

EFFECTO DE LAS PLANTACIONES FORESTALES SOBRE EL RECURSO AGUA EN EL URUGUAY

Silveira, L.¹; Alonso, J.²; Martínez, L.

Recibido: 06/03/06 Aceptado:25/10/06

RESUMEN

El desarrollo de la forestación industrial en el Uruguay, sustituyendo tierras de pastoreo para uso ganadero por plantaciones de *Eucalyptus* y *Pinus*, ha causado preocupación respecto a sus efectos sobre los recursos naturales, particularmente aguas y suelos. En ese contexto se emprenden estudios de investigación con el propósito de obtener indicadores de manejo forestal sustentable. Este trabajo presenta los avances en el conocimiento de los efectos de la forestación sobre el recurso hídrico en el Uruguay, en base a los resultados obtenidos hasta el presente en proyectos de investigación de la Red Temática de Ingeniería Agrícola de la Universidad de la República. Se describen los estudios realizados en una macrocuenca de 2.097 km², con una superficie forestada de 540 km² y en dos microcuencas experimentales, la primera forestada con *Eucalyptus* y la testigo con tapiz herbáceo para uso ganadero, ubicadas en la misma región, bajo condiciones hidrológicas similares. Los resultados disponibles permiten cuantificar tendencias en cuanto al: 1) efecto de las plantaciones sobre hidrogramas de tormentas (volúmenes escurridos y caudales máximos); 2) efecto de las plantaciones de *Eucalyptus* y *Pinus* sobre la escorrentía en macrocuencas, distinguiendo entre comportamiento anual y estacional, en el período preforestación (1975-1993), y el período posforestación (1994-2002); 3) precipitación directa y fustal, dos de las tres componentes en que se distribuye la lluvia en una plantación forestal; 4) relación entre humedad del suelo y capacidad de campo.

PALABRAS CLAVE: *Eucalyptus*, *Pinus*, tapiz herbáceo, escorrentía, sustentabilidad

SUMMARY

THE EFFECTS OF AFFORESTATION ON URUGUAY'S WATER RESOURCES

The development of industrial afforestation in Uruguay led to the substitution of natural grasslands mainly used for cattle grazing by *Eucalyptus* and *Pinus* plantations. This land use modification caused concern regarding its effects on the country's natural resources, particularly water and soils. Therefore, research studies were undertaken in order to find hydro-environmental indicators of sustainable forest management. This paper shows the progress and current state of knowledge regarding the effects of afforestation on Uruguay's water resources, based on investigations carried out by the University Net on Agricultural Engineering. The paper describes studies in a macro-basin of 2.097 km², with a forestry surface of about 540 km² and two experimental micro-basins with different land cover, located in the same region, under similar hydrological conditions. Available results allows to quantify trends related to: 1) the effects on hydrographs (runoff volumes and maximum peaks); 2) the effect of the *Eucalyptus* and *Pinus* plantations on the macro-basin's runoff, distinguishing between annual and seasonal behavior, for the period before afforestation (1975-1993), where the cattle use prevailed, and the period after afforestation (1994-2002); 3) the amount of direct rainfall and stemflow, two of the three components of rainfall redistribution in forests; 4) the relationship between soil humidity and field capacity.

KEY WORDS: *Eucalyptus*, *Pinus*, grasslands, runoff, sustainable management

¹Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), J. Herrera y Reissig 565, C.P. 11300.

²Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Aguas, Garzón 780, C.P. 12900. Montevideo, Uruguay.

INTRODUCCIÓN

La promulgación de la Ley Forestal N° 15.939, dio lugar a un incremento sustancial de la superficie territorial del Uruguay afectada a la actividad forestal. En consecuencia, se produjo la sustitución de campo natural, primordialmente destinado a la ganadería, por plantaciones industriales, en general de *Eucalyptus* y *Pinus*. El incremento registrado entre 1990 y diciembre de 2004 fue de tal magnitud, que se pasó de 45.000 hectáreas a aproximadamente 750.000 hectáreas forestadas.

La forestación industrial, en un país tradicionalmente agrícola - ganadero, representó para la comunidad y la opinión pública un elemento nuevo en la vida nacional y creó preocupación en la sociedad y en las instituciones estatales, entre otros, respecto a su efecto sobre los recursos naturales, en particular aguas y suelos. En ese contexto y tomando en cuenta que Uruguay participa del Proceso de Montreal (1993), que tiene por propósito realizar el seguimiento de Criterios e Indicadores de Manejo Forestal Sustentable, la Dirección General Forestal (DGF) del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP), encomendó en 1998 a las Facultades de Agronomía e Ingeniería de la Universidad de la República, la ejecución del "Proyecto de instalación de microcuencas experimentales para el estudio del impacto ambiental y monitoreo de programas de forestación con *Eucalyptus* en el Uruguay". Este programa se ejecutó, con discontinuidades, entre el 4 de diciembre de 1998 y el 31 de mayo de 2001. La selección de microcuencas y su instrumentación tuvo lugar en 1999, y el monitoreo se inició a partir del año siguiente.

Este trabajo recopila los avances de este programa en relación al conocimiento de los efectos de las plantaciones forestales sobre el recurso hídrico. La información disponible comprende: análisis de hidrogramas (volúmenes escurridos y caudales máximos), precipitación directa y fustal, y contenido de humedad en el suelo, registrados en dos microcuencas de 70 y 100 hectáreas de superficie, que se encuentran documentados en Silveira *et al.* (2002, 2003).

En base a estas primeras experiencias, para darle continuidad a la línea de investigación emprendida en 1998, se formuló el proyecto de investigación "Impacto de las plantaciones forestales sobre los recursos hídricos ¿Cómo extender la información de microcuencas experimentales a grandes cuencas?", que fue financiado por la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC), de la Universidad de la República. Este proyecto, que se ejecutó entre el 1 de octubre de 2002 y el 30 de setiembre de 2004, incorporó el análisis de macrocuencas con superficies superiores a los 1.000 km², en las que se produjo un desarrollo forestal relevante. Los estudios se apoyaron en la infor-

mación histórica existente en el país, fundamentalmente registros de precipitación y caudales observados, y datos en relación a la evolución de las plantaciones forestales. En particular, el presente trabajo recopila los estudios realizados en una macrocuenca de 2.097 km² de extensión y la comparación de sus resultados con los obtenidos en las microcuencas experimentales ubicadas en la misma región, que se encuentran documentados en Silveira & Alonso (2004) y Silveira *et al.* (2004). Para ello, en primer lugar, detalla la metodología utilizada para obtener indicadores hidrológicos en relación al efecto de las plantaciones de *Eucalyptus* y *Pinus* sobre la escorrentía de la macrocuenca, en base a datos diarios de altura limnimétrica y pluviometría, distinguiendo entre comportamiento anual y estacional, en los períodos pre- y posforestación. En segundo lugar, el trabajo describe la metodología utilizada para medir el efecto de las plantaciones de *Eucalyptus* y *Pinus* sobre el volumen de escorrentía y los caudales pico, en base a la comparación de eventos registrados en los períodos pre- y posforestación. Por último, compara estos resultados con los obtenidos en el par de microcuencas experimentales, que se encuentran bajo condiciones hidrológicas similares. Conviene notar que, estos estudios miden efectos globales en el período de tiempo sobre el que se dispone de información, sin tomar en cuenta variables como la edad y densidad de las plantaciones forestales, que requieren un número considerable de puntos de monitoreo y mayor longitud del período de medición.

ÁREA DE ESTUDIO

Microcuencas

Las microcuencas instrumentadas en el marco del proyecto encomendado por la DGF, se ubican en el Departamento de Tacuarembó, Establecimiento "La Abuelita", al que se accede en el km 363 de la Ruta Nacional N° 5. En el Cuadro 1 se presentan los parámetros físicos más relevantes y los tiempos de concentración de las dos microcuencas (plantación de *Eucalyptus* y campo natural), calculados según el método de Kirpich (1940). Asimismo, en las Figuras 1 y 2 se ilustra su ubicación geográfica, forma y topografía.

Los suelos dominantes de las microcuencas están constituidos por Luvisoles y Acrisoles Ócricos e Inceptisoles (Durán, P. *et al.*, 2001), equivalentes a Hapludalfes, Hapludultes y Distrudeptes, respectivamente según la Taxonomía de Suelos (Keys to soil Taxonomy for Uruguay, 2005). La geología del área se compone de rocas del Triásico Jurásico asociadas a la Formación Tacuarembó, que a su vez están parcialmente recubiertas

Cuadro 1. Parámetros físicos e hidrológicos de las microcuencas experimentales y la macrocuenca P° Manuel Díaz.

Parámetro	Microcuenca forestal	Microcuenca testigo (Campo natural)	Macrocuenca P° Manuel Díaz
Área (ha)	68,0	102,7	209.687,3
Pendiente media de la cuenca (%)	9,1	10,7	1,29
Longitud del cauce principal (km)	1,3	1,2	93,8
Pendiente del cauce principal (%)	2,5	2,9	0,08
Tiempo de concentración	20 min.	19 min.	35,3 hs.
Coordenadas del cierre (lat, long)	31° 56', 56° 03'	31° 56', 56° 04'	31° 32', 55° 41'

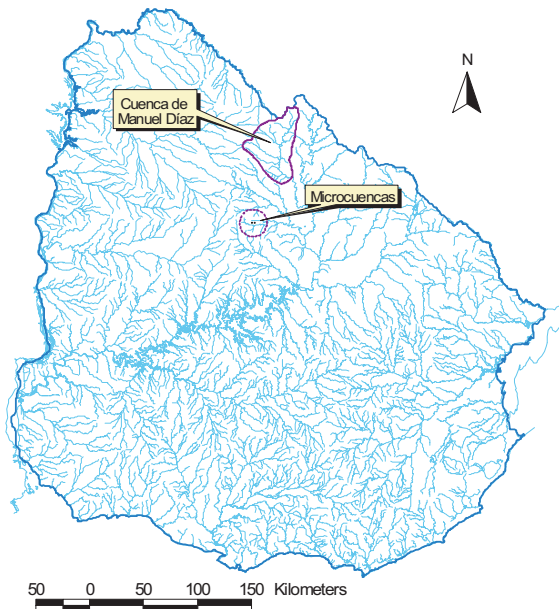


Figura 1. Ubicación geográfica de las microcuencas experimentales y macrocuenca P° Manuel Díaz.

por lavas básicas de la Formación Arapey, de edad Cretácico Inferior. La vegetación está constituida por plantaciones forestales de *Eucalyptus Grandis* en una de las microcuencas y campo natural para uso ganadero en la microcuenca testigo.

