

Características de la radiación solar en un bosque de *Pinus radiata*, en Valdivia, Chile*

Characteristics of solar radiation in a *Pinus radiata* stand (Valdivia, Chile)

C.D.O.: 111.2

HUBER, A. W.; OYARZUN, C. E.

Instituto de Geociencias, Fac. de Ciencias, Universidad Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile.

ALVAREZ, L. A.; ARA YA, E.

Instituto de Informática y Métodos Cuantitativos, Fac. Ciencias Económicas, Universidad Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile.

SUMMARY

Spatial and temporal distribution of the direct solar beam and diffuse radiation were studied in an adult *Pinus radiata* stand. Solarimeters (direct solar beam) and shaded pyranometers (diffuse radiation) located above the forest (43 m), at the mean height of initial canopy (20 m) and close to the ground (2 m) provided the data for the study. The diffuse radiation shows the highest penetration down to the forest ground, with averages, of 30.2% and 10.4% on clear and cloudy days, respectively, where as the direct solar beam amounted to 4.4% and 2.5% for the same days. The direct solar component within the canopy increases during summer, as opposed to the diffuse component which is less variable along the year. Temporal fluctuations of solar radiation within the forest are related to an unequal penetration of the direct solar beam.

RESUMEN

Se estudió la distribución espacial y temporal de la radiación directa y radiación difusa en un bosque adulto de *Pinus radiata*. Se utilizaron los valores obtenidos con solarímetros (radiación directa) y solarímetros con banda (radiación difusa) ubicados sobre el bosque (43 m), a la altura media de inicio de copas vivas (20 m) y a nivel de suelo (2 m). La radiación difusa presentó la mayor penetración hacia el suelo del bosque, con un promedio anual de 30,2% y 10,4%, para días despejados y nublados, respectivamente, mientras que los valores de radiación directa representaron el 4,4% y 2,5% para días con iguales características. El componente directo de la radiación solar dentro del bosque se incrementó durante el verano, mientras que el difuso mantuvo constante sus valores a través del año. Las fluctuaciones temporales de la radiación solar dentro del bosque son el resultado de la dispar penetración de la radiación directa.

INTRODUCCION

La radiación solar es la principal fuente de energía disponible para todos los procesos que ocurren dentro de los ecosistemas. Alcanza la superficie terrestre a través de la radiación directa (radiación que llega sin interferencias a la superficie) y radiación difusa (radiación solar dispersada por la atmósfera).

Los bosques, dado su gran desarrollo vertical y estratificación, ejercen una gran influencia sobre la distribución, intensidad y composición de la radiación solar que alcanza hasta el suelo (Aussenac y Ducrey, 1977; Mc Caughey, 1982). Actúan modificando la radiación solar a través de los efectos combinados de la distribución de su biomasa, geometría y características ópticas que controlan la radiación que llega hasta el suelo y

* PROYECTO RS-83-14 financiado por la Dirección de Investigación y Desarrollo, Universidad Austral de Chile.

son, a su vez, responsable de su descomposición en radiación directa y difusa (Hutchison y Matt, 1977).

La penetración de la radiación solar directa a través del bosque depende del número, tamaño y distribución espacial de las aberturas del dosel (Anderson y Denmead, 1969; Horn, 1971; Raifsnnyder *et al.*, 1971), mientras que la de la radiación difusa depende de las características de la atmósfera, número, tamaño y distribución espacial de las aberturas en el dosel y de la geometría, distribución espacial y características ópticas de la biomasa (Anderson y Denmead, 1969; Horn, 1971; Miller y Norman, 1971).

En el presente trabajo se estudia la cantidad de radiación solar directa, y difusa, que entra hacia los niveles inferiores de un bosque adulto de *Pinus radiata*. Se analiza además la influencia de la nubosidad, elevación solar y época del año. Los resultados de este trabajo pueden ser antecedentes importantes que ayuden a definir el manejo de estos bosques, ya que en conjunto con las demás condiciones micrometeorológicas determinan en gran medida el desarrollo y crecimiento de los árboles.

