

Efecto del manejo silvicultural sobre el área foliar y la evapotranspiración en *Pinus taeda* en el noreste de Uruguay

Munka Carolina¹, Pezzani Fabiana¹, Cafferri Mario¹

¹Departamento de Sistemas Ambientales, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Garzón 780, 12900 Montevideo, Uruguay. Correo electrónico: fabiana@fagro.edu.uy

Recibido: 26/4/13 Aceptado: 7/10/13

Resumen

La poda y el raleo son prácticas silviculturales que buscan aumentar la productividad de los rodales. Estas prácticas también afectan variables estructurales y funcionales de los sistemas forestales. Este estudio evaluó la incidencia del raleo y la poda sobre una variable estructural, el índice de área foliar (IAF), y sobre una variable funcional, la evapotranspiración, en una plantación de *Pinus taeda* en Uruguay. Se evaluaron dos estaciones de crecimiento (2008-2009 y 2009-2010) en un rodal plantado en 2003 a una densidad inicial de 1000 árboles ha⁻¹. En junio de 2008 el 40% de los árboles fueron raleados y se podó el 50% de la copa de los árboles remanentes. El IAF fue estimado mediante fotografía hemisférica digital, en parcelas tratadas y testigo. Los valores de IAF se utilizaron para el cálculo de la resistencia superficial, término que luego se incluyó en la ecuación de Penman-Monteith para estimar la evapotranspiración máxima (ETm). El tratamiento silvicultural redujo 61% en promedio el IAF y esto resultó en una disminución promedio de la ETm de 45%. El manejo explicó el 55% de la variación del IAF y el 3% de la variación de la ETm. La ETm fue en promedio 32% y 15% menor en parcelas tratadas que en las testigo en la primera y segunda estación de crecimiento respectivamente. El incremento del área foliar fue mayor en los árboles tratados durante los dos años posteriores al tratamiento en relación a los árboles de las parcelas testigo.

Palabras clave: índice área foliar, evapotranspiración, poda y raleo, *Pinus taeda*

Summary

Effects of Silvicultural Management on Leaf Area and Evapotranspiration in *Pinus taeda* in Northeastern Uruguay

Pruning and thinning are silvicultural practices that seek to increase the productivity of the stands. These practices also affect structural and functional variables of forest systems. This study evaluated the effect of thinning and pruning on a structural variable, leaf area index (LAI), and on a functional variable, evapotranspiration, in a *Pinus taeda* stand in Uruguay. We evaluated two growing seasons (2008-2009 and 2009-2010) in a stand planted in 2003 at an initial density of 1000 trees/ha. In June 2008, 40% of the trees were thinned and the remaining tops were pruned (50%). LAI was estimated using digital hemispherical photography in treated and control plots. LAI values were used to calculate superficial resistance and this term was then included in the Penman-Monteith equation to estimate maximum evapotranspiration (ETm). Silvicultural treatment caused an average reduction of 61% of the IAF and this resulted in a 45% average decrease of ETm. The silvicultural management explained 55% of the variation in the IAF and 3% of the variation in the ETm. The ETm was 32% and 15% lower in treated plots than in control ones in the first and second growing season respectively. The increase in the leaf area was higher in treated trees during the two years after the treatment compared to trees in the control plots.

Keywords: leaf area index, evapotranspiration, pruning and thinning, *Pinus taeda*

Introducción

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 prácticas que tienden a aumentar la productividad del rodal. Estas prácticas generan cambios estructurales en el dosel y tienen algunos efectos inmediatos sobre determinados componentes del ciclo hidrológico: reducción de la interceptación de la precipitación, reducción de la evapotranspiración (ET), aumento del agua disponible en el suelo y aumento del escurrimiento (Amatya y Skaggs, 2008).

