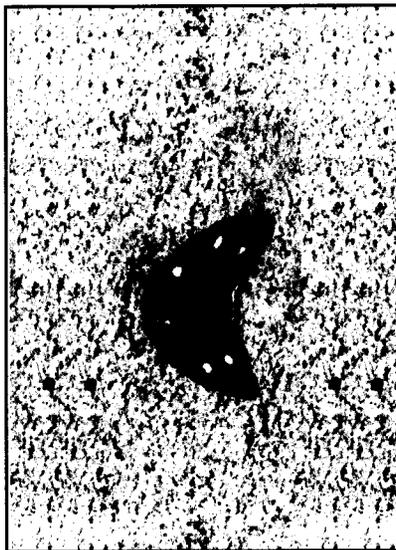


Fig. 3.- Acícula de *Pinus halepensis*.
Sección transversal.
Pinus halepensis needle. Cross section

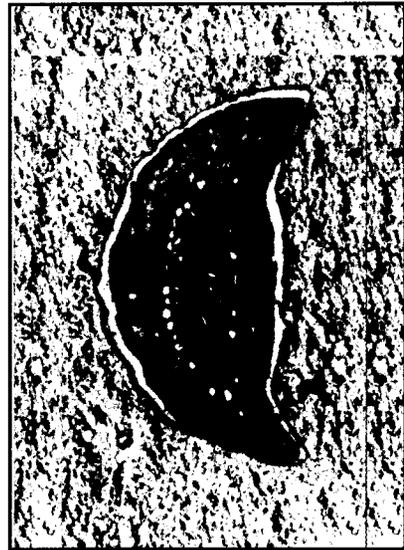


Fig. 4.- Acícula de *Pinus pinea*.
Sección transversal.
Pinus pinea needle. Cross section

TABLA 5
VALORES MEDIOS Y ERRORES TIPICOS (ENTRE PARENTESIS) DE LA LONGITUD (\bar{L}), EL DIAMETRO (\bar{D}) Y LA RELACION SUPERFICIE/VOLUMEN (σ)

Mean values and standard errors (between brackets) of length (\bar{L}), diameter (\bar{D}) and ratio of surface area to volume (σ)

		\bar{L} (cm)	\bar{D} (cm)	σ (cm)
<i>Pinus halepensis</i>	Granada	6,24 (0,04)	0,079 (0,001)	77,79 (1,70) a
<i>Pinus halepensis</i>	S.E. de Francia	6,36 (0,07)	0,084 (0,001)	81,67 (1,20) a
<i>Pinus pinaster ssp. atlantica</i>	Pontevedra	15,39 (0,12)	0,182 (0,004)	49,16 (1,48) c
<i>Pinus pinaster ssp. mesogeensis</i>	Granada	13,77 (0,09)	0,179 (0,004)	48,13 (1,52) c
<i>Pinus pinaster ssp. mesogeensis</i>	S.O. de Francia	14,08 (0,14)	0,170 (0,004)	47,42 (1,37) c
<i>Pinus pinea</i>	Madrid	12,42 (0,36)	0,121 (0,003)	58,33 (1,48) b
<i>Pinus pinea</i>	S.E. de Francia	12,29 (0,07)	0,135 (0,003)	57,28 (1,87) b

Para σ , los valores seguidos de la misma letra no presentan diferencias significativas según el test de Tukey ($\alpha = 0,01$)

For σ , the values followed by the same letter have no significant differences in the Tukey test ($\alpha = 0.01$)

El análisis de la varianza de σ para la especie según su área de muestreo pone de manifiesto (Tabla 6) que existen diferencias altamente significativas entre las especies consideradas ($p = 0,000$; $F > F^*_{(0,1,6,161)}$).

TABLA 6
RELACION SUPERFICIE/VOLUMEN: ANALISIS DE VARIANZA PARA LA ESPECIE SEGUN SU AREA DE MUESTREO

Ratio of surface area to volume: ANOVA for the species according to sampling area

Entre especies	28.944,86	6	4.824,14	85,58	0,0000
Dentro especies	9.043,48	161	56,17		
Total	37.988,34	167			

La Tabla 5 recoge la clasificación por medias según el método de Tukey, para $\alpha = 0,01$.

En esta clasificación se observa que los valores de σ se agrupan por especies, no presentando diferencias las relaciones superficie/volumen de cada una de las especies en función del área de muestreo. Tampoco se observan diferencias entre los valores de σ de las dos subespecies de *Pinus pinaster*.

La Figura 5 muestra gráficamente este resultado.

