

**TERCER CONGRESO LATINOAMERICANO DE MANEJO DE CUENCAS  
HIDROGRAFICAS**

**EFFECTO DE LA SUSTITUCIÓN DE CAMPO NATURAL POR PLANTACIONES  
FORESTALES, SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EL URUGUAY**

Ing. Luis Silveira, Ph.D.<sup>1</sup>, Ing. Agr. Leticia Martínez<sup>2</sup>, Ing. Jimena Alonso<sup>1</sup>

1. Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay
2. Dpto. de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Uruguay  
“Luis Silveira” < [lesy@fing.edu.uy](mailto:lesy@fing.edu.uy) >

**RESUMEN**

Palabras clave: eucaliptos, campo natural, indicadores hidroambientales

El gobierno uruguayo dispuso, sobre fines de los años ochenta, estímulos para fomentar el desarrollo del sector forestal. La sustitución de campo natural para uso ganadero por plantaciones de eucaliptos y pino ha generado preocupación respecto a su impacto sobre los recursos naturales, particularmente aguas y suelos, emprendiéndose por parte de la Dirección General Forestal y la Universidad de la República la ejecución de un “Proyecto de instalación de microcuencas experimentales para el estudio del impacto ambiental y monitoreo de programas de forestación con eucaliptos en el Uruguay”, que tiene por objeto obtener indicadores hidroambientales de manejo forestal sustentable. El presente documento describe: a) objetivos del proyecto; b) equipamiento instalado en una microcuenca experimental con plantación de eucaliptos *grandis* y su respectiva microcuenca testigo con campo natural para uso ganadero, ubicadas en el Departamento de Tacuarembó; c) marco metodológico para el análisis comparativo de los escurrimientos; y d) resultados correspondientes al período de monitoreo 2000-2002. Estos primeros datos procesados muestran que, en tormentas, la escorrentía específica se reduce en la microcuenca forestal en un 64% ( $R^2=0,89$ ) respecto a la microcuenca en campo natural. La reducción de los caudales pico específicos asociados a estos eventos es de un 78% ( $R^2=0,74$ ). A nivel mensual se observan reducciones que oscilan entre un 50 a 70%, con una aparente distinción entre meses de verano e invierno. No obstante, la longitud de la serie de datos y la variabilidad de los eventos de precipitación registrados no permite aventurar conclusiones definitivas, puesto que los eventos de lluvia analizados varían entre 7 a 64 mm/día, que corresponden a tormentas con períodos de retorno bajos, que en mayor medida se ven afectadas por la intercepción debida a las copas de los árboles; en tanto que eventos que alcanzan o superan los 150 mm/día no son infrecuentes en la región bajo estudio.

## **INTRODUCCION**

Los procesos de deforestación y reforestación representan, a escala global, la modificación del uso de la tierra más significativa, tanto por la superficie afectada como por la incidencia sobre los procesos hidrológicos (Calder, 1992).

En el Uruguay, el uso tradicional del suelo ha experimentado modificaciones al amparo de la Ley Forestal N° 15.939, resultando en un incremento de la superficie afectada a la actividad forestal, principalmente eucaliptos y pino, que pasó de 45.000 hectáreas en 1990 a 750.000 hectáreas en junio de 2002, representando el 21,4% del territorio de prioridad forestal. La forestación industrial, en un país agrícola ganadero, donde las plantaciones forestales en gran escala representan para la comunidad y la opinión pública un elemento nuevo en la vida nacional (Panario, 1991; Lima, 1997), ha creado preocupación en la sociedad y en las instituciones nacionales respecto a su impacto sobre los recursos naturales, en particular aguas y suelos. Uruguay participa del Proceso de Montreal (1993), que tiene por propósito realizar el seguimiento de Criterios e Indicadores de Manejo Forestal Sustentable. Uno de estos criterios refiere a la “conservación y mantenimiento de los recursos suelo y agua”, con indicadores como el impacto sobre la cantidad y calidad de las aguas y la erodabilidad de los suelos, aspectos éstos que se abordan en el “Proyecto de instalación de microcuencas experimentales para el estudio del impacto ambiental y monitoreo de programas de forestación con eucaliptos en el Uruguay”, que llevan adelante las Facultades de Agronomía e Ingeniería de la Universidad de la República, encomendado por la Dirección General Forestal del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP). Sucintamente, los objetivos generales del proyecto son los siguientes: i) establecimiento de un programa de investigación y monitoreo ambiental en el ámbito de las plantaciones de eucaliptos a gran escala; ii) búsqueda de indicadores del manejo sustentable de las plantaciones forestales; iii) instalación de microcuencas experimentales con plantaciones de eucaliptos y sus respectivas microcuencas testigos con campo natural por cobertura vegetal; iv) monitoreo continuo del impacto de las plantaciones forestales sobre el régimen hídrico (cantidad y calidad) y propiedades de los suelos, medido como impacto relativo a la situación natural bajo pastura para uso ganadero; y v) obtención de información que pueda servir para mejorar las prácticas de manejo forestal y disminuir el impacto ambiental.

