

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**VARIACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR  
Y DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN *Pinus taeda* DEBIDO AL  
MANEJO SILVICULTURAL**

por

**María Carolina MUNKA MORENO**

TESIS presentada como uno de los  
requisitos para obtener el título de  
*Magister* en Ciencias Agrarias  
Opción Ciencias del Suelo

**MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2010**

Tesis aprobada por:

-----  
Ing. Agr. (MSc.) Luis Viega

-----  
Ing. Agr. (Dr.) Roberto Scoz

-----  
Ing. Agr. (Dra.) Ambelia Del Pino

-----  
Dr. George Chescheir

Fecha: -----

Autor: -----  
Ing. Agr. María Carolina Munka Moreno

Director: -----  
Ing. Agr. (Dra.) Fabiana Pezzani

Co-director: -----  
Dr. Mario Caffera

## AGRADECIMIENTOS

A mis tutores Dra. Fabiana Pezzani y Dr. Mario Caffera por sus invaluable aportes, por su orientación, apoyo y confianza permanente en este trabajo.

A los integrantes del Tribunal por acceder a participar en este trabajo y por sus significativos aportes.

Al Ing. Agr. Juan Pedro Posse y al Dr. George Chescheir por su aval y por su generosa e invaluable disposición la cual permitió la concreción y el desarrollo de esta investigación en el marco de los programas de investigación de la empresa Weyerhaeuser S.A.

Al Ing. Agr. Oscar Bentancur por su significativo asesoramiento en el análisis estadístico de la información.

Al Ing. Agr. José Gándara por su valiosa colaboración en los relevamientos de los datos de campo y por su interés y compañerismo en este trabajo.

A la Tec. Juliana Ivanchenko y Gerardo Osorio por la destacada y comprometida ayuda brindada en las actividades de gabinete y en las tareas logísticas y operativas de campo.

A la Ing. Agr. Laura Arló, a la Ing. Agr. Gabriela Cruz y al Ing. Agr. Juan Cabris por su compañerismo y valiosa ayuda.

A mis compañeros de la Unidad de Sistemas Ambientales por su comprensión, sus aportes y solidaridad, en especial a Juan Pablo Chiara, Rodolfo Pedocchi y Celmira Saravia.

A familiares y amigos por su paciencia, comprensión y solidaridad y sin los cuales este trabajo no hubiera sido posible.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS Y FIGURAS.....	VI
RESUMEN.....	IX
SUMMARY.....	X
1. <u>INTRODUCCIÓN GENERAL Y ANTECEDENTES</u> .....	1
1.1 SITUACIÓN FORESTAL EN URUGUAY.....	1
1.2 EL AGUA EN LOS SISTEMAS FORESTALES.....	4
1.3 MANEJO SILVICULTURAL, EVAPOTRANSPIRACIÓN Y ÁREA FOLIAR .....	5
1.4 ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	6
1.5 ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EN CUBIERTAS FORESTALES.....	10
1.6 OBJETIVO GENERAL.....	15
1.7 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2. <u>EFFECTO DEL MANEJO SILVICULTURAL SOBRE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN UN RODAL DE <i>Pinus taeda</i> EN URUGUAY</u> .....	16
1. Introducción.....	18
2. Materiales y métodos.....	21
<i>Descripción del área de estudio</i> .....	21
<i>Determinación del IAF</i> .....	24
<i>Determinación de la ETm</i> .....	26
<i>Análisis de la información</i> .....	27
3. Resultados.....	28
<i>Clasificación de las parcelas experimentales</i> .....	28
<i>Análisis temporal del IAF y de la ETm</i> .....	29
<i>Análisis espacial del IAF y de la ETm</i> .....	32
<i>Efecto del manejo silvicultural sobre el IAF y la ETm</i> .....	33

<i>Análisis comparativo del IAF estimado a partir de LAI-2000 y FH.....</i>	<i>36</i>
4. <u>Discusión.....</u>	<u>37</u>
3. <u>DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES GLOBALES.....</u>	<u>51</u>
4. <u>BIBLIOGRAFÍA.....</u>	<u>54</u>
5. <u>ANEXOS.....</u>	<u>64</u>

## LISTA DE CUADROS Y FIGURAS

Cuadro No.	Página
1. Características de los suelos donde están ubicadas las parcelas Experimentales en el Establecimiento Forestal La Corona, Tacuarembó (Molfino, 2000).....	23
2. Totales mensuales (mm) de precipitación (P) y evapotranspiración potencial (ETP) en el período noviembre 2007 – diciembre 2008 en el Establecimiento Forestal La Corona, Tacuarembó y promedios climáticos ( $P_{(c)}$ y $ETP_{(c)}$ ) de la región (Uruguay, INIA, 2010).....	24
3. Cronograma de registros mediante fotografía hemisférica (FHD) y LAI-2000 (L) en las parcelas intervenidas (poda y raleo) y en las parcelas testigo.....	26
4. Resultado de las pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III) para el IAF y la ETm (Modelo 1).....	30
5. Resultado de las pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III) para el IAF y la ETm (Modelo 2).....	34
6. Valores promedio (n=32) del índice de área foliar (IAF) y de la evapotranspiración máxima (ETm) según tratamiento, sitio y fecha de medición en el período pos-tratamiento (julio – diciembre 2008).....	35
7. Valores promedio (n=32) de Evapotranspiración máxima (ETm) para los tratamientos con manejo y sin manejo silvicultural en cada fecha de medición (CT= con poda y raleo; ST= sin poda y raleo).....	36











Figura No.	Página
1. Superficie forestada bajo proyecto, por año y total acumulado en el período 1976-2007 en Uruguay en base a datos de la Dirección General Forestal (ForestalWeb, 2009).....	2
2. Distribución geográfica de la superficie forestal en Uruguay según bosques nativos, eucalipto, pinos y salicáceas. (Uruguay. MGAP, 2004).....	3
3. Mapa de suelos de la cuenca en el Establecimiento Forestal La Corona, Tacuarembó, y localización de las parcelas experimentales (  : parcelas raleadas y podadas,  : parcelas testigo).....	22
4. Localización de los puntos donde se realizaron las fotografías hemisféricas en cada parcela. Los símbolos  corresponden a los árboles y las  indican los puntos de medición.....	25
5. Clasificación de las parcelas experimentales en tres sitios diferentes en la cuenca en el Establecimiento Forestal La Corona, Tacuarembó: sitio 1 (  ), sitio 2 (  ) y sitio 3 (  ).....	29
6. Índice de Área Foliar (IAF) (media $\pm$ d.e.) en los tres sitios que recibieron manejo (sitio 3:  , sitio 2:  y sitio 1:  ) y el valor promedio (n=10, línea negra) en el Establecimiento Forestal La Corona (Tacuarembó) en el período noviembre 2007 – diciembre 2008. La línea punteada (----) representa el IAF en las parcelas sin poda y sin raleo. La flecha indica el momento del año donde se realizó el tratamiento silvicultural.....	30

Figura No.	Página
7. Evapotranspiración máxima (ETm) mensual (media $\pm$ d.e.) para los 3 sitios de la cuenca (sitio 3: x, sitio 2: ▲ y sitio 1: ● ) y el valor promedio (n=10, línea negra) en el Establecimiento Forestal La Corona (Tacuarembó) en el período diciembre 2007 – noviembre 2008. La línea punteada (- - -) representa la ETm en las parcelas sin poda y sin raleo. La flecha indica el momento del año donde se realizó el tratamiento silvicultural.....	31
8. Índice de área foliar (IAF) (promedio $\pm$ d.e., n=4) en las parcelas testigo (barra punteada) y en las parcelas pareadas, con manejo (barra blanca) en el Establecimiento Forestal La Corona (Tacuarembó) en el período mayo 2008 – diciembre 2008. La flecha indica el momento del año donde se realizó el tratamiento silvicultural.....	33
9. Relación entre el índice de área foliar (IAF) estimado por fotografía hemisférica (FH) e IAF estimado por LAI-2000 en el Establecimiento Forestal La Corona (Tacuarembó).....	37



## RESUMEN

En los últimos 20 años en Uruguay ha habido un significativo incremento del área destinada a plantaciones forestales. En estas plantaciones es frecuente la realización de podas y raleos que generan cambios estructurales en el dosel y que a su vez influyen en aspectos funcionales del ecosistema forestal, como la evapotranspiración. El índice de área foliar (IAF) es considerado uno de los mejores descriptores de las estructuras de los doseles para definir intercambios de energía y agua en la interfase con la atmósfera. En Uruguay no se han encontrado antecedentes relacionados al estudio del IAF en cubiertas forestales y cómo éste incide en la evapotranspiración, lo cual refuerza la necesidad de investigar en estos aspectos. El objetivo general del presente trabajo fue evaluar el efecto del manejo silvicultural (raleo y poda) en la cobertura foliar en un rodal de *Pinus taeda* en Uruguay y su influencia en la evapotranspiración del cultivo. Se describió la dinámica foliar en base al IAF en el período noviembre 2007 a diciembre 2008 en un rodal de 5 años de *P. taeda*, raleado y podado en junio de 2008, instalado en el Establecimiento Forestal “La Corona”, Tacuarembó, Uruguay. Se estimó el IAF pre y pos manejo silvicultural mediante la técnica de fotografía hemisférica digital y su valor se incluyó en la ecuación de Penman-Monteith de manera de obtener una primera aproximación de la evapotranspiración máxima del cultivo (ET<sub>m</sub>). El área foliar exhibió una amplia variación anual: fue 3 veces menor en invierno (agosto) respecto al verano (febrero). El raleo y la poda provocaron una reducción media del IAF de 62,9%, sin embargo esta reducción no fue homogénea en toda el área. La disminución del área foliar debido al manejo silvicultural se vio reflejada en una reducción significativa de la ET<sub>m</sub> del orden del 45%. El raleo y la poda redujeron significativamente el IAF y la ET<sub>m</sub>, pero estas prácticas explicaron un 45% de la variación del IAF y solo un 4,7% de la variación de la ET<sub>m</sub>. En este estudio se analizaron cambios generados en el dosel debido a prácticas silviculturales, al momento del año y a variables edáficas. Estos cambios, evaluados a partir del IAF, permitieron incorporar una estimación del control fisiológico en la ET<sub>m</sub> de este rodal.

Palabras clave: *Pinus taeda*, índice de área foliar, evapotranspiración, Uruguay

## SUMMARY

The area devoted to forest plantations in Uruguay has significantly increased during the last 20 years. These plantations are often carrying out pruning and thinning that produce structural changes in the canopy and also influence the functional aspects of the forest ecosystem, such as evapotranspiration. The leaf area index (LAI) is considered one of the best canopy structure descriptors to define energy and water exchanges at the interface with the atmosphere. In Uruguay there are no records relating LAI in forest cover and its impact on evapotranspiration, which reinforces the need for research in these areas. The overall objective of this study was to evaluate the effect of the silvicultural management (thinning and pruning) on the foliar cover in a stand of *Pinus tadea* in Uruguay and its influence on the crop evapotranspiration. Leaf dynamics was described based on the LAI for the period November 2007 to December 2008, in a 5 year stand of *P. tadea*, thinned and pruned in June 2008, installed in the Forest Establishment "La Corona" in Tacuarembó, Uruguay. LAI was estimated pre and post silvicultural management using the technique of digital hemispherical photography and its value was included in the Penman-Monteith equation so as to obtain a first approximation of the crop maximum evapotranspiration (ET<sub>m</sub>). Leaf area presented a wide annual variation: it was three times lower in winter (August) compared to summer (February). Thinning and pruning caused an average reduction of 62.9% in the LAI, however, this reduction was not even across the area. The decrease in the LAI due to the silvicultural management was reflected in a significant reduction (45%) of the ET<sub>m</sub>. Thinning and pruning significantly reduced the LAI and the ET<sub>m</sub>, but these practices explained 45% of the variation in LAI and only 4.7% of the variation of the ET<sub>m</sub>. In this study changes generated in the canopy due to silvicultural practices, time of year and edaphic variables were studied. These changes, as assessed from the LAI, allowed to incorporate an estimation of the physiological control in the ET<sub>m</sub> of this stand.

Keywords: *Pinus taeda*, leaf area index, evapotranspiration, Uruguay

## **1. INTRODUCCIÓN GENERAL Y ANTECEDENTES**

### 1.1 SITUACIÓN FORESTAL EN URUGUAY

Las plantaciones forestales en Uruguay han tenido un crecimiento significativo en los últimos 20 años. A diferencia del resto de los países de América Latina y el Caribe, que registraron pérdidas netas en la superficie forestal, entre los años 2000 y 2005, Uruguay junto con Chile presentaron una tendencia positiva debido a programas de plantación industrial a gran escala (FAO, 2009). Luego de una primera Ley Forestal en el año 1966 y beneficios tributarios que impulsaron brevemente la actividad forestal a mediados de la década de los 70, la forestación industrial se instala en Uruguay a partir de la promulgación de una nueva "Ley Forestal" (Ley N° 15.939) en diciembre de 1987. El gobierno ha impulsado los bosques artificiales desde 1987 mediante concesión de beneficios fiscales cuando se establecían en áreas de prioridad forestal cuya extensión a nivel nacional oscila hoy entre 2,5-3 millones de ha. Según las cifras de la Dirección General Forestal, el área total forestada bajo proyecto al 2009 es superior a las 0,8 millones de ha de bosques de producción (representando el 4,5 % aprox. de la superficie del territorio nacional) (Figura 1; ForestalWeb, 2009).

Las especies plantadas pertenecen mayoritariamente a los géneros *Eucalyptus* y *Pinus*. El género netamente dominante es *Eucalyptus* que ocupa unas 500.000 ha lo cual equivale al 70% de la superficie plantada. A éste le sigue el género *Pinus* con unas 200.000 ha abarcando el 28% del total. El 2% restante corresponde a plantaciones de especies de los géneros *Populus* y *Salix* (Uruguay. MGAP, 2005).

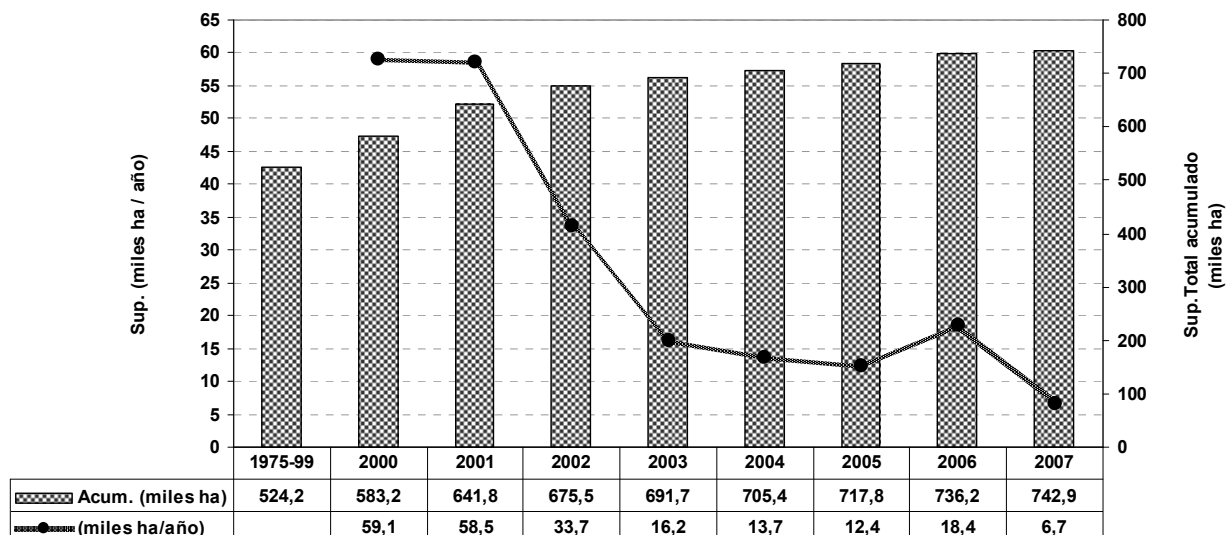


Figura 1. Superficie forestada bajo proyecto, por año y total acumulado en el período 1976-2007 en Uruguay en base a datos de la Dirección General Forestal (ForestalWeb, 2009).

En la Figura 2 se puede observar la distribución geográfica del área forestal. Los departamentos con mayor superficie forestada son: Rivera, Tacuarembó, Río Negro, Paysandú y Lavalleja. Estos cinco departamentos comprenden algo más del 70% del área plantada con bosques artificiales. En Rivera y Tacuarembó, el género dominante es *Pinus*, mientras que en el resto de los departamentos el género más plantado es *Eucalyptus* (Uruguay. MGAP, 2004).

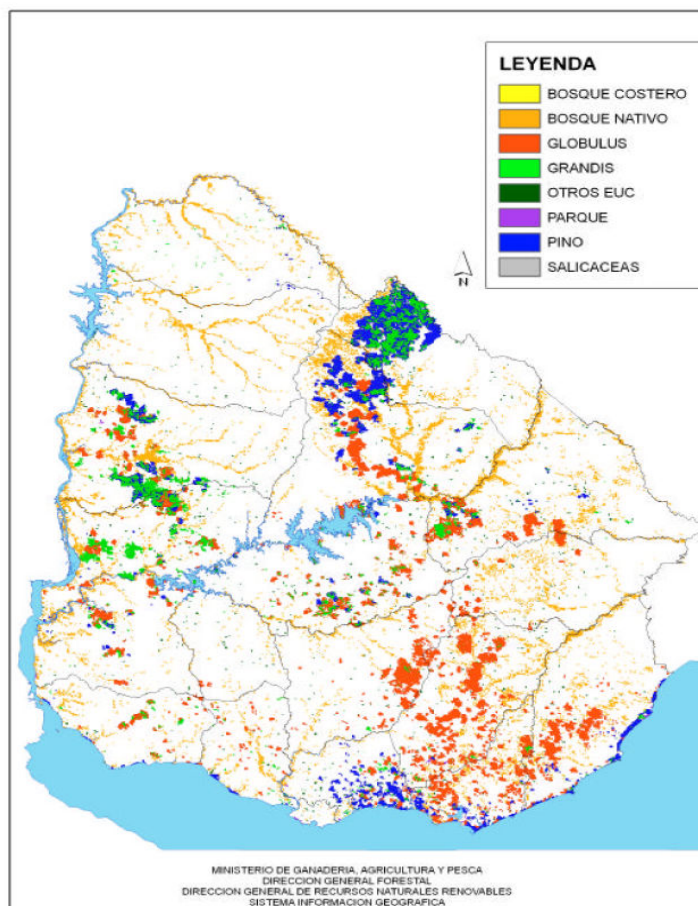


Figura 2. Distribución geográfica de la superficie forestal en Uruguay según bosques nativos, eucalipto, pinos y salicáceas. (Uruguay. MGAP, 2004).

El aumento del área destinada a plantaciones forestales supone un cambio en el uso de la tierra que plantea en distintos ámbitos (instituciones del Estado, sectores privados y organizaciones de la sociedad civil) inquietudes e incertidumbres relacionadas con los impactos ambientales de estas plantaciones, particularmente el uso del agua. Las preguntas más frecuentes están relacionadas al consumo de agua de las plantaciones forestales y a la relación entre la disponibilidad de agua y la evapotranspiración de los árboles. La investigación a nivel nacional no acompañó el desarrollo forestal en el país y reporta muy pocos antecedentes locales. Las referencias

nacionales abordan el estudio de cuencas forestadas y plantean el análisis desde la evaluación de algunos componentes del ciclo hidrológico (Silveira et al., 2003; Chescheir et al., 2006). Para responder estas preguntas es necesario profundizar la investigación en el estudio de las relaciones biofísicas del ecosistema forestal y en el desarrollo de modelos de balance de agua (Soares y Almeida, 2001). A continuación se presenta una revisión de los efectos de las cubiertas forestales en los recursos hídricos del sistema suelo-planta-atmósfera.