El efecto de las plantaciones forestales sobre el rendimiento hídrico de una cuenca (el volumen total de agua producida como caudal de la cuenca en un período de tiempo dado Sadanandan y Brown, 1997) depende de las características climáticas (precipitación y demanda atmosférica), de las características edáficas e hidrológicas de la cuenca (tipo de 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 esta 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 estudio de los efectos hidrológicos del manejo silvicultural (raleos y podas) en rodales de *Pinus taeda* en su región de origen (Norteamérica) fue abordado por numerosos investigadores (Stogsdill *et al.*, 1992; Chescheir *et al.*, 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 interceptación de la lluvia más que una reducción del uso del agua disponible. Esta reducción de interceptación 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 esta varía cuando se modifica, reemplaza o quita la cubierta vegetal. Uno de los mejores descriptores de la estructura de doseles que permite estimar intercambios de energía y agua en la interfase con la atmósfera es el índice de área foliar (IAF Rosenberg *et al.*, 1983). El IAF se define como la relación entre la superficie foliar por unidad de superficie de suelo (Watson, 1947). El proceso de transpiración en cubiertas forestales está alta-

mente correlacionado con el IAF y este a su vez es considerado un determinante estructural de la transpiración (Santiago *et al.*, 2000) como un estimador de la conductancia global del dosel (indirectamente de su resistencia al pasaje de vapor) la cual constituye una variable crítica en la estimación de la transpiración (Xavier *et al.*, 2002). En el cálculo de la ET, cuando no hay restricciones de agua disponible en el suelo, la resistencia al pasaje de vapor se considera mínima (Soares y Almeida, 2001); en estos casos la ET representa la evapotranspiración máxima (ET_m). La ET_m 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 ecuación de Penman-Monteith (Monteith, 1965) es utilizada para alcanzar una adecuada estimación de la ET_m de las cubiertas forestales (Monteith y Unsworth, 1990; Soares y Almeida, 2001; Jones, 2004). En la misma, el índice de área foliar (IAF) y la resistencia estomática (r_s) son utilizados para estimar la conductancia de la canopia, la cual representa el control fisiológico de las plantas en la transpiración.

Las medidas directas de IAF son técnicas destructivas, muy dificultosas y en general, en cubiertas forestales, no es posible realizar un muestreo exhaustivo del dosel, por lo que se han desarrollado métodos indirectos. La fotografía hemisférica digital (FHD) es propuesta como una medida indirecta que permite una adecuada estimación 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).

En este trabajo se analizó la incidencia del raleo y de la poda en un rodal de *Pinus taeda* sobre el cambio y la evolución del IAF durante dos años consecutivos. El IAF fue estimado mediante fotografía hemisférica. Asimismo, se evaluó la incidencia de los valores de IAF sobre la ET_m 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 ET_m pre y post tratamiento silvicultural en un rodal de *Pinus taeda* en la región NE de Uruguay.

Materiales y métodos

El área de estudio está ubicada aproximadamente 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 templa-

do y húmedo, con veranos calurosos (Cfa). El promedio anual de precipitación es de 1484 mm con distribución regular en el año medio, pero con una pronunciada variabilidad interanual en cada mes, y la temperatura promedio anual 18,1 °C (Furest, 2008). 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 msnm. 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 período de estudio fue desde mayo 2008 a mayo 2010 en un rodal de *Pinus taeda* plantado en el año 2003 a una densidad inicial de 1000 árboles ha⁻¹ (2,5 x 4 m). A principios de junio del 2008 se realizaron practicas culturales que luego conformaron el tratamiento silvicultural, que consistió en un raleo del 40% (se retiraron 350-400 árboles ha⁻¹) y en una poda del 50% de la copa de los árboles remanentes. Se seleccionaron dos sitios de diferente aptitud edáfica dentro de la cuenca. El sitio 1 corresponde a zonas de mayor altitud (aprox. 200 msnm) y presenta suelos superficiales de baja productividad; el sitio 2 presenta suelos de mayor profundidad y alta productividad (Cuadro 1). En cada sitio se evaluaron dos parcelas sometidas al tratamiento (raleo y poda) y dos parcelas testigo (sin raleo y sin poda). La parcela experimental tiene una superficie circular de 314 m².

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, desde mayo 2008 y hasta mayo 2010, 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, por ser un método óptico, 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 (Xavier *et al.*, 2002).

En cada parcela y en cada fecha se tomaron fotografías en siete puntos distintos en las siguientes ubicaciones: punto medio entre filas y entre árboles, a un metro de la fila entre árboles, punto medio entre árboles en la fila y punto medio entre filas en línea con los árboles. 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). Las imágenes fueron analizadas con el programa GLA (Gap Light Analyzer, versión 2) (Frazer, 1999) y los valores de IAF fueron calculados 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).