En este trabajo se presentan los fundamentos conceptuales y metodológicos de la investigación; una descripción de las instalaciones dispuestas, en el Departamento de Tacuarembó, para el monitoreo de los procesos hidrológicos; y se centra en la metodología utilizada para medir el impacto de las plantaciones de eucaliptos sobre la escorrentía, tomando como medida de comparación una microcuenca testigo, con campo natural para uso ganadero por cobertura vegetal; y documenta avances preliminares de la investigación resultantes de procesar datos correspondientes al período de monitoreo 2000 - 2002.

## **MARCO METODOLOGICO**

### **Fundamentos conceptuales**

Una premisa básica para adoptar la instalación de microcuencas experimentales como herramienta de estudio consiste en aceptar que las actividades que modifican el uso del suelo, en este caso particular la plantación forestal con eucaliptos, causan algún efecto sobre los recursos

hídricos, produciendo cambios en la cantidad y calidad, así como sobre las principales propiedades de los suelos, características asociadas y erodabilidad; factores éstos que pueden identificarse como indicadores del impacto a medio y largo plazo de los programas de forestación (Swank y Johnson, 1994).

El incipiente monitoreo ambiental, como parte de los programas de forestación en gran escala en el Uruguay, se enfoca no sólo para evaluar la calidad ambiental del manejo forestal adoptado en un instante y sitio determinado, sino también como herramienta para obtener información que posibilite permanentemente mejorar las prácticas de manejo forestal, propendiendo la sustentabilidad.

### **Metodología**

Este documento abarca aquellos componentes del proyecto que refieren al análisis de los efectos de la forestación con eucaliptos sobre los recursos hídricos en cuanto a cantidad, medido como impacto relativo a la condición natural de suelos bajo pasturas para uso ganadero. La metodología adoptada consiste en la comparación de cada uno de los procesos que participan del ciclo hidrológico y, en particular, la redistribución de la precipitación incidente sobre el monte de eucaliptos (Iroumé y Huber, 2000); análisis del escurrimiento en tormentas; y determinación del balance hídrico mensual, estacional y anual.