## 1.2 EL AGUA EN LOS SISTEMAS FORESTALES

Los aspectos hidrológicos en los ecosistemas forestales fueron teóricamente analizados por Jarvis (1975) y Whitehead et al. (1984) y extensamente investigados por numerosos autores (Hibbert, 1967; Bosch y Hewlett, 1982; McCarthy y Skaggs, 1992; Oyarzun y Huber, 1999; Zhang et al., 2001; Best et al., 2003; Amatya et al., 2006). Básicamente los efectos hidrológicos más reconocidos están relacionados con el aumento de la intercepción del agua de lluvia y de la evaporación directa desde la canopia, con la reducción del escurrimiento superficial y con la modificación en la dinámica del agua disponible en el suelo y en la infiltración. Desde el punto de vista evapotranspirativo también se asocian a estas cubiertas forestales con una mayor intercepción y absorción de energía y con un proceso muy efectivo de transferencia turbulenta de vapor de agua, pero también con una alta resistencia estomática al flujo de agua (Jarvis y Stewart, 1978; Calder, 1979; Jarvis y McNaughton, 1986; Lima, 1987; Shuttleworth, 1989). Estudios realizados en Australia, Nueva Zelanda, Sudáfrica y Gran Bretaña mostraron que el establecimiento de plantaciones forestales reduce el rendimiento de agua de una cuenca y disminuye el flujo de agua (escurrimiento) hacia ríos y arroyos. Este efecto es adjudicado, primariamente, a la mayor evapotranspiración (ET) desde los árboles (Zhang et al., 1999; Scott et al., 2000; Zhang et al., 2001; Chescheir et al. 2006). El efecto de las plantaciones sobre el rendimiento de agua de una cuenca depende de las características climáticas (precipitación y demanda atmosférica), de las características edáficas e hidrológicas de la cuenca (suelo y propiedades de

drenaje) y del manejo silvicultural del rodal. En particular, el estudio de los efectos hidrológicos de las operaciones silviculturales (raleos y podas) en rodales de *Pinus taeda* fue abordado en su región de origen (Estados Unidos) por numerosos investigadores (Stogsdill et al., 1989; Cregg et al., 1990; Stogsdill et al., 1992; Chescheir, 2003; Grace et al., 2006; Amatya y Skaggs, 2008).

Estos estudios reportaron que los efectos inmediatos del raleo representan una reducción de las pérdidas de agua por intercepción de la lluvia más que una reducción del uso del agua disponible. Esta reducción de intercepción de agua se traduce en un incremento del agua disponible en el suelo y un aumento de la tasa de drenaje diaria y del escurrimiento superficial. De esta manera, hay acuerdo en señalar que el manejo silvicultural influye en la cantidad de agua involucrada en la ET y que necesariamente ésta varía cuando se interviene, reemplaza o quita la cobertura foliar.

### 1.3 MANEJO SILVICULTURAL, EVAPOTRANSPIRACIÓN Y ÁREA FOLIAR

Las plantaciones forestales destinadas a la producción de madera para industria (aserrados, debobinados, tableros contrachapados) logran madera de alta calidad a partir de un manejo específico de los rodales. Es frecuente que luego de la plantación, transcurrido un plazo entre 3 y 5 años, los montes sean sometidos a podas y raleos. Estas prácticas tienen como objetivo dejar los mejores árboles (200-250 árboles/ha) para el momento de corta final, que en Uruguay oscila entre los 20 años para *Eucalyptus* y 25 años para *Pinus* (Pou, 2009). Estas intervenciones generan cambios estructurales en el dosel. Considerar estos cambios mediante la realización de un monitoreo de la dinámica del dosel a lo largo del tiempo contribuiría significativamente al análisis de la ET del cultivo y por lo tanto a encontrar respuestas a preguntas sobre los efectos hidrológicos de estas plantaciones. En este sentido, el índice de área foliar (IAF) es considerado uno de los mejores descriptores de las estructuras de doseles para definir intercambios de energía y agua en la interfase con la atmósfera (Rosenberg et al., 1983). Es así que el proceso de transpiración en cubiertas forestales está altamente correlacionado con el IAF y éste a su vez es considerado un determinante estructural de la transpiración (Santiago

et al., 2000). Su utilización es valorada positivamente como un estimador de la conductancia global del dosel (e indirectamente de su resistencia a la difusión de vapor) la cual constituye una variable crítica en la estimación de la transpiración (Xavier et al., 2002).

En la actualidad el conocimiento y la comprensión de los controles físicos y biológicos de la ET no es una limitante en el conocimiento científico, pero existe la necesidad de desarrollar modelos con adecuada aplicación en situaciones de campo. Particularmente se destaca esta necesidad en áreas de bosques y en la evaluación y predicción del efecto del raleo, así como también del fuego, de los cambios en la composición de especies y en las actividades culturales que afecten el balance de agua (Ziemer, 1979; Carneiro et al., 2008). Asimismo, se reconoce la dificultad de obtener medidas directas a campo de estos aspectos (físicos y biológicos) que regulan el proceso de ET, y la necesidad de disponer de metodologías indirectas que proporcionen una estimación precisa. Se presenta a continuación una revisión de metodologías de estimación de evapotranspiración, con énfasis en las determinaciones que contemplan los factores meteorológicos y del cultivo, y que asumen un suministro óptimo de agua disponible en el suelo.

#### 1.4 ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

La ET es una variable importante para la modelación, tanto hidrológica como de la productividad primaria neta, pero su determinación no es sencilla (Allen et al., 1998). A su vez, la transpiración es un factor crítico en la modelación de balances hídricos de cubiertas forestales: errores en su determinación son más significativos que aquellos en otros componentes del ciclo hidrológico tales como la evaporación del suelo, la intercepción o el drenaje profundo (Soares y Almeida, 2001)

Se considera a la ET como la pérdida de agua por evaporación del suelo y por transpiración de las plantas (Penman, 1948). La misma está determinada por factores meteorológicos, edáficos y propios del cultivo. La ET máxima (ET<sub>m</sub>) del cultivo sólo es afectada por aspectos del cultivo y de la demanda atmosférica, ya que se asume un



suministro óptimo de agua del suelo (Doorenbos y Kassam, 1979). En la ET los factores meteorológicos determinan el componente energético y el poder desecante de la atmósfera, los factores de la planta condicionan la cantidad de energía absorbida y su transferencia o disipación de calor y de vapor, y los factores edáficos condicionan el flujo de agua en el suelo, el régimen térmico y el porcentaje de radiación reflejada (albedo) (Allen et al., 1998). En este sentido, hay coincidencia en señalar que los procesos evaporativos desde las superficies son más dependientes de la demanda evaporativa (disponibilidad de energía y remoción de vapor de la superficie evaporante), y que el proceso de transpiración de las plantas está fuertemente ligado al control fisiológico (Stephens et al., 2001; Jones, 2004).

La importancia relativa de los componentes energéticos y aerodinámicos en la demanda evaporativa depende de cómo el cultivo se “acopla” con la atmósfera. Así, cubiertas vegetales altas, espaciadas (especialmente árboles) tienden a estar bien “acopladas” con la atmósfera y su transpiración es más dependiente del componente aerodinámico que del energético. Por el contrario, cultivos cortos y uniformes, no están tan bien acoplados en la zona de intercambio de calor y vapor (capa límite), y entonces el balance energético es el principal determinante de la transpiración (Stephens et al., 2001).

La ET que ocurre en una superficie cultivada puede ser medida directamente a través de métodos de transferencia de masa o del balance de energía. También se puede obtener a partir de estudios del balance de agua en el suelo en campos cultivados o a través de instrumental de medida de evapotranspiración (ej. lisímetros) (Huber et al., 1985; Huber y López, 1993; Oyarzún y Huber, 1999; Silveira et al., 2003; von Stackelberg, 2005; Chescheir et al., 2006). Por otro lado, dada la dificultad de tomar medidas directas a campo se han desarrollado numerosas estimaciones empíricas de la ET. La evapotranspiración de un cultivo puede ser estimada a partir de datos meteorológicos y del cultivo utilizando la ecuación de Penman-Monteith (Monteith, 1965), en la misma el IAF permite estimar la conductancia de la canopia la cual representa el control fisiológico de las plantas en la transpiración.

Numerosos autores señalan que mediante esta ecuación se alcanza una adecuada estimación de la ET de las cubiertas forestales (Monteith y Unsworth, 1990; Soares y Almeida, 2001; Jones, 2004).

Se puede considerar que la ecuación de Penman-Monteith expresa el proceso evapotranspirativo como el flujo de calor latente ( $\lambda ET$ ):

$$\lambda ET = \frac{s \cdot (R_n - G) + \rho \cdot c_p \cdot (e_s - e) / r_a}{s + \gamma [1 + (r_s / r_a)]}$$

donde:  $\lambda$  es el calor latente de vaporización (alrededor de 580 cal/g en temperaturas cercanas a 15°C),  $R_n$  es la radiación neta,  $G$  es el flujo del calor en el suelo,  $(e_s - e)$  representa el déficit de presión de vapor del aire,  $\rho$  es la densidad media del aire a presión constante,  $c_p$  es el calor específico del aire,  $s$  representa la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación,  $\gamma$  es la constante psicrométrica, y  $r_s$  y  $r_a$  son las resistencias superficial (total) y aerodinámica.

Esta ecuación combina el balance de energía y el componente aerodinámico del aire que afectan el proceso de pérdida de agua desde la cubierta vegetal. La fórmula incluye variables fisiológicas y meteorológicas. La conductancia aerodinámica ( $g_a$ , o su inverso, la resistencia aerodinámica  $r_a$ ) depende del viento y de la densidad y estructura de la canopia.

Por su parte la conductancia de la canopia ( $g_c$ , o su inverso, la resistencia de la superficie  $r_s$ ) depende de la conductancia estomática ( $g_e$ ) y del IAF ( $g_c = g_e \cdot \text{IAF}$ ). La  $g_c$  disminuye si decrece el potencial de agua en la hoja debido a una disminución de agua disponible en el suelo. En el cálculo de transpiración potencial o máxima no hay restricciones de agua disponible en el suelo, entonces la  $g_e$  y la  $g_c$  se consideran máximas (Soares y Almeida, 2001) y en estos casos la ET representa la ETm. Estudios realizados por Kelliher et al. (1993) señalan que la conductancia máxima en cubiertas

forestales de coníferas y en cubiertas herbáceas es similar ( $22,00 \text{ mms}^{-1}$ ) al igual que la tasa máxima (horaria) de evaporación ( $E_{\text{max}}$ ) ( $0,46 \text{ mmh}^{-1}$ ).

Los mismos autores señalan que la tasa diaria de  $E_{\text{max}}$  en coníferas es significativamente menor que en cubiertas herbáceas ( $4,0 \text{ mmd}^{-1}$  y  $4,6 \text{ mmd}^{-1}$  respectivamente). A su vez la relación entre la  $g_c$  y el IAF es directamente proporcional. Algunos trabajos experimentales señalan que las copias forestales con IAF superiores a tres alcanzan un valor estable de conductancia máxima ya que ésta en hojas individuales decrece progresivamente con el incremento del IAF (Soares y Almeida, 2001). En este sentido, otros estudios indican que la resistencia al flujo de agua a través del árbol se incrementa a medida que aumenta la densidad del rodal y se alcanzan valores de IAF de 5 (dosel cerrado) (Landsberg, 1986).

Otro aspecto determinante en la ET de cubiertas forestales es la estructura de la canopia (forma y distribución de las copas) ya que influye en la conductancia de la capa límite (Santiago et al., 2000). Cambios estructurales en la superficie que evapotranspira afectan la capa límite, de manera que si aumenta la resistencia al pasaje de vapor de la superficie, la ET disminuye. La sensibilidad relativa de la tasa de evaporación a los cambios en la resistencia de la superficie vegetal es mayor para doseles de pinos que para vegetación herbácea (Kelliher et al., 1993). En canopias de coníferas existe un intercambio turbulento muy efectivo y la relación entre la  $g_a$  y la  $g_c$  es mayor ( $g_a / g_c = 50$ ) respecto a la de la vegetación herbácea ( $g_a / g_c = 1$ ) aún asumiendo condiciones similares de resistencia de la superficie (máxima  $g_c$ ) (Landsberg, 1986; Monteith y Unsworth, 1990). Algunos valores de resistencia ( $r_s$ ) de una superficie forestal reportados en la literatura alcanzan valores cercanos a  $150 \text{ sm}^{-1}$  (Shuttleworth, 1989), otros señalan valores de  $70 \text{ sm}^{-1}$  en coníferas, y en particular para canopias de pinos, de  $98$  a  $150 \text{ sm}^{-1}$  y de  $300 \text{ sm}^{-1}$  en “hardwood forest” (Burman, y Pochop, 1994). Los valores de  $g_c$  promedio diario para *Pinus radiata* son de  $10 \text{ mms}^{-1}$  (Landsberg, 1986). En relación a la resistencia de la superficie, ésta es directamente proporcional a la resistencia estomática e inversamente proporcional al índice de área foliar activo. El

índice de área foliar activo define el sector del cultivo que contribuye efectivamente a la transferencia de calor y de vapor de la superficie vegetal (Allen et al., 1998).

A continuación se presenta una revisión sobre el índice de área foliar y su determinación en cubiertas forestales.

### 1.5 ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EN CUBIERTAS FORESTALES

El IAF se presenta como un descriptor de la estructura del dosel y figura como la principal variable usada en modelos referidos a procesos fotosintéticos y evapotranspirativos de cubiertas forestales. Presenta una relación de dependencia con la especie, estado de desarrollo, condiciones del lugar, estacionalidad y prácticas de manejo (Jonckheere et al., 2004). Representa la interfase planta-atmósfera y es un indicador biofísico que juega un rol importante en el intercambio de masa y energía entre la canopia y la atmósfera (Wythers et al., 2003; Weiss et al., 2004; Jonckheere et al., 2004).

El IAF se define como la superficie foliar por unidad de superficie de suelo (Watson, 1947). En la actualidad la definición del IAF no resulta clara ni aplicable de igual manera para todas las superficies vegetales. Especialmente para coníferas y dependiendo de la técnica utilizada para la obtención del IAF, algunos autores sugieren considerar al IAF como la mitad del área total de hojas por unidad de superficie de suelo (Wythers et al., 2003; Weiss et al., 2004; Jonckheere et al., 2004) o su expresión como área proyectada de acículas por unidad de superficie de suelo (Teske y Thistle, 2004). Las definiciones más recientes de IAF no consideran el concepto de área proyectada dado su significancia física. Mientras a la definición de área proyectada se le asigna un sentido físico (por ej. intercepción de radiación) al área foliar se le da una connotación biológica (por ej. intercambio gaseoso) (Jonckheere et al., 2004). Las medidas directas de IAF en cubiertas forestales son muy dificultosas y en general no es posible realizar un muestreo exhaustivo de la canopia por lo que se utilizan métodos indirectos. Las técnicas indirectas comúnmente más utilizadas miden la transmisión de la luz a través de la canopia y se basan en instrumental óptico (Zhang et al., 2005; Morissette et al., 2006;

Garrigues et al., 2008). Estos métodos son implementados con múltiples instrumentos comerciales, por ej. LAI-2000 (LI-COR, Lincoln, Nebraska USA), AccuPAR (Decagon Devices, Inc., Pullman, Washington, USA), TRAC (3rd Wave, Ontario Canadá) y la Fotografía Hemisférica Digital entre otros (Jonckheere et al., 2004). LAI-2000 y AccuPAR son instrumentos de medidas instantáneas de IAF estimadas mediante la relación de lecturas a cielo abierto y bajo canopias y que no requieren adquisición y procesamiento posterior del dato. AccuPAR mide la cantidad de radiación fotosintéticamente activa (RFA o PAR como su sigla en inglés) por medio de sensores lineales quantum y representa una técnica no adecuada para cubiertas forestales de coníferas debido al efecto de penumbra bajo la canopia sobre la radiación PAR medida. El LAI-2000 se basa en sensores de luz de tipo “ojo de pez” (en cinco bandas angulares). La principal desventaja radica en que caracteriza la canopia forestal con solo cinco anillos concéntricos, que realiza un procedimiento inmediato de integración de las lecturas y por esto resulta imposible, a posteriori, cualquier análisis espacial de la distribución del follaje.

El TRAC es un instrumento que registra la radiación directa transmitida (a alta frecuencia) por medio de tres sensores fotosensibles y permite obtener la frecuencia de área con vegetación en la canopia así como una dimensión física de esa superficie. Sin embargo no se señala adecuado para coníferas dada la presencia de espacios muy pequeños de cielo sin vegetación entre las acículas que desaparecen en la penumbra bajo el dosel y los cuáles no pueden ser detectados por el sensor.

La fotografía hemisférica digital (FHD) es propuesta como una medida adecuada del IAF para estudios tanto de la arquitectura de la canopia como de la transmisión de la radiación solar en cubiertas forestales (Zhang et al., 2005). La FHD consiste en el uso de lente hemisférico de tipo “ojo de pez” mediante el cual se estiman medidas de IAF debajo del dosel en condiciones de luminosidad difusa. Este método permite cuantificar la penetración de radiación solar en el dosel y además obtener una descripción de la arquitectura de la canopia traduciendo sobre un plano la imagen del campo hemisférico observada desde un punto en el terreno (Linhares de Souza y Ponzoni, 1998; Weiss et

al., 2004; Cabrelli et al., 2006). Requiere de procesamiento posterior en programas computacionales de análisis de la imagen fotográfica y genera un registro permanente del dato. El análisis de la imagen fotográfica hemisférica proporciona múltiples variables radiativas y que han sido exitosamente utilizadas en diversos estudios de estructura de la canopia y penetración y eficiencia del uso de la luz.

Esta técnica considera modelos de inversión de transferencia radiativa y se basa en la estimación de la fracción gap (fracción de cielo visible a través de la canopia). La fracción gap es equivalente a la medida de la transmitancia de radiación solar hacia el suelo asumiendo que la vegetación se comporta como un cuerpo negro. Estas técnicas utilizan medidas multidireccionales de fracción gap asumiendo distribución espacial al azar de canopias esféricas y funciones elipsoidales de distribución de inclinación de las hojas. La fracción gap tiene una relación no lineal con el IAF y cuantifica la apertura y arquitectura del dosel evaluando la frecuencia de contacto. A mayor frecuencia de contacto hay mayor proyección de hojas por unidad de superficie de follaje y mayor IAF, reduciendo exponencialmente la fracción gap (Wythers et al., 2003; Weiss et al., 2004; Zhang et al., 2005). Las metodologías de estimación de IAF basadas en el análisis de la fracción gap en general subestiman el IAF cuando el área foliar se encuentra espacialmente agrupada y sin distribución al azar (Santiago et al., 2000). En especial para cubiertas forestales se recomienda la fotografía hemisférica para la evaluación de IAF y se menciona una reducción de la subestimación de IAF cuando se realiza el registro fotográfico en forma digital, que varía entre un 15% hasta un 50% respecto a mediciones directas (Jonckheere et al., 2004).

Otro aspecto de las estimaciones de IAF mediante modelos de inversión es que presentan la dificultad de no distinguir entre los elementos verdes y los no verdes de la vegetación. Esto representa una fuente de error de estas medidas indirectas en cubiertas forestales. En este sentido aparecen como novedosas y muy útiles denominaciones alternativas de este indicador, en particular aquellas asociadas al dato obtenido mediante fotografía hemisférica. Se sugiere la denominación de Índice de Área de Vegetación (IAV), Índice de Área de Planta (IAP) o IAF efectivo (Weiss et al., 2004; Jonckheere et

al., 2004). De esta manera la incorporación de cámaras digitales y el tratamiento de fotografías hemisféricas digitales proporcionan una solución a la problemática de las medidas de la estructura y arquitectura de las canopias mediante la aplicación de una técnica no destructiva (Weiss et al. 2004; Zhang et al., 2005).

Estudios comparativos de diferentes metodologías de estimación de IAF concluyen que las asociaciones más consistentes se han establecido entre el método LAI-2000 y la fotografía hemisféricas (Jonckheere et al., 2004; Zhang et al., 2005). La técnica de LAI-2000 es también un método indirecto de instrumental óptico pero en este caso integra varias mediciones direccionales de fracción gap de una única longitud de onda de 490 nm. En cubiertas forestales con doseles parcial y completamente cerrados (IAF de 0,29 y 4,63 respectivamente) la correlación entre ambas técnicas aumenta cuando los registros fotográficos digitales se realizan con adecuados contrastes de imagen y definición de la exposición (no automática). Las fotografías (FHD) tomadas con exposición automática subestiman en un 48,7 % en promedio, mientras que fotografías con mayor contraste de imagen subestiman en promedio un 23,1% (Zhang et al., 2005).