Macrocuenca

El proyecto CSIC comprende el estudio de macrocuencas sitas aguas arriba de la represa Dr. Gabriel Terra, en el Río Negro. De estas se seleccionaron aquellas cuya superficie forestada abarca más de un 10% de su superficie total. Este trabajo recopila los resultados obtenidos en la macrocuenca Paso Manuel Díaz, por ser la que muestra mayor desarrollo forestal durante la década de 1990. Esta macrocuenca está delimitada por el P° Manuel Díaz, sito en el km 480 de la Ruta Nacional N° 5. Su cauce principal, el río Tacuarembó, es uno de los principales

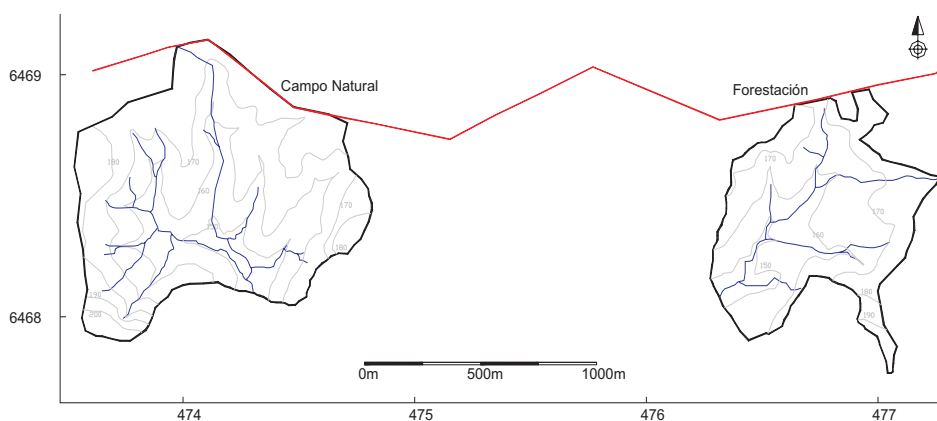


Figura 2. Ubicación y topografía de las microcuencas experimentales.

afuentes del río Negro, sobre el que se localizan las tres centrales hidroeléctricas de UTE. La Cuchilla Negra y la Cuchilla de Haedo forman parte de su divisoria de aguas, con altitudes entre 300 a 400 m s.n.m. Aguas abajo predominan las pendientes suaves, con altitudes entre 150 a 200 m s.n.m. El Cuadro 1 incluye también sus parámetros físicos y tiempo de concentración. Las Figuras 1 y 3 ilustran su ubicación geográfica y la distribución espacial de la superficie forestada.

En la macrocuenca P° Manuel Díaz predominan los Luvisoles y Acrisoles Ócricos (MAP/DSF, 1979). La superficie forestada se compone principalmente de *Pinus* y *Eucalyptus* y representa el 25,75% de la superficie total de la macrocuenca. En la Figura 4 se ilustra la evolución anual de la forestación, distinguiendo entre las especies *Eucalyptus* y *Pinus*.

En virtud de la extensión de la macrocuenca P° Manuel Díaz, donde pueden coexistir otras modificaciones del uso de los suelos en el período bajo estudio, se analizó la evolución de otros usos del recurso hídrico, principalmente la construcción de embalses y tomas directas para riego. De acuerdo a los anuarios de la Dirección Nacional de Hidrografía sobre "Aprovechamiento de los Recursos Hídricos", la superficie máxima regada nunca supero los 6 km², que representan el 0,3% de la superficie de la macrocuenca, situándose actualmente en menos de 2 km². Por tanto, se optó por considerar que estos usos no son significativos en comparación con la superficie forestada.

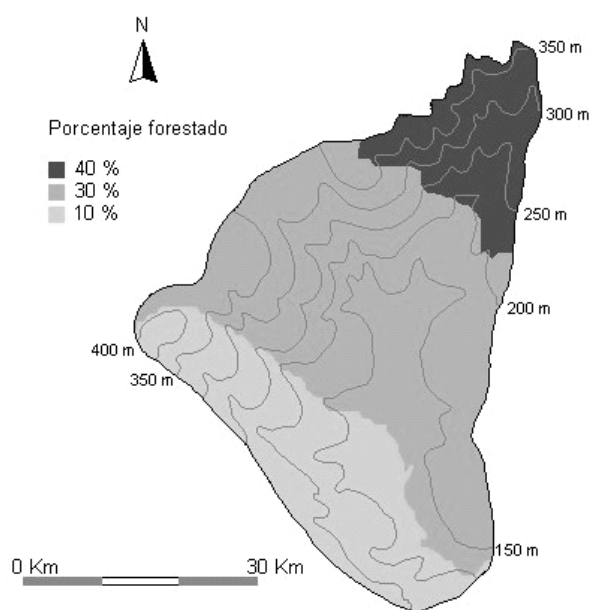


Figura 3. Mapa topográfico y distribución de la superficie forestada en la macrocuenca P° Manuel Díaz.

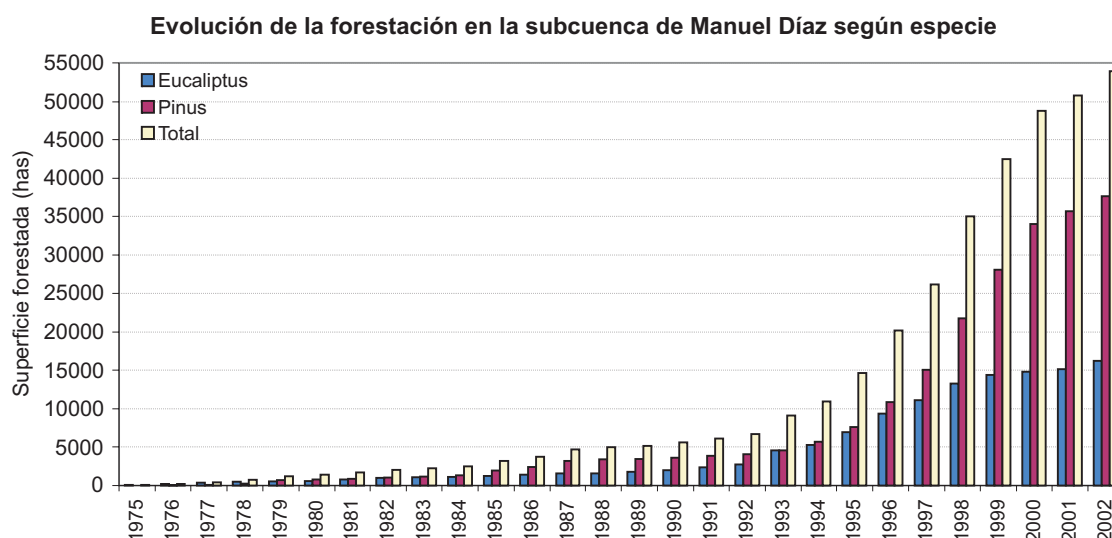


Figura 4. Evolución de la forestación en la macrocuenca P° Manuel Díaz.

METODOLOGÍA

A continuación se distingue entre la metodología utilizada para cuantificar tendencias en cuanto a: 1) efecto de las plantaciones sobre eventos de lluvias (volúmenes escurridos y caudales máximos) para diferentes escalas espaciales (micro- y macrocuenca); 2) efectos de las plantaciones de *Eucalyptus* y *Pinus* sobre la escorrentía en macrocuencas, distinguiendo entre comportamiento anual y estacional, en el período preforestación (1975-1993), donde predomina el uso ganadero, y el período posforestación (1994-2002); 3) precipitación directa y fustal, dos de las tres componentes en que se redistribuye la precipitación incidente en una plantación forestal; 4) relación entre el contenido de agua del suelo y su capacidad de campo.

1) Efecto sobre eventos de lluvias

Microcuencas

Para analizar los efectos de la forestación sobre los parámetros hidrológicos del balance hídrico se dispuso de dos microcuencas con distinta cobertura vegetal (*Eucalyptus* y campo natural). La instrumentación de éstas, para la determinación de la relación precipitación - caudal, consta de: estructuras de cierre, similares al cuerpo de pequeñas presas de tierra, provistas en la zona central con vertederos de cresta delgada, de tipo combinado triangular - rectangular, con capacidad para registrar caudales en el rango 0 - 14 m³/s; limnigrafos electrónicos de boya; red de pluviómetros; y un pluviógrafo electrónico, éste último ubicado en la estación meteorológica sita en la microcuenca testigo, con campo natural por cobertura vegetal.

Los datos de altura limnimétrica registrados en cada una de las microcuencas se transformaron a datos de caudal aplicando la relación altura - caudal vertido, determinada en laboratorio mediante la implementación de un modelo físico, con el que se calibró la zona de transición entre el vertedero triangular y el vertedero rectangular (Durán, P. *et al.*, 2001). Puesto que la información registrada no es continua, se identificaron los hidrogramas registrados en el período junio de 2000 a mayo de 2002, y se analizó la correlación existente entre caudales máximos y escurrimientos específicos, medidos en la microcuenca forestal y la microcuenca testigo con campo natural, expresados por unidad de área, a efectos de prescindir de las diferencias existentes en superficie entre una microcuenca y otra.

Macrocuena

Para estudiar los efectos de la forestación sobre el régimen de escurrimiento en macrocuencas, se dispuso, entre

otros, de medidas diarias de altura limnimétrica en el P° Manuel Díaz, que se transformaron a caudal aplicando la curva de aforos del servicio oficial (DNH), y datos diarios de precipitación medida en cuatro pluviómetros ubicados en la macrocuenca. De acuerdo a la evolución de la forestación en esta macrocuenca, el período de estudio se dividió, según el marcado cambio de pendiente que se observa en la Figura 4, de la siguiente forma:

- 1975-1993: se considera como sin intervención, en lo que sigue denominado período preforestación.
- 1994-2002: es el período en el cual se observa el mayor aumento de la superficie forestada, en lo que sigue denominado período posforestación.