MATERIAL Y METODO

El estudio se realizó en el interior de un bosque adulto de *Pinus radiata* de 26 años, ubicado a 20 km al noreste de la ciudad de Valdivia (Lat. 39°48'S; Long. 73°14'W; Alt. 20 m.s.n.m.). El rodal tiene una extensión de 16 há y posee una orientación norte con una inclinación de 5-7°. Su altura media es de 36 m, la de inicio de copa muerta de 10 m y la de inicio de copa viva de 20 m. La cobertura de copas está entre un 75 y 80% y la densidad media es de 733 árboles por hectárea. La superficie del suelo está cubierta por un mantillo y un sotobosque de matorral secundario perteneciente a la asociación Fuchsia-Chusqueatum-quilae HILDS y Raphitamno-Aristotelia OBERG (Ramírez *et al.*, 1984) que cubre parcialmente el suelo y tiene una altura promedio de 1,8 m.

Para determinar la radiación solar que llega a nivel de copas se instalaron dos solarímetros (Wilhelm Lambrecht N° 1611), que tienen una sensibilidad entre 0, 3-2,5 μm . Los instrumentos fueron fijados a un brazo metálico de 4 m de largo, sujeto en el extremo superior de una torre metálica de 43 m de altura. Para este trabajo sólo se utilizaron los valores de los solarímetros expuestos hacia arriba. A 20 m sobre el suelo se instalaron 3

solarímetros de tubo, para captar la radiación solar que llegaba a la altura media del inicio de las copas vivas. A 2 m sobre el suelo se instalaron 3 baterías de 3 solarímetros de tubo cada una conectadas en serie y ubicadas en diferentes lugares, para obtener una información más representativa debido a la heterogénea distribución de la radiación que llega a nivel del suelo.

Para determinar la radiación solar difusa se instaló en iguales alturas un piranómetro en forma de estrella, según Dirmhirn (Wilhelm Lambrecht N° 1610), provisto de una banda de sombra, para protegerlo contra la radiación directa. Dicha banda fue movida semanalmente, de acuerdo con la elevación solar.

Durante algunos días totalmente nublados se compararon los valores de radiación obtenidos con el solarímetro y los del instrumento con la banda sombreada. Esto permitió obtener un factor de corrección y minimizar así el efecto interceptor de radiación difusa producido por la banda.

Por diferencia entre los valores de la radiación solar total y la radiación solar difusa en la misma altura se obtuvieron los montos de la radiación solar directa.

Mediante un selector de canales programable, conectado a un microprocesador, cada tres minutos se hizo una lectura a cada uno de los solarímetros. La información integrada por hora fue almacenada en cassette. Con estos valores se confeccionaron los correspondientes archivos para su posterior procesamiento, caracterizando previamente cada día según el grado de nubosidad en días despejados y nublados (nubosidad promedio diaria inferior a 20% y superior a 80% respectivamente). Para ello se utilizaron los registros de un actinógrafo, instalado en la parte superior de la torre. El período de mediciones se extendió entre junio de 1985 y mayo de 1986.

RESULTADOS Y DISCUSION

El porcentaje promedio anual de la radiación directa con respecto a la total, durante días despejados, fue de 87.0% en el nivel superior. De esta radiación directa sólo un 8.4 y 5.1% penetraron a los niveles medio e inferior, respectivamente, lo que equivale al 7.3 y 4.4% de la radiación solar total que llegó a la parte superior del bosque.

El componente difuso de la radiación solar alcanzó a un 13.0% de la radiación solar total en el nivel superior. De esta radiación difusa se traspasaron a los niveles medio e inferior el 37.4 y

30.2% respectivamente, lo que equivale al 4.9 y 3.9% de la solar total. Estos resultados permiten afirmar que el componente difuso de la radiación solar, a medida que va entrando al interior del bosque, adquiere cada vez una mayor participación en relación a la radiación directa, lo que está de acuerdo con los resultados obtenidos por Aizenhtat's (1958) y Gay *et al.* (1971) que encontraron que los porcentajes de radiación difusa se incrementaban debajo del dosel, en días despejados.

Se puede destacar el hecho de que los porcentajes mayores de penetración de la radiación directa ocurren en los meses de verano (Tabla 1), debido a que la mayor elevación solar, durante esta época del año, permite que los rayos solares ingresen con mayor facilidad por los claros del dosel.

El porcentaje anual de la radiación directa respecto de la solar total, durante días nublados (nubosidad promedio diaria superior al 80%), fue del 11.8% en el nivel superior. Del total de esta radiación directa sólo un 5.5 y 2.5% lograron los niveles medio e inferior.