En este tipo de técnica (FHD) es relevante contemplar algunos aspectos metodológicos en la operativa de campo. Se han encontrado escasas referencias en relación al protocolo llevado a cabo en campo en la adquisición, procesamiento y análisis de la imagen. En este sentido se describen dos aspectos fundamentales: por un lado la diferenciación entre lo que es vegetación verde de lo que no lo es, y por otro lado la necesidad de desarrollo de software para el procesamiento de imágenes, ya que esto supone un trabajo tedioso, costoso en tiempo y que puede generar error en el operador (Jonckheere et al., 2004). Otro aspecto metodológico importante para alcanzar un óptimo estándar de protocolo de campo son los elementos que definen las estrategias de muestreo, por ej. el número de individuos medidos y el procesamiento de las muestras para lograr una adecuada representatividad espacial. Para cubiertas forestales de *Pinus sp.* se recomiendan observaciones de la fracción gap de entre 5 a 15 individuos (Weiss

et al., 2004), en tanto Leblanc et al. (2002) propone usar sólo cuatro fotografías como base de un buen muestreo en bosques templados y boreales.

Estudios realizados por Cabrelli et al. (2006) en rodales adultos de *Pinus elliottii* en Argentina muestran valores de IAF, estimados mediante fotografía hemisférica, para diferentes situaciones de manejo silvicultural. El IAF fue significativamente menor en un rodal raleado (dosel abierto, 586 árboles) respecto de un rodal sin manejo (dosel cerrado, 900 árboles /ha), los valores de IAF estimados fueron de 1,45 ( $\pm 0,35$ ) y 3,01 ( $\pm 0,39$ ) respectivamente.

En Uruguay, no se han encontrado antecedentes de investigaciones relacionadas al efecto del manejo silvicultural sobre el IAF en *Pinus sp* y del efecto de éste sobre la ET del cultivo. En el presente trabajo se plantea la hipótesis que debido al manejo silvicultural (poda y raleo) se generan cambios en el área foliar y en la ET. Estos cambios pueden evaluarse mediante indicadores biofísicos como el IAF. El raleo y la poda de los árboles al reducir la cobertura foliar favorecerían un incremento en la resistencia superficial al flujo de vapor y disminuirían la pérdida de agua del cultivo por ET.

Para realizar este estudio se contó con las facilidades para el registro de fotografía hemisférica digital en un rodal de *Pinus taeda* de 5 años, combinadas con datos de una estación meteorológica ubicada en las cercanías del rodal. El mismo se encuentra instalado en el Establecimiento Forestal “La Corona”, Tacuarembó, Uruguay (31°38’S, 55°41’W) propiedad de la empresa Weyerhaeuser S.A. Mediante este trabajo se espera aportar información local relativa al IAF y la ET en rodales de pinos.



## 1.6 OBJETIVO GENERAL

Analizar la incidencia del raleo y de la poda en un rodal de *Pinus taeda* sobre el IAF, estimado mediante fotografía hemisférica, y evaluar la incidencia de éste en la evapotranspiración máxima del cultivo calculada mediante la ecuación de Penman-Monteith.

## 1.7 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- (1) Describir la dinámica anual y los cambios estacionales de la cobertura foliar en un rodal de *Pinus taeda* sometido al primer raleo y poda precomercial
- (2) Cuantificar los valores de IAF pre y post tratamiento silvicultural en un rodal de *Pinus taeda*
- (3) Cuantificar los valores de ETm pre y post tratamiento silvicultural en un rodal de *Pinus taeda*

A continuación se presenta el trabajo en formato de artículo científico para su publicación en una revista arbitrada. Se siguió el protocolo de publicación de la revista Forest Ecology and Management.

**Efecto del manejo silvicultural sobre la evapotranspiración en un rodal  
de *Pinus taeda* en Uruguay**

**Carolina Munka, Fabiana Pezzani y Mario Caffera**

## Resumen

La descripción y el análisis estructural del dosel forestal son elementos clave tanto en la modelación hidrológica, en el estudio de los intercambios de energía y carbono, como también en el manejo productivo de las plantaciones comerciales. Los procesos biofísicos involucrados en estos modelos (fotosíntesis, respiración, evapotranspiración) cambian cuando se interviene la cobertura foliar. En este estudio se evaluó la incidencia del manejo silvicultural (raleo y poda precomercial) sobre el índice de área foliar (IAF) en un rodal de *Pinus taeda* en Uruguay y como éste influyó en los valores de la evapotranspiración del cultivo. El estudio se llevó a cabo entre noviembre de 2007 y diciembre de 2008 en un rodal de *Pinus taeda* de 5 años, con una densidad inicial de plantación de 1000 árboles/ha, en una cuenca de 108 ha en Tacuarembó – Uruguay (31°38'S, 55°41'W). En junio de 2008 se realizó un raleo del 40% de los árboles y una poda del 50% de las copas. Se realizaron estimaciones del índice de área foliar mediante fotografías hemisféricas digitales tomadas cada seis semanas, en parcelas raleadas y podadas y en parcelas testigo (sin poda y sin raleo). Los datos obtenidos de IAF se incluyeron en la ecuación de Penman-Monteith para la estimación de la evapotranspiración máxima (ET<sub>m</sub>). El IAF en promedio, fue máximo en abril ( $1,7 \pm 0,75$ ) y mínimo en agosto ( $0,53 \pm 0,17$ ). Se constató una reducción media del IAF de 62,9% debido al raleo y la poda silvicultural. Esta reducción fue significativamente superior (71%) en las parcelas ubicadas en sitios de menor capacidad de agua disponible en relación a las parcelas ubicadas en sitios de mayor capacidad de agua disponible, donde la reducción fue del 55%. La reducción del IAF tuvo como consecuencia una disminución significativa de los valores de ET<sub>m</sub> calculados. Los porcentajes medios de reducción de ET<sub>m</sub> fueron de 58% en el sitio que presentó mayor reducción del IAF y de 35% en el sitio con menor porcentaje de disminución de IAF. El raleo y la poda explicaron un 45% de la variación del IAF y un 4,7% de la variación de la ET<sub>m</sub>.

Palabras clave: *Pinus taeda*; Evapotranspiración; Raleo; Poda; Índice de Área Foliar

## 1. Introducción

El aumento del área destinada a plantaciones forestales supone un cambio en el uso de la tierra que plantea en distintos ámbitos (instituciones del Estado, sectores privados y organizaciones de la sociedad civil) inquietudes e incertidumbres relacionadas con los impactos ambientales de estas plantaciones, particularmente al uso del agua. Los efectos sobre el ciclo hidrológico de las plantaciones forestales fueron extensamente investigados por numerosos autores. Básicamente, estos efectos refieren al aumento de la intercepción del agua de lluvia, a la reducción del escurrimiento superficial, a la modificación en la dinámica del agua disponible en el suelo y en la infiltración, así como también a la alteración de la magnitud en la evapotranspiración (ET) (Lima, 1987; Oyarzún y Huber, 1999; Zhang et al., 2001; Best et al., 2003; Amatya et al., 2006; Zhou et al., 2008). El efecto de las plantaciones sobre el rendimiento de agua de una cuenca depende de las características climáticas (precipitación y demanda atmosférica), de las características edáficas e hidrológicas de la cuenca (suelo y propiedades de drenaje) y del manejo silvicultural del rodal. De este modo cambios en la cobertura vegetal necesariamente modifican la utilización de la radiación absorbida y la partición de ésta en calor sensible como en calor latente por parte de la superficie evapotranspirante. Como consecuencia de estos cambios, el balance de agua del sitio se ve afectado a través de la contribución relativa de la transpiración de las plantas y de la evaporación del suelo (Simonin et al., 2007).

El raleo y la poda forman parte de los tratamientos silviculturales más comunes que se realizan en el manejo de las plantaciones forestales y constituyen una práctica silvicultural que tiende a maximizar la productividad del rodal. Estas prácticas generan cambios estructurales en el dosel y tienen un efecto inmediato en algunos aspectos del ciclo hidrológico. Algunos de estos efectos son: la reducción de la intercepción de la precipitación, la reducción de la ET, el aumento del agua disponible en el suelo y el aumento del escurrimiento (Stogsdill et al., 1989; Hennesey et al., 2004; Simonin et al., 2007; Amatya y Skaggs, 2008). Considerar los cambios estructurales en el dosel mediante un monitoreo continuo de su dinámica contribuye a encontrar respuestas a las

preguntas sobre los efectos de estas plantaciones en el ciclo hidrológico. En este sentido, el índice de área foliar (IAF) es considerado uno de los mejores descriptores de las estructuras de doseles forestales para definir intercambios de energía y agua en la interfase con la atmósfera (Rosenberg, 1983; Wythers et al., 2003; Teske y Thistle 2004; Will et al., 2005; Davi et al., 2008).

Se considera a la ET como la pérdida de agua por evaporación del suelo y por transpiración de las plantas (Penman., 1948). La misma está determinada por factores meteorológicos, edáficos y propios del cultivo. La ET máxima (ET<sub>m</sub>) del cultivo sólo es afectada por aspectos del cultivo y de la demanda atmosférica, ya que se asume un suministro óptimo de agua del suelo (Doorenbos y Kassam, 1979). La ET que ocurre en una superficie cultivada puede ser medida directamente a través de métodos de transferencia de masa o del balance de energía. También se puede obtener a partir de estudios del balance de agua en el suelo en campos cultivados o a través de instrumental de medida de evapotranspiración (por ej. lisímetros) (Huber et al., 1985; Huber y López, 1993; Oyarzún y Huber, 1999; Silveira et al., 2003; von Stackelberg, 2005; Chescheir et al., 2006). Dada la dificultad de medidas directas a campo, se han desarrollado numerosas estimaciones empíricas de la ET. La ET de un cultivo puede ser estimada a partir de datos meteorológicos y del cultivo utilizando la ecuación de Penman-Monteith (Monteith, 1965), en la misma el IAF permite estimar la conductancia de la canopia la cual representa el control fisiológico de las plantas en la transpiración. Numerosos autores señalan que mediante esta ecuación se alcanza una adecuada estimación de la ET de las cubiertas forestales (Monteith y Unsworth, 1990; Soares y Almeida, 2001; Jones, 2004). Es así que el proceso de transpiración en cubiertas forestales está altamente correlacionado con el IAF y este a su vez es considerado un determinante estructural y funcional de la transpiración (Santiago et al., 2000). Su utilización es valorada positivamente como un estimador de la conductancia global del dosel (e indirectamente de su resistencia a la difusión de vapor) la cual es una variable crítica en la estimación de la transpiración (Xavier et al., 2002).

El IAF se define como el área de hoja por unidad de superficie de suelo (Watson, 1947). Especialmente para coníferas y dependiendo de la técnica utilizada para la obtención del IAF, algunos autores sugieren considerar al IAF como la mitad del área total de hojas por unidad de superficie de suelo (Chen y Black, 1992; Wythers et al., 2003; Weiss et al., 2004; Jonckheere et al., 2004). Las definiciones más recientes de IAF consideran la mitad del área total de hojas dada su connotación biológica, superficie activa y efectiva en los procesos de transpiración (por ej. intercambio gaseoso) (Jonckheere et al., 2004). La determinación del IAF puede dividirse en dos grandes categorías: las técnicas directas y las indirectas. Una buena descripción y revisión sobre las metodologías de estimación fue discutida por Norman y Campbell (1989), Jonckheere et al. (2004) y Strachan et al. (2005). Las medidas directas de IAF son técnicas destructivas, muy dificultosas y en general, en cubiertas forestales, no es posible realizar un muestreo exhaustivo de la canopia, por lo que se utilizan métodos indirectos. Las técnicas indirectas comúnmente más utilizadas miden la transmisión de la luz a través de la canopia y se basan en instrumental óptico (Zhang et al., 2005; Morisette et al., 2006; Garrigues et al., 2008). Estos métodos son implementados con múltiples instrumentos comerciales, por ej. LAI-2000 (LI-COR, Lincoln, Nebraska USA), AccuPAR (Decagon Devices, Inc., Pullman, Washington, USA), TRAC (3rd Wave, Ontario Canadá) y Fotografía Hemisférica Digital, entre otros. La fotografía hemisférica digital (FHD) es propuesta como una medida adecuada del IAF para estudios tanto de la arquitectura de la canopia como de la transmisión de la radiación solar en cubiertas forestales (Zhang et al., 2005). La incorporación de cámaras digitales y el tratamiento de fotografías hemisféricas digitales proporcionan una técnica no destructiva y un avance en la solución de la problemática de las medidas de la estructura y arquitectura de las canopias (Weiss et al., 2004; Zhang et al., 2005). En este trabajo se analizó la incidencia del raleo y de la poda en un rodal de *Pinus taeda* sobre el IAF, estimado mediante fotografía hemisférica, y se evaluó su incidencia en la ET<sub>m</sub> del cultivo calculada mediante la ecuación de Penman-Monteith. Los objetivos del estudio fueron: (1) describir la dinámica y los cambios estacionales de la cobertura foliar en un

rodal de *Pinus taeda* sometido al primer raleo y poda precomercial y (2) cuantificar los valores de IAF y ETm pre y post tratamiento silvicultural en un rodal de *Pinus taeda*.

## 2. Materiales y métodos

En este estudio se procedió a: estimar y hacer el análisis temporal del IAF y de la ETm, cuantificar los cambios de estas variables debidos al manejo silvicultural, y comparar los métodos de estimación del IAF por medio de LAI-2000 vs. FHD.

### *Descripción del área de estudio*

El área de estudio está ubicada aprox. 50 km al norte de la ciudad de Tacuarembó, Uruguay (31°38'09''S, 55°41'48''W). Según la clasificación climática de Köppen la región se caracteriza por un clima templado y húmedo, con veranos calurosos (Cfa). El promedio anual de precipitación es de 1484 mm con distribución regular en el año pero con muy alta variabilidad interanual en cada mes, y la temperatura media oscila, entre 23,2 °C en el mes más cálido (enero) y 10,8 °C en el mes más frío (julio) (Uruguay. INIA, 2009). El estudio se realizó en una cuenca de 108 ha caracterizada por pendientes de entre 0 a 15 % y altitudes que varían entre 136 y 192 m s.n.m. Los suelos en su mayor proporción están desarrollados sobre areniscas y en general son profundos, bien drenados y de textura franco arenosa y franco arcillo arenosa (Molfino, 2000).

El trabajo se llevó a cabo desde noviembre 2007 a diciembre 2008 en un rodal de *Pinus taeda* instalado en julio de 2003 con una densidad de plantación de 1000 árbolesha<sup>-1</sup> (2,5 x 4 m). El área entre filas se caracteriza por presentar vegetación herbácea (pastizal natural). Entre el 26 de mayo y el 5 de junio del 2008 se realizó un tratamiento silvicultural que consistió en un raleo del 40% de los árboles (se retiraron 350-400 árbolesha<sup>-1</sup>) y una poda del 50% de la copa. En todo el período de estudio fueron evaluadas 10 parcelas experimentales, que se encuentran distribuidas al azar en la cuenca (Figura 3). Las mismas forman parte de aquellas definidas previamente por la empresa como parcelas “inventario” y en las cuales se cuenta con información dasométrica. En abril del 2008 fueron seleccionadas e instaladas cuatro parcelas

adicionales que representaron la situación testigo (sin raleo y sin poda), las cuales fueron evaluadas durante el período abril - diciembre de 2008. Cada parcela experimental representa un círculo de 314 m<sup>2</sup>.

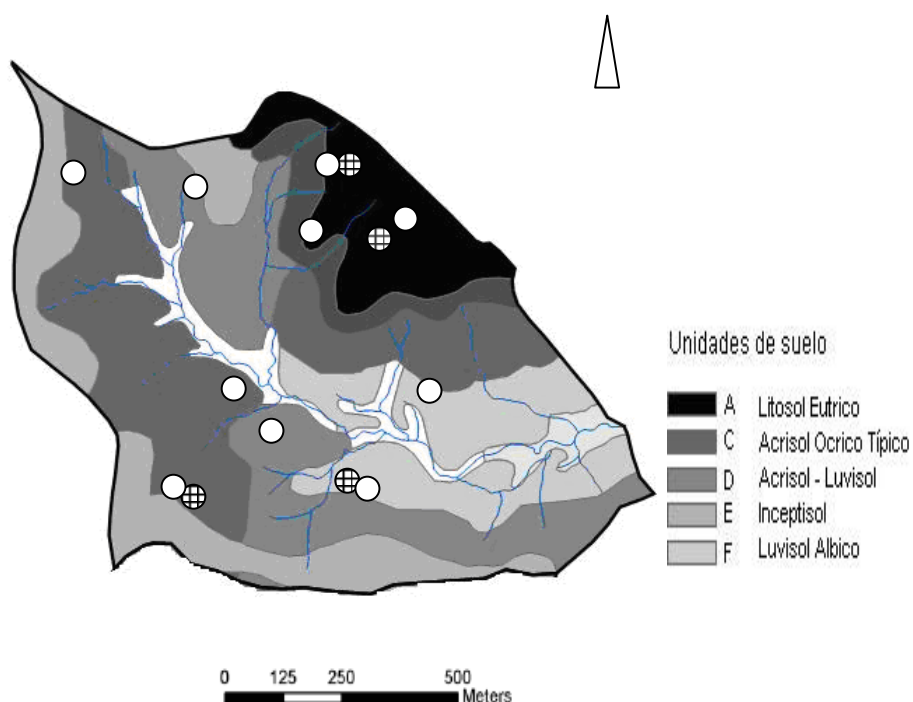


Figura 3. Mapa de suelos de la cuenca en el Establecimiento Forestal La Corona, Tacuarembó, y localización de las parcelas experimentales (○ : parcelas raleadas y podadas, ⊕: parcelas testigo).

En el cuadro 1 se presenta información edafológica adicional de las unidades de suelo en donde se encuentran ubicadas las parcelas experimentales.



Cuadro 1. Características de los suelos donde están ubicadas las parcelas experimentales en el Establecimiento Forestal La Corona, Tacuarembó (Molfino, 2000).

Tipo de suelo*	Nºhorizontes	Textura	Profundidad (cm)	Elevación (m)	Pendiente (%)	Área (%)
Litosol Éutrico (A) (Entisol/Lithic)	1	Franco arcillo- arenoso	10	180 - 220	0-2	11
Acrisol Ócrico Típico (C) (Typic Hapludult)	4	Arenoso franco	175	150 - 180	12-15	26
Acrisol y Luvisol (D) (Humic Hapludult)	4	Franco arenoso	175	145 - 160	6-12	20
Inceptisol (E) (Inceptisol)	1	Arenoso	35	160 - 180	0-5	16
Luvisol Álbico (F) (Humic Hapludult)	3	Franco arenoso	104	135 - 150	< 5	15

\* Las letras entre ( ) indican las unidades de suelo referidas en la Figura 3.

En el cuadro 2 se presentan los valores mensuales de precipitación y evapotranspiración potencial (Penman-Monteith) correspondientes al período estudiado (noviembre 2007 – diciembre 2008) en el área de estudio y los promedios climáticos mensuales de precipitación y evapotranspiración potencial de la región.

Cuadro 2. Totales mensuales (mm) de precipitación (P) y evapotranspiración potencial (ETP) en el período noviembre 2007 – diciembre 2008 en el Establecimiento Forestal La Corona, Tacuarembó y promedios climáticos ( $P_{(c)}$  y  $ETP_{(c)}$ ) de la región (Uruguay, INIA, 2010).

Año	2007		2008											
Mes	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
P	33	71	77	70	42	36	132	77	105	133	52	107	65	199
ETP	104	183	179	144	128	101	60	35	43	65	76	102	133	200
$P_{(c)}$	115	119	87	98	120	107	97	92	87	56	94	113	115	119
$ETP_{(c)}$	126	152	156	116	107	65	42	28	32	51	69	99	126	152

#### *Determinación del IAF*

El IAF se determinó mediante fotografía hemisférica digital. El procedimiento de adquisición y procesamiento de las imágenes fue adaptado del protocolo propuesto por Zhang et al. (2005). Las fotografías fueron tomadas cada seis semanas (Cuadro 3) con una cámara digital Nikon CoolPix 4500, montada sobre un trípode auto – nivelador, a la cual se le adjuntó un lente hemisférico (“ojo de pez”) Nikon FC-E8 con un campo de visión de 183°. Los registros fotográficos fueron realizados mientras no existía incidencia de radiación solar directa: antes del amanecer, luego del atardecer o en momentos que el cielo estaba completamente nublado. Se asumió una distribución espacial al azar de canopias esféricas.