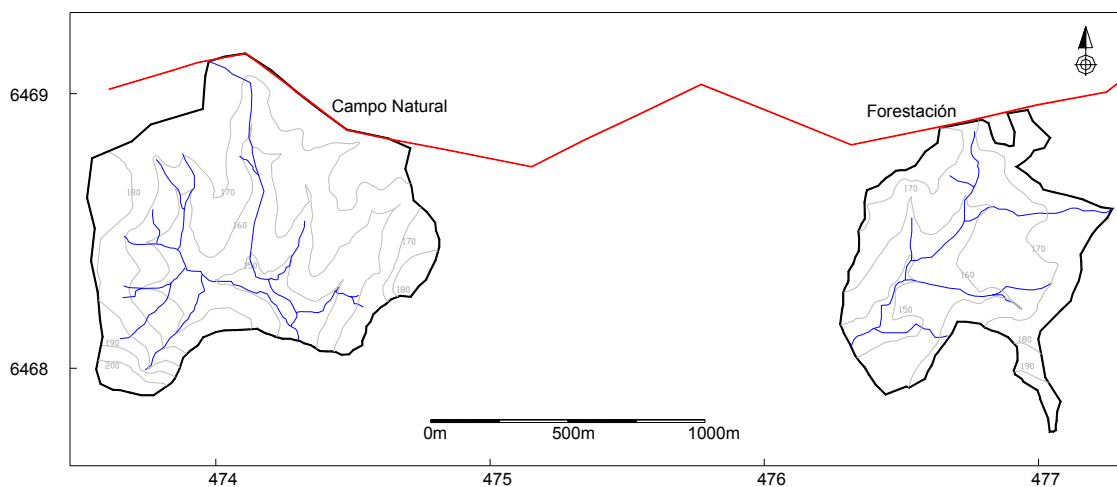
En particular, atendiendo a la información actualmente disponible, el presente trabajo se centra en el análisis comparativo de la escorrentía en tormentas y escorrentía mensual en aquellos meses en que se cuenta con datos completos en ambas microcuencas. A efectos de facilitar el análisis comparativo, el criterio fundamental adoptado para seleccionar el cierre de las microcuencas ha sido imponer igualdad de tiempos de concentración. En efecto, este parámetro ha prevalecido sobre el parámetro área en la selección del sitio de cierre, puesto que igualdad de áreas y tiempos de concentración diferentes producirían para un mismo evento hidrogramas con diferente tiempo pico y tiempo base, y la consideración de diferentes duraciones de lluvia en la generación del caudal pico, lo que dificultaría el análisis comparativo. Por consiguiente, adoptado el criterio de iguales tiempos de concentración, la diferencia en área de las microcuencas, que sólo afecta la magnitud del caudal pico y no la forma del hidrograma, se toma en cuenta manejando caudales pico específicos (caudales por unidad de área) y escurrimientos específicos (lámina de escurrimiento por unidad de área).

### **Area de estudio**

A partir de la selección de predios forestados, realizada por la Contraparte de la Dirección General Forestal, se identificaron un total de 70 microcuencas en las zonas de prioridad forestal más relevantes del país. Estas microcuencas se caracterizaron, con información predial e identificación de las correspondientes fotos áreas, por parámetros físicos e hidrológicos habituales en estudios hidrológicos. Seguidamente, en base al análisis realizado, se visitaron los sitios más favorables, seleccionándose finalmente dos microcuencas en el Departamento de Tacuarembó, Establecimiento “La Abuelita”, al que se accede en el km 363 de la Ruta 5, en la zona centro-norte del país. En la Tabla I se presentan los parámetros físicos más relevantes y los tiempos de concentración de ambas microcuencas, calculados según el método de Kirpich (1940), y en la Figura 1 se ilustra su forma y ubicación.

Parámetro	Microcuenca forestal	Microcuenca testigo (Campo natural)
Area (ha)	60,8	102.7
Pendiente media de la microcuenca (%)	9.1	10.7
Longitud del cauce principal (km)	1.3	1.2
Pendiente del cauce principal (%)	2.5	2.9
Tiempo de concentración (min)	20	19
Coordenadas del cierre (X,Y)	(476.8 , 6468.3)	(474.3 , 6468.1)

**Tabla I. Parámetros físicos e hidrológicos de las microcuencas seleccionadas**



**Figura 1. Ubicación de las microcuencas seleccionadas.**

La caracterización de las cuencas se completó con la elaboración de una serie de mapas en escala 1:10.000, comprendiendo curvas de nivel a intervalos de 2.5 metros, suelos, geología y vegetación. Los suelos dominantes de la cuenca son del tipo Luvisol Ocríco e Inceptisol Umbrico, mientras que la geología del área se compone de rocas del Triásico Jurásico asociadas a la Formación Tacuarembó; éstas rocas a su vez están parcialmente recubiertas por lavas de edad Cretácico Inferior, básicas, de la Formación Arapey. La vegetación, como se ha señalado, está constituida por plantaciones forestales de eucaliptos *grandis* en una de las microcuencas y campo natural para uso ganadero en la microcuenca testigo.

### **Instrumentación**

Atendiendo a los procesos hidrológicos que intervienen en el régimen hídrico de una *microcuenca forestal*, la instrumentación consta de: una estructura de cierre similar al cuerpo de una pequeña presa de tierra, provista en la zona central con un vertedero de cresta delgada, de tipo combinado triangular - rectangular, con capacidad para registrar caudales en el rango 0 - 14 m<sup>3</sup>/s (ver Figura 2); un limnógrafo electrónico de boya; dos pluviómetros; instrumental para medida de la redistribución de la precipitación (es decir, escurrimiento fustal, precipitación directa a través de la copa de los árboles e intercepción); baterías de tensiómetros, tubos de

acceso para sonda de neutrones y bloques de yeso para la determinación de la evolución del agua en el suelo; y tres piezómetros para el monitoreo de la variación del nivel de la napa freática.