La participación de la radiación difusa en la radiación total representó el 88.2% en el nivel superior. Del total de esta radiación difusa un 14.0 y 10.4% alcanzaron los niveles medio e inferior del bosque.

De las tablas 1 y 2 se puede destacar el hecho de que los porcentajes de penetración de la radiación difusa hacia los niveles inferiores del bosque son bastante mayores durante los días despejados que en días nublados. Esta situación se debe a que parte de la radiación directa que alcanzó a penetrar en el bosque es reflejada por las copas y troncos, transformándola en radiación difusa, lo que incrementa los montos de ésta que llegan hasta el suelo (Hutchison y Matt, 1976). En días nublados, los montos de radiación global que alcanzan a una superficie son más reducidos que los que presentan en días claros, debido a la absorción y reflexión que ejercen las nubes sobre ella. Además, la radiación directa es convertida en difusa por los procesos de transmisión de las nubes y, en consecuencia, la radiación incidente sobre ella es prácticamente sólo difusa (tabla 2).

En días despejados existe un notorio enriquecimiento de la radiación difusa dentro del bosque, producto de la reflexión y dispersión de la radiación directa en las copas. Esto tiene el efecto de incrementar la proporción de radiación difusa incidente que penetra el dosel (Hutchison y Matt, 1976).

Los cursos diarios de radiación directa y difusa, para días despejados y nublados, representativos para diciembre (verano) en los tres niveles, se muestran en las Figs. 1 y 2. Para días despejados, en el nivel superior, se destaca la simetría de la curva de radiación total y la gran proporción de la radiación directa durante las horas con mayor elevación solar, alcanzando hasta 918 W/m^2 . Durante el día, la radiación difusa alcanza valores máximos de 116 W/m^2 , siendo su curso diario muy parejo y con sólo pequeños cambios (Fig. 1). Esto significa que el componente directo de la radiación es el responsable de los cambios bruscos y de las irregularidades en las curvas de radiación total (Hutchison y Matt, 1977). Esta situación se hace más significativa en las curvas de radiación total en los niveles medio e inferior, que demuestran una gran irregularidad a través del día, como consecuencia de las aberturas en la cobertura del dosel (Fig. 1).

Para la misma época del año, pero durante días nublados, las curvas representativas, tanto de la radiación total como difusa tienen un desarrollo y valores bastantes semejantes, alcanzando montos de hasta 361 y 279 W/m^2 en el nivel superior, respectivamente (Fig. 2). Ello se debe a que durante estos días prácticamente no existe radiación directa.

En las Figs. 3 y 4 se presentan los cursos diarios de la radiación total y difusa para días despejados y nublados, representativos para junio (invierno). Durante días despejados, en el nivel superior, se observa una mayor proporción de radiación difusa que en días de verano con iguales condiciones. A mediodía, la radiación total y la difusa presentan valores de 291 y 105 W/m^2 , característica propia para esta estación del año, como consecuencia de la menor elevación solar (Dirnhirn, 1964). En los niveles medios e inferior la radiación total sólo está compuesta por radiación difusa, debido a que la radiación solar directa es totalmente interceptada por el dosel. En este caso los valores de radiación no sobrepasan los 29 W/m^2 .

Durante días nublados (Fig. 4) prácticamente no existen diferencias entre los montos de la radiación total y difusa. Además se puede observar una simetría de sus cursos diarios en los tres niveles. Ello se debe a que la radiación total está compuesta casi exclusivamente por radiación difusa que le transmite este desarrollo. Al mediodía, los valores de radiación total y difusa no exceden los 93 W/m^2 en el nivel superior, mientras

TABLA 1

Número de días despejados (N), radiación global promedio diaria (I + D), radiación directa (I) y difusa (D), en $W m^{-2}$. Porcentajes de la radiación directa y difusa con respecto al total recibido, y porcentaje de penetración de la radiación directa (I%) y difusa (D%) en relación a la correspondiente radiación recibida en el nivel superior, para días despejados.

Number of clear days (N), daily mean solar radiation (I + D), direct solar beam (I) and diffuse radiation (D), in $W m^{-2}$. Percentages of the beam and diffuse radiation as related to the total reception and percentage of penetration of the beam radiation (I%) and diffuse (D%), in relation to the corresponding radiation reception in the upper level, for clear days.