La metodología de trabajo consistió en analizar la serie de caudales medidos en el período 1975 a 2002 en la macrocuenca P° Manuel Díaz, procurando identificar pares de eventos comparables pertenecientes a cada período (pre y posforestación). Los criterios adoptados para clasificar dos eventos como “comparables” refieren a la coincidencia de las siguientes variables:

- Forma de los hidrogramas: simples, sin picos múltiples
- Precipitación acumulada del evento
- Distribución en el tiempo de la precipitación del evento
- Precipitación acumulada en los 7 o 14 días anteriores al evento - Condición de humedad de suelo antecedente
- Estacionalidad (Abril-Setiembre, Octubre-Marzo), aceptando una tolerancia de ± 30 días para la definición de estos límites.

Una vez identificados los pares de eventos comparables se correlacionaron los caudales máximos y escurrimientos específicos en el período pre y posforestación.

Asimismo, se compararon estas correlaciones con las obtenidas en las microcuencas, a efectos de considerar la incidencia de la escala espacial.

2) Efecto sobre la escorrentía anual y estacional en macrocuencas

La relación precipitación-caudal se analizó determinando los coeficientes de escorrentía (C_e) asociados a la precipitación acumulada, anual y estacional. A nivel estacional se consideraron dos períodos: abril-setiembre y octubre-marzo, en base a que en áreas relativamente llanas, en la zona templada, se observan a nivel de macrocuencas diferencias significativas en el peso relativo de los diferentes procesos hidrológicos que participan de los mecanismos de escurrimiento (Silveira, 1998). En efecto, en el período abril-setiembre la evaporación es relativamente baja, con lo que se produce una gradual saturación de los suelos, y

un incremento de la escorrentía superficial. En cambio, en el período octubre – marzo la evaporación es relativamente alta, con lo que el contenido de humedad de los suelos es bajo, requiriéndose volúmenes de precipitación importantes para producir escurrimientos superficiales significativos.

3) Precipitación directa y fustal

La precipitación total incidente en una plantación forestal se divide en tres componentes: intercepción, precipitación directa y escurrimiento de agua por los troncos o precipitación fustal. En esta sección se describen los dispositivos utilizados para cuantificar la precipitación directa y la precipitación fustal, en la microcuenca forestal más arriba descrita, así como la metodología aplicada para procesar la información.

Para medir la precipitación directa se seleccionó un área representativa dentro del monte delimitada por 4 árboles, donde se instalaron 6 pluviómetros formando una cuadrícula con un área de influencia de 1m² por cada pluviómetro. Cada dispositivo es capaz de medir 130mm de precipitación.

La precipitación fustal se recolectó utilizando perfiles de goma en forma de U, colocados alrededor de los troncos en forma de espiral, que descargan en un tanque recolector. Cada perfil consta de una cinta elástica de goma esponja de 3,2 cm de ancho por 1,2 cm de grosor unida a una plancha de goma de unos 4,5 cm de ancho y de 3 mm de espesor, de manera de formar la pared del canal. El tanque recolector, en que descargan los perfiles tiene una capacidad de 80 l. Cada tanque está provisto de un tubo externo transparente conectado al fondo y una escala graduada (en mm). Las lecturas en mm se convierten a volumen a partir una tabla de calibración y luego se transforma a milímetros de lluvia, considerando el área dada por el marco de plantación (3 m x 2 m).

Los dispositivos recolectores se colocaron sobre troncos de árboles representativos de los existentes en la plantación, en posiciones alejadas de los bordes de la parcela. El criterio utilizado para la selección de los árboles consistió en considerar la circunferencia a la altura del pecho, instalándose 5 recolectores, en árboles con las siguientes medidas de circunferencia: 41, 53, 58, 62 y 73 cm, en base a los trabajos de Leonard (1961) y Rutter (1963), que indican una mejora en la precisión de las ecuaciones de regresión, agregando la variable DAP (diámetro a la altura del pecho).

Los datos de precipitación directa y fustal fueron relevados luego de cada lluvia, estableciéndose la correlación

existente con la precipitación total incidente medida en la microcuenca bajo pasturas.

4) Relación entre el contenido de agua en el suelo y la capacidad de campo

El reemplazo de la cobertura herbácea por *Eucalyptus* también produce cambios en el contenido de humedad a nivel del suelo, debido a las características del sistema radicular, el cual alcanza mayores profundidades y les permite acceder a una mayor cantidad de agua edáfica. La variación temporal de ésta se manifiesta más intensamente en los primeros 50 cm de profundidad, donde se concentran la mayor cantidad de raíces, y disminuye con la profundidad, aunque se observa en todo el perfil, (Huber *et al.*, 1998).

Para la determinación del contenido de agua en los suelos se realizaron lecturas diarias de tensiómetros, en 3 sitios de muestreo en la microcuenca forestal y dos en la microcuenca testigo (pastura natural), teniendo en cuenta diferentes posiciones topográficas para su ubicación. En cada sitio se efectuaron lecturas a 30, 60 y 90 cm, considerando que la mayor extracción de agua por parte de las raíces tiene lugar hasta aproximadamente esa profundidad, dado que por debajo de éste nivel se identificó un horizonte más consolidado, caracterizado como C en las descripciones de los perfiles.

Puesto que los tensiómetros proporcionan una medida directa de tensión de agua en el suelo y solo indirectamente del contenido de humedad, se realizó una calibración para obtener contenidos de agua en volumen. Dicha calibración se efectuó mediante dos métodos: a) curva tensión-humedad, utilizando el método de la Olla de Richards, y b) gravimétrico. Debido a problemas técnicos en la Olla de Richards, los datos obtenidos fueron desechados, con lo que la calibración se efectuó a partir de datos de contenido de humedad obtenidos por gravimetría. Para la calibración de cada horizonte, se tomaron conjuntamente las muestras correspondientes a ambas microcuencas, para las diferentes profundidades, asumiéndose similar comportamiento. De esta forma se obtuvo una ecuación para el horizonte A y otra para el B:

- Horizonte A: $H = 39.309 * T^{-0.2426}$ $R = 0.72 (**)$
- Horizonte B: $H = 42.44 * T^{-0.2256}$ $R = 0.69 (**)$

Donde:

H: contenido de agua en el suelo (mm).

T: tensión de retención del agua en el suelo (cb)

(**) Significativo $p=0.01$ para 31 g.l.

Para la determinación del contenido de agua en el suelo se consideró el perfil de suelo descrito por Durán, A. *et al.*

Cuadro 2. Caracterización del perfil de suelo representativo de las microcuencas.

Prof. cm	Horizontes	Densidad aparente	C.C mm/10 cm	PMP mm/10 cm
0 – 66	A	1.41	22.4	6.7
67 – 90	B	1.32	25.0	8.1

(2001), obtenido a partir de la realización de calicatas en ambas microcuencas. En ambos casos se tomó como perfil representativo el descrito como Luvisol (Cuadro 2).

Los eventos identificados en la macrocuenca P° Manuel Díaz, que cumplen con los criterios descritos en la metodología, se presentan en el Cuadro 3.

Se observa en la Figura 5 que para los datos manejados producto de dos años de monitoreo de las microcuencas, la escorrentía específica a nivel de eventos, se reduce promedialmente en un 64% por efecto de la forestación. El

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1) Efecto sobre eventos de lluvias

Cuadro 3. Eventos comparables en los períodos preforestación y posforestación

Período 1975-1993					Período 1994-2002				
P cum.	P max. diaria	Fecha Q pico	Q pico (m ³ /s/km ²)	V esc. (mm)	P Acum.	P max. diaria	Fecha Q pico	Q pico (m ³ /s/km ²)	V esc. (mm)
44	17	14/08/1983	0.04	27	44	31	30/04/1999	0.01	8
63	43	21/10/1983	0.06	40	59	32	05/09/1997	0.04	30
62	41	08/07/1988	0.09	48	59	32	05/09/1997	0.04	30
62	43	21/10/1983	0.09	40	63	54	23/12/2001	0.02	7
81	41	18/09/1977	0.05	36	89	42	08/10/1995	0.04	26
86	27	23/10/1985	0.06	43	119	44	07/05/1995	0.05	39
105	53	11/08/1982	0.15	72	119	44	07/05/1995	0.05	39
105	53	11/08/1982	0.15	72	127	35	22/09/2000	0.09	72
116	33	08/08/1976	0.13	84	119	44	07/05/1995	0.05	39
116	33	08/08/1976	0.13	84	127	35	22/09/2000	0.09	72
350	97	11/05/1993	0.74	287	335	119	24/03/2001	0.38	153

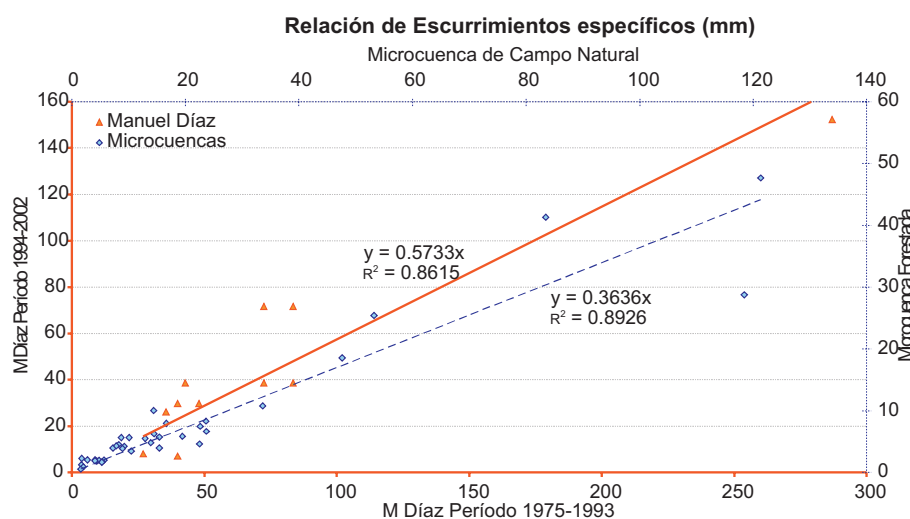


Figura 5. Comparación entre las relaciones obtenidas para escurrimientos específicos mensuales. a) Microcuencas: campo natural y monte de *Eucalyptus Grandis*, b) Macrocuenca P° M. Díaz: preforestación y posforestación

correspondiente índice de reducción para la macrocuenca forestada con *Eucalyptus* y *Pinus*, se sitúa en un 43%, comparando eventos en los períodos preforestación (1975-1993) y posforestación (1994-2002).