**Figura 2. Vista, desde aguas arriba, del cierre ubicado en la microcuenca en monte forestal, constituido por un terraplén provisto con vertedero de lámina delgada, de tipo triangular-rectangular, en su zona central**

La instrumentación de la *microcuenca testigo*, con campo natural por cobertura vegetal, consta de: una estructura de cierre similar a una pequeña presa de tierra, provista en la zona central con un vertedero de cresta delgada, de tipo combinado triangular - rectangular, con capacidad para registrar caudales en el rango 0 - 14 m<sup>3</sup>/s, éste último correspondiente a un período de retorno estimado de 25 años; un limnógrafo electrónico de boya; una estación meteorológica que comprende: un pluviógrafo electrónico, un pluviómetro, un tanque evaporímetro tipo "A" y un gabinete para termómetros equipado con un juego de termómetros de máxima y mínima y un psicrómetro de mano para medida de humedad relativa; baterías de tensiómetros, tubos de acceso para sonda de neutrones y bloques de yeso para la determinación de la evolución del agua en el suelo; y dos piezómetros para el monitoreo de la variación del nivel de la napa freática.

Puesto que el proyecto de investigación también comprende el estudio del impacto de la forestación sobre la calidad de las aguas de lluvia y aguas en cauce, y procesos de pérdida de suelo, la instrumentación de las microcuencas incluye: red de muestreo de aguas de lluvias, torres de muestreo de sedimentos en suspensión en cauce, y parcelas de escurrimiento. El proyecto también abarca estudios comparativos y evolución de las propiedades de los suelos (Durán, A. et al., 2001).

La instrumentación se ha implementado progresivamente durante la primera mitad de 2000. El bosque fue implantado en forma íntegra en la primavera del año 1993, contando por tanto con 7 años de edad al inicio del presente estudio, y una densidad de 1200 árboles por hectárea.

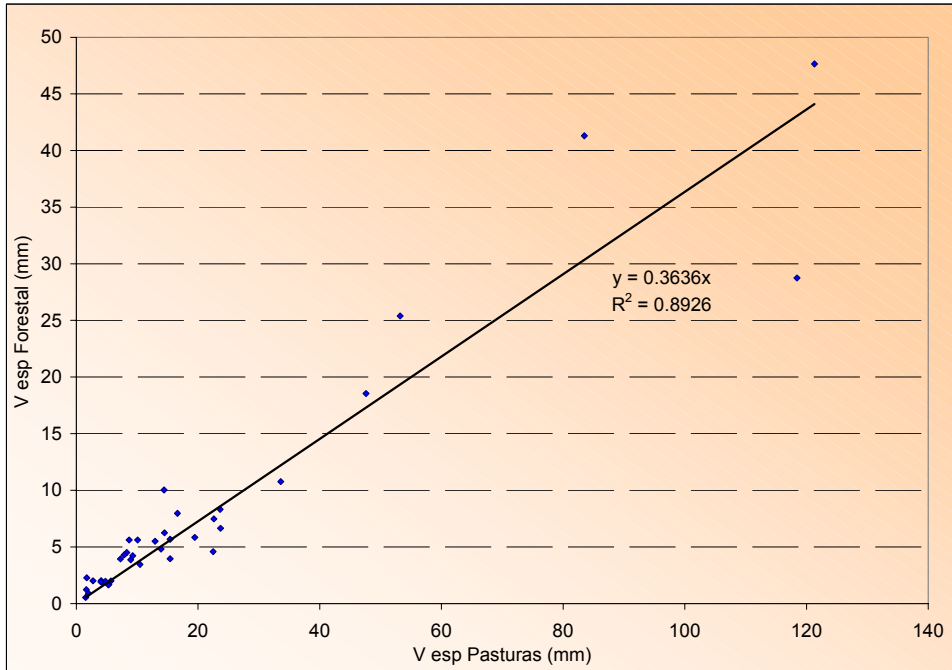
## **RESULTADOS DEL PERIODO DE MONITOREO 2000-2002**

Los resultados que se presentan a continuación se centran en el análisis de tormentas registradas en el período comprendido entre el 1° de junio de 2000 y el 31 de agosto de 2002, fecha ésta última en que se suspendió momentáneamente el programa de monitoreo.