	N	I + D	I	(%)	I%	D	(%)	D%
JUNIO								
Superior	1	64.0	55.8	(87.2)		8.3	(12.8)	
Medio		5.4	0.4	(7.4)	0.7	5.0	(92.6)	61.0
Inferior		4.7	0.1	(2.1)	0.2	4.6	(97.9)	56.1
JULIO								
Superior	0							
Medio								
Inferior								
AGOSTO								
Superior	4	147.9	126.3	(85.4)		21.6	(14.6)	
Medio		11.0	3.6	(32.7)	2.9	7.4	(67.3)	34.3
Inferior		9.6	3.3	(34.4)	2.6	6.3	(65.6)	29.2
SEPTIEMBRE								
Superior	11	227.9	199.2	(87.4)		28.7	(12.6)	
Medio		23.3	10.4	(44.6)	5.2	12.9	(55.4)	44.9
Inferior		15.9	6.7	(42.1)	3.4	9.2	(57.9)	32.1
OCTUBRE								
Superior	13	278.7	245.0	(87.9)		33.7	(12.1)	
Medio		32.0	15.6	(48.8)	6.4	16.4	(51.2)	48.7
Inferior		25.1	11.6	(46.2)	4.7	13.5	(53.8)	40.1
NOVIEMBRE								
Superior	16	363.4	309.5	(85.2)		53.9	(14.8)	
Medio		58.8	41.4	(70.4)	13.4	17.4	(29.6)	32.3
Inferior		33.2	19.5	(58.7)	6.3	13.7	(41.3)	25.4
DICIEMBRE								
Superior	20	372.7	322.3	(86.5)		50.4	(13.5)	
Medio		65.0	47.9	(73.7)	14.9	17.1	(26.3)	33.9
Inferior		35.5	22.7	(63.9)	7.0	12.8	(36.1)	25.4
ENERO								
Superior	15	382.2	336.5	(88.0)		45.7	(12.0)	
Medio		50.3	33.8	(67.2)	10.0	16.5	(32.8)	36.1
Inferior		33.9	21.2	(62.5)	6.3	12.7	(37.5)	27.8
FEBRERO								
Superior	9	326.2	285.2	(87.4)		41.0	(12.6)	
Medio		43.0	26.8	(62.3)	9.4	16.2	(37.7)	39.5
Inferior		35.9	21.7	(60.4)	7.6	14.2	(39.6)	34.6
MARZO								
Superior	11	292.7	259.4	(88.6)		33.3	(11.4)	
Medio		24.7	11.4	(46.2)	4.4	13.3	(53.8)	39.9
Inferior		19.7	7.7	(39.1)	3.0	12.0	(60.9)	36.0
ABRIL								
Superior	4	233.2	199.1	(85.4)		34.1	(14.6)	
Medio		14.5	5.4	(37.2)	2.7	9.1	(62.8)	26.7
Inferior		11.9	5.0	(42.0)	2.5	6.9	(58.0)	20.2
MAYO								
Superior	0							
Medio								
Inferior								

RADIACION SOLAR EN UN BOSQUE DE *PINUS RADIATA*

TABLA 2

Número de días nublados (N), radiación global promedio diaria (I+D), radiación directa (I) y difusa (D), en $W\ m^{-2}$. Porcentajes de la radiación directa y difusa con respecto al total recibido, y porcentaje de penetración de la radiación directa (I%) y difusa (D%) en relación a la correspondiente radiación recibida en el nivel superior, para días nublados.

Number of cloudy days (N), daily mean solar radiation (I+D), direct solar beam (I) and diffuse radiation (D), in $W\ m^{-2}$. Percentages of the beam and diffuse radiation as related to the total reception and percentage of penetration of the beam radiation (I%) and diffuse (D%), in relation to the corresponding radiation reception in the upper level, for cloudy days.