Los valores de IAF obtenidos fueron utilizados para calcular el término de resistencia superficial en la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) para obtener una primera aproximación de la ETm (mm día⁻¹) de este rodal de acuerdo a:

$$ETm = \frac{s \cdot (Rn - G) + \rho \cdot cp \cdot (e_s - e) / r_a}{s + \gamma [1 + (r_s / r_a)]}$$

(mm/día)

donde: Rn es la radiación neta (MJ m⁻² día⁻¹), G es el flujo del calor en el suelo (MJ m⁻² día⁻¹), e_s es la presión saturante de vapor (kPa), e es la presión actual de vapor (kPa), (e_s - e) representa el déficit de presión de vapor del aire, ρ es la densidad media del aire a presión constante (kg m⁻³), cp es el calor específico del aire (MJ kg⁻¹ °C⁻¹), s

Cuadro 1. Información edafológica de las unidades de suelo en donde se encuentran ubicadas las parcelas experimentales en la cuenca de estudio, Tacuarembó, Uruguay.

Tipo de suelo*	N° horizontes	Textura	Profundidad (cm)	Elevación (m)	Pendiente (%)	Área** (%)
Litosol éutrico (1)	1	Franco arcillo-arenoso	10	180 - 220	0 a 2	11
Acrisol ócrico típico (2)	4	Arenoso franco	175	150 - 180	12 a 15	26
Acrisol y luvisol (2)	4	Franco arenoso	175	145 - 160	6 a 12	20
Luvisol albico (2)	3	Franco arenoso	104	135 - 150	menor a 5	15

* Los números entre paréntesis identifican los dos tipos de sitio donde se ubicaron las parcelas en la cuenca.

** Porcentaje de ocupación de cada tipo de suelo en el área total de la cuenca.

representa la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$), γ es la constante psicrométrica ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$), y r_s y r_a son las resistencias superficial (total) y aerodinámica ($m.s^{-1}$), respectivamente. En el cálculo del balance de energía (Rn) se utilizó un valor de albedo de 0,15. Los valores de resistencia de la superficie (r_s) dependen de la resistencia estomática (r_e) y del IAF del dosel ($r_s = r_e / IAF$). Se utilizó $r_e = 150 m.s^{-1}$ de acuerdo a recomendaciones para cubiertas de pinos (Rosenberg, 1983; Landsberg, 1986; Amatya com.pers.) y el valor de IAF fue ajustado en función de los datos obtenidos en el período de estudio. Los valores diarios de IAF se obtuvieron por interpolación lineal entre dos fechas de mediciones sucesivas. Los promedios diarios de temperatura del aire ($^\circ C$), humedad relativa del aire (%), velocidad del viento ($m.s^{-1}$) y los totales diarios de radiación solar incidente ($MJ.m^{-2}$) utilizados para el cálculo de la ETm fueron calculados en base a los registros de un sistema automático de adquisición de datos basado en un registrador modelo CR10X (Campbell Scientific, Logan, UT) ubicado en el área de estudio.

Para las variables IAF y ETm se realizaron análisis de varianza de tres vías mediante un modelo lineal de efecto fijo donde se evaluaron los efectos de los factores tratamiento silvicultural y sitio, y la fecha de muestreo como una medida repetida en el tiempo, de acuerdo al siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + \text{TRATAMIENTO}_i + \text{SITIO}_j + \text{FECHA}_k + (\text{TRATAMIENTO} \times \text{FECHA})_{jk} + E_{ijk}$$

donde: Y = IAF o ETm, TRATAMIENTO es el efecto del tratamiento i (con poda y raleo o sin poda y sin raleo), SITIO

es el efecto fijo del sitio j (1 o 2), FECHA es el efecto de la fecha k (mayo/08...mayo/10), TRATAMIENTO x FECHA representa la interacción, E_{ijk} es el efecto residual

Se consideraron errores con estructura autorregresiva de orden uno (AR1) y varianzas heterocedásticas. Se consideró el valor de $p = 0,05$ como el límite de significación estadística.

Resultados

El área foliar de los rodales estudiados exhibió una notoria variación intranual (Figura 1). Esto se pudo observar en las parcelas testigo (sin manejo silvicultural) en las cuales el IAF varió entre 1,7 en marzo 2008 y 1,3 y 1,34 en agosto 2008 y julio 2009, respectivamente (promedio para ambos sitios). El análisis de varianza indicó que el factor fecha explicó un 26% de la variación del IAF a lo largo de todo el período evaluado ($F_{(7,63)} = 27,51$; $p < 0,0001$). A su vez, en la época que corresponde a la estación de crecimiento para *P. taeda* en regiones templadas (octubre-marzo), el incremento del área foliar de las parcelas intervenidas fue en el entorno del 10% mensual, mientras que las parcelas testigo presentaron un incremento del orden del 6% mensual.