En cada parcela y en cada fecha se tomaron fotografías en siete puntos distintos: en el punto medio entre filas y entre árboles (punto 1), a un metro de la fila entre árboles (puntos 2 y 4), en el punto medio entre árboles en la fila (puntos 3 y 5) y en el punto medio entre filas en línea con los árboles (puntos 6 y 7) (Figura 4). En cada uno de los puntos se tomaron tres fotografías utilizando una apertura fija (f5.3) y tres velocidades de obturación siguiendo el procedimiento sugerido por Zhang et al. (2005). Se seleccionó una foto por punto conformando así un conjunto de siete fotografías por

parcela (unidad de muestreo). Las imágenes fueron analizadas con el programa GLA<sup>1</sup> (Gap Light Analyzer, versión 2) (Frazer, 1999). Los valores de IAF fueron calculados por el programa GLA mediante el análisis de la fracción gap (fracción de cielo visible a través de la canopia). Para cada parcela y para cada fecha se calculó un IAF promedio ( $n=7$ ) y a los fines de este estudio se lo asignó al punto central de la unidad de muestreo (punto 1).

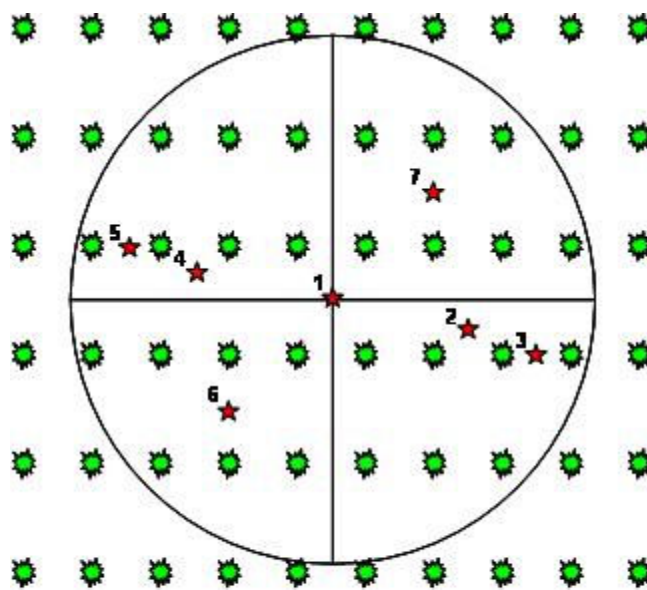




Figura 4. Localización de los puntos donde se realizaron las fotografías hemisféricas en cada parcela. Los símbolos  corresponden a los árboles y las  indican los puntos de medición.

<sup>1</sup> Programa de aplicación -base Windows- diseñado para importar y analizar fotografías hemisféricas (“ojo de pez”) digitales de canopias. Transforma píxeles de la imagen en clases de píxel de cielo y píxel de no cielo, estima el IAF efectivo según el cómputo de la fracción gap basado en el modelo de transmisión de luz.

Adicionalmente, en mayo, julio y diciembre de 2008, en cada punto de registro fotográfico y, en cada parcela, se determinó el IAF mediante un analizador de canopia vegetal LAI-2000<sup>2</sup> (LiCor Inc, USA) para analizar la correlación de los resultados entre ambas técnicas de estimación del IAF (Cuadro 3).

Cuadro 3. Cronograma de registros mediante fotografía hemisférica (FHD) y LAI-2000 (L) en las parcelas intervenidas (poda y raleo) y en las parcelas testigo.

Año	2007		2008											
Mes	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Parcelas intervenidas	FHD	FHD	FHD	FHD	FHD/L	FHD/L	FHD/L	FHD	FHD	FHD	FHD	FHD	FHD/L	FHD/L
Parcelas testigo							FHD/L	FHD/L	FHD	FHD	FHD	FHD	FHD/L	FHD/L

#### *Determinación de la ET<sub>m</sub>*

Se utilizó como base la ecuación de Penman-Monteith (Allen et al., 1998), para obtener una primera aproximación de la ET<sub>m</sub> de esta cubierta de pinos

$$ET_m = \frac{s \cdot (R_n - G) + \rho \cdot c_p \cdot (e_s - e) / r_a}{s + \gamma [1 + (r_s / r_a)]}$$

(mm/día)

donde: R<sub>n</sub> es la radiación neta, G es el flujo del calor en el suelo, e<sub>s</sub> es la presión saturante de vapor, e es la presión actual de vapor y (e<sub>s</sub> - e) representa el déficit de presión de vapor del aire, ρ es la densidad media del aire a presión constante, c<sub>p</sub> es el calor específico del aire, s representa la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación y temperatura, γ es la constante psicrométrica, y r<sub>s</sub> y r<sub>a</sub> son las resistencias

<sup>2</sup>Instrumental portátil que proporciona al instante una estimación del IAF de la canopia (basado en el análisis de la fracción gap) desde medidas de intercepción de luz obtenidas mediante sensores ópticos “ojo de pez”.

superficial (total) y aerodinámica. En el cálculo del balance de energía ( $R_n$ ) se utilizó un valor de albedo (radiación solar reflejada/radiación solar incidente) de 0,15. La ETm asume que no hay restricciones de agua disponible en el suelo y por ende las resistencias estomáticas, en el cálculo de la ETm, fueron consideradas mínimas. Los valores de resistencia de la superficie ( $r_s = \text{resistencia estomática}/\text{IAF}$ ) dependen de la resistencia estomática y del IAF del dosel; su valor fue obtenido en función de los datos de IAF calculados en el período. Los valores diarios de IAF se obtuvieron por interpolación lineal entre dos fechas de mediciones sucesivas.

Para el cálculo de la ETm correspondiente al período diciembre 2007 – diciembre 2008 se utilizaron los promedios diarios de temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ), humedad relativa del aire (%), velocidad del viento ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y los totales diarios de radiación solar incidente ( $\text{MJm}^{-2}$ ). Los datos meteorológicos fueron registrados mediante un sistema automático de adquisición de datos basado en un registrador modelo CR10X (Campbell Scientific, Logan, UT) ubicado en una zona cercana, fuera del rodal, y considerada representativa y de influencia en la cuenca de estudio.

#### *Análisis de la información*

Se efectuó un análisis lineal discriminante (Wilks, 1995) para agrupar las parcelas en “sitios” de la cuenca. Cada sitio fue definido según la profundidad del horizonte A del suelo (según la descripción de suelos realizada en el área por Molino, 2000) y el rendimiento de madera promedio ( $\text{m}^3/\text{árbol}$ , calculado en base al diámetro y altura de árboles, medidos por la empresa en noviembre de 2007).

Para el análisis espacial y temporal del IAF y de la ETm se confeccionó una base de datos que incluyó la información proveniente de las 10 parcelas durante todo el período de evaluación ( $n=90$ ). Para el análisis del efecto del tratamiento silvicultural (raleo y poda) se confeccionó una base de datos que incluyó el IAF y la ETm provenientes de ocho parcelas (cuatro parcelas con tratamiento y cuatro parcelas testigo pareadas) para las cuatro fechas evaluadas pos-tratamiento a partir de julio del 2008 ( $n=32$ ). Para cada uno de los análisis se realizaron ANAVA, aplicado a un muestreo,

mediante un modelo lineal de efecto fijo donde se contempló el efecto de la fecha como una medida repetida en el tiempo (Modelos 1 y 2, para el análisis espacial y temporal y del efecto del tratamiento, respectivamente). Se consideraron errores con estructura autorregresiva de orden uno (AR1) y varianzas heterocedásticas.

Modelo 1  $Y_{ijk} = \mu + \text{SITIO}_i + \text{FECHA}_j + (\text{SITIO} * \text{FECHA})_k + E_{ijk}$ .

Modelo 2  $Y'_{ijk} = \mu + \text{SITIO}'_i + \text{TRATAMIENTO}_j + E_{ijk} + \text{FECHA}'_l + (\text{TRATAMIENTO} * \text{FECHA})_{jl} + E_{ijkl}$

Donde: Y = IAF o ETm, es cada medida realizada en cada Sitio y Fecha

Y' = IAF o ETm, es cada medida realizada en cada Sitio y Fecha para cada tratamiento

Para las variables IAF y ETm fueron analizados los efectos de los factores sitio, fecha y tratamiento silvicultural. En todos los casos la comparación de medias se realizó mediante el test de Fisher y se consideró el valor de  $p = 0,05$  como el límite de significación estadística. Se realizó un análisis de correlación de Pearson (Conover, 1999) entre las determinaciones de IAF mediante fotografía hemisférica y LAI-2000. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando la versión libre del programa InfoStat (2009).

### 3. Resultados

#### *Clasificación de las parcelas experimentales.*

Las 10 parcelas experimentales fueron agrupadas en tres sitios diferentes en la cuenca de estudio. El análisis discriminante diferenció, en base a las variables seleccionadas (profundidad del horizonte A del suelo y  $m^3/\text{árbol}$ ), los tres sitios definidos *a priori* (tasa de error de clasificación = 0%) (Figura 5).

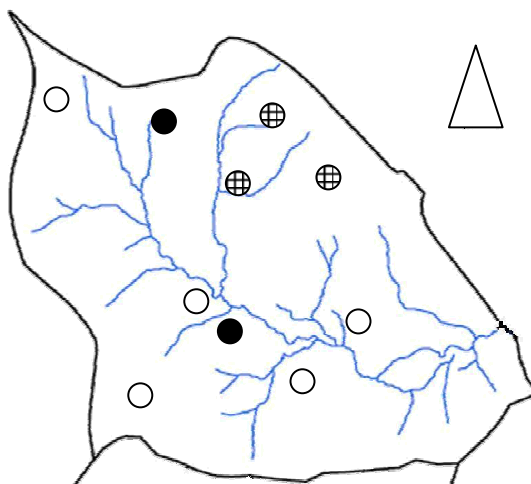


Figura 5. Clasificación de las parcelas experimentales en tres sitios diferentes en la cuenca en el Establecimiento Forestal La Corona, Tacuarembó: sitio 1 (⊕), sitio 2 (●) y sitio 3 (○).

El sitio 1 corresponde a la zona de mayor elevación de la cuenca (200 m s.n.m.) y se caracteriza por presentar suelos superficiales y con baja productividad. Por otro lado el sitio 3 está representado por suelos más profundos y de mayor productividad, y el sitio 2 representa una situación intermedia en cuanto a profundidad de los suelos y productividad. Los sitios 2 y 3 están ubicados en zonas que varían entre 150 y 180 m s.n.m.

#### *Análisis temporal del IAF y de la ETm*

El IAF presentó una marcada variación a lo largo del año con un descenso en los meses de invierno, donde se sumó la disminución provocada por la poda y el raleo que recibieron estas parcelas (Figura 6). En promedio ( $n=10$ ) el mes de febrero presentó el valor más alto de IAF ( $1,69 \pm 0,45$ ) y el menor valor de IAF correspondió al mes de agosto ( $0,53 \pm 0,17$ ). La fecha tuvo un efecto muy significativo ( $F_{(8,89)}=70,96$ ;  $p<0,0001$ ) sobre el IAF y explicó un 81% de la variación del mismo (Cuadro 4).

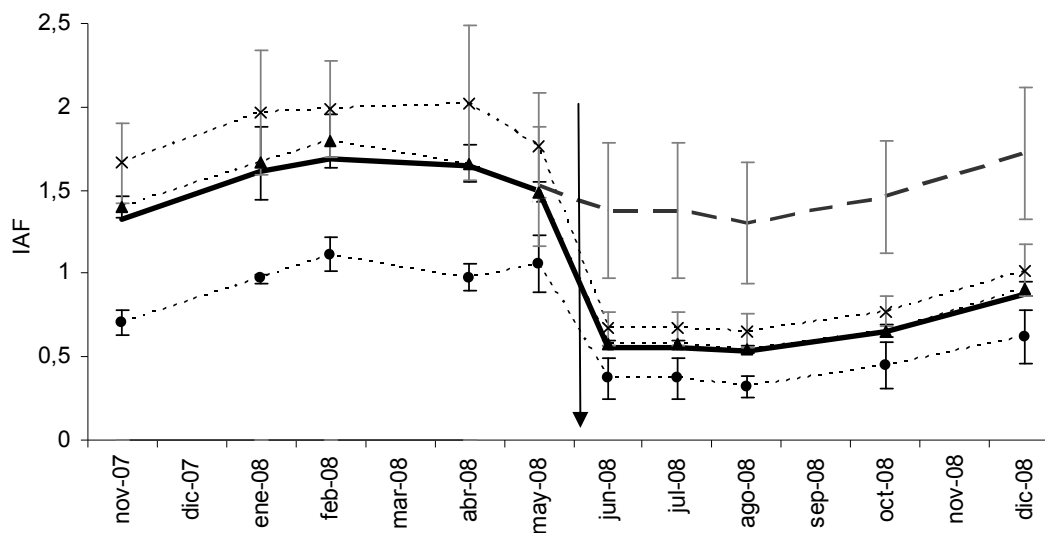


Figura 6. Índice de Área Foliar (IAF) (media  $\pm$  d.e.) en los tres sitios que recibieron manejo (sitio 3: x , sitio 2: ▲ y sitio 1: ●) y el valor promedio (n=10, línea negra) en el Establecimiento Forestal La Corona (Tacuarembó) en el período noviembre 2007 – diciembre 2008. La línea punteada (----) representa el IAF promedio en las parcelas sin poda y sin raleo. La flecha indica el momento del año donde se realizó el tratamiento silvicultural.

Cuadro 4. Resultado de las pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III) para el IAF y la ETm (Modelo 1).

	IAF			ETm		
	gl	F-value	p-value	gl	F-value	p-value
(Intercept)	1	1046,66	<0,0001	1	1865,65	<0,0001
SITIO	2	42,30	<0,0001	2	19,68	<0,0001
FECHA	8	70,96	<0,0001	8	814,01	<0,0001
SITIO:FECHA	16	3,09	0,0007	16	7,87	<0,0001



La estacionalidad de la ETm resultó muy marcada (Figura 7), en promedio (n=10) el mayor valor correspondió al mes de enero (132 mm  $\pm$  21) y el menor valor se registró en junio (16 mm  $\pm$  3). La fecha tuvo un efecto muy significativo ( $F_{(8,89)} = 814,01$ ;  $p < 0,0001$ ) en la ETm y explicó un 97,5% de su variación (Cuadro 4).

La incidencia observada del efecto de la fecha en el IAF y en la ETm, en base al análisis realizado, debe ser atribuida al efecto conjunto del momento del año y el manejo silvicultural realizado.

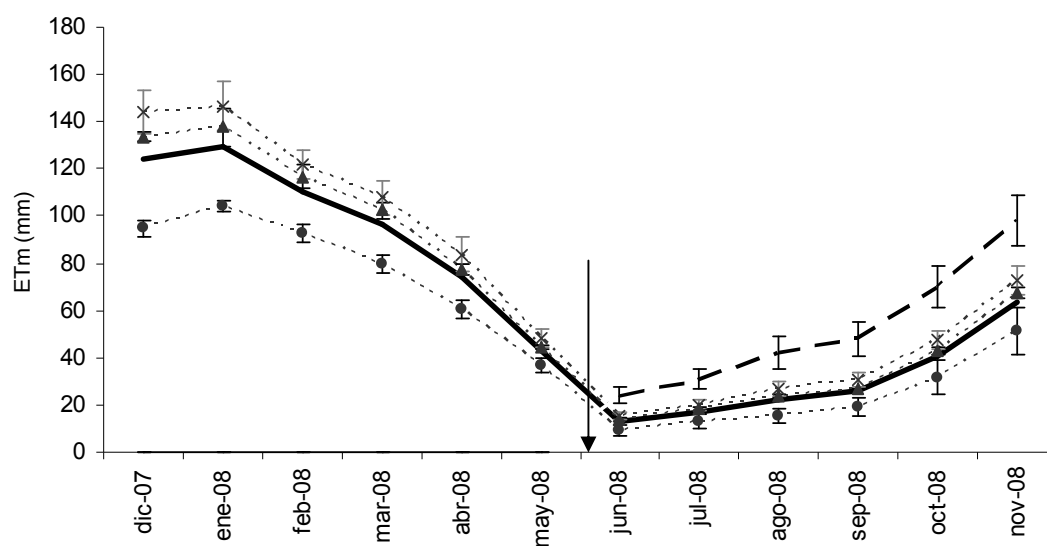


Figura 7. Evapotranspiración máxima (ETm) mensual (media  $\pm$  d.e.) para los 3 sitios de la cuenca (sitio 3: x, sitio 2:▲ y sitio 1:●) y el valor promedio (n=10, línea negra) en el Establecimiento Forestal La Corona (Tacuarembó) en el período diciembre 2007 – noviembre 2008. La línea punteada (- - -) representa la ETm promedio en las parcelas sin poda y sin raleo. La flecha indica el momento del año donde se realizó el tratamiento silvicultural.

### *Análisis espacial del IAF y de la ETm*

Los valores de IAF fueron significativamente diferentes ( $F_{(2,89)} = 42,3$ ;  $p < 0,0001$ ) entre los sitios 1 y 3 de la cuenca: 0,73 y 1,39 respectivamente. El factor sitio explicó un 12% de la variación del IAF. Desde el inicio del estudio, en promedio ( $n=10$ ), los menores valores correspondieron al sitio 1 ( $0,71 \pm 0,08$ ) y los mayores valores se registraron en el sitio 3 ( $1,66 \pm 0,24$ ). Para todas las fechas de medición los valores más bajos de IAF correspondieron al sitio que presentó los menores valores iniciales de IAF (sitio 1). La interacción entre los factores sitio y fecha tuvo efecto significativo ( $F_{(16,89)} = 3,09$ ;  $p = 0,0007$ ) sobre el IAF (Cuadro 4).

En tanto que para los tres sitios, el valor más bajo de IAF se obtuvo en el mismo mes (agosto), el máximo valor de IAF se observó en el mes de abril para el sitio 3 y en el mes de febrero en los sitios 1 y 2. Esta interacción explicó un 7% de la variación del IAF.

Acorde a la variación presentada por el IAF, la ETm presentó una variación significativa entre los sitios de la cuenca ( $F_{(2,89)} = 19,68$ ;  $p < 0,0001$ ) (Cuadro 4). En el sitio 3 los valores máximos y mínimos de ETm fueron 156 mm/mes y 17 mm/mes y en el sitio 1 correspondieron a 105 mm/mes y 10 mm/mes. La variación de la ETm fue explicada en un 0,6% por el factor sitio. Los valores iniciales de ETm (nov-2007) fueron significativamente diferentes entre los sitios estudiados, en promedio los menores valores correspondieron al sitio 1 ( $95 \text{ mm/mes} \pm 4$ ) y los mayores valores se registraron en el sitio 3 ( $144 \text{ mm/mes} \pm 9$ ). La interacción entre el sitio y la fecha tuvo efecto significativo en la ETm, esta interacción explicó un 1,9% de la variación de la ETm. Los sitios 2 y 3 se diferenciaron significativamente solo al inicio del estudio (nov-2007). El sitio 1 en tanto presentó valores significativamente menores que los sitios 2 y 3 en los meses de nov-2007, enero, febrero, abril, julio, octubre y diciembre del 2008.

### *Efecto del manejo silvicultural sobre el IAF y la ETm*

En la Figura 8 se visualiza la magnitud de la disminución del IAF provocada por el tratamiento silvicultural.

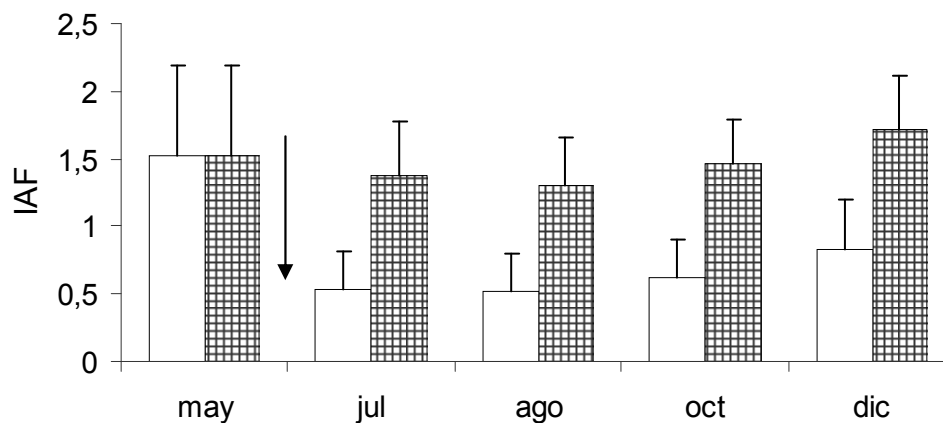


Figura 8. Índice de área foliar (IAF) (promedio  $\pm$  d.e.,  $n=4$ ) en las parcelas testigo (barra punteada) y en las parcelas pareadas, con manejo (barra blanca) en el Establecimiento Forestal La Corona (Tacuarembó) en el período mayo 2008 – diciembre 2008. La flecha indica el momento del año donde se realizó el tratamiento silvicultural.