	N	I + D	I	(%)	I%	D	(%)	D%
JUNIO								
Superior	23	20.1	0.1	(0.5)		20.0	(99.5)	
Medio		2.9	0.0	(0.0)	0.0	2.9	(100.0)	14.5
Inferior		2.3	0.0	(0.0)	0.0	2.3	(100.0)	11.5
JULIO								
Superior	16	28.8	1.5	(5.2)		27.3	(94.8)	
Medio		3.5	0.0	(0.0)	0.0	3.5	(100.0)	12.8
Inferior		2.9	0.0	(0.0)	0.0	2.9	(100.0)	10.6
AGOSTO								
Superior	9	39.3	2.4	(6.1)		36.9	(93.9)	
Medio		5.2	0.1	(1.9)	4.2	5.1	(98.1)	13.8
Inferior		4.1	0.1	(2.4)	4.2	4.0	(97.6)	10.8
SEPTIEMBRE								
Superior	10	62.4	4.4	(7.1)		58.0	(92.9)	
Medio		8.2	7.5	(6.1)	11.4	7.7	(93.9)	13.3
Inferior		5.5	0.1	(1.8)	2.3	5.4	(98.2)	9.3
OCTUBRE								
Superior	5	70.7	4.6	(6.5)		66.1	(93.5)	
Medio		10.1	0.3	(3.0)	6.5	9.8	(97.0)	14.8
Inferior		8.0	0.2	(2.5)	4.3	7.8	(97.5)	11.8
NOVIEMBRE								
Superior	4	50.5	6.8	(13.5)		43.7	(86.5)	
Medio		6.9	0.4	(5.8)	5.9	6.5	(94.2)	14.9
Inferior		4.5	0.2	(4.4)	2.9	4.3	(95.6)	9.8
DICIEMBRE								
Superior	1	97.3	17.9	(18.4)		79.4	(81.6)	
Medio		13.1	1.4	(10.7)	7.8	11.7	(89.3)	14.7
Inferior		8.4	0.6	(7.1)	3.4	7.8	(92.9)	9.8
ENERO								
Superior	2	85.1	14.9	(17.5)		70.2	(82.5)	
Medio		11.2	0.7	(6.3)	4.7	10.5	(93.7)	15.0
Inferior		7.3	0.4	(5.5)	2.7	6.9	(94.5)	9.8
FEBRERO								
Superior	8	70.6	11.5	(16.3)		59.1	(83.7)	
Medio		7.1	0.3	(4.2)	2.6	6.8	(95.8)	11.5
Inferior		6.8	0.2	(2.9)	1.7	6.6	(97.1)	11.2
MARZO								
Superior	0							
Medio								
Inferior								
ABRIL								
Superior	12	31.1	6.0	(19.3)		25.1	(80.7)	
Medio		3.8	0.3	(7.9)	5.0	3.5	(92.1)	13.9
Inferior		3.1	0.2	(6.5)	3.3	2.9	(93.5)	11.6
MAYO								
Superior	14	25.4	3.7	(14.6)		21.7	(85.4)	
Medio		2.9	0.2	(6.9)	5.4	2.7	(93.1)	12.4
Inferior		2.2	0.1	(4.5)	2.7	2.1	(95.5)	9.7

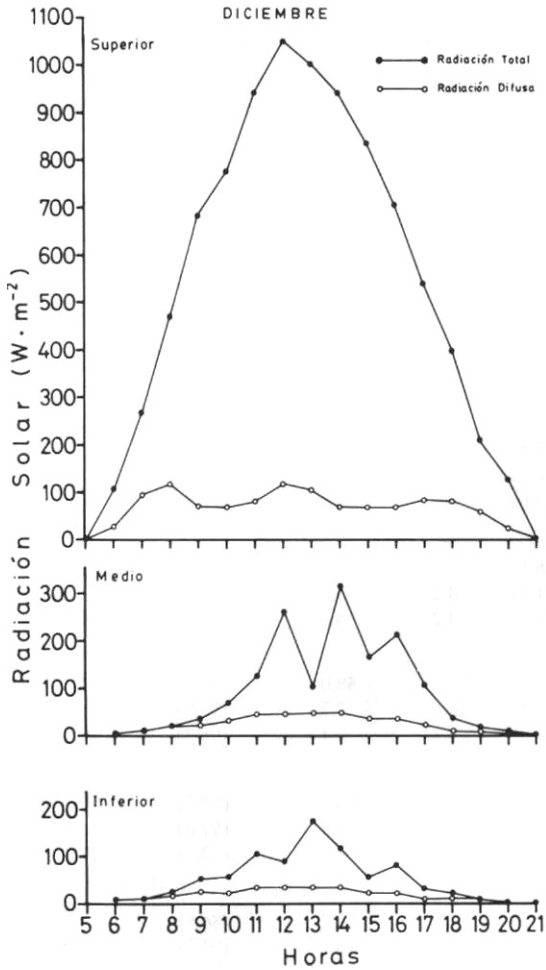


Fig. 1: Radiación solar total y difusa durante días despejados en diciembre, en tres niveles: superior (43 m), medio (20 m) e inferior (2 m) (hora local).