Los caudales pico específicos asociados a las tormentas analizadas disminuyen en la microcuenca forestal en un 78%, en relación al correspondiente caudal pico registrado en la microcuenca cubierta por pasturas. El correspondiente porcentaje en la macrocuenca, comparando eventos en los períodos preforestación y posforestación,

indica que los caudales pico se reducen en un 49%. Ambas correlaciones pueden observarse en la Figura 6.

2) Efecto sobre la escorrentía anual y estacional en macrocuencas

A partir de la información limnimétrica diaria se calcularon los escurrimientos anuales (Abril – Marzo), y con los datos diarios de pluviómetros se calculó la precipitación media anual por el método de Thiessen, determinándose

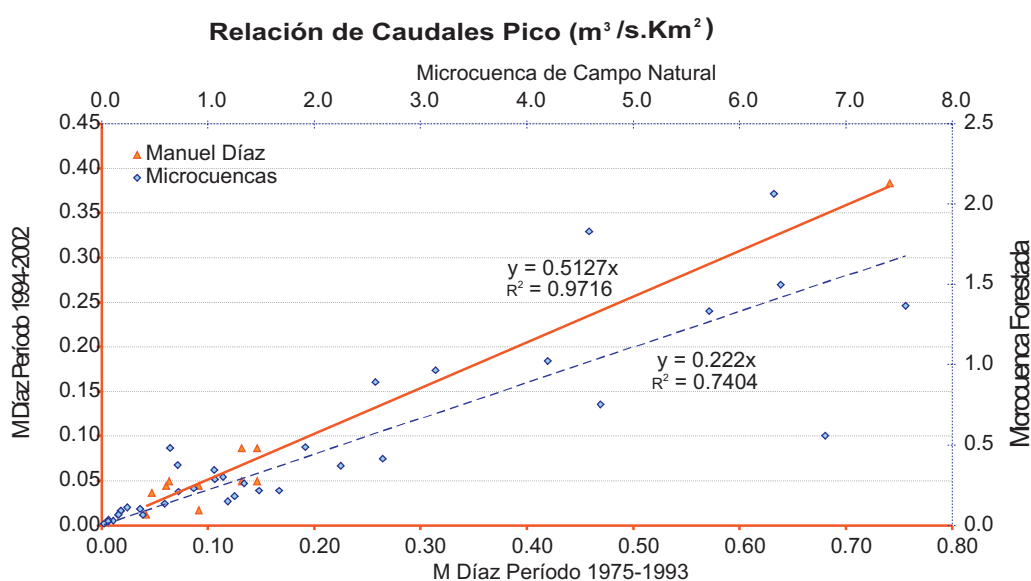


Figura 6. Comparación entre las relaciones obtenidas para caudales pico específicos. a) Microcuencas: campo natural y monte de *Eucalyptus Grandis*, b) Macrocuenca M. Díaz: preforestación y posforestación.

Cuadro 4. Precipitación y coeficientes de escorrentía anual en la cuenca P° Manuel Díaz.

Año	P(mm)	Ce	Año	P(mm)	Ce	Año	P(mm)	Ce
1975	1219.2	0.34	1984	1272.0492	0.45	1993	1693.1	0.44
1976	1361.5	0.40	1985	1272.9501	0.52	1994	1350.2	0.36
1977	1351.0	0.52	1986	1561.5179	0.43	1995	1361	0.28
1978	813.1	0.54	1987	1532.2102	0.56	1996	1164.5	0.37
1979	1058.0	0.26	1988	787.56156	0.34	1997	2220.5	0.57
1980	1293.5	0.49	1989	1295.9293	0.18	1999	1301.7	0.31
1981	1286.6	0.41	1990	1063.8537	0.47	2000	1931.3	0.45
1982	1631.52	0.48	1991	1637.8538	0.46	2001	2196.2	0.55
1983	1262.99	0.54	1992	1489.6494	0.63			

los coeficientes de escorrentía anuales, según se detalla en el Cuadro 4.

La Figura 7 representa estos coeficientes de escorrentía anual, asociados a la precipitación media anual, distinguiendo entre el período preforestación (1975-1993) y el período posforestación (1994-2002).

La representación abarca solamente el intervalo de precipitación hasta 1800 mm, en el que es posible la comparación entre el período preforestación y posforestación. Se eliminan del análisis los años 1997 y 2001, debido a que las precipitaciones extremas anuales registradas en ellos no cuentan con años comparables en el período preforestación. Igual consideración merece el año 1989, extremadamente seco (coeficiente de escorrentía anual 0,18), para el que no existe un año comparable en el período posforestación. La Figura 7 incluye además líneas de tendencia para los coeficientes de escorrentía, según correspondan al período pre o posforestación. Las líneas de tendencia fueron determinadas aplicando el criterio de la mediana, calculada por rangos de precipitación media anual, dejando igual cantidad de puntos por encima y por debajo de las líneas de tendencia.

Seguidamente, con la misma información, se calcularon los escurrimientos estacionales, distinguiéndose entre el período abril – septiembre y octubre – marzo. En el Cuadro 5 se presentan los coeficientes de escorrentía estacionales resultantes y en las Figuras 8 y 9 se los representa gráfica-

mente, asociados a la precipitación media estacional, incluyendo líneas de tendencia determinadas siguiendo idéntico criterio que para los coeficientes de escorrentía anuales.

A partir de las líneas de tendencia para coeficientes de escorrentía anual y estacional, se confeccionó la Figura 10, en la que se expresa la tendencia a una reducción porcentual de los escurrimientos, producto del desarrollo forestal en la cuenca. Según esta figura, los escurrimientos anuales tienen a disminuir entre un 22 a 31%, dependiendo de la precipitación anual. A nivel estacional, la disminución porcentual de los escurrimientos varía entre 33 a 40%, en la temporada estival octubre – marzo, dependiendo de la precipitación estacional. La reducción en los meses de otoño – invierno, abril – septiembre, en que la escorrentía tiende a ser mayor, es significativamente menor, con variaciones entre un 13 a 20%, dependiendo de la precipitación estacional. Esta menor reducción en meses en que la escorrentía tiende a ser mayor, amortigua el efecto sobre los escurrimientos anuales.

La Figura 11 muestra la evolución de las medias móviles de 10 años de precipitación y caudal anual en la macrocuenca P° Manuel Díaz. Los valores anuales se presentan estandarizados, restándoles la media de la serie de datos anuales y dividiéndolos por la desviación estándar. Se observa que a pesar de la tendencia creciente de las precipitaciones, a nivel de caudales se produce un cierto

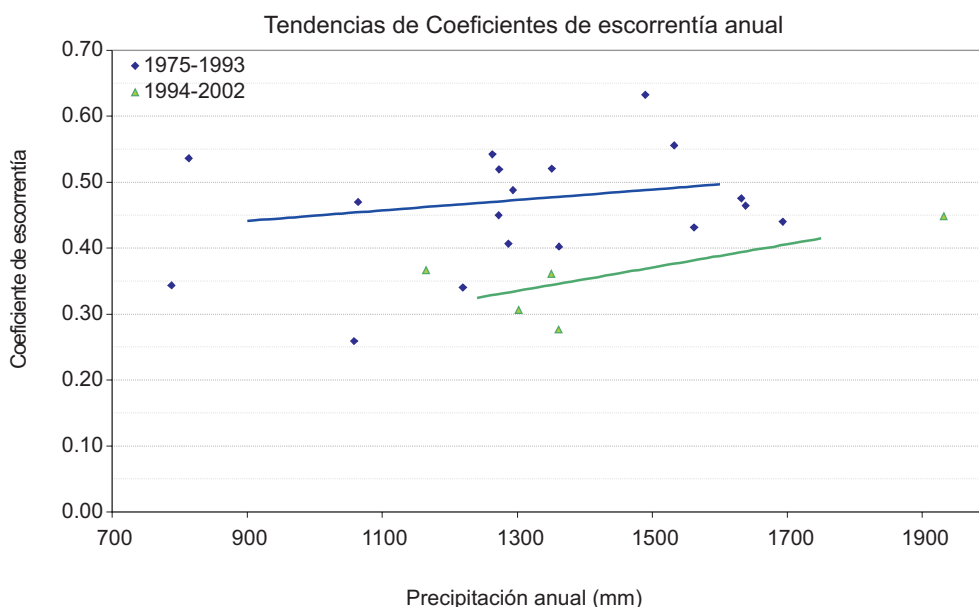


Figura 7. Coeficientes de escorrentía anuales y líneas de tendencia según la precipitación anual, distinguiendo entre período pre y posforestación, en la macrocuenca P° Manuel Díaz

Cuadro 5. Precipitación y coeficientes de escorrentía estacionales en la macrocuenca P° Manuel Díaz.