El tratamiento silvicultural redujo el IAF en promedio un 61% respecto a las parcelas testigo ($F_{(1,63)} = 410,41$; $p < 0,0001$) pasando de 1,37 a 0,56; este factor explicó el 55% de la variación del IAF en el período de evaluación (Figura 1). La interacción tratamiento x fecha también fue significativa ($F_{(7,63)} = 2,86$; $p = 0,0142$) aunque representó menos del 3% de la variación observada.

La magnitud de disminución del IAF debido al tratamiento silvicultural no fue la misma en toda la cuenca: el porcentaje

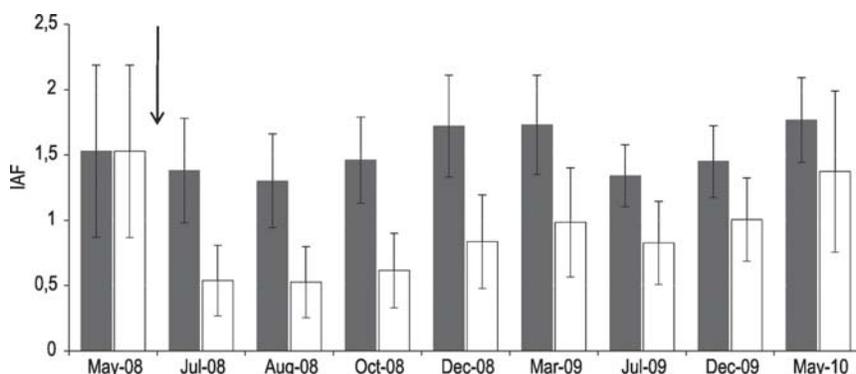


Figura 1. Índice de área foliar (IAF) (promedio \pm d.e., $n=4$) en las parcelas testigo (barra gris) y en las parcelas pareadas, con manejo (barra blanca) en la cuenca de estudio, Tacuarembó, Uruguay, en el período mayo 2008 – mayo 2010. La flecha indica el momento del año cuando se realizó el tratamiento silvicultural.

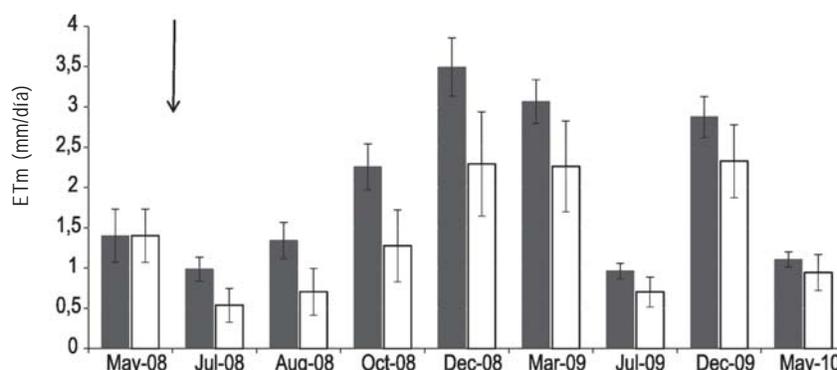


Figura 2. Evapotranspiración máxima (ETm) (promedio \pm d.e., n=4) en las parcelas testigo (barra gris) y en las parcelas pareadas, con manejo (barra blanca), en la cuenca de estudio, Tacuarembó, Uruguay, en el período mayo 2008 – mayo 2010. La flecha indica el momento del año cuando se realizó el tratamiento silvicultural.

promedio de reducción del IAF fue de 66,7% en el sitio 1 (1,05 en las parcelas testigo vs. 0,35 en las intervenidas) y de 54,8% en el sitio 2 (1,7 en las parcelas testigo vs. 0,77 en las intervenidas). El factor sitio ($F_{(1,63)} = 127,71$; $p < 0,0001$) explicó un 17% de la variación del IAF en el período post-tratamiento (julio 2008-mayo 2010).