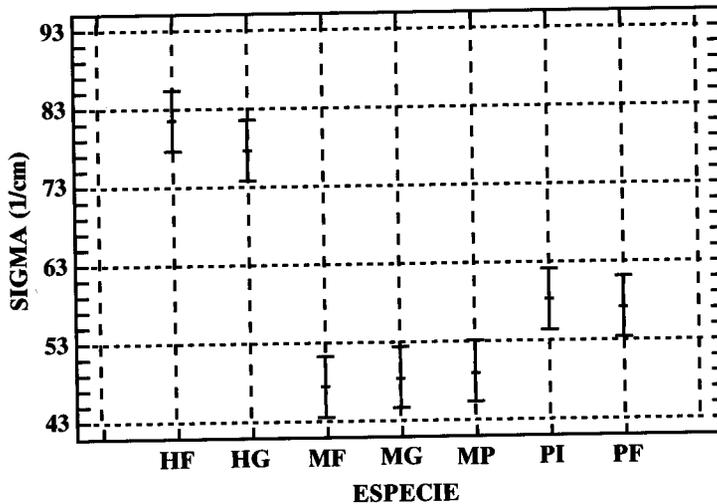


Fig. 5.—Intervalos de confianza (Método de Tukey; $\alpha = 0,01$) de la relación superficie/volumen para la especie según su área de muestreo

(HF: *Pinus halepensis*, del S.E. de Francia; HG: *Pinus halepensis*, de Granada; MF: *Pinus pinaster*, del S.O. de Francia; MG: *Pinus pinaster*, de Granada; MP: *Pinus pinaster*, de Pontevedra; PI *Pinus pinea*, de Madrid; PF: *Pinus pinea*, del S.E. de Francia)

Confedence intervals (Tukey Method; $\alpha = 0.01$) of the ratio of surface area to volume for the species according to sampling area

(HF: *Pinus halepensis* from S.E. of France; HG: *Pinus halepensis*, from Granada; MF: *Pinus pinaster*, from S.W. of Francia; MG: *Pinus pinaster*, from Granada; MP: *Pinus pinaster*, from Pontevedra; PI: *Pinus pinea*, from Madrid; PF: *Pinus pinea*, from S.E. of Francia)

En la Tabla 5 se observa, asimismo, que con las especies consideradas, el valor de σ de las acículas muertas es tanto mayor cuanto más cortas y finas son éstas.

Los valores obtenidos para *Pinus pinaster* son similares a los presentados por Daligault (1991), quien encuentra que σ se sitúa entre 40 y 50 cm^{-1} , aunque afirma que existen diferencias significativas entre las áreas de muestreo. Por lo que respecta a los valores obtenidos para *Pinus pinea* y *Pinus halepensis*, son inferiores a los proporcionados por este mismo autor, de 71,38 y 104,23 cm^{-1} , respectivamente.

La Tabla 7 presenta para las acículas de *Pinus pinea*, en los dos estados considerados (acículas de la cubierta muerta y acículas verdes secadas al aire hasta un 38 p. 100 de contenido de humedad), los valores medios y errores típicos de la longitud, el diámetro y la relación superficie/volumen.

TABLA 7
VALORES MEDIOS Y ERRORES TIPICOS (ENTRE PARENTESIS) DE LA LONGITUD (\bar{L}), EL DIAMETRO (\bar{D}) Y LA RELACION SUPERFICIE/VOLUMEN (σ) DE LAS ACICULAS DE *PINUS PINEA*, EN LOS DOS ESTADOS CONSIDERADOS

*Mean values and standard errors (between brackets) of length (\bar{L}), diameter (\bar{D}) and ratio of surface area to volume (σ) for *Pinus pinea* needles, according to state*

<i>Pinus pinea</i>	Seco de la cubierta muerta	12,42 (0,36)	0,121 (0,003)	58,33 (1,48) a
<i>Pinus pinea</i>	Verde, secado en laboratorio	11,73 (0,09)	0,096 (0,002)	79,92 (1,42) b

Para σ , los valores seguidos de la misma letra no presentan diferencias significativas según el test de Tukey ($\alpha = 0,01$)

For σ , the values followed by the same letter have no significant differences in the Tukey test ($\alpha = 0.01$)

El análisis de la varianza de σ para el factor estado pone de manifiesto (Tabla 8), que existen diferencias significativas entre los estados considerados ($p = 0,000$; $F > F^*_{(0,01,1,46)}$), siendo mayor el valor de σ en las acículas verdes secadas que en las acículas procedentes de la cubierta muerta.

TABLA 8
RELACION SUPERFICIE/VOLUMEN DE LAS ACICULAS DE *PINUS PINEA*: ANALISIS DE VARIANZA PARA EL FACTOR ESTADO

*Ratio of surface area to volume for *Pinus pinea* needles: ANOVA for the factor state*

Entre estados	5.595,85	1	5.595,85	110,55	0,0000
Dentro estados	2.328,44	46	50,62		
Total	7.924,29	47			

Este hecho se debe a que, aunque la longitud de ambos tipos de acículas es similar, el diámetro de las acículas verdes secadas es inferior al de las acículas procedentes de la cubierta muerta (Tabla 7). Esto es debido, sin duda, a un proceso

de contracción producido por el secado. La Figura 6 muestra gráficamente este resultado.