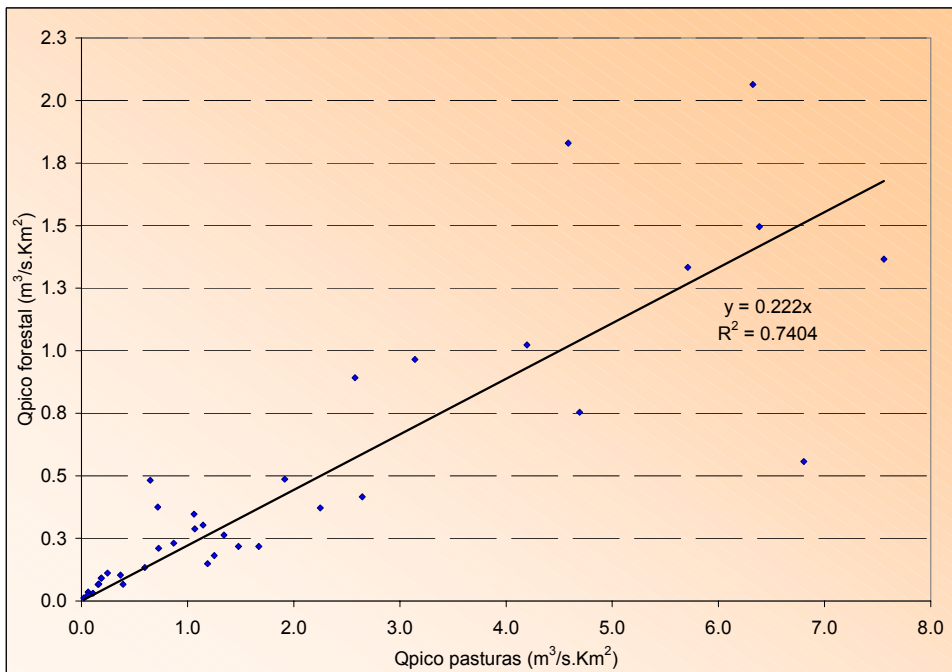
Los datos de altura limnimétrica registrados en cada una de las microcuencas se transformaron a datos de caudal aplicando la relación altura – caudal vertido, determinada en laboratorio mediante la implementación de un modelo físico con el que se calibró la zona de transición entre el vertedero triangular y el vertedero rectangular (Durán, P. et al., 2001). En la Figura 3 se muestra, para las tormentas identificadas en el período considerado, la correlación existente entre los escurrimientos específicos medidos en campo natural y monte de eucaliptos *grandis*, expresados en mm, a efectos de prescindir de las diferencias existentes en superficie entre una microcuenca y otra. El escurrimiento en la microcuenca forestal se reduce promedialmente en un 64% respecto a la escurrimiento en la microcuenca en campo natural. La función objetivo propuesta por Nash y Sutcliffe (1970), coeficiente  $R^2 = 0,89$ , próximo a uno, indica un buen ajuste entre ambas series de datos.

La Figura 4 expresa la correlación existente entre los correspondientes caudales pico específicos medidos en campo natural y en monte de eucaliptos *grandis*, expresados en  $m^3/s.km^2$ . La correlación lineal que pasa por el origen de coordenadas muestra que los caudales pico específicos en la microcuenca forestal representan solamente un 22 % del correspondiente caudal pico registrado en la microcuenca en campo natural, representando por lo tanto una reducción de 78 %. También en este caso se obtiene coeficiente un coeficiente  $R^2 = 0,74$ , que indica un buen ajuste entre ambas series de datos.