La reducción del IAF debido a la poda y el raleo provocó una disminución significativa en los valores de ETm ($F_{(1,63)} = 15,42$; $p < 0,0001$), aunque la incidencia del tratamiento explicó solo un 3% de la variación de la ETm durante las dos estaciones de crecimiento estudiadas (julio 2008-mayo 2010). La disminución inmediata de la ETm luego del tratamiento silvicultural fue en promedio del orden del 45% (Figura 2). Otra parte de la variación de esta variable fue explicada en un 14% por el sitio ($F_{(1,63)} = 81,96$; $p < 0,0001$). Los valores estimados de ETm luego del tratamiento fueron de 0,86 y 0,36 en el sitio 1 (suelos superficiales) y en el sitio 2 (suelos profundos) 1,11 y 0,72 en parcelas testigo y tratadas, respectivamente.

La estacionalidad de la ETm resultó muy marcada, el factor fecha tuvo un efecto muy significativo ($F_{(8,89)} = 62,72$; $p < 0,0001$) en la variación de la misma en cada uno de los dos años evaluados, explicando el 74% de dicha variación (Cuadro 2). La ETm, fue tres veces menor en invierno (junio) respecto al verano (diciembre) tanto en las parcelas intervenidas como en las testigos. La interacción tratamiento x fecha fue significativa ($F_{(7,63)} = 7,98$; $p < 0,0001$) y representó el 9% de la variación observada en esta variable.

Cuadro 2. Valores promedio (para todas las fechas y parcelas evaluadas, n=64) de evapotranspiración máxima (ETm, mm/día) para las parcelas con manejo y sin manejo silvicultural en cada fecha de medición en la cuenca de estudio, Tacuarembó, Uruguay.

Fecha	Con poda y raleo	Sin poda y raleo
jul-08	0,99 g (0,05)	0,54 i (0,05)
ago-08	1,34 e (0,08)	0,71 h (0,08)
oct-08	2,26 d (0,13)	1,28 e f (0,13)
dic-08	3,49 a (0,21)	2,29 d (0,21)
mar-09	3,07 b (0,19)	2,26 d (0,19)
jul-09	0,96 g (0,04)	0,70 h (0,04)
dic-09	2,87 c (0,19)	2,33 d (0,19)
may-10	1,11 f g (0,06)	0,94 g (0,06)

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

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 estudió un aspecto estructural a través de la estimación del IAF en un rodal de *Pinus taeda* durante dos años luego de su primer raleo y poda precomercial. El raleo y la poda afectaron la estructura del dosel, reduciendo el IAF. Esto a su vez, provocó una disminución de la evapotranspiración, uno de los aspectos funcionales del ecosistema.

El raleo y la poda fueron la principal causa de la variación de la cobertura foliar en el período pos-tratamiento silvicultural (julio 2008-mayo 2010) provocando una reducción muy significativa del IAF (61% promedio). Resultados similares respecto a la reducción del área foliar debido al manejo silvicultural fueron obtenidos por Hennessey *et al.* (2004) para *P. taeda* en el SE de Estados Unidos (Oklahoma). Los autores reportaron que el raleo del 75% y del 50% del área basal original, a los nueve años en una plantación de 2078 árboles.ha⁻¹, redujo el IAF en un 55% y 33% respectivamente.

El desarrollo del follaje depende principalmente de la penetración de la luz y de la disponibilidad de nutrientes y agua (Barclay *et al.*, 1986; Albaugh *et al.*, 2006). En nuestro estudio, luego de dos estaciones de crecimiento post-tratamiento, las parcelas podadas y raleadas presentaron menores valores de IAF respecto a las parcelas testigos. Sin embargo, el incremento del área foliar en ese período fue superior en las parcelas podadas y raleadas. Este tipo de respuestas fueron también descritas por Muñoz *et al.* (2008) quienes reportaron mayores valores de IAF en árboles de *Eucalyptus nitens* que recibieron tratamiento silvicultural luego de nueve años de raleados y podados en relación a los no tratados. Gillespie *et al.* (1994) y Barclay *et al.* (1986) encontraron similares tendencias como respuesta al raleo en *P. taeda* y *Pseudotsuga menziesii* respectivamente. Esta tendencia se podría atribuir a una mayor luminosidad disponible por árbol, que provocaría un aumento en el tamaño de copa, así como a un aumento en la disponibilidad de agua y nutrientes en el suelo debido a la apertura del dosel. Otra posible explicación en la mayor tasa de incremento del área foliar podría deberse a una mayor eficiencia en el uso de la radiación y el agua por parte de la biomasa vegetal remanente (Dalla Tea y Jokela, 1991; Muñoz *et al.*, 2008).

