

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA EN UNA
PLANTACIÓN ADULTA DE *EUCALYPTUS***

por

Leticia MARTÍNEZ FAIRA

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
Diciembre 2013

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Ing. Agr. Roberto Scoz, Ing. Rafael Terra e Ing. Agr. Carlos Mantero, el 10 de Setiembre de 2013 .Autora: Ing. Agr. Leticia Martínez. Director: Ing. PhD Luis Silveira, Co-director Dr. Ing. Agr. Mario García.

AGRADECIMIENTOS

A los tutores Ing. (PhD.) Luis Silveira y Dr. Mario García, por su constante apoyo e infinita paciencia y también por su orientación y sus valiosos aportes a este trabajo.

La información base de este trabajo fue generada en el marco de los proyectos: “Indicadores hidroambientales de manejo forestal sustentable de las plantaciones de Eucaliptos en el Uruguay” y “Efectos de la actividad forestal sobre los recursos suelos y aguas, en microcuencas similares sometidas a distinto manejo”, financiados por el PDT y el INIA respectivamente. Los mismos fueron ejecutados en establecimientos de la empresa Eufores SA, actualmente pertenecientes a la empresa Montes del Plata, por lo cual agradezco a dichas empresas la posibilidad de llevar adelante la investigación en terrenos de su propiedad. Al personal técnico y de campo del Núcleo Pandule, y particularmente al Ing. Agr. Alejandro González por su invaluable ayuda en la gestión y concreción de este trabajo.

A Jimena Alonso, Pedro de Izaguirre, Christian Chreties, Santiago Symonds y Magdalena Crisci, por su contribución en la ejecución del proyecto y en el procesamiento de los datos que permitieron el desarrollo de este trabajo, así como también los lindos momentos compartidos en las salidas de campo.

Gracias a Raquel, Lucía, Mario, Pablo y Lisette por su invaluable amistad y apoyo recibido en todos estos años, así como también a todos los compañeros de Edafología y de Manejo y Conservación de Suelos.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	VI
SUMMARY	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	3
1.1.1 <u>Objetivo General</u>	3
1.1.2 <u>Objetivos Específicos</u>	3
1.2. ANTECEDENTES	4
1.2.1 <u>Efecto de los sistemas forestales en el ciclo hidrológico</u>	4
1.2.2 <u>Consumo de agua por coberturas forestales</u>	9
2. MATERIALES Y MÉTODOS	13
2.1. ANTECEDENTES	13
2.2. SITIO DE ESTUDIO	14
2.2.1 <u>Caracterización física</u>	15
2.2.2 <u>Geología</u>	15
2.2.3 <u>Suelos</u>	17
2.2.4 <u>Vegetación</u>	19
2.3. PARAMETROS MEDIDOS	20
2.4. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS	26
2.4.1 <u>Determinación de la evapotranspiración de la cubierta vegetal</u>	26
2.3.2 <u>Determinación de la evapotranspiración de referencia (ET_o)</u>	28
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
3.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN TOTAL DE LA COBERTURA FORESTAL	29
3.2. COMPARACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA ENTRE COBERTURAS	33
3.3. VALORES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DIARIA	36
3.4 GENERACIÓN DE UN MODELO SIMPLE PARA DETERMINAR	

LA VARIACIÓN EN EL CONSUMO DE AGUA AL MODIFICAR LA CUBIERTA VEGETAL.....	38
4. <u>CONCLUSIONES</u>	42
5. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	44
6. <u>ANEXOS</u>	50
6.1. CONSUMO DE AGUA EN UNA PLANTACIÓN ADULTA DE <i>Eucalyptus globulus</i> Y PASTURAS NATURALES EN LA ZONA LITORAL OESTE DEL URUGUAY.....	50
6.2. DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES DE SUELOS EN CUENCA DON TOMÁS (Forestada) Y LA CANTERA (Pasturas).....	77
6.3. BALANCES HIDRICOS A NIVEL MENSUAL, SEMESTRAL, ESTACIONAL Y ANUAL EN LA MICROCUENCA DE PASTURAS...	80
6.4. BALANCES HIDRICOS A NIVEL MENSUAL, SEMESTRAL, ESTACIONAL Y ANUAL EN LA MICROCUENCA FORESTAL.....	83