Los resultados obtenidos en ambas correlaciones confirman los obtenidos inicialmente, al procesar tormentas registradas solamente en el año 2000 (Silveira et al., 2002). No obstante, cuando se relacionan los escurrimientos superficiales entre dos tipos de coberturas vegetales tan diferentes, como campo natural y eucaliptos *grandis*, debe tenerse presente la magnitud de la precipitación registrada que da lugar a estos eventos. En este caso particular se observa que los datos de precipitación diaria registrados varían entre 7 a 64 mm/día para el período considerado y, por lo tanto, corresponden a tormentas con períodos de retorno bajos, que son justamente 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 intercepción 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 150 mm/día. Por consiguiente, se comprende que las conclusiones que puedan extraerse en esta etapa de avance de la investigación están sujetas a las limitaciones que impone la información procesada actualmente disponible.

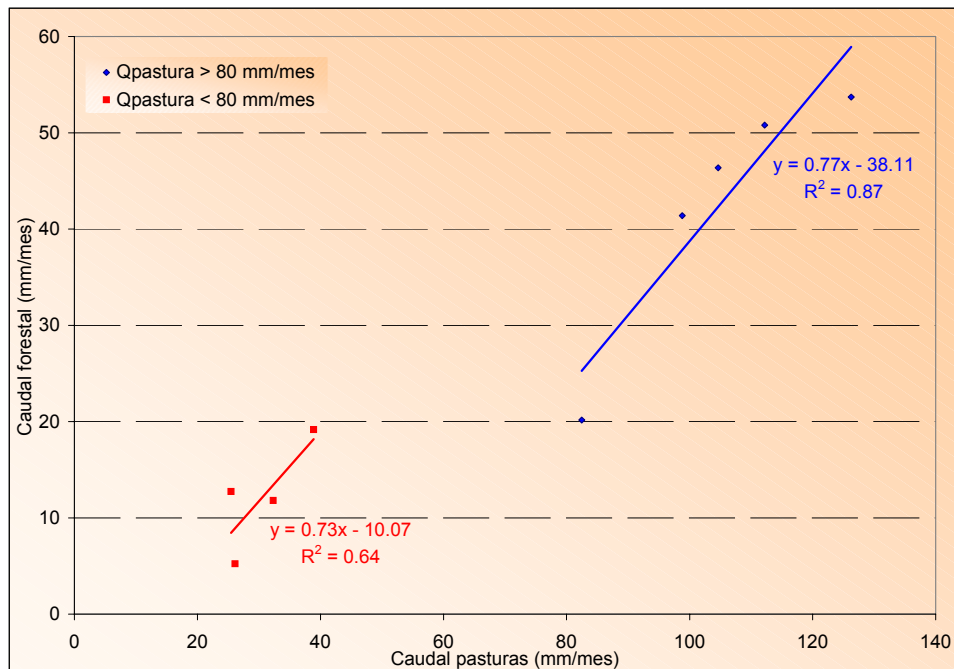


**Figura 3. Relación entre escurrimientos específicos en campo natural y en monte de eucaliptos *grandis***



**Figura 4. Relación entre caudales picos específicos escurridos en campo natural y en monte de eucaliptos *grandis***

Por último, al contar con una serie de datos más extensa, en este trabajo se incorpora una primera correlación entre escurrimientos mensuales para aquellos meses en que se cuenta con datos completos. En la Figura 5 se observa que se establecieron dos agrupamientos, tomando como base la escorrentía específica mensual medida en campo natural. Los escurrimientos menores a 80 mm/mes corresponden a meses de verano y los superiores a dicha cota a meses de invierno. En el primer caso se obtiene un índice de correlación  $R^2 = 0,64$  y, en el segundo,  $R^2 = 0,87$ . Las ecuaciones de correlación muestran que, según los meses y la magnitud del escurrimiento referencia en la cuenca en campo natural, la escorrentía en la microcuenca en monte de eucaliptos *grandis* se reduce en niveles que, expresados en porcentaje, oscilan entre un 50 a 60% para meses de verano y 50 a 70% para meses de invierno. No obstante, puede observarse en la Figura 5 que el número de meses en cada grupo es extremadamente reducido, por lo que la correlación establecida debe entenderse como meramente orientativa de una cierta tendencia.