El tratamiento silvicultural redujo en promedio un 62,8% el IAF respecto a las parcelas testigo ( $F_{(1,31)} = 182,37$ ;  $p < 0,0001$ ) (Cuadro 5) y explicó un 44,5% de la variación del IAF. Sin embargo, la disminución del IAF debido al tratamiento silvicultural no fue la misma en toda la cuenca: el porcentaje promedio de reducción del IAF fue de un 70,9% en el sitio 1 y de un 54,7% en el sitio 3. Por otro lado, en el período pos-tratamiento el aumento del área foliar de las parcelas intervenidas fue del orden del 10% mensual, mientras que las parcelas testigo presentaron un aumento del área foliar del 6% mensual. La variación del área foliar en el período post-tratamiento fue calculada como la tasa de incremento del IAF entre julio y diciembre de 2008  $((\text{IAF diciembre} - \text{IAF julio}) / \text{IAF diciembre}) / 4$ .

Cuadro 5. Resultado de las pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III) para el IAF y la ETm (Modelo 2).

	IAF			ETm		
	gl	F-value	p-value	gl	F-value	p-value
(Intercept)	1	1139,22	<0,0001	1	818,92	<0,0001
SITIO	1	135,08	<0,0001	1	26,57	<0,0001
TRATAMIENTO	1	182,37	<0,0001	1	52,58	<0,0001
FECHA	3	30,81	<0,0001	3	336,72	<0,0001
TRATAMIENTO:FECHA	3	0,94	0,4374	3	9,47	0,0003

No se evidenció una diferencia significativa del IAF entre las mediciones de julio y agosto inmediatas al tratamiento silvícola (Cuadro 6). La variación del IAF en el período post-tratamiento (jul-dic. 2008) fue explicada en un 33% por el factor sitio mientras que la fecha lo hizo en un 22,5%. La disminución del IAF debido a la poda y el raleo provocó una disminución significativa ( $F_{(1,31)} = 52,6$ ;  $p < 0,0001$ ) en los valores de ETm (Cuadro 5). Aunque significativa, la incidencia del tratamiento silvicultural explicó solo un 4,7% de la variación de la ETm, en tanto el factor sitio explicó un 2,4% y la fecha explica un 90,4% de esta variación en el período post-tratamiento.

Cuadro 6. Valores promedio (n=32) del índice de área foliar (IAF) y de la evapotranspiración máxima (ETm) según tratamiento, sitio y fecha de medición en el período pos-tratamiento (julio – diciembre 2008).

	IAF	ETm (mm/d)
Sin manejo	1,47a (0,06)	2,01a (0,06)
Con manejo	0,63b (0,03)	1,20b (0,09)
Sitio 3	1,32a (0,04)	1,86a (0,07)
Sitio 1	0,78b (0,04)	1,36b (0,07)
Diciembre	1,28a (0,04)	2,89a (0,07)
Octubre	1,04b (0,04)	1,77b (0,07)
Agosto	0,96c (0,04)	1,02c (0,07)
Julio	0,91c (0,04)	0,76d (0,07)

*Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). Valores entre paréntesis representan el error estándar.*

La interacción entre el tratamiento y la fecha de medición tuvo efecto significativo ( $F_{(3,31)} = 9,5$ ;  $p=0,0003$ ) sobre la ETm y explicó un 2,5 % de su variación. Los valores mínimos y máximos de ETm diaria varían significativamente entre 0,54 y 3,49 para los casos con manejo silvicultural en el mes de julio y para aquellos sin manejo en el mes de diciembre respectivamente (Cuadro 7).

Cuadro 7. Valores promedio (n=32) de evapotranspiración máxima (ETm) para los tratamientos con y sin manejo silvicultural en cada fecha de medición (CT= con poda y raleo; ST= sin poda y raleo).

Fecha	Tratamiento	ETm (mm/día)
Julio	CT	0,54e (0,11)
Julio	ST	0,98d (0,07)
Agosto	CT	0,70e (0,11)
Agosto	ST	1,34c (0,07)
Octubre	CT	1,27c (0,11)
Octubre	ST	2,25b (0,07)
Diciembre	CT	2,29b (0,11)
Diciembre	ST	3,49a (0,07)

*Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). Valores entre paréntesis representan el error estándar.*

#### *Análisis comparativo del IAF estimado a partir de LAI-2000 y FH*

Las determinaciones de IAF mediante fotografía hemisférica digital y LAI-2000 presentaron una alta correlación ( $r = 0,9$ ; Figura 9).

Los menores niveles de dispersión entre las dos técnicas fueron observados a bajos valores de IAF. En tanto que las diferencias en el IAF estimado mediante ambas técnicas se incrementan a IAF superiores a 2,5.

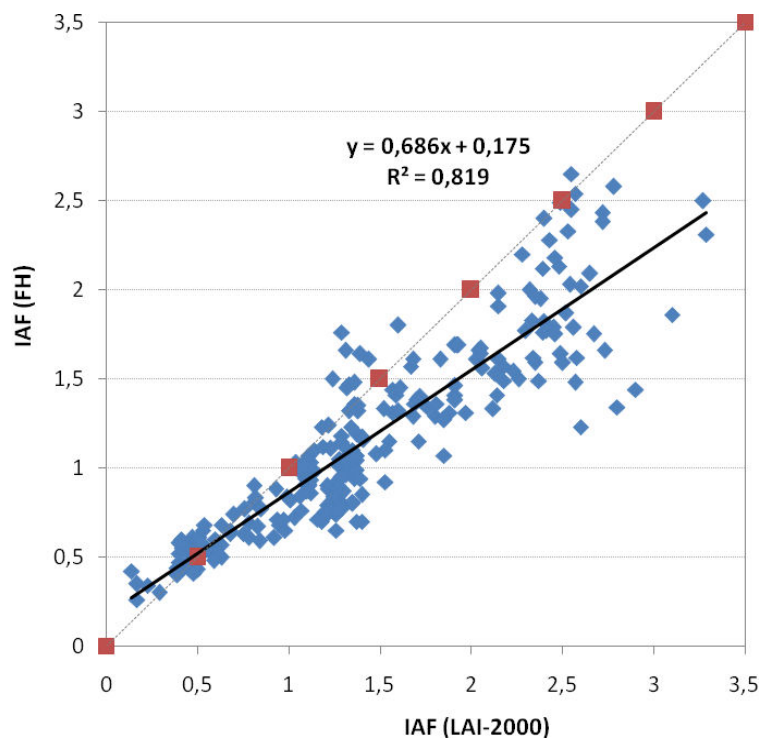


Figura 9. Relación entre el índice de área foliar (IAF) estimado por fotografía hemisférica (FH) e IAF estimado por LAI-2000 en el Establecimiento Forestal La Corona (Tacuarembó).

#### 4. Discusión

La descripción de la estructura del dosel constituye un elemento clave en la modelación de los procesos biofísicos que ocurren en los ecosistemas forestales (Landsberg, 1986). En el presente trabajo se describió la dinámica foliar en un rodal joven de *Pinus taeda* en el año de su primer raleo y poda precomercial. El raleo y la poda tuvieron influencia en la estructura del dosel y esta a su vez se encuentra fuertemente relacionada con aspectos funcionales del ecosistema, como lo es la evapotranspiración. El IAF obtenido mediante una técnica rápida y sencilla (fotografía hemisférica digital) fue considerado como el parámetro descriptor y como un importante atributo de la estructura del rodal.

El comportamiento estacional del área foliar refleja una clara diferenciación entre el período de máxima expansión de acículas hacia el final del verano y el período de máxima pérdida foliar acumulada hacia el final del invierno (Beadle et al., 1982; Dalla Tea y Jokela, 1991; Gholz et al., 1991; Allen et al., 2004). El área foliar exhibió una amplia variación anual la cual responde a una dinámica foliar típica de la especie *P. taeda* (Dougherty et al., 1995; Sampson et al., 2003). Este patrón mostró un IAF tres veces menor en invierno respecto al verano, producto de la oscilación estacional y de la influencia de la intervención silvicultural realizada en junio del mismo año. En las parcelas testigo, sin manejo silvicultural, también se observó una dinámica estacional: el IAF fue 25% superior en la época estival (febrero) respecto a la invernal (agosto). La ausencia de antecedentes nacionales no permite comparar estos resultados con estudios en el país, sin embargo estos mismos patrones del área foliar fueron reportados para *P. taeda* por Dougherty et al. (1995) y Sampson et al. (2003) en la región de origen de la especie (SE de Estados Unidos). Gholz et al. (1991) en esa misma región encontraron una variación estacional del orden del 40-50% en un rodal de dosel cerrado de *Pinus elliottii* (especie afín al *P. taeda*); la razón principal de esta variación fue atribuida fundamentalmente al período de expansión de hojas que ocurre hacia el final de su estación de crecimiento. En nuestro caso la acentuada variación anual se explica por la pérdida foliar adicional provocada por la poda y el raleo realizado a principios del invierno.

La cobertura foliar aumenta con el desarrollo del rodal y se estabiliza a un determinado nivel de radiación interceptada y tasa de respiración del follaje, momento que corresponde al cierre del dosel (Muñoz et al., 2008). Esta situación no fue observada en el presente trabajo, los valores de IAF se encontraron por debajo del nivel óptimo (5,5) asociado a la máxima productividad en *P. taeda* (Gholz, 1986).

En nuestro trabajo el IAF promedio varió a lo largo del año entre 0,53 y 1,69 en la situación con raleo y poda y entre 1,30 y 1,70 en la situación testigo. Cabrelli et al. (2006) en Entre Ríos (Argentina) en *P. elliottii* obtuvieron valores de IAF de 1,45 en rodales de 19 años y a una densidad de 586 árbolesha<sup>-1</sup> y de 3,01 para rodales de 29 años



y a una densidad de 900 árboles.ha<sup>-1</sup> (obtenidos mediante fotografía hemisférica). Samuelson et al. (2004) y Will et al. (2005) obtuvieron IAF superiores a los obtenidos en nuestro estudio, en el entorno de 2,80 y de 2,52 a 4,9 respectivamente. Estos trabajos corresponden a rodales de *P. taeda* de edad similar pero de mayor densidad que el analizado en este trabajo, en la región SE de Estados Unidos (con características climáticas y de sitio semejantes al nuestro). Esta diferencia puede explicarse no solo por la densidad de árboles de estos rodales sino también por la metodología directa de determinación del IAF (calculado a través de la medida del área específica de hoja mediante colecta de acículas). Esto indicaría una probable subestimación del IAF obtenido mediante FHD en relación a la medida directa.

A pesar de que la estación del año en conjunto con el manejo silvicultural explicaron el mayor porcentaje de la variación del IAF, en todo el período de evaluación, el sitio también tuvo un efecto significativo sobre el área foliar. *P. taeda* exhibe una importante variación en la producción de follaje en respuesta a la fertilidad y a la disponibilidad de agua del sitio (Hennessey et al., 1992; Dougherty et al., 1995). En nuestro caso esto se observa tanto en la magnitud como en el momento en que los distintos sitios alcanzaron los máximos valores de IAF. El sitio de mayor productividad y agua disponible en el suelo (sitio 3) duplicó el máximo valor que alcanzó el sitio con menos agua disponible (sitio 1). En la Figura 6 puede observarse, además de la magnitud, el desfase en el momento que se obtiene el máximo valor de IAF en los distintos sitios de la cuenca. En el sitio 1 el pico máximo de IAF (0,98) se registró dos meses antes que el máximo IAF (2,02) en el sitio 3. Esto podría explicarse por la mayor deficiencia de evapotranspiración relativa  $(1-ETR/ETP)^3$  que presentó el sitio de menor disponibilidad de agua. En la etapa de mayor desarrollo de acículas (noviembre 2007 – abril 2008) ocurrió un período de sequía en la zona de estudio, los registros pluviométricos fueron inferiores a los valores promedio de precipitación e inferiores a la

---

<sup>3</sup> ETP: milímetros de agua evapotranspirados potencialmente por una superficie vegetal estándar, con óptimo suministro de agua disponible en el suelo y afectada exclusivamente por la demanda atmosférica. ETR: milímetros de evapotranspiración real producto de la sumatoria del agua disponible en el suelo y la precipitación (en el caso que la precipitación sea < a la ETP; de lo contrario ETR se asume igual a la ETP)

demanda atmosférica (ETP). En los dos primeros meses de este período esto se tradujo en una deficiencia de la evapotranspiración relativa que fue de 0,58 y 0,61 en el sitio de menor agua disponible y de 0,29 y 0,53 en el sitio de mayor disponibilidad de agua.

El raleo y la poda fueron la principal causa de la variación de la cobertura foliar en el período pos-tratamiento silvicultural (julio-diciembre 2008) provocando una reducción muy significativa del IAF (62,8% promedio). El rango de reducción varió entre 55% y 71% entre los sitios 3 y 1. Resultados similares respecto a la reducción del área foliar debido al manejo silvicultural fueron obtenidos por Hennessey et al. (2004) para *P. taeda* en SE de Estados Unidos (Oklahoma). Los autores reportaron que el raleo a los 9 años (2078 árbolesha<sup>-1</sup>) del 75% y del 50% del área basal original redujo el IAF en un 55% y 33% respectivamente.

El desarrollo del follaje depende principalmente de la penetración de luz y de la disponibilidad de nutrientes y agua (Barclay et al., 1986, Albaugh et al., 2006). En los seis meses post-tratamiento las parcelas podadas y raleadas presentaron menores valores de IAF respecto a las parcelas testigos. Sin embargo, el aumento del área foliar en ese período fue superior en las parcelas podadas y raleadas; se infiere entonces que los valores de IAF en las parcelas intervenidas superen el IAF de las parcelas no intervenidas en las próximas estaciones de crecimiento. Muñoz et al. (2008) reportaron mayores valores de IAF en *Eucalyptus nitens* luego de 9 años de raleados y podados. Gillespie et al. (1994) y Barclay et al. (1986) encontraron similares tendencias como respuesta al raleo en *P. taeda* y *Pseudotsuga menziessi* respectivamente.

La estacionalidad de la ETm resultó muy marcada: el momento del año explicó en un 97,5% la variación de la ETm, siendo 8 veces menor en invierno (junio) respecto al verano (enero). Esta oscilación responde a un proceso evapotranspirativo dinámico que es gobernado principalmente por la energía disponible la cual es responsable del cambio de estado del agua en este proceso.

La disminución del área foliar debido al manejo silvicultural se vio reflejada en una reducción significativa de la ETm: la disminución inmediata de la ETm fue en promedio del orden del 45%. Resultados similares fueron reportados en un rodal de *P.*

*taeda* en la región SE de Estados Unidos donde raleos del 50 al 75% del área basal disminuyeron un 29 a 43% la transpiración de los rodales durante la primera estación de crecimiento y una disminución del 12% en la segunda estación de crecimiento (Stogsdill et al., 1992). Por otro lado investigaciones basadas en balances hidrológicos en plantaciones forestales coinciden en reportar que los raleos tienen un efecto inmediato sobre el ciclo hidrológico. Tanto el aumento del agua en el suelo como del escurrimiento son atribuidos, principalmente, a una reducción de la intercepción de agua de precipitación y a un descenso de la ET (Huber et al., 1985, Cregg et al., 1990, Stogsdill et al., 1992, Grace et al., 2006, Amatya y Skaggs, 2008).

En este estudio no se consideró el efecto de la cubierta herbácea presente bajo los pinos en la evapotranspiración de ésta superficie. Las modificaciones introducidas en la estimación de la ET (asumiendo óptima disponibilidad de agua -ETm-) mediante la ecuación de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) fueron: la inclusión del IAF en el cálculo de la resistencia de la superficie y el ajuste del componente energético por el albedo específico de las coníferas. Estas modificaciones permitieron evaluar el efecto del raleo y de la poda en la ETm. Se reconoce que para alcanzar estimaciones empíricas más ajustadas de la ETm en superficies forestales es necesario, en futuras investigaciones, contemplar ajustes en los aspectos aerodinámicos del proceso evapotranspirativo y considerar la contribución relativa en la ET de la cubierta herbácea bajo el dosel.

La asociación encontrada entre el IAF obtenido mediante la técnica de LAI-2000 y FHD fue alta ( $r = 0,90$ ) y similar a las reportadas por Zhang et al. (2005). La validación de la técnica de estimación de IAF no fue objeto de este trabajo y se asumió a la FHD como una medida recomendada, al igual que el LAI-2000, para obtener IAF en cubiertas de coníferas (Chen et al., 1997, Leblanc et al., 2002, Jonckheere et al., 2004). Sin embargo reconocemos que estas estimaciones ópticas generalmente subestiman el IAF y que deberían ser corregidas para alcanzar un valor de IAF “verdadero” (Jonckheere et al., 2004; Zhang et al., 2005). Las principales causas de esta subestimación radican en que no es posible distinguir directamente los elementos “verdes” de los no verdes

(ramas, troncos, flores) y en el agrupamiento típico de las acículas (“clumping”) (Welles, 1990; Chen, 1996; Weiss et al., 2004). Para el propósito de nuestro estudio fueron utilizados los valores de IAF no corregidos y por lo tanto correspondieron a valores de IAF efectivo o Índice de Área de Planta (IAP). Esta denominación aparece como el término más apropiado para describir el IAF estimado mediante instrumental óptico ya que reconoce las limitaciones de la subestimación del IAF que presentan estas técnicas (Chen y Black, 1992; Garrigues et al., 2008).

La información discutida anteriormente permite subrayar el hecho de que la cobertura foliar participa activamente en la función evapotranspirativa de las cubiertas forestales. De esta manera, el área foliar constituye una variable importante para relacionar la estructura de la vegetación con algunos aspectos del funcionamiento ecosistémico de los rodales como el intercambio de masa y energía con la atmósfera (Running y Coughlan, 1989). El conocimiento de estos aspectos es fundamental para entender los impactos que provocan los cambios en el uso de la tierra cuando se establecen plantaciones forestales.

### **Agradecimientos**

Agradecemos a Juan Pedro Posse y George Chescheir por avalar esta investigación, por su asesoramiento y apoyo. Agradecemos a Oscar Bentancur por su asesoramiento en el análisis estadístico. Agradecemos a Juliana Ivanchenko y Gerardo Osorio por su generosa asistencia en el campo y a la empresa Weyerhaeuser S.A. por proporcionar el apoyo humano, logístico y financiero.

## **Bibliografia**

- Albaugh, T., Allen, H., Fox, T., 2006. Individual tree crown and stand development in *Pinus taeda* under different fertilization and irrigation regimes. *Forest Ecology and Management* 234, 10-23.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements-FAO. Irrigation and drainage paper 56. FAO, Water Resources, Development and Management Service. Rome.
- Allen, Ch., Will, R., Sarigumba, T., Jacobson, M., Daniels, R., Kennerley, S., 2004. En: Connor, K. (Ed.). Proceedings of the 12<sup>th</sup> biennial southern silvicultural research conference. Gen. Tech. Rep. SRS-71. Asheville, NC, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, p.594.
- Amatya, D.M., Skaggs, R.W., Blanton, C.D., Gilliam, J.W., 2006. Hydrologic and water quality effects of harvesting and regeneration of a drained pine forest. En: Williams and Nettles (Eds.). Proc. Of the ASABE-Weyerhaeuser sponsored Int'l Conference on Hydrology and Management of Forest Wetlands, New Bern, North Carolina.
- Amatya, D.M., Skaggs, R.W., 2008. Effects of Thinning on Hydrology and Water Quality of a Drained Pine Forest in Coastal North Carolina. En: Tollner E.W., Saleh, A. (Eds.). 21st Century Watershed Technology: Improving Water Quality and Environment. Proceeding of the 29 March – April 2008 Conference, Concepción, Chile, Publication date 29 March 2008. ASABE PUBLICATION Lumber 701P0208cd.
- Barclay, H., Pang, P., Pollard, F., 1986. Aboveground biomass distribution within trees and stands in thinned and fertilized Douglas-fir. *Canadian Journal Forest Research* 16, 438-442.
- Beadle, C., Talbot, H., Jarvis, P., 1982. Canopy structure and leaf area index in a mature Scots pine forest. *Forestry* 55, 105-123.