Total and diffused solar radiation on clear days in december, at three levels: upper (43 m), mid (20 m) and ground (2 m) (local time).

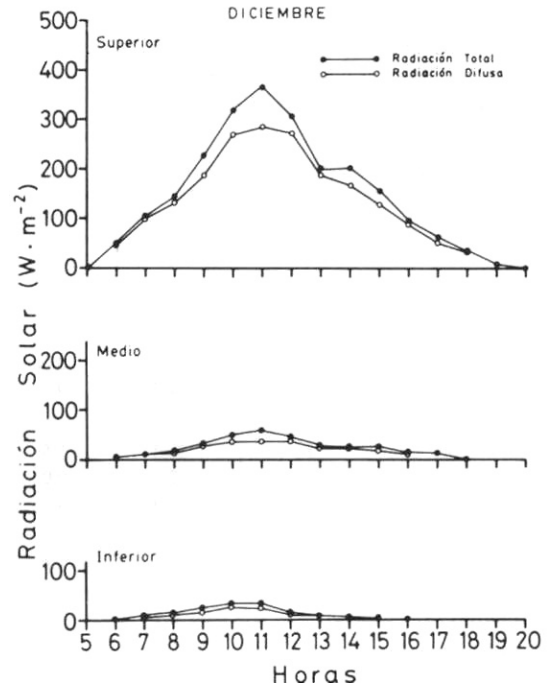


Fig. 2: Radiación solar total y difusa durante días nublados, en diciembre, en tres niveles: superior (43 m), medio (20 m) e inferior (2 m) (hora local).

Total and diffused solar radiation on cloudy days in december, at three levels: upper (43 m), mid (20 m) and ground (2 m) (local time).

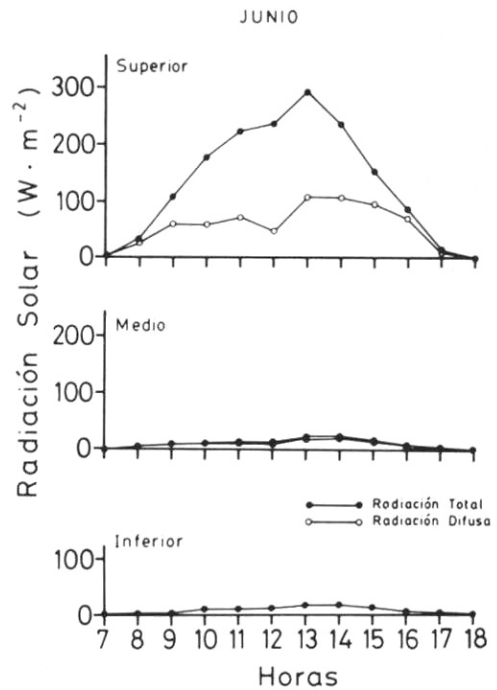


Fig. 3: Radiation solar total y difusa durante días despejados, en junio, en tres niveles: superior (43 m), medio (20 m) e inferior (2 m) (hora local).

Total and diffused solar radiation on clear days in June, in three levels: upper (43 m), mid (20 m) and ground (2 m) (local time).

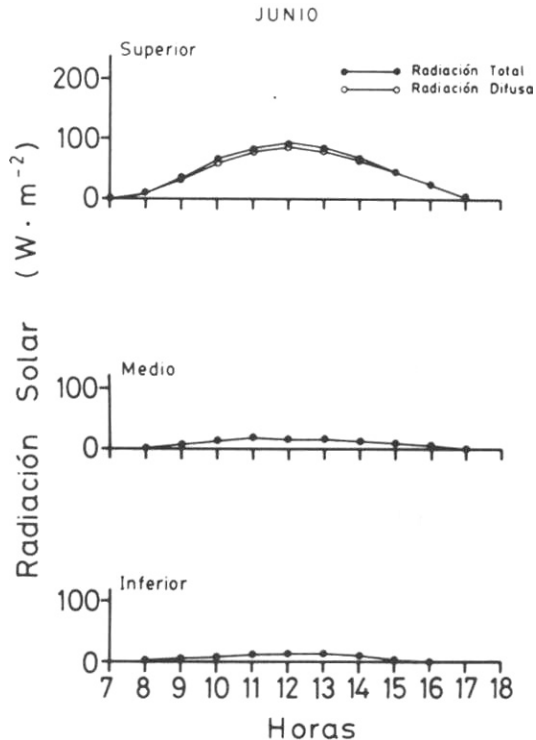


Fig. 4: Radiación solar total y difusa durante días nublados, en junio, en tres niveles: superior (43 m), medio (20 m) e inferior (2 m) (hora local).