La cobertura foliar aumenta con el desarrollo del rodal y se estabiliza a un determinado nivel de luminosidad y tasa de respiración del follaje, momento que corresponde al cierre del dosel (Muñoz *et al.*, 2008). Esta situación no fue observada en el período de estudio del presente trabajo. Esto se podría explicar porque los valores de IAF estimados al culminar el segundo período de crecimiento post-tratamiento, se encontraron aun por debajo de 5,5, lo cual representa el nivel óptimo de IAF asociado a la máxima productividad en *P. taeda* (Gholz, 1986).

En nuestro trabajo el IAF promedio alcanzó máximos de 1,57 ($\pm 0,45$) en las parcelas con poda y raleo y de 1,77 ($\pm 0,32$) en el testigo hacia el final del período de estudio. Cabrelli *et al.* (2006) en Entre Ríos (Argentina) en *P. elliotii*

obtuvieron valores de IAF, también obtenidos mediante fotografía hemisférica, de 1,45 en rodales a una densidad de 586 árboles.ha⁻¹ y de 3,01 para una densidad de 900 árboles ha⁻¹. Samuelson *et al.* (2004) y Will *et al.* (2005) obtuvieron valores de IAF superiores a los obtenidos en nuestro estudio, en el entorno de 2,8 y en un rango de 2,52 a 4,9 respectivamente. Estos trabajos se realizaron en rodales de *P. taeda* en la región SE de Estados Unidos (con características climáticas y de sitio semejantes al nuestro), que tenían edad similar pero mayor densidad que la del rodal de este trabajo. Además, esta diferencia puede explicarse no solo por la diferente densidad de árboles de estos rodales, sino también por la metodología de estimación del área foliar utilizada en el caso de las plantaciones mencionadas. Para la determinación del IAF se usó un método directo que calcula el área específica de hoja mediante colecta de acículas. Esto podría indicar una probable subestimación del valor de IAF obtenido mediante FHD en nuestro trabajo, si se lo comparara con valores determinados mediante métodos directos.

El comportamiento estacional del área foliar del género *Pinus* 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). Esta misma variación pudo ser observada en nuestro trabajo: en las parcelas que fueron raleadas y podadas el IAF fue dos veces mayor en verano respecto al invierno. En las parcelas testigo, sin manejo silvicultural, también se observó variación estacional: el IAF fue 1/3 superior en la época estival (marzo) 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 *P. elliotii* (especie afín al *P. taeda*); la razón principal de esta variación fue atribuida al período de expansión de hojas que ocurre hacia el final de su estación de crecimiento.

A pesar de que la poda y el raleo junto con la estación del año 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 respues-

ta 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 en los valores de IAF que alcanzaron los distintos sitios estudiados. El rango de reducción del IAF varió entre 55% y 71% entre los sitios 2 y 1 respectivamente en el muestreo inmediato posterior al tratamiento. Luego de dos años, en el sitio con suelos más profundos, y posiblemente con mayor agua disponible en el suelo (sitio 2) el valor de IAF alcanzado fue de 1,7 comparado con un IAF de 1 alcanzado en el sitio con suelos más superficiales (sitio 1). Si bien no fue un objetivo de nuestro trabajo evaluar los efectos de diferentes condiciones de producción (por ejemplo la profundidad del suelo), las diferencias encontradas entre los sitios deberían ser tenidas en cuenta para realizar recomendaciones de prácticas silviculturales que se ajusten a cada situación.

La disminución del área foliar debido al manejo silvicultural se vio reflejada en una reducción significativa de la ETm: la disminución de esta variable dos meses después de realizado el manejo 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% respectivamente la transpiración de los rodales durante la primera estación de crecimiento. En la segunda estación de crecimiento la disminución de la transpiración fue del 12% (Stogsdill *et al.*, 1992). Consistentemente con estos resultados, en nuestro estudio, el raleo y la poda redujeron la ETm en la primera (32%) y en la segunda estación de crecimiento (15%), respecto a las parcelas control. Cabe señalar que investigaciones basadas en balances hidrológicos en plantaciones forestales coinciden en reportar que los raleos tienen un efecto inmediato sobre el ciclo hidrológico no solo debido a un descenso de la ET, sino también a una reducción de la interceptación de agua de precipitación. Ambos procesos conllevan a un aumento del agua en el suelo así como del escurrimiento (Huber *et al.*, 1985; Stogsdill *et al.*, 1992; Grace *et al.*, 2006; Amatya y Skaggs, 2008).