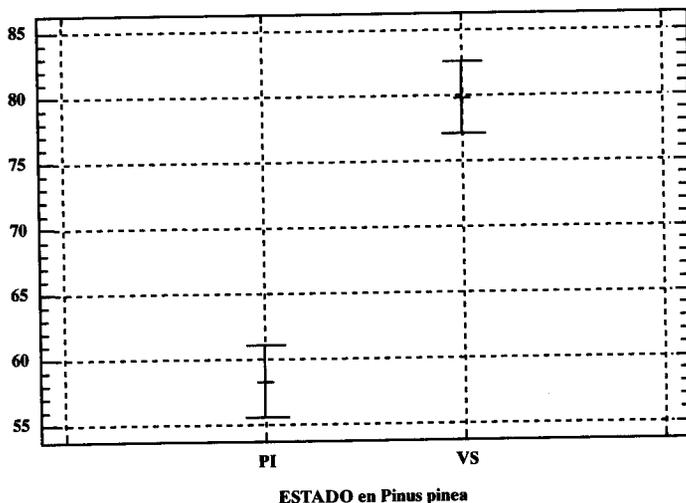


Fig. 6.—Intervalos de confianza (Método de Tukey; $\alpha = 0,01$) de la relación superficie/volumen en *Pinus pinea* para el factor estado (PI: acículas de la cubierta muerta; VS: acículas verdes secadas)
 Confidence intervals (Tukey Method; $\alpha = 0.01$) of the ratio of surface area to volume for *Pinus pinea* for the factor state
 PI: litter needles; VS: air-dried green needles)

CONCLUSIONES

Las diferencias encontradas en las formas que presentan las secciones de las acículas estudiadas, muestran la poca precisión que puede suponer la determinación de la superficie foliar por asimilación de ésta a modelos geométricos simples.

Si bien existen diferencias altamente significativas debidas a la especie, no se han detectado variaciones derivadas de los diferentes lugares de muestreo, para una misma especie, incluso cuando esto conlleva la existencia de subespecies distintas, como es el caso de *Pinus pinaster*.

Para conocer el valor de la relación superficie/volumen de las acículas de la cubierta muerta, es necesario tomar las muestras en esta capa, no siendo aplicables los resultados obtenidos con acículas verdes.

AGRADECIMIENTOS

A la DG XII de la Unión Europea por el soporte económico del Proyecto «Forest fire protection through prescribed burning», incluido en el Programa STEP, dentro del cual se encuadra este trabajo.

A María Teresa López de Roma, José Luis Simón Serfaty y María Esperanza Rodríguez Méndez, del Area de Industrias Forestales del CIFOR, por su ayuda en la preparación y medición de las muestras.

A Juan Francisco Tazón Ponce, del Area de Industrias Forestales, por la realización de las fotografías.

A Rafael Díez Barra, del Area de Industrias Forestales, por su colaboración en el análisis de los resultados.

SUMMARY

Estimating ratio of surface area to volumen for dead needles

A method for estimating the ratio of surface area to volume for dead needles was developed. The method is based on the simplification proposed by Brown (1970), but the requested values (surface area and perimeter) have been obtained, on micrometrical cross sections, through an image analyzer. The proposed method gather the necessary conditions of accuracy and rate.

The ratio of surface area to volumen (σ) is closely related to the fire behaviour in the different forest fuels. Therefore, this phisiscal characteristic has been determinated for fine dead fuel particles that take part, frecuently, in forest fires.

The values obtained for *Pinus pinaster* Ait., *P. pinea* L. and *P. halepensis* Mill. are, respectively, 48.24, 57.80 and 79.93 cm⁻¹.

The results show variations among species. Nevertheless, differences due to sampling areas have not been founded.

KEY WORDS: Ratio of surface area to volume
Fire behaviour
Flammability
Pinus pinaster Ait.
Pinus pinea L.
Pinus halepensis Mill.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BRAND D. G., 1987. Estimating the surface area of spruce and pine foliage from displaced volume and length. *Canadian Journal of Forest Research*, 17: 1305-1308.
- BROWN J. K., 1970. Ratios of surface area to volume for common fine fuels. *Forest Science*, 16 (1): 101-105.
- DALIGAULT O., 1991. Caractéristiques physiques des aiguilles de pin. Mémoire de stage de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes. INRA. Laboratoire de Recherches Forestières Méditerranéennes. Avignon. Document interne PIF9112. 16 pp. + anexos.
- JOHNSON J. D., 1984. A rapid technique for estimating total surface area of pine needles. *Forest Science*, 30: 913-921.
- OHMART C. P., THOMAS J. R., 1986. Estimating surface area of *Pinus radiata* needles using needles weight. *Australian Forest Research*, 16: 85-89.

- ROTHERMEL R. C., 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station. Research Paper. INT-115. 40 pp.
- ROTHERMEL R. C., 1983. How to predict the spread and intensity of forest and range fires. USDA Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station. General Technical Report. INT-143. 161 pp.
- ROTHERMEL R. C., ANDERSON H. E., 1966. Fire spread characteristics determined in the laboratory. USDA Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station. Research Paper. INT-30. 34 pp.
- THOMAS P. H., 1967. Some aspects of the growth and spread of fire in the open. *Forestry*, 40 (2): 139-164.