Abril – Septiembre						Octubre – Marzo					
Año	P est		Año	P est		Año	P est		Año	P est	
	(mm)	Ce		(mm)	Ce		(mm)	Ce		(mm)	Ce
1975	626.1	0.38	1989	434.7	0.10	1975	593.08	0.30	1989	861.23	0.22
1976	477.7	0.44	1990	465.1	0.56	1976	883.82	0.38	1990	598.76	0.40
1977	689.6	0.72	1991	786.3	0.62	1977	661.37	0.31	1991	851.56	0.32
1978	415.6	0.66	1992	951.1	0.80	1978	397.51	0.41	1992	538.57	0.34
1979	382.0	0.21	1993	811.4	0.51	1979	676.08	0.29	1993	881.72	0.38
1980	475.5	0.66	1994	561.2	0.48	1980	817.98	0.39	1994	789.00	0.28
1981	688.5	0.56	1995	461.7	0.48	1981	598.16	0.23	1995	899.33	0.17
1982	738.0	0.43	1996	464.5	0.53	1982	893.51	0.52	1996	699.97	0.26
1983	547.0	0.67	1997	537.2	0.38	1983	715.98	0.44	1997	1683.29	0.62
1984	694.2	0.63	1998	1038.9	0.76	1984	577.82	0.23	1999	631.23	0.14
1985	730.7	0.74	1999	670.4	0.47	1985	542.26	0.23	2000	1039.35	0.32
1986	614.9	0.59	2000	892.0	0.60	1986	946.67	0.33	2001	1047.38	0.37
1987	814.1	0.70	2001	1148.9	0.70	1987	718.07	0.40			
1988	403.8	0.53	2002	1221.6	0.63	1988	383.79	0.15			

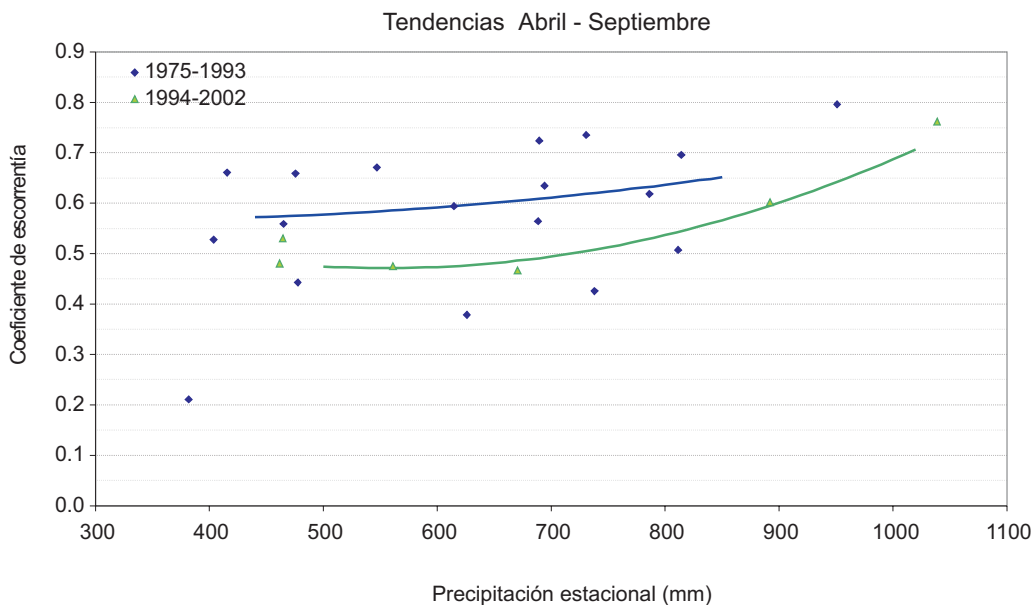


Figura 8. Coeficientes de escorrentía estacionales (abril – septiembre) y líneas de tendencia según la precipitación media estacional, distinguiendo entre período preforestación y posforestación, en la macrocuenca P° Manuel Díaz.

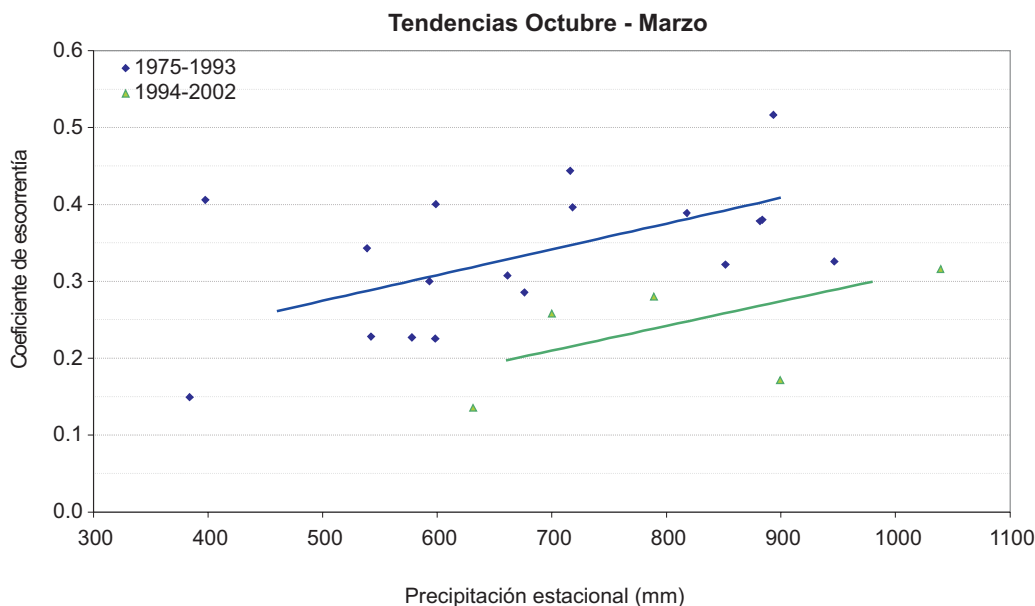


Figura 9. Coeficientes de escorrentía estacionales (octubre – marzo) y líneas de tendencia según la precipitación media estacional, distinguiendo entre período preforestación y posforestación, en la macrocuenca Pº Manuel Díaz.

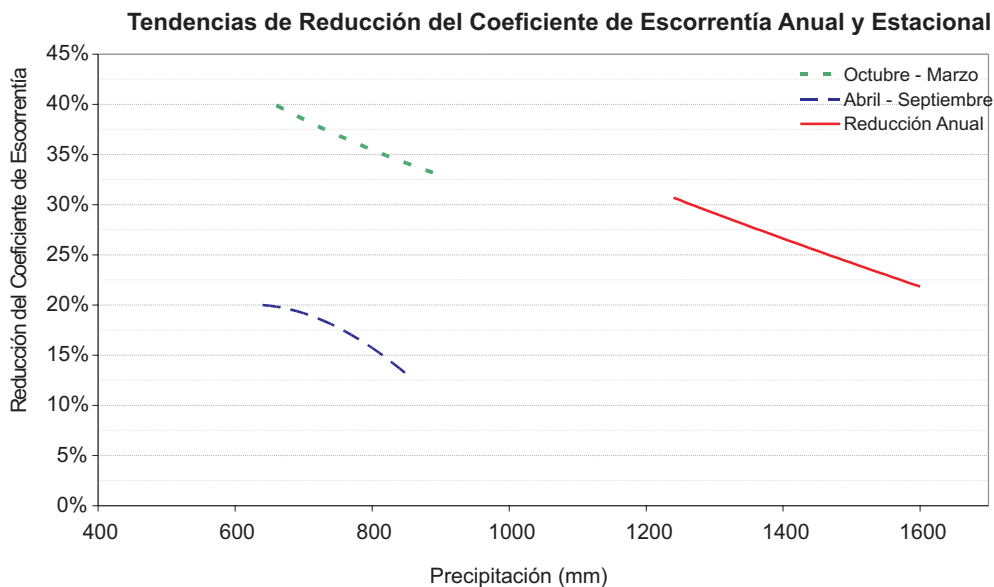


Figura 10. Reducción porcentual de los coeficientes de escorrentía (anuales y estacionales), calculados en base a las líneas de tendencia de las Figuras 7 a 9, en la macrocuenca Pº Manuel Díaz.

descenso a partir del año 1993, coincidente con la definición del período posforestación. La tendencia se revierte solamente en las medias móviles calculadas para los dos últimos años, que se caracterizaron por lluvias extraordina-

rias, que superaron largamente los 2.000 mm/año, comparado con la media histórica que se sitúa en el orden de los 1.400 mm/año, provocando inundaciones que afectaron severamente a las poblaciones del interior del país.

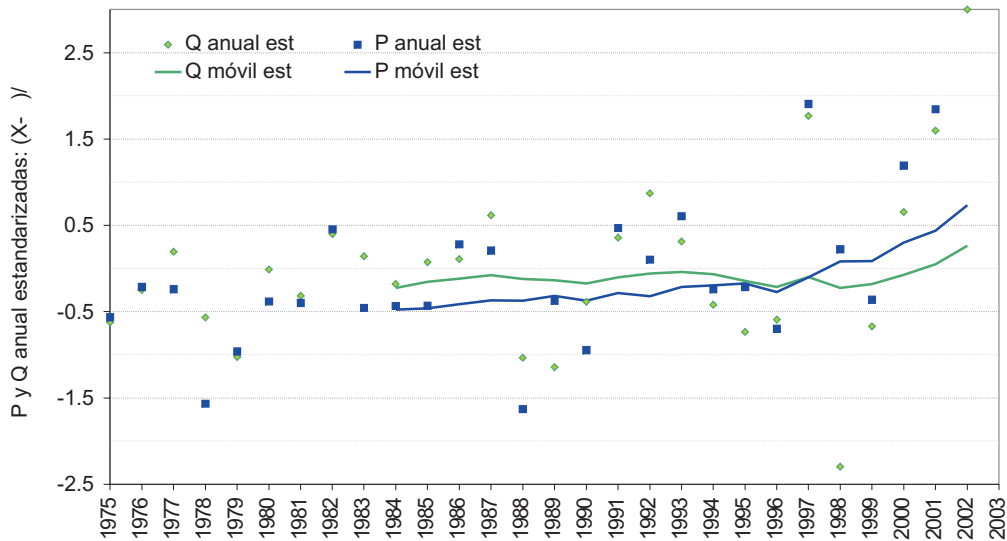


Figura 11. Evolución de las medias móviles de 10 años de precipitación y caudal anual en la macrocuenca P° Manuel Díaz.

3) Precipitación directa y fustal

Analizando los datos disponibles de precipitación directa no es posible detectar comportamientos diferentes entre los pluviómetros de la cuadrícula. Se comparó entonces la precipitación media registrada en la cuadrícula (precipitación directa) con la precipitación registrada en el pluviómetro ubicado en la microcuenca de pasturas. Como se observa en la Figura 12 la correlación existente es igual a 1.