De acuerdo a las condiciones climáticas en Uruguay, la estacionalidad de la ETm resultó muy marcada: el momento del año explicó en un 74% la variación de esta variable, siendo tres 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 en cada estación del año, la cual es requerida para el cambio de estado del agua en este proceso. El balance de energía es cinco veces mayor en verano que en invierno para el rango de latitud en que se encuentra Uruguay (Furest, 2008).

En este estudio no se consideró el efecto de la cubierta herbácea bajo los pinos en la evapotranspiración de la superficie. Las modificaciones introducidas en la estimación de la 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 una cubierta de coníferas. Estas modificaciones permitieron evaluar el efecto del raleo y de la poda sobre 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 evapotranspiración de la cubierta herbácea bajo el dosel.

La validación de la técnica de estimación de IAF no fue objeto de este trabajo y se asumió a la FHD como una herramienta recomendada para obtener valores de 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 área foliar y que deberían ser corregidas para alcanzar un valor de IAF «verdadero» (Linhares *et al.*, 2000; Jonckheere *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2005). Dos de las principales causas de esta subestimación son: a) no es posible discriminar directamente los elementos «verdes» del dosel de los no verdes (ramas, troncos, flores); b) el agrupamiento típico de las acículas conocido como efecto «clumping» (Welles, 1990; Chen, 1996; Weiss *et al.*, 2004). Para el propósito de nuestro estudio fueron utilizados los valores de IAF no corregidos por «clumping» 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).

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo permitieron demostrar que la poda y el raleo no solo afectaron una variable estructural de un rodal de *P. taeda* como lo es el área foliar, sino también influyeron en un atributo funcional como lo es la evapotranspiración. Dichas prácticas silviculturales redujeron los valores de IAF y de ETm, y este efecto fue observado durante dos estaciones de crecimiento posteriores a la poda y el raleo. Asimismo pudo observarse que los efectos de las prácticas silviculturales sobre las variables estudiadas fueron más notorios en rodales menos productivos

ubicados sobre suelos superficiales. Esto podría tener implicaciones en las recomendaciones de futuras prácticas en sitios con diferente aptitud productiva.

Agradecimientos

Se agradece a Juan Pedro Posse, George Chescheir, Juliana Ivanchenko, Gerardo Osorio y a la empresa Weyerhaeuser SA por el apoyo logístico brindado para la realización de este trabajo. A Oscar Bentancur por el asesoramiento para los análisis estadísticos. La Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC-UDELAR) otorgó una beca de Posgrado a C. Munka para la realización de este estudio.