**Figura 5. Relación entre escurrimientos específicos mensuales en campo natural y en monte de eucaliptos *grandis***

## DISCUSION Y CONCLUSIONES

Las microcuencas experimentales instaladas constituyen un laboratorio natural por excelencia, permitiendo estudios cuantitativos del efecto integrado de los procesos hidrológicos y, en un futuro, el análisis de diferentes prácticas de manejo forestal, según lo proponen Moldan y Cerny (1994). El proyecto constituye un primer eslabón hacia el conocimiento del impacto ambiental de los programas de forestación con eucaliptos en el Uruguay y la búsqueda de información / indicadores de manejo sustentable, para corregir y mejorar las prácticas de manejo forestal. Conviene señalar, no obstante, que la investigación se encuentra en una fase inicial, en la que se



cuenta con algo más de dos años de monitoreo, con huecos de información debidos fundamentalmente a aspectos relacionados con la financiación del programa, pretendiéndose abarcar al menos un período que se extienda algunos años más allá del primer corte. En la etapa actual del proyecto se observa que la escorrentía específica en tormentas se reduce en la microcuenca forestada con eucaliptos *grandis*, promedialmente, en 64% respecto a la escorrentía específica en la microcuenca en campo natural. A nivel mensual se distinguen dos correlaciones diferentes, que aparentemente corresponden a meses de verano e invierno, observándose que la reducción de la escorrentía oscila globalmente entre un 50 a 70% según la magnitud de la escorrentía en la cuenca en campo natural, tomada como referencia. Los caudales pico específicos asociados a las tormentas analizadas representan, en la microcuenca forestal, una reducción promedio del 78% en relación al correspondiente caudal pico registrado en la microcuenca en campo natural. Si bien las correlaciones establecidas permiten percibir una tendencia clara en cuanto a la reducción de la escorrentía específica y caudales pico específicos en tormentas, y escorrentía específica mensual, la extensión de los datos monitoreados no permite aventurar conclusiones definitivas, hasta tanto no se cuente 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 corresponden a eventos de lluvia entre 7 a 64 mm/día, que corresponden a tormentas con períodos de retorno bajos, que son los que en mayor medida se ven afectados por la reducción de aporte de lluvia a nivel del suelo por intercepción debida a las copas de los árboles; en tanto que eventos que alcanzan o superan los 150 mm/día no son infrecuentes en la región bajo estudio.

## BIBLIOGRAFIA

- Calder, I.R. (1992) "The hydrological impact of land-use change with special reference to afforestation and deforestation", *Proceedings of the Conference on Priorities for Water Resources Allocation and Management, Natural Resources and Engineers Advisers Conference*. Southampton, July 1992, Overseas Development Administration, pp. 91-101.
- Durán, A., F. García Préchac, M. Pérez Bidegain, M. Friori, L. Sicardi, C. Molteri, y A. Bozzo (2001) "Parte B – Suelos", en Estudio de Monitoreo Ambiental de Plantaciones Forestales en el Uruguay. Informe Final. Universidad de la República.
- Duran, P., L. Silveira, C. Anido, L. Martínez, A. Chamorro, J.C. González, E. Zanetti, J. Alonso, R. Hayashi (2001) "Parte A – Hidrología", en Estudio de Monitoreo Ambiental de Plantaciones Forestales en el Uruguay. Informe Final. Universidad de la República.
- Iroumé, A. y A. Huber (2000) Intercepción de las lluvias por la cubierta de bosques y efecto en los caudales de crecida en una cuenca experimental en Malalcahuello, IX Región, 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.
- Lima, W.P. (1997) Impactos ambientales de los programas de forestación. *Forestal* (Revista de la Sociedad de Productores Forestales del Uruguay). Segunda época - Año 2 - No. 5, 3-8.
- Moldan, B. y J. Cerný (1994) "Small Catchment Research". En "Biogeochemistry of Small Catchments. A Tool for Environmental Research", de Moldan & Cerný (editores). John Wiley & Sons.
- 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.

- Panario, D.H. (1991) Hacia una evaluación de efectos ambientales de la forestación en Uruguay con especies introducidas. CIEDUR, Serie Investigaciones No. 85.
- Silveira, L., C. Anido y L. Martínez (2002) Programa de monitoreo y evaluación del impacto de las plantaciones de eucaliptos sobre los recursos hídricos en el Uruguay. XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, La Habana, Cuba.
- Swank, W.T. y C.E. Johnson (1994) "Small Catchment Research i the Evaluation and Development of Forest Management Practices". En "Biogeochemistry of Small Catchments. A Tool for Environmental Research", de Moldan & Cerný (editores). John Wiley & Sons.