Debido a esto se optó por recabar datos de viento de la estación meteorológica de Tacuarembó para corregir los datos medidos en campo natural. La Figura 13 muestra la correlación entre los datos de precipitación directa medida bajo monte y los datos medidos en campo natural corregidos por viento. Se ve en este caso que la precipitación directa bajo la forestación se reduce aproximadamente un 5,3% respecto a la medida en la pastura.

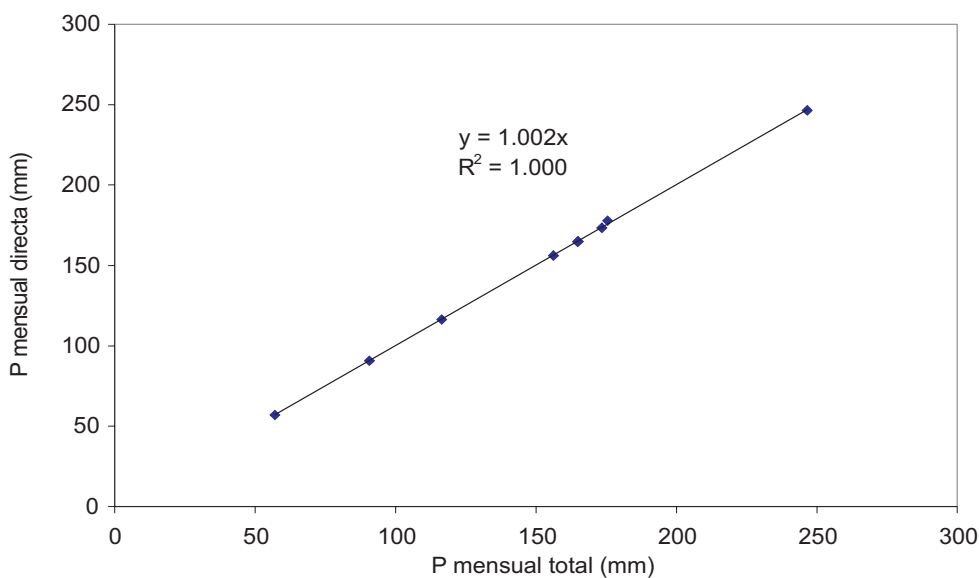


Figura 12. Correlación a nivel mensual entre precipitación directa y precipitación total.

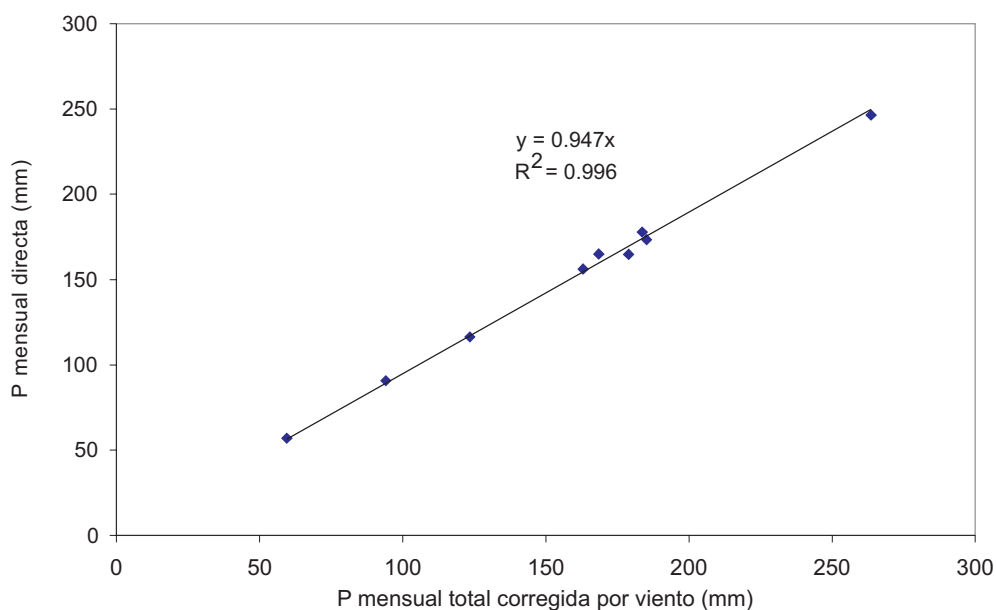


Figura 13. Correlación a nivel mensual entre precipitación directa y precipitación total corregida por efecto del viento.

Los datos de viento manejados aquí corresponden a la ciudad de Tacuarembó, por lo que la incidencia real en las microcuencas puede diferir respecto a este valor.

Los datos de precipitación fustal fueron levantados luego de cada lluvia, entre febrero a octubre de 2000. En el Cuadro 6 se caracterizan estos eventos según sus frecuencias.

La relación entre la precipitación fustal y la magnitud de las lluvias registradas se ilustra en la Figura 14. En la misma puede observarse un buen ajuste lineal entre ambas variables, a nivel de evento.

En relación a la utilización de la circunferencia de troncos como criterio de selección de árboles para muestrear escurrimiento por los troncos, los resultados indican que

dicho parámetro no resulta un buen indicador de la arquitectura de la copa de los árboles y como consecuencia no se observó una correlación significativa entre dicha variable y la precipitación fustal. Esto concuerda con lo reportado por Dewalle y Paulsell (1969), quienes tampoco encontraron correlación entre estas variables.

En el Cuadro 7 se analizan los datos de precipitación incidente y precipitación fustal, acumulados cada mes, y se expresa la precipitación fustal como porcentaje respecto a la precipitación total mensual

Si en cambio se analiza la evolución de la precipitación fustal a lo largo de los meses analizados (Figura 15), se observa una tendencia a incrementarse entre los meses de febrero y octubre.

Cuadro 6. Análisis de frecuencia de los eventos registrados.

Valor de lluvia (mm)	Frecuencia	Precipitación Total media (mm)	Precipitación fustal medio (mm)	Ppf como % de la Precipitación total
0 - 5	12	3.2	0.23	7.19
5 - 10	10	7.3	0.34	4.66
10 - 20	13	13.5	1.3	9.63
20 - 30	14	25.8	2.4	9.30
30 - 40	5	35.8	2.9	8.1
40 - 50	6	44.4	3.7	8.33
50 - 60	2	53.2	5.7	10.71

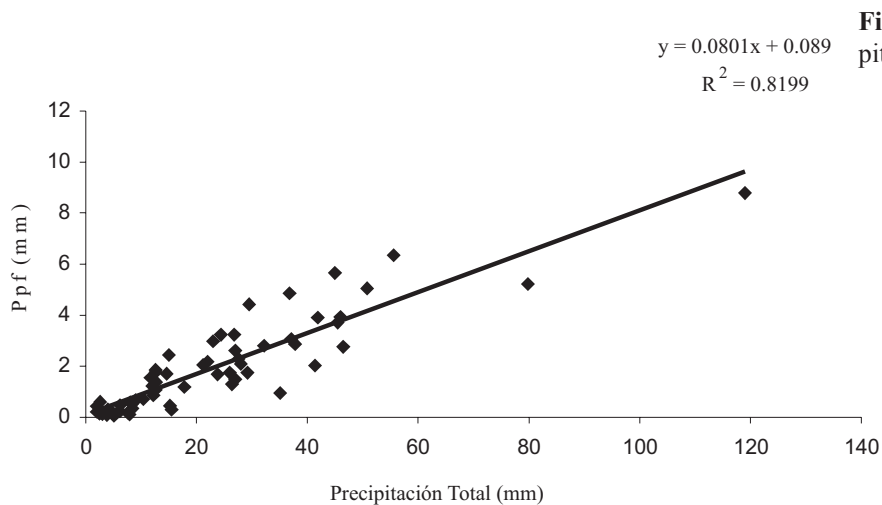


Figura 14. Correlación entre precipitación fustal y precipitación total

Cuadro 7. Precipitación fustal como porcentaje de la precipitación total.

Mes de 2000	Pp mm	Ppf mm	% Ppf/Pp
Febrero	162.8	10.12	6.21
Marzo	79.76	3.64	4.56
Abril	190.1	14.11	7.42
Mayo	282.1	25.63	9.08
Junio	167.2	14.33	8.57
Julio	113	12.48	11.04
Agosto	56.7	4.04	7.12
Setiembre	158.8	16.98	10.69
Octubre	152.6	18.07	11.84
Promedio			8.51

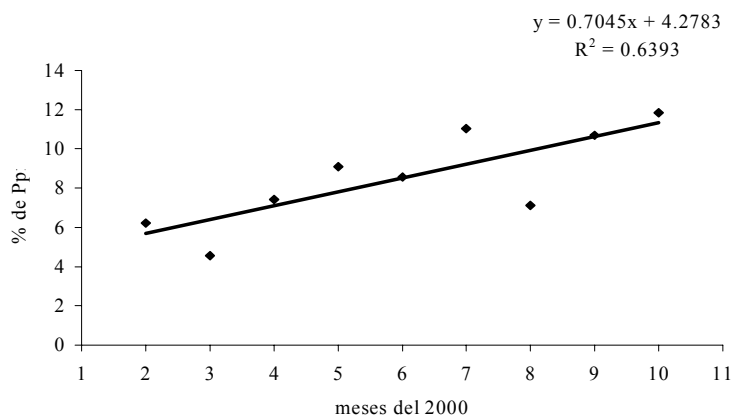


Figura 15. Evolución temporal de la precipitación fustal y la precipitación total

4) Relación entre el contenido de agua en el suelo y la capacidad de campo

Los datos obtenidos a partir de los cinco puntos de muestreo fueron analizados con el objetivo de determinar diferencias entre ambas coberturas. Las lecturas del contenido de agua en los suelos coincidieron con períodos de precipitaciones abundantes y bajos valores de ET, lo que determinó que en ambos casos el suelo estuvo muy cercano a Capacidad de Campo, superando ese valor ampliamente en el caso de los suelos bajo pasturas.