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(1): 10-23.
- Allen C, Will R, Sarigumba T, Jacobson M, Daniels R, Kennerley S. 2004. Relationship between canopy dynamics and stem volume production of four species receiving irrigation and fertilization. En: Connor K. [Ed.]. Proceedings of the 12th biennial southern silvicultural research conference. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. pp. 343-347.
- Allen RG, Pereira L S, Raes D, Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Roma : FAO. 298p. (Irrigation and drainage paper: 56).
- Amatya D, Skaggs R. 2008. Effects of thinning on hydrology and water quality of a drained pine forest in Coastal North Carolina [Cd-Rom]. En: Tollner EW, Saleh A. [Eds.]. 21st Century Watershed Technology: Improving Water Quality and Environment. Proceedings of a meeting held 29 March - 3 April 2008; Concepcion, Chile. ASABE.
- 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(3): 438-442.
- Beadle C, Talbot H, Jarvis P. 1982. Canopy structure and leaf area index in a mature Scots pine forest. *Forestry*, 55(2): 105-123.
- Cabrelli D, Rebottaro S, Efron D. 2006. Caracterización del dosel forestal y del microambiente lumínico en rodales con diferente manejo, utilizando fotografía hemisférica. *Quebracho*, 13: 17-25.
- Chen J. 1996. Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 80(2-4): 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(24): 29429-29443.
- Chen J, Black T. 1992. Defining leaf-area index for non-flatleaves. *Plant Cell Environment*, 15(4): 421-429.
- Chescheir GM, Lebo ME, Amatya DM, Hughes J, Gilliam JW, Skaggs RW, Herrman RB. 2003. Hydrology and water quality of forested lands in Eastern North Carolina. Raleigh : North Carolina State University, Department of Communication Services. 79p. (Technical Bulletin : 320).
- Dalla Tea F, Jokela E. 1991. Needlefall, canopy light interception, and productivity of young intensively managed slash and loblolly pine stands. *Forest Science*, 37(5): 1298-1313.
- Doorenbos J, Kassam A. 1979. Efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Roma : FAO. (Riego y Drenaje ; 33). 133p.
- Dougherty P, Hennessey 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(2-3): 213-227.
- Frazer G, Canham C, Lertzman K. 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. Burnaby : Simon Fraser University, British Columbia, Institute of Ecosystem Studies.
- Furest JM. 2008. Estadísticas Agroclimológicas Mensuales 1971 - 2000 [En línea]. INIA. Consultado 16 octubre 2013. Disponible en: http://www.inia.org.uy/online/site/base_clima_esta_mens_vizu.php?bus=Tacuarembó&base=72.
- Garrigues S, Shabanov NV, Swanson K, Morissette JT, Baret F, Myneni RB. 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(8-9): 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. Ibaraki : Forestry and Forest Products Research Institute. 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 elliotii* stands of north Florida. *Ecological Monographs*, 61(1): 33-51.
- Gillespie 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(7):1337-1344.
- Grace III J, Skaggs R, Chescheir G. 2006. Hydrologic and water quality effects of thinning loblolly pine. *Transaction of the ASABE*, 49(3): 645-665.
- 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(1): 97-116.
- Hennessey T, Dougherty P, Cregg B, Wittwer R. 1992. Annual variations in needle fall of a loblolly pine stand in relation to climate and stand density. *Forest Ecology and Management*, 51(4): 329-338.
- Huber A, Oyarzún C, Ellies A. 1985. Balance hídrico en tres plantaciones de *Pinus radiata*. II: Humedad del suelo y evapotranspiración. *Bosque*, 6(2): 74-82.
- Jonckheere I, Fleck S, Nackarts K, Muys B, Coppin P, Weiss M, 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(1-2):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; 20-21 mayo, 2004; Ilhavo, Portugal. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior de Agronomia. p. 3.
- Landsberg, J. 1986. Physiological Ecology of Forest Production. London : Academic Press. 198p.
- 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. Toronto: Institute of Electrical and Electronics Engineers. pp. 2902-2904.

- Linhares C, Oonzoni F, Shimabukuro Y.** 2000. Relacao entre volume de madeira e indice de área foliar em um povoamento de *Pinus spp.*: estudio de caso. *Revista Árvore*, 24: 47-54.
- 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. Montevideo : COLONVADE. 24p.
- Monteith J.** 1965. Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19: 205-234.
- Monteith J, Unsworth M.** 1990. Principles of environmental physics. 2 ed. Londres : Edward Arnold. 291p.
- 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(1): 44-51.
- Rosenberg N, Blad B, Verma S.** 1983. Microclimate, the biological Environment. 2 ed. New York : John Wiley & Sons. 495p.
- Sadanandan E, Brown A.** 1997. Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forest. Camberra : CSIRO. 571 p.
- 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(12): 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(1): 59-70.
- Santiago L, Goldstein G, Meinzer F, Fownes J, Mueller-Dombois D.** 2000. Transpiration and forest structure in relation to soil waterlogging in a Hawaiian montane cloud forest. *Tree Physiology*, 20(10): 673-681.
- 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(3-4): 266-276.
- Soares J, Almeida A.** 2001. Modelling the water balance and soil water fluxes in fast growing *Eucalyptus* plantation in Brazil. *Journal of Hydrology*, 253(1-4): 130-147.
- Stogsdill WR, Wittwer RF, Hennessey TC, Dougherty PM.** 1992. Water use in thinned loblolly pine plantations. *Forest Ecology and Management*, 50(3-4): 233-245.
- Watson D.** 1947. 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, 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(1-2):37-53.
- Welles 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.
- 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. *Revista Árvore*, 26(4): 421-427.
- Zhang Y, Chen J, Miller J.** 2005. Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133(1-4): 166-181.