- Best, A., Zhang, L., McMahon, T., Western A., Vertessy, R., 2003. A critical review of paired catchment studies with reference to seasonal flows and climatic variability. MDBC Publication 11/03. Murray-Darling Basin Commission, Canberra, Australia.
- Cabrelli, D., Rebottaro, S. y Effron, D., 2006. Caracterización del dosel forestal y del microambiente lumínico en rodales con diferente manejo, utilizando fotografía hemisférica. *Quebracho* 13, 17-25.
- Chen, J., Black, T., 1992. Defining leaf-area index for non-flatleaves. *Plant Cell Environment* 15, 421-429.
- Chen, J., 1996. Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. *Agricultural and Forest Meteorology* 80, 135-163.
- Chen, J., Rich, P., Gower, S., Norman, J., Plummer, S., 1997. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques and measurements. *Journal of Geophysical Research* 102, 29429-29443.
- Chescheir, G.M., Von Stackelberg, N., Amatya, D. and Skaggs, R., 2006. Effects of afforestation on the hydrologic behavior of a basin in the Tacuarembó River. Progress Report for 2005-06 submitted to Weyerhaeuser Foundation. Biological & Agricultural Engineering Department, North Carolina State University, Raleigh, NC, USA.
- Cregg, B.M., Hennessey, T.C., Dougherty, P.M., 1990. Water Relations to Loblolly Pine Trees in Southeastern Oklahoma following pre-commercial thinning. Oklahoma Agricultural Experimental Station, Oklahoma State University.
- Conover, W., 1999. *Practical Nonparametric Statistics*. Wiley, J & Sons (Eds.), New York.
- Dalla Tea, F., Jokela, E., 1991. Needlefall, canopy light interception, and productivity of young intensively managed slash and loblolly pine stands. *Forest Science* 37, 1298-1313.
- Davi, H., Baret, F., Dufrêne, E., 2008. Effect of thinning on LAI variance in heterogeneous forest. *Forest Ecology and Management* 256, 890-899.

- Doorenbos, J. and Kassam, A., 1979. Efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos. FAO. Riego y Drenaje (33). Roma, Italia. pp. 104-106.
- Dougherty, P., Hennesey, T., Zarnoch, S., Stenberg, P., Holeman, R., Wittwer, R., 1995. Effects of stands development and weather on monthly leaf biomass dynamics of a loblolly pine (*Pinus taeda* L.) stand. Forest Ecology and Management 72, 213-227.
- Frazer, G.W., Canham, C.D., and Lertzman, K.P. 1999. Gap Light Analyzer (GLA): Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation Copyright © 1999: Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York.
- Garrigues, S., Shabanov, N.V., Swanson, K., Morisette, J.T., Baret, F., Myneni, R.B., 2008. Intercomparison and sensitivity analysis of Leaf Area Index retrievals from LAI-2000, AccuPAR, and digital hemispherical photography over croplands. Agricultural and Forest Meteorology 148, 1193-1209.
- Gholz, H., 1986. Canopy development and dynamics in relation to primary productivity. En: Fujimori, T., Whitehead D. (Eds.). Proceedings of the IUFRO workshop on Crown and Canopy Structure in Relation to Productivity. Forestry and Forest Products Research. Inst., Ibaraki, Japón, pp. 224-242
- Gholz, H., Vogel, S., Cropper, W. Jr., McKelvey, K., Ewel, K., Teskey, R., Curran, P., 1991. Dynamics of canopy structure and light interception in *Pinus elliottii* stands of north Florida. Ecological Monographs 61, 33-51.
- Grace III, J.M., Skaggs, R.W., Chescheir, G.M., 2006. Hydrologic and Water Quality Effects of Thinning Loblolly Pine. Trans. ASABE 49(3):645-654.
- Guillespie, A., Allen, H., Vose, J., 1994. Amount and vertical distribution of foliage of young loblolly pine trees affected by canopy position and silvicultural treatment. Canadian Journal of Forest Research 24, 1337-1344.

- Hennessey, T., Dougherty, P., Cregg, B., Wittwer, R., 1992. Annual variation in needle fall of a loblolly pine stand in relation to climate and stand density. *Forest Ecology and Management* 51, 329-338.
- Hennessey, T., Dougherty, P., Lynch, T., Wittwer, R., Lorenzi, E., 2004. Long-term growth and ecophysiological responses of a southeastern Oklahoma loblolly pine plantation to early rotation thinning. *Forest Ecology and Management* 192, 97-116.
- Huber, A., Oyarzún, C., Ellies, A., 1985. Balance hídrico en tres plantaciones de *Pinus radiata*. II: Humedad del suelo y evapotranspiración. *Bosque* 6, 74-82.
- Huber, A., Lopez, D. 1993. Cambios en el balance hídrico provocados por tala rasa de un rodal adulto de *Pinus radiata* (D. Don.), Valdivia, Chile. *Bosque* 14, 11-18.
- InfoStat, 2009. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackarts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M. and Baret, F., 2004. Reviews of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121, 19-35.
- Jones, H., 2004. Introduction: environmental and physiological control of evapotranspiration (ET) from vegetation. En: Workshop on Water Use of Woody Crops: techniques, issues, modeling and applications on water management. Ilhavo, Portugal.
- Landsberg, J. J. 1986. *Physiological Ecology of Forest Production*. Academic Press. London. 198 p.
- Leblanc, S., Fernandes, R., Chen, J., 2002. Recent advancements in optical field leaf area index, foliage heterogeneity, and foliage angular distribution measurements. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium* 5, 2902-2904.
- Lima, W.P., 1987. *Impacto ambiental do eucalipto*. 1.ed. Universidade de Sao Paulo, Sao Paulo, 291 p.



- Molfino, J., 2000. Estudio detallado de suelos de dos cuencas en el Departamento de Tacuarembó. Proyecto de instalación de cuencas experimentales para el estudio de efectos del establecimiento de áreas forestales con pino en Uruguay. COLONVADE S.A. Uruguay, 24 p.
- Monteith, J., 1965. Evaporation and environment. Symposium of Society Exp. of Biology. 19:205-234.
- Monteith, J., Unsworth, M., 1990. Principles of Environmental Physics. Second edition. Edward Arnold, London. 291 p.
- Morissette, J.T., Baret, F., Privette, J.L., Myneni, R.B., Nickeson, J., Garrigues, S., Shabanov, N.V., Weiss, M., Fernandes, R., Leblanc, S., Kalacska, M., Sánchez-Azofeifa, G.A., Chubey, M., Rivard, B., Stenberg, P., Rautiainen, M., Voipio, P., Manninen, T., Pilant, A., Lewis, T., Iiams, J., Colombo, R., Meroni, M., Busetto, L., Cohen, W., Turner, D., Warner, E.D., Petersen, G.W., Seufert, G., Cook, R., 2006. Validation of global moderate-resolution LAI Products: a framework proposed within the CEOS Land Product Validation subgroup. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 44, 1804–1814.
- Muñoz, F., Espinosa, M., Cancino, J., Rubilar, R., Herrera, M., 2008. Efecto de poda y raleo en el área foliar de *Eucalyptus nitens*. Bosque 29, 44-51.
- Norman, J., Campbell, G., 1989. Canopy structure. In Percy, R., Ehleringer, J., Mooney, H., Rundel, P. (Eds.), Plant Ecology: Field Methods and Instrumentation. Chapman & Hall, London, pp. 301-325.
- Oyarzún, C., Huber, A., 1999. Balance hídrico en plantaciones jóvenes de *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata* en el sur de Chile. TERRA Latinoamericana. 17, 35-44.
- Penman, H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. Royal Society of London Proceeding. Serie A, 193, 120-146.
- Rosenberg, N.J., Blad, B.L. and Verma, S.B. 1983. Microclimate, the Biological Environment. Second edition John Wiley & Sons. New York. pp. 495.

- Running, S., Coughlan, J., 1988. A general model for forest ecosystem processes for regional application. I. Hydrologic balance, canopy gs exchange, and primary production processes. *Ecological Modelling* 42, 125-154.
- Sampson, D., Albaugh, T., Johnsen, K., Allen, H., Zarnoch, S., 2003. Monthly leaf area index estimates from point-in-time measurements and needle phenology for *Pinus taeda*. *Canadian Journal Forest Research* 33, 2477-2490.
- Samuelson, L., Johnsen, K., Stokes, T., 2004. Production, allocation, and stemwood growth efficiency of *Pinus taeda* L. Stands in response to 6 years of intensive management. *Forest Ecology and Management* 192, 59-70.
- Santiago, L., Goldstein, G., Meinzer, F., Fownes, J. and Mueller-Dombois, D., 2000. Transpiration and forest structure in relation to soil waterlogging in a Hawaiian montane cloud forest. *Tree Physiology* 20, 673-681.
- Silveira, L., Martínez, L. y Alonso, J. 2003. Efecto de la sustitución de campo natural por plantaciones forestales, sobre los recursos hídricos en el Uruguay. En Tercer Congreso Latinoamericano de manejo de cuencas hidrográficas. Perú.
- Simonin, K, Kolb, T., Montes-Helu, M., Koch, G. 2007. The influence of thinning on components of stand water balance in ponderosa pine forest stand during and after extreme drought. *Agricultural and Forest Meteorology* 143, 266-276.
- Soares, J. and Almeida, A. 2001. Modeling the water balance and soil water fluxes in fast growing Eucalyptus plantation in Brazil. *Journal of Hydrology* 253, 130-147
- Stogsdill, W.R., Wittwer, R.F., Dougherty, P.M., 1989. Relationship between throughfall and stand density in a *Pinus taeda* plantation. *Forest Ecology and Management* 29, 105-113.
- Stogsdill, W.R., Wittwer, R.F., Hennessey, T.C., Dougherty, P.M., 1992. Water use in thinned loblolly pine plantations. *Forest Ecology and Management* 50, 233-245.

- Strachan, I., Stewart, D., Pattey, E., 2005. Determination of Leaf Area Index in Agricultural Systems. En: Hatfield, J., Baker, J., Viney, M. (Eds.), *Micrometeorology in Agricultural Systems*, Agronomy N° 47. Wisconsin, pp. 179-198.
- Teske, M., Thistle, H., 2004. A library of forest canopy structure for use in interception modeling. *Forest Ecology and Management* 198, 341-350.
- Uruguay, INIA. Unidad GRAS INIA Tacuarembó, 2009 (en línea). Consultado agosto, 2009. Disponible en: <http://www.inia.org.uy/online/site/10679811.php>.
- Uruguay, INIA, Unidad GRAS INIA Tacuarembó, 2010 (en línea). Estadísticas Agroclimatológicas Mensuales 1971-2000. Consultado 23 abril 2010. Disponible en: [http://www.inia.org.uy/online/site/base\\_climaesta\\_mens\\_vizu.php?bus=Tacuarembó&base=72](http://www.inia.org.uy/online/site/base_climaesta_mens_vizu.php?bus=Tacuarembó&base=72).
- von Stackelberg, N., 2005. Simulation of the hydrologic effects of afforestation in the Tacuarembó river basin, Uruguay. Thesis of Master of Science Biological and Agricultural Engineering. Graduate Faculty of North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, USA.
- Watson, D., 1974. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany* 11, 41-76.
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G., Jonckheere, I. and Coppin, P., 2004. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination. Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology* 121, 37-53.
- Wells, J., 1990. Some indirect methods of estimating canopy structure. *Remote Sensing Reviews* 5, 31-43.
- Will, R., Narahari, N., Shiver, D., Teskey, R. 2005. Effects of planting density on canopy dynamics and stem growth for intensively managed loblolly pine stands. *Forest Ecology and Management* 205, 29-41

- Wilks, D., 1995. Statistical methods in the atmospheric sciences; an introduction. San Diego, Academic Press. 464p. International Geophysics Series, Vol 59, 464 p.
- Wythers, K., Reich, P., Turner, D., 2003. Predicting leaf area index from scaling principles: corroboration and consequences. *Tree Physiology* 23, 1171-1179.
- Xavier, A., Soares, J., Campi de Almeida, J., 2002. Variação do índice de área foliar em clones de eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. *Árbore*. 26, 421-427.
- Zhang, L., Dawes, W.R., Walker, G.R., 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*. 37: 701-708.
- Zhang, Y., Chen, J., Miller, J., 2005. Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. *Agricultural and Forest Meteorology* 133, 166–181.
- Zhou, G., Sun, G., Wang, X., Zhou, Ch., McNulty, G., Vose, J., Amatya, D., 2008. Estimating forest ecosystem evapotranspiration at multiple temporal scales with dimension analysis approach. *Journal of the American Water Resources Association*. 44, 208-221.

### **3. DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES GLOBALES**

La cuantificación de la biomasa foliar es clave para entender el desarrollo vegetal y los intercambios de masa y energía entre la cubierta vegetal y la atmósfera. Tales estimaciones son particularmente difíciles de obtener en cubiertas forestales donde el acceso a la canopia es dificultoso y el follaje se encuentra distribuido heterogéneamente. En este sentido una simplificación común es asumir que el rodal presenta dosel cerrado y que el IAF es constante año tras año. Sin embargo esto no es válido para la mayoría de los rodales, la canopia forestal no es una estructura estática ya que la misma cambia con el desarrollo del rodal y las prácticas de manejo. En el presente trabajo se describió la dinámica foliar en un rodal joven de *P. taeda* en el año de su primer raleo y poda precomercial. El IAF obtenido mediante una técnica rápida y sencilla (fotografía hemisférica digital) fue considerado como el parámetro descriptor y como un importante atributo de la estructura del dosel. El raleo y la poda tuvieron influencia en la estructura de este ecosistema forestal y ésta a su vez se encontró fuertemente relacionada con aspectos funcionales del rodal como lo es la evapotranspiración. El área foliar exhibió una amplia variación anual la cual responde a una dinámica foliar típica de la especie *P. taeda*. El IAF fue tres veces menor en invierno respecto al verano, producto de la oscilación estacional y de la influencia de la intervención silvicultural (raleo y poda) realizada. En las parcelas testigo, sin manejo silvicultural, también se observó una dinámica estacional: 25% superior en la época estival (febrero) respecto a la invernal (agosto). A pesar de que el momento del año explicó el mayor porcentaje de la variación del IAF, durante todo el período de evaluación, el sitio también tuvo un efecto significativo sobre el área foliar. En el período pos-tratamiento silvicultural (jul-dic 2008), el raleo y la poda fueron la principal causa de la variación de la cobertura foliar provocando una reducción muy significativa del IAF (62,8% promedio). La disminución del área foliar debido al manejo silvicultural se vió reflejada en una reducción significativa de la ETm. La disminución inmediata de la ETm fue en promedio del orden del 45%.

El raleo y la poda redujeron significativamente el IAF y la ET<sub>m</sub>, pero estas prácticas explicaron un 45% de la variación del IAF y solo un 4,7% de la variación de la ET<sub>m</sub>.

La comparación entre LAI-2000 y FHD tuvo una alta correlación, por lo cual ambas técnicas resultarían recomendadas para la obtención del IAF en cubiertas forestales. Las potencialidades de cada técnica recaen, fundamentalmente, en los objetivos e intereses de cada investigación. El LAI-2000 proporciona una estimación inmediata mediante instrumental portátil y no requiere procesamiento posterior del dato. Su mayor restricción radica en la imposibilidad de realizar un análisis posterior de la distribución espacial de la canopia debido a la integración inmediata de la lectura de los sensores. La FHD requiere de procesamiento y análisis posterior de las imágenes hemisféricas digitales en programas computacionales. Los resultados de estos análisis reportan múltiples variables radiativas que permiten el análisis estructural y de eficiencia del uso de la luz de las canopias vegetales.

Para el propósito de nuestro estudio fueron utilizados valores de IAF que correspondieron al IAF efectivo o Índice de Área de Planta (IAP). Esta denominación aparece como el término más apropiado para describir el IAF estimado mediante instrumental óptico ya que reconoce las limitaciones de la subestimación del IAF que presentan estas técnicas (Chen y Black, 1992). Sin embargo si el objetivo fuera la inclusión del IAF, por ejemplo en la modelación de procesos biofísicos, su valor debería ajustarse por factores de corrección que atiendan la heterogeneidad de las canopias. Del mismo modo para alcanzar estimaciones empíricas más ajustadas de la ET<sub>m</sub> en superficies forestales es necesario, en futuras investigaciones, contemplar ajustes en los aspectos aerodinámicos del proceso evapotranspirativo y considerar la contribución relativa en la ET de la cubierta herbácea bajo el dosel. Por otro lado los valores de ET<sub>m</sub> obtenidos resultaron inferiores a la ETP o evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) estimada en el área y período estudiados. A pesar que no es posible una comparación estricta entre los valores estimados de ambas variables se puede identificar una misma

respuesta estacional influenciada principalmente por la estacionalidad del balance de energía en la región.

Las modificaciones introducidas en la ecuación de Penman-Monteith en el presente trabajo suponen un acercamiento a características particulares de las cubiertas forestales y una primera contribución a la cuantificación de las necesidades hídricas de estos cultivos. Los avances en distintas formas de cuantificación de la evapotranspiración (balances hídricos, balances hidrológicos, flujos de savia, ecuaciones empíricas) permitirá disponer de valiosa información objetiva que posibilite en futuras investigaciones las comparaciones pertinentes entre diferentes cuantificaciones de la evapotranspiración en cubiertas forestales.

En este estudio se constató que las prácticas de manejo silviculturales, el momento del año y variables edáficas generan cambios significativos en la estructura y en la función evapotranspirativa del ecosistema forestal. El conocimiento de la magnitud de estos cambios puede contribuir a mejorar las estrategias de manejo silvicultural que se establecen en las plantaciones forestales. En este sentido resultaría necesario un monitoreo continuo de la dinámica foliar durante todo el ciclo de vida del rodal.

El establecimiento y manejo de plantaciones forestales supone una gestión del rodal que entre otros aspectos debería basarse en el óptimo desarrollo de la canopia con fines productivos pero que además contemple la sostenibilidad del ecosistema. La apertura del dosel, debido a las prácticas silviculturales, modifica parámetros estructurales y también microambientales tales como el régimen de luz y la disponibilidad de agua y nutrientes del ecosistema. Futuros estudios deberían incluir la evaluación del efecto de estos cambios sobre el árbol, el suelo y la vegetación herbácea bajo el dosel. Estas evaluaciones proporcionarían una contribución significativa para el desarrollo de otras alternativas de producción como por ejemplo los sistemas agroforestales.

#### **4. BIBLIOGRAFÍA**

- Albaugh, T., Allen, H., Fox, T., 2006. Individual tree crown and stand development in *Pinus taeda* under different fertilization and irrigation regimes. *Forest Ecology and Management* 234, 10-23.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements-FAO. Irrigation and drainage paper 56. FAO, Water Resources, Development and Management Service. Rome.
- Allen, Ch., Will, R., Sarigumba, T., Jacobson, M., Daniels, R., Kennerley, S., 2004. En: Connor, K. (Ed.). Proceedings of the 12<sup>th</sup> biennial southern silvicultural research conference. Gen. Tech. Rep. SRS-71. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, 594 p.
- Amatya, D.M., Skaggs, R.W., Blanton, C.D., Gilliam, J.W., 2006. Hydrologic and water quality effects of harvesting and regeneration of a drained pine forest. En: Williams and Nettles (Eds.). Proc. Of the ASABE-Weyerhaeuser sponsored Int'l Conference on Hydrology and Management of Forest Wetlands, New Bern, North Carolina.
- Amatya, D.M., Skaggs, R.W., 2008. Effects of Thinning on Hydrology and Water Quality of a Drained Pine Forest in Coastal North Carolina. En: Tollner E.W., Saleh, A. (Eds.). 21st Century Watershed Technology: Improving Water Quality and Environment. Proceeding of the 29 March – April 2008 Conference, Concepción, Chile, Publication date 29 March 2008. ASABE PUBLICATION Lumber 701P0208cd.
- Barclay, H., Pang, P., Pollard, F., 1986. Aboveground biomass distribution within trees and stands in thinned and fertilized Douglas-fir. *Canadian Journal Forest Research* 16, 438-442.
- Beadle, C., Talbot, H., Jarvis, P., 1982. Canopy structure and leaf area index in a mature Scots pine forest. *Forestry* 55, 105-123.