Se analizaron los datos según cada una de las coberturas, resultando las Figuras 16 y 17, correspondientes a los períodos considerados.

Para cada cobertura se determinó el contenido de agua en el suelo, se efectuó un promedio de los datos obtenidos en diferentes puntos de la pastura, procediéndose de igual forma para la cobertura forestal. En éste último caso se descartó una posición porque presentó valores no representativos de humedad al estar situada en una posición topográfica muy baja.

En las Figuras 16 y 17 se puede observar que, debido a las altas precipitaciones, el suelo mantuvo un alto contenido de agua en ambos sitios. No obstante lo anterior, y a pesar que las diferencias no fueron significativas, la tendencia fue que en los suelos bajo cobertura de *Eucalyptus* los valores generalmente estuvieron por debajo de los encontrados en la pastura, excepto algunos momentos correspondientes a precipitaciones abundantes.

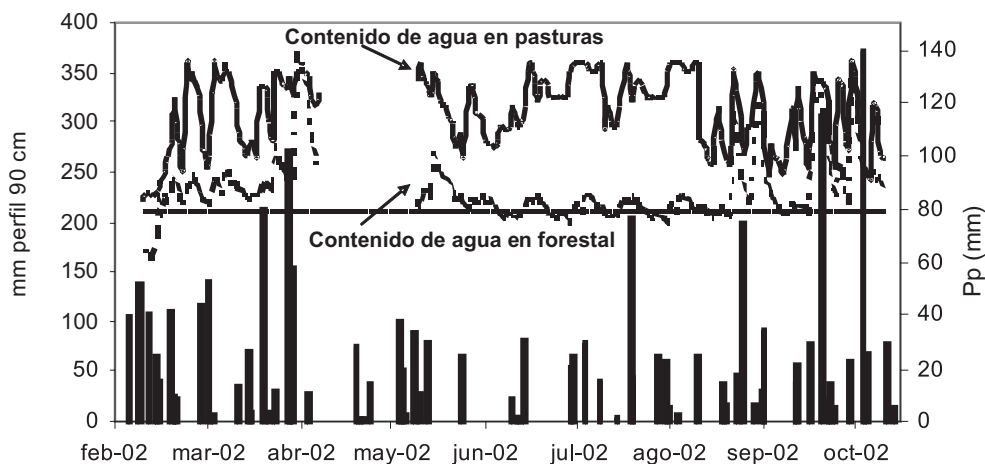


Figura 16. Contenido de agua en el suelo, para las dos coberturas en el período febrero-octubre de 2002.

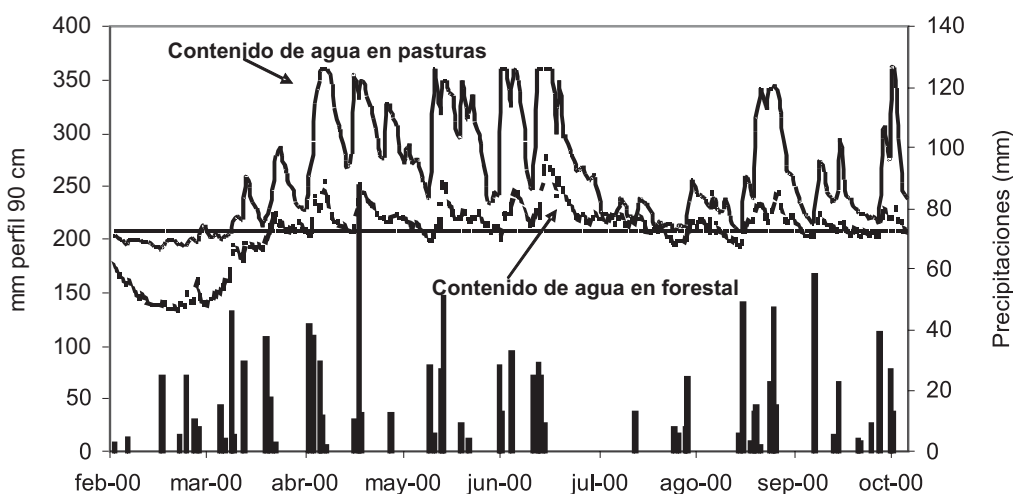


Figura 17. Contenido de agua en el suelo, para las dos coberturas en el período febrero-octubre de 2000.

Los períodos analizados corresponden a la estación invernal, por lo cual tanto la pastura como la plantación tienen baja Etr, lo que sumado a una precipitación, en ocho meses, equivalente al promedio anual de 1200 mm, era esperable que ambos suelos presentaran el mismo contenido de agua y que no existan diferencias importantes entre los dos usos comparados.

La Figura 18 muestra el contenido de agua en el suelo en el período marzo-octubre de 2002 para diferentes profundidades en el perfil: 30, 60 y 90 cm. En todas las profundidades se puede observar un comportamiento similar al descrito en las figuras anteriores cuando se considera la totalidad del perfil. Dadas las altas precipitaciones en el período analizado y la baja ET las diferencias no estarían explicadas por un mayor consumo de la plantación, sino que podría explicarse por un cambio en las propiedades hídricas del suelo, con un rápido drenaje del agua retenida a bajos potenciales. Este rápido drenaje sería consecuencia de una mayor macro y mesoporosidad en los suelos bajo cobertura forestal (Musto, 1994) lo que resulta en un menor contenido de agua en el perfil por encima de capacidad de campo. Los altos valores de infiltración observados se deberían a la conducción del agua por caminos de escurrimientos preferenciales (macroporos, grietas, canales de raíces).

El análisis del contenido de agua en el suelo explica en parte las mediciones realizadas por Silveira *et al.* (2004) en cuanto a las diferencias en los escurrimientos superficiales en ambos sitios. El mismo determina un menor escurrimiento superficial total para la cuenca forestada en relación a la pastura. Si se considera que no existen diferencias significativas, entre ambas coberturas en cuanto a la extracción, estaría indicando una mayor infiltración. Complementariamente, García *et al.* (*sin publicar*, 2004) explican que las diferencias encontradas en el invierno pueden ser el efecto observado, en suelos bajo *Eucalyptus*, de una menor retención de agua a “capacidad de campo”, lo cual surge del análisis de las curvas características de retención de agua.

CONCLUSIONES

Microcuencas

Si bien las correlaciones establecidas en base al análisis de hidrogramas de tormentas permiten establecer que la plantación forestal causa una reducción del 77,8% para caudales pico y del 63,6% para escurrimientos específicos, en comparación con el tapiz herbáceo para uso ganadero, la extensión de los datos monitoreados no permite aventurar conclusiones definitivas, hasta tanto no se cuen-

te con una serie más extensa de datos y una mayor representatividad de la variabilidad de los eventos de precipitación. Esto se debe a que las tormentas analizadas en las microcuencas corresponden a eventos de lluvia entre 7 a 64 mm/día, lo que las asocia con períodos de retorno bajos, que son los que en mayor medida se ven afectados por la reducción de los aportes de lluvia a nivel del suelo por el efecto de la interceptación debida a las copas de los árboles (Iroumé y Huber, 2000). Esta precisión es sumamente importante puesto que en la región no son infrecuentes eventos de precipitación que alcanzan o superan los 100 mm/día.

Macrocuenca

Los resultados que se obtienen al analizar los coeficientes de escorrentía en la macrocuenca P° Manuel Díaz, muestran que éstos se reducen, producto de la sustitución del tapiz herbáceo para uso ganadero por plantaciones de *Eucalyptus* y *Pinus*. Asimismo, la evolución de las medias móviles de precipitación y caudal confirman la tendencia descendente de estos últimos a partir del año en que da inicio el marcado desarrollo forestal en la macrocuenca. Los porcentajes de reducción de los coeficientes de escorrentía que aquí se presentan deben entenderse como meras tendencias globales, para el estado y edad actual de las plantaciones forestales existentes en la macrocuenca P° Manuel Díaz puesto que en el estudio no fueron considerados factores como la edad de las plantaciones, que se modifica año a año, producto del crecimiento de los árboles y de la instauración de nuevas plantaciones.

Comparación microcuencas - macrocuenca P° Manuel Díaz

El análisis de la relación precipitación-caudal, a partir de datos de tormentas medidas, permite observar para diferentes escalas espaciales - microcuencas con superficies entre 70 a 100 hectáreas y macrocuenca con una superficie de 2.097 km² - que los caudales pico y volúmenes escurridos se reducen, producto de la sustitución del tapiz herbáceo para uso ganadero por plantaciones de *Eucalyptus* y *Pinus*. En las microcuencas predominan pendientes de cuenca relativamente altas (9,1 y 10,7%), mientras que en la macrocuenca, si bien en la parte alta se observan niveles topográficos entre 300 y 400 metros, al abarcar una superficie superior a los 2.000 km² predomina el efecto de llanura, resultando una pendiente media de 1,3%. Estudios hidrológicos en áreas relativamente llanas en la zona templada confirman que estas diferencias modifican significativamente el peso relativo de los diferentes proce-