Total and diffused solar radiation on cloudy days in June, at three levels: upper (43 m), mid (20 m) and ground (2 m) (local time).

que en los niveles medio e inferior estas cantidades son menores a 17 W/m².

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten afirmar que el componente difuso de la radiación solar es el que presenta la mayor penetración hasta el suelo del bosque, alcanzando un valor promedio anual de 30.2 y 10.4%, para días despejados y nublados, respectivamente. Este alto porcentaje para los días despejados se debe a que parte de la radiación directa es reflejada por las copas y troncos, transformándose en radiación difusa, la que se agrega a la que pasa directamente por los claros.

Los porcentajes de la radiación directa que alcanzaron el suelo sólo representaron el 4.4 y 2.5% para iguales condiciones de nubosidad, lo que indica que es este componente el que es más atenuado por la biomasa boscosa.

La penetración del componente directo aumenta porcentualmente durante el verano, ya que está fuertemente relacionado con el ángulo de

elevación solar. En cambio, el componente difuso es más constante a través del tiempo, debido a sus características y a su independencia de las variaciones de la elevación solar a través del año.

Las mayores fluctuaciones de la radiación total dentro del bosque, durante su curso diario, son principalmente el resultado de la dispar penetración de la radiación directa a través de los claros del dosel.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la importante colaboración prestada para el desarrollo de este estudio al Centro Experimental Forestal de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Austral de Chile.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AIZENHTAT'S, B. A. 1958. *The Heat Balance and Microclimate of Certain Landscapes in a Sandy Desert*. (Transl. from Russian, 1960), U.S. Weather Bureau, Washington, D.C., 90 pp.
- ANDERSON, M. G.; DENMEAD, O.T. 1969. "Shortwave radiation on inclined surfaces in model plant communities", *Agronomic Journal* 61: 867-872.
- AUSSENAC, G.; DUCREY, M. 1977. "Etude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus sylvatica* L. et *Quercus sessiliflora* Salisb.) de l'Est de la France. I. Analyse des profils microclimatiques es des caracteristiques anatomiques et morphologiques de l'appareil foliaire", *Annales des Sciences forestières* 34(4): 265-284.
- DIRMIRN, I. 1964. *Das Strahlungsfeld im Lebensraum*. Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main, 426 pp.
- GAY, L.W.; KNOERR, K. R; BRAATEN M.O. 1971. "Solar radiation variability on the floor of a pine plantation", *Agricultural Meteorology* 8:39-50.
- HORN, H.W. 1971. *The adaptive geometry of trees*. Princeton Univ. Press, Princeton, N.J., 144 pp.
- HUTCHISON, BA.; MATT, D.R 1976. "Beam enrichment of diffuse radiation in a deciduous forest", *Agricultural Meteorology* 17: 93-110.
- HUTCHISON, BA.; MATT, D.R. 1977. "The distribution of solar radiation within a deciduous forest", *Ecological Monographs* 47: 185-207.
- Mc CAUGHEY, J.H. 1982. "Spatial variability of net radiation and soil heat flux density on two logged sites at Montmorency, Quebec", *Journal of Applied Meteorology* 21(6): 777-787.
- MILLER, E.E.; NORMAN, J.M. 1971. "A sunfleck theory for plant canopies. II. Penumbra, effect: Intensity distributions along sunfleck segments", *Agronomic Journal* 63:739-743
- RAMIREZ, C. FIGUEROA, H.; CARRILLO, E.; CONTRERAS, D. 1984. "Estudio fitosociológico de los estratos inferiores en un bosque de Pino (Valdivia, Chile)", *Bosque* 5 (2): 65-81.
- REIFSNYDER, W.E.; FURNIVAL, G.M.; HOROWITZ, J.L. 1971. "Spatial and temporal distribution of solar radiation beneath forest canopies", *Agricultural Meteorology* 9: 21-37.