- Best, A., Zhang, L., McMahon, T., Western A., Vertessy, R., 2003. A critical review of paired catchment studies with reference to seasonal flows and climatic variability. MDBC Publication 11/03. Murray-Darling Basin Commission, Canberra, Australia.
- Bosch, J.M., Hewlett, J.D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55, 3-23.
- Burman, R., Pochop, L., 1994. Evaporation, evapotranspiration and climatic data. Elsevier, Amsterdam, 278 p.
- Cabrelli, D., Rebottaro, S. y Efron, D., 2006. Caracterización del dosel forestal y del microambiente lumínico en rodales con diferente manejo, utilizando fotografía hemisférica. *Quebracho* 13, 17-25.
- Calder, I.R., 1979. Do trees use more water than grass?. *Water Services (London)*, 83, 11-14.
- Carneiro, R.L.C., Ribeiro, A., Huaman, C.A.M., Leite, F.P., Sedyama, G., Bastos, N.F., 2008. Consumo de água em plantios de eucalipto - Parte 1: Determinação da condutância estomática em tratamentos irrigados e não irrigados. *Árbore* 32, 1-10.
- Chen, J., Black, T., 1992. Defining leaf-area index for non-flatleaves. *Plant Cell Environment* 15, 421-429.
- Chen, J., 1996. Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. *Agricultural and Forest Meteorology* 80, 135-163.
- Chen, J., Rich, P., Gower, S., Norman, J., Plummer, S., 1997. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques and measurements. *Journal of Geophysical Research* 102, 29429-29443.
- Chescheir, G.M., Lebo, M.E., Amatya, D.M., Huges, J., Gilliam, J.W., Skaggs, R.W., Herrmann, R.B., 2003. Hydrology and Water Quality of Forested Lands in Eastern North Carolina. *Research Bulletin N°320*, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.

- Chescheir, G.M., Von Stackelberg, N., Amatya, D. and Skaggs, R., 2006. Effects of afforestation on the hydrologic behavior of a basin in the Tacuarembó River. Progress Report for 2005-06 submitted to Weyerhaeuser Foundation. Biological & Agricultural Engineering Department, North Carolina State University, Raleigh, NC, USA.
- Cregg, B.M., Hennessey, T.C., Dougherty, P.M., 1990. Water Relations to Loblolly Pine Trees in Southeastern Oklahoma following pre-commercial thinning. Oklahoma Agricultural Experimental Station, Oklahoma State University.
- Conover, W., 1999. Practical Nonparametric Statistics. Wiley, J & Sons (Eds.), New York.
- Dalla Tea, F., Jokela, E., 1991. Needlefall, canopy light interception, and productivity of young intensively managed slash and loblolly pine stands. *Forest Science* 37, 1298-1313.
- Davi, H., Baret, F., Dufrêne, E., 2008. Effect of thinning on LAI variance in heterogeneous forest. *Forest Ecology and Management* 256, 890-899.
- Doorenbos, J. and Kassam, A., 1979. Efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos. FAO. Riego y Drenaje (33). Roma, Italia. pp. 104-106.
- Dougherty, P., Hennesey, T., Zarnoch, S., Stenberg, P., Holeman, R., Wittwer, R., 1995. Effects of stands development and weather on monthly leaf biomass dynamics of a loblolly pine (*Pinus taeda* L.) stand. *Forest Ecology and Management* 72, 213-227.
- FAO, 2009. Situación de los bosques del mundo, 2009. ISBN 978-92-5-306057-3, Roma.
- ForestalWeb, 2009. Consultado 20 de mayo 2009. Disponible en:  
<http://www.forestalweb.com/Desargas-documento/46-Superficie-forestada/>.
- Frazer, G.W., Canham, C.D., and Lertzman, K.P. 1999. Gap Light Analyzer (GLA): Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation Copyright © 1999: Simon Fraser University, Burnaby, British

- Columbia, and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York.
- Garrigues, S., Shabanov, N.V., Swanson, K., Morisette, J.T., Baret, F., Myneni, R.B., 2008. Intercomparison and sensitivity analysis of Leaf Area Index retrievals from LAI-2000, AccuPAR, and digital hemispherical photography over croplands. *Agricultural and Forest Meteorology* 148, 1193-1209.
- Gholz, H., 1986. Canopy development and dynamics in relation to primary productivity. En: Fujimori, T., Whitehead D. (Eds.). *Proceedings of the IUFRO workshop on Crown and Canopy Structure in Relation to Productivity*. Forestry and Forest Products Research. Inst., Ibaraki, Japón, pp. 224-242
- Gholz, H., Vogel, S., Cropper, W. Jr., McKelvey, K., Ewel, K., Teskey, R., Curran, P., 1991. Dynamics of canopy structure and light interception in *Pinus elliottii* stands of north Florida. *Ecological Monographs* 61, 33-51.
- Grace III, J.M., Skaggs, R.W., Chescheir, G.M., 2006. Hydrologic and Water Quality Effects of Thinning Loblolly Pine. *Trans. ASABE* 49(3):645-654.
- Guillespie, A., Allen, H., Vose, J., 1994. Amount and vertical distribution of foliage of young loblolly pine trees affected by canopy position and silvicultural treatment. *Canadian Journal of Forest Research* 24, 1337-1344.
- Hennessey, T., Dougherty, P., Cregg, B., Wittwer, R., 1992. Annual variation in needle fall of a loblolly pine stand in relation to climate and stand density. *Forest Ecology and Management* 51, 329-338.
- Hennessey, T., Dougherty, P., Lynch, T., Wittwer, R., Lorenzi, E., 2004. Long-term growth and ecophysiological responses of a southeastern Oklahoma loblolly pine plantation to early rotation thinning. *Forest Ecology and Management* 192, 97-116.
- Hibbert, A.R., 1967. Forest Treatment Effects on Water Yield. En: SOPPER & LULL (Eds.) *International Symposium on Forest Hydrology*, Pergamon Press, pp. 527-543

- Huber, A., Oyarzún, C., Ellies, A., 1985. Balance hídrico en tres plantaciones de *Pinus radiata*. II: Humedad del suelo y evapotranspiración. *Bosque* 6, 74-82.
- Huber, A., Lopez, D. 1993. Cambios en el balance hídrico provocados por tala rasa de un rodal adulto de *Pinus radiata* (D. Don.), Valdivia, Chile. *Bosque* 14, 11-18.
- InfoStat, 2009. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Jarvis, P.G., 1975. Water transfer in plants. En: de Vries, D.A., Afgan, N.H. (Eds.), *Heat and Mass Transfer in the Biosphere. Part 1. Transfer Processes in Plant Environment*. Scripta Book Company, Washington, DC, pp. 369-394.
- Jarvis, P.G., Stewart, J., 1978. Evaporation of water from plantation forests. En: FORD et al. (Eds.), *The Ecology of even-aged forest plantations*. Institute of Terrestrial Ecology, Reino Unido, pp. 327-349.
- Jarvis, P.G., McNaughton, K.G., 1986. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. En: *Advances in Ecological Research*, Academic Press, London, pp. 1-49.
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackarts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M. and Baret, F., 2004. Reviews of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121, 19-35.
- Jones, H., 2004. Introduction: environmental and physiological control of evapotranspiration (ET) from vegetation. En: *Workshop on Water Use of Woody Crops: techniques, issues, modeling and applications on water management*. Ilhavo, Portugal.
- Kelliher, F. M., Leuning, R., Schulze, E.D., 1993. Evaporation and canopy characteristics of coniferous forests and grasslands. *Oecologia* 95, 153-163.
- Landsberg, J. J. 1986. *Physiological Ecology of Forest Production*. Academic Press. London. 198 p.
- Leblanc, S., Fernandes, R., Chen, J., 2002. Recent advancements in optical field leaf area index, foliage heterogeneity, and foliage angular distribution

- measurements. International Geoscience and Remote Sensing Symposium 5, 2902-2904.
- Lima, W.P., 1987. Impacto ambiental do eucalipto. 1.ed. Universidade de Sao Paulo, Sao Paulo, 291 p.
- Linhares de Sousa, C., Ponzoni, F., 1998. Avaliação de índices de vegetação e de bandas tm/landsat para estimativa de volume de madeira em floresta implantada de *Pinus spp.* En: Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, pp. 1537-1547.
- McCarthy, E.J., Skaggs, R.W., 1992. Simulation and Evaluation of Water Management System for a Pine Plantation Watershed. Southern Journal of Applied. Forestry 16, 48-56.
- Molfino, J., 2000. Estudio detallado de suelos de dos cuencas en el Departamento de Tacuarembó. Proyecto de instalación de cuencas experimentales para el estudio de efectos del establecimiento de áreas forestales con pino en Uruguay. COLONVADE S.A. Uruguay, 24 p.
- Monteith, J., 1965. Evaporation and environment. Symposium of Society Exp. of Biology. 19:205-234.
- Monteith, J., Unsworth, M., 1990. Principles of Environmental Physics. Second edition. Edward Arnold, London. 291 p.
- Morisette, J.T., Baret, F., Privette, J.L., Myneni, R.B., Nickeson, J., Garrigues, S., Shabanov, N.V., Weiss, M., Fernandes, R., Leblanc, S., Kalacska, M., Sánchez-Azofeifa, G.A., Chubey, M., Rivard, B., Stenberg, P., Rautiainen, M., Voipio, P., Manninen, T., Pilant, A., Lewis, T., Iiams, J., Colombo, R., Meroni, M., Busetto, L., Cohen, W., Turner, D., Warner, E.D., Petersen, G.W., Seufert, G., Cook, R., 2006. Validation of global moderate-resolution LAI Products: a framework proposed within the CEOS Land Product Validation subgroup. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 44, 1804–1814.

- Muñoz, F., Espinosa, M., Cancino, J., Rubilar, R., Herrera, M., 2008. Efecto de poda y raleo en el área foliar de *Eucalyptus nitens*. *Bosque* 29, 44-51.
- Norman, J., Campell, G., 1989. Canopy structure. In Pearcy, R., Ehrlinger, J., Mooney, H., Rundel, P. (Eds.), *Plant Ecology: Field Methods and Instrumentation*. Chapman & Hall, London, pp. 301-325.
- Oyarzún, C., Huber, A., 1999. Balance hídrico en plantaciones jóvenes de *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata* en el sur de Chile. *TERRA Latinoamericana*. 17, 35-44.
- Penman, H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Royal Society of London Proceeding. Serie A*, 193, 120-146.
- Pou, R., 2009. El desarrollo de la industria de productos forestales. Rosario Pou & Asociados. *Agenda Forestal 2009 – Uruguay*. Montevideo: Siglo Comunicación p.7.
- Rosenberg, N.J., Blad, B.L. and Verma, S.B. 1983. *Microclimate, the Biological Environment*. Second edition John Wiley & Sons. New York. 495 p.
- Running, S., Coughlan, J., 1988. A general model for forest ecosystem processes for regional application. I. Hydrologic balance, canopy gs exchange, and primary production processes. *Ecological Modelling* 42, 125-154.
- Sampson, D., Albaugh, T., Johnsen, K., Allen, H., Zarnoch, S., 2003. Monthly leaf area index estimates from point-in-time measurements and needle phenology for *Pinus taeda*. *Canadian Journal Forest Research* 33, 2477-2490.
- Samuelson, L., Johnsen, K., Stokes, T., 2004. Production, allocation, and stemwood growth efficiency of *Pinus taeda* L. Stands in response to 6 years of intensive management. *Forest Ecology and Management* 192, 59-70.
- Santiago, L., Goldstein, G., Meinzer, F., Fownes, J. and Mueller-Dombois, D., 2000. Transpiration and forest structure in relation to soil waterlogging in a Hawaiian montane cloud forest. *Tree Physiology* 20, 673-681.
- Scott, D.F., Prinsloo, F.W., Moses, G., Mehlomakulu, M., Simmers, A.D.A., 2000. A reanalysis of the South African afforestation experimental data. WRC Report

No. 810/1/00. Water Research Commission, South Africa.

- Shuttleworth, W. J., 1989. Micrometeorology of temperate and tropical forest. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. B. 324, 299–334.
- Silveira, L., Martínez, L. y Alonso, J. 2003. Efecto de la sustitución de campo natural por plantaciones forestales, sobre los recursos hídricos en el Uruguay. En Tercer Congreso Latinoamericano de manejo de cuencas hidrográficas. Perú.
- Simonin, K, Kolb, T., Montes-Helu, M., Koch, G. 2007. The influence of thinning on components of stand water balance in ponderosa pine forest stand during and after extreme drought. *Agricultural and Forest Meteorology* 143, 266-276.
- Soares, J. and Almeida, A. 2001. Modeling the water balance and soil water fluxes in fast growing Eucalyptus plantation in Brazil. *Journal of Hydrology* 253, 130-147
- Stephens, W., Hess, T., Knox, J., 2001. Review of the effects of energy crops on hydrology. Project Report, Institute of Water and Environment Cranfield University Silsoe. Cranfield University, Bedford, UK.
- Stogsdill, W.R., Wittwer, R.F., Dougherty, P.M., 1989. Relationship between throughfall and stand density in a *Pinus taeda* plantation. *Forest Ecology and Management* 29, 105-113.
- Stogsdill, W.R., Wittwer, R.F., Hennessey, T.C., Dougherty, P.M., 1992. Water use in thinned loblolly pine plantations. *Forest Ecology and Management* 50, 233-245.
- Strachan, I., Stewart, D., Pattey, E., 2005. Determination of Leaf Area Index in Agricultural Systems. En: Hatfield, J., Baker, J., Viney, M. (Eds.), *Micrometeorology in Agricultural Systems*, Agronomy N° 47. Wisconsin, pp. 179-198.
- Teske, M., Thistle, H., 2004. A library of forest canopy structure for use in interception modeling. *Forest Ecology and Management* 198, 341-350.

- Uruguay, INIA, Unidad GRAS INIA Tacuarembó, 2009 (en línea). Consultado agosto, 2009. Disponible en: <http://www.inia.org.uy/online/site/10679811.php>.
- Uruguay, INIA, Unidad GRAS INIA Tacuarembó, 2010 (en línea). Estadísticas Agroclimatológicas Mensuales 1971-2000. Consultado 23 abril 2010. Disponible en: [http://www.inia.org.uy/online/site/base\\_climaesta\\_mens\\_vizu.php?bus=Tacuarembó&base=72](http://www.inia.org.uy/online/site/base_climaesta_mens_vizu.php?bus=Tacuarembó&base=72).
- Uruguay, MGAP, 2004. Carta Forestal 2004. Verificado el 17 de octubre 2009. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/Renare/SIG/>
- Uruguay, MGAP, 2005. Boletín estadístico 2005. Verificado el 17 de octubre 2009. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/Forestal/Boletin2005.pdf>
- von Stackelberg, N., 2005. Simulation of the hydrologic effects of afforestation in the Tacuarembó river basin, Uruguay. Thesis of Master of Science Biological and Agricultural Engineering. Graduate Faculty of North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, USA.
- Watson, D., 1974. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany* 11, 41-76.
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G., Jonckheere, I. and Coppin, P., 2004. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination. Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology* 121, 37-53.
- Wells, J., 1990. Some indirect methods of estimating canopy structure. *Remote Sensing Reviews* 5, 31-43.
- Whitehead, D., Jarvis, P.G., Waring, R.H., 1984. Stomatal conductance, transpiration, and resistance to water uptake in a *Pinus sylvestris* spacing experiment. *Canadian Journal of Forest Research* 14, 692-700.
- Will, R., Narahari, N., Shiver, D., Teskey, R. 2005. Effects of planting density on canopy dynamics and stem growth for intensively managed loblolly pine stands. *Forest Ecology and Management* 205, 29-41



- Wilks, D., 1995. Statistical methods in the atmospheric sciences; an introduction. San Diego, Academic Press. 464p. International Geophysics Series, Vol 59, 464 p.
- Wythers, K., Reich, P., Turner, D., 2003. Predicting leaf area index from scaling principles: corroboration and consequences. *Tree Physiology* 23, 1171-1179.
- Xavier, A., Soares, J., Campi de Almeida, J., 2002. Variação do índice de área foliar em clones de eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. *Árbore*. 26, 421-427.
- Zhang, L., Dawes, W. R., Walker, G.R., 1999. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average waterbalance. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Report 99/12, Victoria.
- Zhang, L., Dawes, W.R., Walker, G.R., 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* 37, 701-708.
- Zhang, Y., Chen, J., Miller, J., 2005. Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. *Agricultural and Forest Meteorology* 133, 166–181.
- Zhou, G., Sun, G., Wang, X., Zhou, Ch., McNulty, G., Vose, J., Amatya, D., 2008. Estimating forest ecosystem evapotranspiration at multiple temporal scales with dimension analysis approach. *Journal of the American Water Resources Association*. 44, 208-221.
- Ziemer, R., 1979. Evaporation and transpiration. *Reviews of Geophysics and Space Physics* 17, 1175-1186.

## 5. ANEXOS

---

[Forest Ecology and Management](#) > Guide For Authors

### **Forest Ecology and Management** **An International Journal**



ISSN: 0378-1127

Imprint: ELSEVIER

#### **Guide for Authors**



#### **Introduction**

*Forest Ecology and Management* publishes scientific articles that link forest ecology with forest management, and that apply biological, ecological and social knowledge to the management and conservation of man-made and natural forests. The scope of the journal includes all forest ecosystems of the world.

A refereeing process ensures the quality and international interest of the manuscripts accepted for publication. The journal aims to encourage communication between scientists in disparate fields who share a common interest in ecology and forest management, and to bridge the gap between research workers and forest managers in the field to the benefit of both.

Authors should demonstrate a clear link with forest ecology and management. For example, papers dealing with remote sensing are acceptable if this link is demonstrated, but not acceptable if the main thrust is technological and methodological. Similarly, papers dealing with molecular biology and genetics may be more appropriate in specialized journals, depending on their emphasis. The journal does not accept articles dealing with agro-forestry. The journal does not recognize 'short communications' as a separate category.

The editors encourage submission of papers that will have the strongest interest and value to the Journal's international readership. Some key features of papers with strong interest include:

1. Clear connections between the ecology and management of forests;
2. Novel ideas or approaches to important challenges in forest ecology and management;
3. Studies that address a population of interest beyond the scale of single research sites (see the editorial, Three key points in the design of forest experiments, *Forest Ecology and Management* 255 (2008) 2022-2023);
4. Review Articles on timely, important topics. Authors are encouraged to contact one of the editors to discuss the potential suitability of a review manuscript.

We now receive many more submissions than we can publish. Many papers are rejected because they do not fit within the aims and scope detailed above. Some examples include:

1. Papers in which the primary focus is, for example, entomology or pathology or soil science or remote sensing, but where the links to, and implications for, forest management are not clear and have not been strongly developed;
2. Model-based investigations that do not include a substantial field-based validation component;
3. Local or regional studies of diversity aimed at the development of conservation policies;
4. The effects of forestry practices that do not include a strong ecological component (for example, the effects of weed control or fertilizer application on yield);
5. Social or economic or policy studies (please consider our sister journal, 'Forest Policy and Economics').

### **Types of paper**

1. Regular papers. Original research papers should report the results of original research. The material should not have been previously published elsewhere, except in a preliminary form.
2. Review articles. Review articles are welcome but should be topical and not just an overview of the literature. Before submission please contact one of the Chief Editors.
3. Papers for Special Issues. *Forest Ecology and Management* publishes Special Issues from time to time. If your paper has been invited by a Guest Editor as a contribution to a Special Issue, please mark it as such on the title page.

### **Contact details for submission**

P. Attiwill  
 School of Botany  
 The Australian Centre  
 University of Melbourne

16 Wonga Road  
Ringwood, Victoria 3134  
Australia  
Tel: +61 3 9870 3034  
Fax: +61 3 9870 3034  
E-mail: [attwill@unimelb.edu.au](mailto:attwill@unimelb.edu.au)

T.S. Fredericksen  
Ferrum College, Life Science Division  
80 Wiley Drive  
Ferrum, VA 24088, USA  
E-mail: [tfredericksen@ferrum.edu](mailto:tfredericksen@ferrum.edu)

D.Binkley  
Colorado State University  
Colorado Forest Restoration Institute  
Fort Collins, CO 80523  
USA  
E-mail: [Dan.Binkley@Colostate.edu](mailto:Dan.Binkley@Colostate.edu)

J-P. Laclau  
CIRAD/USP,ESALQ-LCF  
Caixa Postal 9 Cep  
Cep 13418-900 Piracicaba SP  
Brazil  
E-mail: [laclau@cirad.fr](mailto:laclau@cirad.fr)



## **Before You Begin**

### **Ethics in Publishing**

For information on Ethics in Publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/ethicalguidelines>.