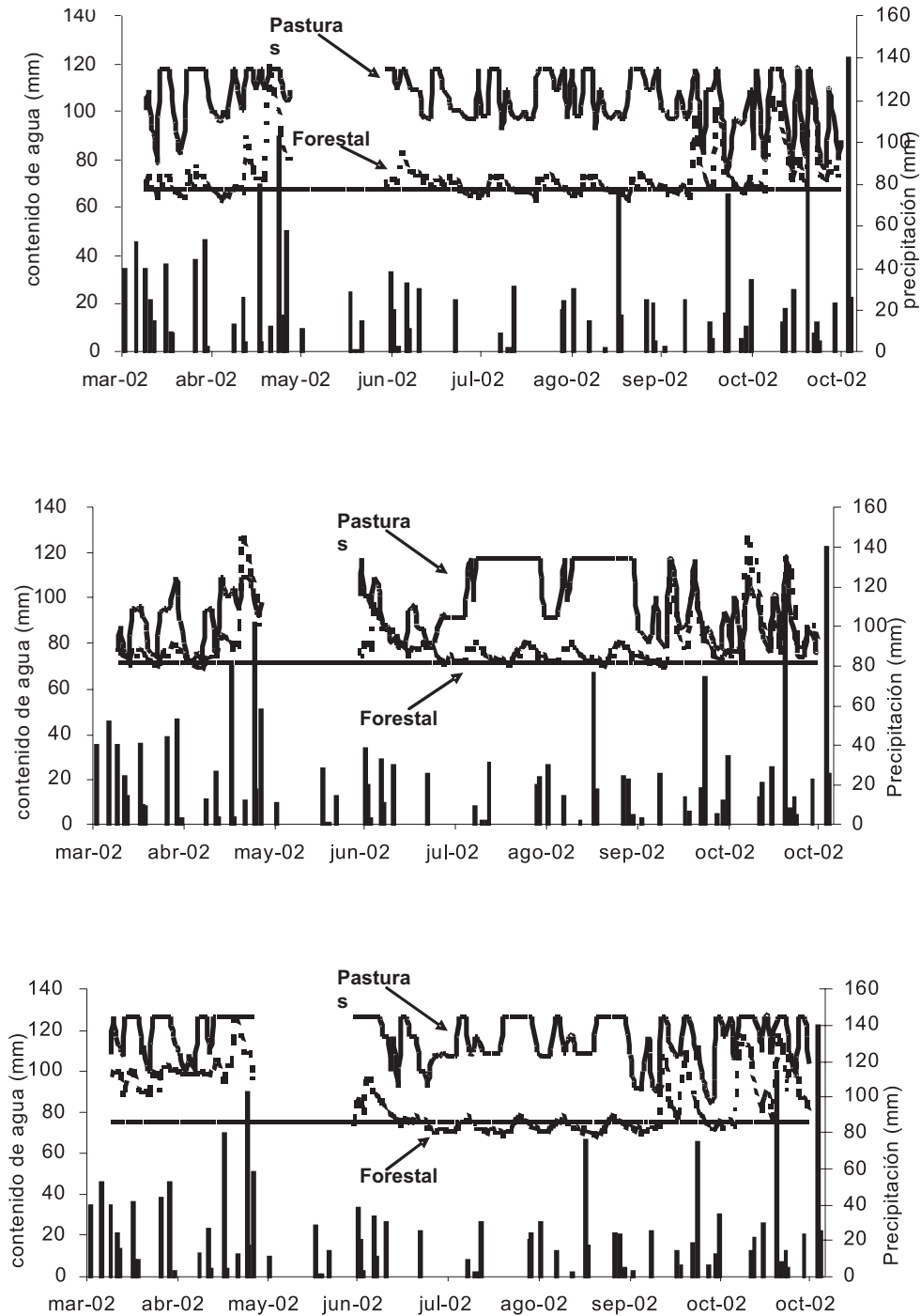


Figura 18. Contenido de agua en el suelo, para las dos coberturas en el período marzo-octubre de 2002, para distintas profundidades (30, 60 y 90 cm).

tos hidrológicos que participan de los mecanismos de escurrimiento (Silveira, 1998), lo que dificulta la aplicación de relaciones simples para vincular resultados medidos en estas unidades.

En las macrocuencas también puede observarse, Cuadro 4, que la lluvia máxima diaria asociada a los eventos varía entre 30 y 50 mm, observándose un único evento en que la precipitación máxima diaria se ubica en el entorno de los 100 mm, por lo que también estos eventos corresponden mayoritariamente a períodos de retorno bajos.

Precipitación directa y fustal

Los dispositivos de recolección de la precipitación fustal utilizados parecen ser eficientes y confiables, a la vez de prácticos, de fácil construcción y bajo costo. De acuerdo a los datos obtenidos, el 8,5% de la precipitación incidente sobre el bosque de *Eucalyptus* escurre por los troncos. La utilización de la circunferencia de los troncos, como criterio de muestreo de la variabilidad de los árboles, no parece el más adecuado. Un aumento del número de puntos de muestreo puede contribuir a disminuir el error experimental en la medición de la precipitación fustal.

Por el contrario, la metodología utilizada para medir la precipitación directa no produjo resultados satisfactorios, motivo por el que no es posible extraer conclusión alguna. En virtud de ello, actualmente se han modificado los dispositivos para medida de la precipitación directa, de modo de poder caracterizar la intercepción, a partir del balance entre precipitación total incidente y la suma de precipitación directa y fustal.

En resumen, dado el reducido número de dispositivos de recolección y el corto período de recolección de datos, la información obtenida resulta apenas una primera aproximación al tema en el Uruguay.

Contenido de agua en el suelo

El suelo bajo *Eucalyptus* presentó, en los dos años analizados, menor contenido de agua que el suelo bajo pastura natural, excepto en los períodos en que ocurrieron abundantes precipitaciones. El comportamiento observado fue similar, tanto si en el análisis se toma en cuenta todo el perfil o diferentes profundidades del mismo.

Considerando que las evaluaciones realizadas coincidieron con períodos invernales muy lluviosos y que en esa época la ETc es baja para ambas coberturas, las diferencias encontradas no parecen atribuirse a una mayor extracción de agua por parte del bosque. Este comportamiento observado parecería, en cambio, deberse a una menor capacidad de retención de agua por parte del suelo

forestado, debido a los cambios en las propiedades hídricas de los mismos, por efectos de la cobertura. Lo anterior es atribuible a un mayor porcentaje de macro y mesoporos conjuntamente con un efecto de hidrofobicidad provocado por las propiedades de la materia orgánica producida por los *Eucalyptus*.

La menor retención de agua en el suelo y menor escurrimiento superficial deberían significar un mayor drenaje profundo y recarga de acuíferos en el período invernal bajo *Eucalyptus*.

AGRADECIMIENTOS

La Dirección General Forestal encomendó los primeros estudios, facilitando la adquisición de instrumental y la conformación de un grupo de investigación en Hidrología Forestal. Posteriormente, la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Universidad de la República permitió mantener y consolidar el grupo de investigadores, a través de su programa concursable de Investigación y Desarrollo. Asimismo, agradecemos a las instituciones públicas que han colaborado brindando información necesaria para el desarrollo de estas investigaciones: Dirección Nacional de Hidrografía del MTOP, Gerencia de Generación Hidráulica de UTE y Dirección General Forestal del MGAP.

BIBLIOGRAFÍA

- CALDER, I.R. 1992. Hydrologic effects of land-use change. En el capítulo 13 del Handbook of Hydrology, editado por David R. Maidment. McGraw-Hill, Inc.
- DEWALLE, D.R. & PAULSELL, L.K. 1969. Canopy interception stemflow and streamflow on a small drainage in the Missouri ozarks. Missouri Agricultural Experiment Station. Research Bulletin, 951. Apud: Forestry abstracts, Oxford, 31(2):1854, 1970.
- DURÁN, P.; SILVEIRA, L.; ANIDO, C.; MARTÍNEZ, L.; CHAMORRO, A.; GÓNZALEZ, J.C.; ZANETTI, E.; ALONSO, J. & HAYASHI, R.; 2001. "Parte A – Hidrología", en Estudio de Monitoreo Ambiental de Plantaciones Forestales en el Uruguay. Informe Final. Universidad de la República.
- DURÁN, A.; CALIFRA, A.; MOLFINS, J.H. & LINN, W. 2005. Keys to soil taxonomy for Uruguay. United States Department of Agriculture, Natural Reserves Conservation Service.
- DURÁN, A.; GARCÍA PRÉCHAC, F.; CALIFRA, A. & PÉREZ BIDEGAIN, M. 2001. "Parte B – Suelos", en Estudio de Monitoreo Ambiental de Plantaciones Forestales en el Uruguay. Informe Final. Universidad de la República.

- HUBER, A.; BARRIGA, P. & TRECAMÁN, R. 1998. Efecto de la densidad de plantaciones de *Eucalyptus nitens* sobre el balance hídrico en la zona de Collipulli, IX Región (Chile). *Bosque* 19(1): 61-69.
- IROUMÉ, A. & HUBER, A. 2000. Intercepción de lluvias por cubierta de bosques y efecto en los caudales de crecida en una cuenca experimental en Malalcahuelli, IX Región de Chile. *Bosque* 21 (1): 45-56.
- KIRPICH, Z.P. 1940 Time of concentration of small agricultural watersheds, *Civ. Eng.*, vol. 10, No. 6, p. 362.
- LEONARD, R.E. 1961. Net precipitation in a northern hardwood forest. *Journal of Geophysical Research*, Washington, 66 (8): 2417-21.
- MAP/DSF 1979. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay. Vol. III: Clasificación de Suelos. Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes. Montevideo, Uruguay.
- MUSTO J.W. 1994. Impacts of plantation forestry on soil physical properties and soil water regime In. *ICFR Annual Research Report South Africa* pp 60-73.
- NASH, J.E. Y J.V. SUTCLIFFE 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- RUTTER, A.J. 1963. Studies in the water relations of *Pinus sylvestris* in plantation conditions: 1- measurements of rainfall and interception. *Journal of Ecology*. Oxford, 51:191-203.
- SILVEIRA, L. 1998. Hydrological modelling of natural grasslands with small slopes in temperate zones. ISRN KTH/AMI/PHD 1022-SE. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- SILVEIRA, L.; ANIDO, C. & MARTÍNEZ, L. 2002. Programa de monitoreo y evaluación del impacto de las plantaciones de *Eucalyptus* sobre los recursos hídricos en el Uruguay. XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, La Habana, Cuba.
- SILVEIRA, L.; MARTÍNEZ, L. & ALONSO, J. 2003. Efecto de la sustitución de campo natural por plantaciones forestales, sobre los recursos hídricos en el Uruguay. Tercer Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas. Arequipa, Perú.
- SILVEIRA, L. & ALONSO, J. 2004. Modificación de los coeficientes de escorrentía producto del desarrollo forestal en una macrocuenca del Uruguay. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. San Pablo, Brasil.
- SILVEIRA, L.; ALONSO, J. & MARTÍNEZ, L. 2004. Efecto de las plantaciones forestales sobre los recursos hídricos. Comparación de estudios en microcuencas y macrocuencas del Uruguay. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. San Pablo, Brasil.