### **Conflict of interest**

All authors are requested to disclose any actual or potential conflict of interest including any financial, personal or other relationships with other people or organizations within three years of beginning the submitted work that could inappropriately influence, or be perceived to influence, their work. See also <http://www.elsevier.com/conflictsofinterest>.

### **Submission declaration**

Submission of an article implies that the work described has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere including electronically in the same form, in English or in any other language, without the written consent of the copyright-holder.

### **Copyright**

Upon acceptance of an article, authors will be asked to complete a 'Journal Publishing Agreement' (for more information on this and copyright see <http://www.elsevier.com/copyright>). Acceptance of the agreement will ensure the widest possible dissemination of information. An e-mail will be sent to the corresponding author confirming receipt of the manuscript together with a 'Journal Publishing Agreement' form or a link to the online version of this agreement. Subscribers may reproduce tables of contents or prepare lists of articles including abstracts for internal circulation within their institutions. Permission of the Publisher is required for resale or distribution outside the institution and for all other derivative works, including compilations and translations (please consult <http://www.elsevier.com/permissions>). If excerpts from other copyrighted works are included, the author(s) must obtain written permission from the copyright owners and credit the source(s) in the article. Elsevier has preprinted forms for use by authors in these cases: please consult <http://www.elsevier.com/permissions>.

### **Retained author rights**

As an author you (or your employer or institution) retain certain rights; for details you are referred to: <http://www.elsevier.com/authorsrights>.

### **Role of the funding source**

You are requested to identify who provided financial support for the conduct of the research and/or preparation of the article and to briefly describe the role of the sponsor(s), if any, in study design; in the collection, analysis and interpretation of data; in the writing of the report; and in the decision to submit the paper for publication. If the funding source(s) had no such involvement then this should be stated. Please see <http://www.elsevier.com/funding>.

### **Funding body agreements and policies**

Elsevier has established agreements and developed policies to allow authors whose articles appear in journals published by Elsevier, to comply with potential manuscript archiving requirements as specified as conditions of their grant awards. To learn more about existing agreements and policies please visit <http://www.elsevier.com/fundingbodies>.

### **Language and language services**

Please write your text in good English (American or British usage is accepted, but not a mixture of these). Authors who require information about language editing and copyediting services pre- and post-submission please visit <http://www.elsevier.com/languageediting> or our customer support site at <http://epsupport.elsevier.com> for more information.

### ***Full Online Submission***

Submission to this journal proceeds totally online and you will be guided stepwise through the creation and uploading of your files. The system automatically converts source files to a single PDF file of the article, which is used in the peer-review process. Please note that even though manuscript source files are converted to PDF files at submission for the review process, these source files are needed for further processing after acceptance. All correspondence, including notification of the Editor's decision and requests for revision, takes place by e-mail removing the need for a paper trail.

All submissions must be accompanied by a **cover letter** detailing what you are submitting. Please indicate:

- The author to whom we should address our correspondence (in the event of multiple authors, a single 'Corresponding Author' must be named)
- A contact address, telephone/fax numbers and e-mail address
- Details of any previous or concurrent submissions. Please see our Authors' Rights section for more copyright information.
- It is also useful to provide the Editor-in-Chief with any information that will support your submission (e.g. original or confirmatory data, relevance, topicality).

### ***Submit your article***

Please submit your article via <http://ees.elsevier.com/foreco/>

### **Referees**

Authors are required to identify four persons who are qualified to serve as reviewers. Authors are requested not to suggest reviewers with whom they have a personal or professional relationship, especially if that relationship would prevent the reviewer from having an unbiased opinion of the work of the authors. A working e-mail address for

each reviewer is essential for rapid review in the event that reviewer is selected from those that are identified by the authors. You may also select reviewers you do not want to review your manuscript, but please state your reason for doing so.



## Preparation

### Use of wordprocessing software

It is important that the file be saved in the native format of the wordprocessor used. The text should be in single-column format. Keep the layout of the text as simple as possible. Most formatting codes will be removed and replaced on processing the article. In particular, do not use the wordprocessor's options to justify text or to hyphenate words. However, do use bold face, italics, subscripts, superscripts etc. Do not embed "graphically designed" equations or tables, but prepare these using the wordprocessor's facility. When preparing tables, if you are using a table grid, use only one grid for each individual table and not a grid for each row. If no grid is used, use tabs, not spaces, to align columns. The electronic text should be prepared in a way very similar to that of conventional manuscripts (see also the Guide to Publishing with Elsevier: <http://www.elsevier.com/guidepublication>). Do not import the figures into the text file but, instead, indicate their approximate locations directly in the electronic text and on the manuscript. See also the section on Electronic illustrations.

To avoid unnecessary errors you are strongly advised to use the "spell-check" and "grammar-check" functions of your wordprocessor.

***It is important that the file be saved in the native format of the wordprocessor used. The text should be in single-column format, and 1.5 line-spacing should be used throughout. Keep the layout of the text as simple as possible.***

'Use of wordprocessing software

### Article structure

#### Subdivision

Divide your article into clearly defined and numbered sections. Subsections should be numbered 1.1 (then 1.1.1, 1.1.2, ...), 1.2, etc. (the abstract is not included in section numbering). Use this numbering also for internal cross-referencing: do not just refer to "the text". Any subsection may be given a brief heading. Each heading should appear on its own separate line.

***Introduction***

State the objectives of the work and provide an adequate background, avoiding a detailed literature survey or a summary of the results.

***Material and methods***

Provide sufficient detail to allow the work to be reproduced. Methods already published should be indicated by a reference: only relevant modifications should be described.

***Results***

Results should be clear and concise.

***Discussion***

This should explore the significance of the results of the work, not repeat them. A combined Results and Discussion section is often appropriate. Avoid extensive citations and discussion of published literature.

***Conclusions***

The main conclusions of the study may be presented in a short Conclusions section, which may stand alone or form a subsection of a Discussion or Results and Discussion section.

***Appendices***

If there is more than one appendix, they should be identified as A, B, etc. Formulae and equations in appendices should be given separate numbering: Eq. (A.1), Eq. (A.2), etc.; in a subsequent appendix, Eq. (B.1) and so on.

**Essential title page information**

- ***Title.*** Concise and informative. Titles are often used in information-retrieval systems. Avoid abbreviations and formulae where possible.
- ***Author names and affiliations.*** Where the family name may be ambiguous (e.g., a double name), please indicate this clearly. Present the authors' affiliation addresses (where the actual work was done) below the names. Indicate all affiliations with a lower-case superscript letter immediately after the author's name and in front of the appropriate address. Provide the full postal address of each affiliation, including the country name, and, if available, the e-mail address of each author.
- ***Corresponding author.*** Clearly indicate who will handle correspondence at all stages of refereeing and publication, also post-publication. **Ensure that telephone and fax numbers (with country and area code) are provided in addition to the e-mail address and the complete postal address.**
- ***Present/permanent address.*** If an author has moved since the work described in the article was done, or was visiting at the time, a "Present address" (or "Permanent address") may be indicated as a footnote to that author's name. The address at which the



author actually did the work must be retained as the main, affiliation address. Superscript Arabic numerals are used for such footnotes.

### **Abstract**

A concise and factual abstract is required (not longer than 400 words). The abstract should state briefly the purpose of the research, the principal results and major conclusions. An abstract is often presented separately from the article, so it must be able to stand alone. For this reason, References should be avoided, but if essential, then cite the author(s) and year(s). Also, non-standard or uncommon abbreviations should be avoided, but if essential they must be defined at their first mention in the abstract itself

### **Keywords**

Immediately after the abstract, provide a maximum of 6 keywords, using American spelling and avoiding general and plural terms and multiple concepts (avoid, for example, "and", "of"). Be sparing with abbreviations: only abbreviations firmly established in the field may be eligible. These keywords will be used for indexing purposes.

### **Abbreviations**

Define abbreviations that are not standard in this field in a footnote to be placed on the first page of the article. Such abbreviations that are unavoidable in the abstract must be defined at their first mention there, as well as in the footnote. Ensure consistency of abbreviations throughout the article.

### **Acknowledgements**

Collate acknowledgements in a separate section at the end of the article before the references and do not, therefore, include them on the title page, as a footnote to the title or otherwise. List here those individuals who provided help during the research (e.g., providing language help, writing assistance or proof reading the article, etc.).

### **Units**

SI (Système International d'unités) should be used for all units except where common usage dictates otherwise. Examples of non-SI that may be more appropriate (depending on context) in many ecological and forestry measurements are ha rather than m<sup>2</sup>, year rather than second. Use Mg ha<sup>-1</sup>, not tonnes ha<sup>-1</sup>, and use µg g<sup>-1</sup>, not ppm (or for volume, µL L<sup>-1</sup> or equivalent). Tree diameter will generally be in cm (an approved SI unit) rather than m. Units should be in the following style: kg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, kg m<sup>-3</sup>. Non-SI units should be spelled in full (e.g. year). Do not insert 'non-units' within compound units: for example, write 300 kg ha<sup>-1</sup> of nitrogen (or N), not 300 kg N ha<sup>-1</sup>.

## Math formulae

Present simple formulae in the line of normal text where possible and use the solidus (/) instead of a horizontal line for small fractional terms, e.g., X/Y. In principle, variables are to be presented in italics. Powers of e are often more conveniently denoted by exp. Number consecutively any equations that have to be displayed separately from the text (if referred to explicitly in the text).

## Footnotes

Footnotes should be used sparingly. Number them consecutively throughout the article, using superscript Arabic numbers. Many wordprocessors build footnotes into the text, and this feature may be used. Should this not be the case, indicate the position of footnotes in the text and present the footnotes themselves separately at the end of the article. Do not include footnotes in the Reference list.

### *Table footnotes*

Indicate each footnote in a table with a superscript lowercase letter.

## Artwork

### *Electronic artwork*

#### *General points*

- Make sure you use uniform lettering and sizing of your original artwork.
- Save text in illustrations as "graphics" or enclose the font.
- Only use the following fonts in your illustrations: Arial, Courier, Times, Symbol.
- Number the illustrations according to their sequence in the text.
- Use a logical naming convention for your artwork files.
- Provide captions to illustrations separately.
- Produce images near to the desired size of the printed version.
- Submit each figure as a separate file.

A detailed guide on electronic artwork is available on our website:

⇒ <http://www.elsevier.com/artworkinstructions>

**You are urged to visit this site; some excerpts from the detailed information are given here.**

#### *Formats*

Regardless of the application used, when your electronic artwork is finalised, please "save as" or convert the images to one of the following formats (note the resolution requirements for line drawings, halftones, and line/halftone combinations given below):

EPS: Vector drawings. Embed the font or save the text as "graphics".

TIFF: color or grayscale photographs (halftones): always use a minimum of 300 dpi.

TIFF: Bitmapped line drawings: use a minimum of 1000 dpi.

TIFF: Combinations bitmapped line/half-tone (color or grayscale): a minimum of 500

dpi is required.

DOC, XLS or PPT: If your electronic artwork is created in any of these Microsoft Office applications please supply "as is".

**Please do not:**

- Supply embedded graphics in your wordprocessor (spreadsheet, presentation) document;
- Supply files that are optimised for screen use (like GIF, BMP, PICT, WPG); the resolution is too low;
- Supply files that are too low in resolution;
- Submit graphics that are disproportionately large for the content.

***Color artwork***

Please make sure that artwork files are in an acceptable format (TIFF, EPS or MS Office files) and with the correct resolution. If, together with your accepted article, you submit usable color figures then Elsevier will ensure, at no additional charge, that these figures will appear in color on the Web (e.g., ScienceDirect and other sites) regardless of whether or not these illustrations are reproduced in color in the printed version. **For color reproduction in print, you will receive information regarding the costs from Elsevier after receipt of your accepted article.** Please indicate your preference for color in print or on the Web only. For further information on the preparation of electronic artwork, please see <http://www.elsevier.com/artworkinstructions>.

Please note: Because of technical complications which can arise by converting color figures to "gray scale" (for the printed version should you not opt for color in print) please submit in addition usable black and white versions of all the color illustrations.

**Figure Captions**

Number figures consecutively in accordance with their appearance in the text. Ensure that each figure has a caption. Supply captions separately, not attached to the figure. A caption should comprise a brief title (**not** on the figure itself) and a description of the figure. Keep text in the figures themselves to a minimum but explain all symbols and abbreviations used.

**Tables**

Number tables consecutively in accordance with their appearance in the text. Place footnotes to tables below the table body and indicate them with superscript lowercase letters. Avoid vertical rules. Be sparing in the use of tables and ensure that the data presented in tables do not duplicate results described elsewhere in the article.

## References

### *Citation in text*

Please ensure that every reference cited in the text is also present in the reference list (and vice versa). Any references cited in the abstract must be given in full. Unpublished results and personal communications are not recommended in the reference list, but may be mentioned in the text. If these references are included in the reference list they should follow the standard reference style of the journal and should include a substitution of the publication date with either "Unpublished results" or "Personal communication" Citation of a reference as "in press" implies that the item has been accepted for publication.

### *Web references*

As a minimum, the full URL should be given and the date when the reference was last accessed. Any further information, if known (DOI, author names, dates, reference to a source publication, etc.), should also be given. Web references can be listed separately (e.g., after the reference list) under a different heading if desired, or can be included in the reference list.

### *References in a special issue*

Please ensure that the words 'this issue' are added to any references in the list (and any citations in the text) to other articles in the same Special Issue.

### *Reference management software*

This journal has standard templates available in key reference management packages EndNote (☞ <http://www.endnote.com>) and Reference Manager (☞ <http://www.refman.com>). Using plug-ins to wordprocessing packages, authors only need to select the appropriate journal template when preparing their article and the list of references and citations to these will be formatted according to the journal style which is described below.

### *Reference style*

*Text:* All citations in the text should refer to:

1. *Single author:* the author's name (without initials, unless there is ambiguity) and the year of publication;
2. *Two authors:* both authors' names and the year of publication;
3. *Three or more authors:* first author's name followed by "et al." and the year of publication.

Citations may be made directly (or parenthetically). Groups of references should be listed first alphabetically, then chronologically.

Examples: "as demonstrated (Allan, 1996a, 1996b, 1999; Allan and Jones, 1995). Kramer et al. (2000) have recently shown ...."

*List:* References should be arranged first alphabetically and then further sorted chronologically if necessary. More than one reference from the same author(s) in the

same year must be identified by the letters "a", "b", "c", etc., placed after the year of publication.

*Examples:*

Reference to a journal publication:

Van der Geer, J., Hanraads, J.A.J., Lupton, R.A., 2000. The art of writing a scientific article. *J. Sci. Commun.* 163, 51–59.

Reference to a book:

Strunk Jr., W., White, E.B., 1979. *The Elements of Style*, third ed. Macmillan, New York.

Reference to a chapter in an edited book:

Mettam, G.R., Adams, L.B., 1999. How to prepare an electronic version of your article, in: Jones, B.S., Smith, R.Z. (Eds.), *Introduction to the Electronic Age*. E-Publishing Inc., New York, pp. 281–304.

***Journal abbreviations source***

Journal names should be abbreviated according to

Index Medicus journal abbreviations: <http://www.nlm.nih.gov/tsd/serials/lji.html>;

List of serial title word abbreviations: <http://www.issn.org/2-22661-LTWA-online.php>;

CAS (Chemical Abstracts Service): <http://www.cas.org/sent.html>.

**Video data**

Elsevier accepts video material and animation sequences to support and enhance your scientific research. Authors who have video or animation files that they wish to submit with their article are strongly encouraged to include these within the body of the article. This can be done in the same way as a figure or table by referring to the video or animation content and noting in the body text where it should be placed. All submitted files should be properly labeled so that they directly relate to the video file's content. In order to ensure that your video or animation material is directly usable, please provide the files in one of our recommended file formats with a maximum size of 30 MB and running time of 5 minutes. Video and animation files supplied will be published online in the electronic version of your article in Elsevier Web products, including ScienceDirect: <http://www.sciencedirect.com>. Please supply 'stills' with your files: you can choose any frame from the video or animation or make a separate image. These will be used instead of standard icons and will personalize the link to your video data. For more detailed instructions please visit our video instruction pages at <http://www.elsevier.com/artworkinstructions>. Note: since video and animation cannot be embedded in the print version of the journal, please provide text for both the electronic and the print version for the portions of the article that refer to this content.

## Supplementary data

Elsevier accepts electronic supplementary material to support and enhance your scientific research. Supplementary files offer the author additional possibilities to publish supporting applications, high-resolution images, background datasets, sound clips and more. Supplementary files supplied will be published online alongside the electronic version of your article in Elsevier Web products, including ScienceDirect: <http://www.sciencedirect.com>. In order to ensure that your submitted material is directly usable, please provide the data in one of our recommended file formats. Authors should submit the material in electronic format together with the article and supply a concise and descriptive caption for each file. For more detailed instructions please visit our artwork instruction pages at <http://www.elsevier.com/artworkinstructions>.

## Submission checklist

It is hoped that this list will be useful during the final checking of an article prior to sending it to the journal's Editor for review. Please consult this Guide for Authors for further details of any item.

### Ensure that the following items are present:

One Author designated as corresponding Author:

- E-mail address
- Full postal address
- Telephone and fax numbers

All necessary files have been uploaded

- Keywords
- All figure captions
- All tables (including title, description, footnotes)

Further considerations

- Manuscript has been "spellchecked" and "grammar-checked"
- References are in the correct format for this journal
- All references mentioned in the Reference list are cited in the text, and vice versa
- Permission has been obtained for use of copyrighted material from other sources (including the Web)
- Color figures are clearly marked as being intended for color reproduction on the Web (free of charge) and in print or to be reproduced in color on the Web (free of charge) and in black-and-white in print
- If only color on the Web is required, black and white versions of the figures are also supplied for printing purposes

For any further information please visit our customer support site at

<http://epsupport.elsevier.com>.



## After Acceptance

### Use of the Digital Object Identifier

The Digital Object Identifier (DOI) may be used to cite and link to electronic documents. The DOI consists of a unique alpha-numeric character string which is assigned to a document by the publisher upon the initial electronic publication. The assigned DOI never changes. Therefore, it is an ideal medium for citing a document, particularly 'Articles in press' because they have not yet received their full bibliographic information. The correct format for citing a DOI is shown as follows (example taken from a document in the journal *Physics Letters B*):

doi:10.1016/j.physletb.2003.10.071

When you use the DOI to create URL hyperlinks to documents on the web, they are guaranteed never to change.

### Proofs

One set of page proofs (as PDF files) will be sent by e-mail to the corresponding author (if we do not have an e-mail address then paper proofs will be sent by post) or, a link will be provided in the e-mail so that authors can download the files themselves.

Elsevier now provides authors with PDF proofs which can be annotated; for this you will need to download Adobe Reader version 7 (or higher) available free from <http://www.adobe.com/products/acrobat/readstep2.html>. Instructions on how to annotate PDF files will accompany the proofs (also given online). The exact system requirements are given at the Adobe site: <http://www.adobe.com/products/acrobat/acrrsystemreqs.html#70win>.

If you do not wish to use the PDF annotations function, you may list the corrections (including replies to the Query Form) and return them to Elsevier in an e-mail. Please list your corrections quoting line number. If, for any reason, this is not possible, then mark the corrections and any other comments (including replies to the Query Form) on a printout of your proof and return by fax, or scan the pages and e-mail, or by post. Please use this proof only for checking the typesetting, editing, completeness and correctness of the text, tables and figures. Significant changes to the article as accepted for publication will only be considered at this stage with permission from the Editor. We will do everything possible to get your article published quickly and accurately. Therefore, it is important to ensure that all of your corrections are sent back to us in one communication: please check carefully before replying, as inclusion of any subsequent corrections cannot be guaranteed. Proofreading is solely your responsibility. Note that Elsevier may proceed with the publication of your article if no response is received.

## Offprints

The corresponding author, at no cost, will be provided with a PDF file of the article via e-mail. For an extra charge, paper offprints can be ordered via the offprint order form which is sent once the article is accepted for publication. The PDF file is a watermarked version of the published article and includes a cover sheet with the journal cover image and a disclaimer outlining the terms and conditions of use.



### Author Inquiries

For inquiries relating to the submission of articles (including electronic submission where available) please visit this journal's homepage. You can track accepted articles at <http://www.elsevier.com/trackarticle> and set up e-mail alerts to inform you of when an article's status has changed. Also accessible from here is information on copyright, frequently asked questions and more. Contact details for questions arising after acceptance of an article, especially those relating to proofs, will be provided by the publisher.



Copyright © 2010 [Elsevier B.V.](http://www.elsevier.com) All rights reserved.