RESUMEN

El sector forestal en el Uruguay ha experimentado un marcado desarrollo en las últimas dos décadas, pasando de 45.000 a 970.000 hectáreas cultivadas con *Eucalyptus spp.* y *Pinus spp.* afectando intensamente el uso del suelo en algunas zonas del país. Las plantaciones forestales en gran escala con especies exóticas, a pesar de su importancia económica, han sido criticadas por su efecto en la disminución de nutrientes y recursos hídricos, pero no hay una respuesta general en cuanto a la magnitud de dichos impactos. Con el objetivo de evaluar el efecto del cambio de cobertura sobre los recursos hídricos a nivel de microcuenca se estimó el consumo de agua de una plantación adulta de *Eucalyptus globulus* F. Muell y de una pastura natural mediante la aplicación de la metodología de balance hídrico. En el periodo comprendido entre octubre de 2006 y setiembre de 2009 se obtuvieron registros de precipitación total, precipitación directa, escurrimiento fustal, escurrimiento superficial y contenido del agua en el suelo. El consumo de agua, o evapotranspiración total, de la cobertura forestal varió entre 829 y 1318 mm año⁻¹, lo cual correspondió a valores entre un 83 y 100 % de la precipitación anual. Los valores correspondientes a la pastura variaron entre 670 y 1220 mm año⁻¹, representando entre un 77 y 87 % de la precipitación. Se determinaron valores promedios diarios de evapotranspiración de 3,9 y 3,6 mm para el periodo estival (octubre-marzo) para la cobertura forestal y de pastura respectivamente; en los meses de invierno (abril-setiembre) los mismos alcanzaron 1,7 y 1,5 mm. Con los resultados obtenidos se plantea el desarrollo de un Modelo Simple para determinar el consumo de agua en una cuenca o parcela cuando se modifica el uso del suelo, parcial o totalmente, desde pastura a forestación o viceversa. El mismo correlaciona la evapotranspiración estimada en cada cobertura con la precipitación y el porcentaje que ocupa cada tipo de cobertura. El modelo sobreestima la evapotranspiración anual en un 11,6% de la lluvia anual, si se la compara con la calculada por el modelo de Zhang. Esta diferencia probablemente es explicada por la percolación, término que en el balance hídrico fue adicionado a la evapotranspiración estimada por carecer de datos.

Palabras claves: evapotranspiración, forestación, modelación, microcuencas apareadas

ESTIMATED WATER CONSUMPTION IN AN ADULT *Eucalyptus* PLANTATION

SUMARY

The forestry sector in Uruguay has experienced a marked development in the past two decades, increasing from 45,000 to 970,000 hectares forested with *Eucalyptus spp.* and *Pinus spp.*, intensely affecting land use in some parts of the country. Despite its economic importance, the large-scale forest plantations with exotic species have been criticized for their effect in reducing soil nutrients and water resources. However, there is no general answer regarding the magnitude of these impacts. In order to evaluate the effect of soil cover change on water resources at micro-basin level, we estimated water use of an adult *Eucalyptus globules* F. Muell, and of a natural pasture by applying the water balance methodology. Data of total precipitation, runoff and water content in soil, as well as precipitation that passes directly through the forest canopy and drain through branches and trunks was recorded in the period between October 2006 and September 2009. Water consumption, or total evapotranspiration, of forest cover varied between 829 and 1318 mm year⁻¹, corresponding to values between 83 and 100 % of annual precipitation. Values for pasture varied between 670 and 1220 mm year⁻¹, representing between 77 and 87 % of precipitation. In summer (October-March), we determined daily average values of real evapotranspiration of 3.9 and 3.6 mm for forest and pasture covers, respectively, while in winter (April-September) these values reached 1,7 and 1,5 mm. With these results we developed a simple model to determine the consumption of water in a basin or plot for partial or total change of land use from pasture to forestry, and vice versa. This model correlates evapotranspiration estimated under each coverage, to precipitation and the percentage occupied by each coverage type. The model overestimates annual evapotranspiration by 11,6 % of the annual rainfall, as compared with that calculated

by the model of Zhang. This difference is probably explained by the percolation, a term added to the estimated evapotranspiration in the water balance due to lack of data.

Keywords: evapotranspiration, forestry, modeling, paired micro-basins

1. INTRODUCCIÓN

Desde tiempos remotos han existido controversias sobre el impacto que genera la forestación sobre el ciclo del agua. 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). Aunque los estudios realizados demuestran que existen efectos sobre los aspectos hidrológicos en una cuenca, su magnitud varía según el contexto en el cual se desarrollen. Algunos de esos cambios pueden ser beneficiosos, mientras otros serían problemáticos para el manejo a nivel de cuencas debido al conflicto que se genera entre los diferentes actores que hacen uso del agua en la misma.

En nuestro país, el proceso de expansión de las plantaciones forestales está directamente relacionado con la Ley Forestal N° 15.939, aprobada en 1987. A través de la misma el estado promovió la forestación mediante incentivos económicos y financieros, subsidiando a productores o empresas que invirtieran en el sector, generando en pocos años, un gran incremento del área afectada por cultivos principalmente de Eucaliptos y Pinos. Como consecuencia, la superficie forestada se incrementó de 50.000 hectáreas en 1990 a 970.000 hectáreas en 2010, representando el 27 % del área definida como de prioridad forestal y un 6 % de la superficie total del país (Dirección General Forestal-MGAP-FAO, 2010). Esto determinó que el uso del suelo, básicamente destinado a la producción agrícola-ganadera se viera modificado intensamente en algunas zonas, pasando a un uso casi exclusivamente forestal.

Las plantaciones forestales en gran escala con especies exóticas, a pesar de su importancia económica, han sido criticadas por su efecto en la disminución de nutrientes y recursos hídricos, pero no hay una respuesta general en cuanto a la magnitud de dichos impactos. El escurrimiento tanto superficial como subsuperficial y la recarga de acuíferos depende del clima y de las características del suelo, intrínsecas o generadas como resultado de las actividades humanas. Cambios significantes en la cubierta vegetal conduce a una alteración de las propiedades del

suelo lo cual necesariamente produce cambios en la dinámica del agua y entonces en el ciclo hidrológico (Poor y Fries 1985, Céspedes-Payret *et al.* 2009)

En Uruguay, en particular, un país tradicionalmente agrícola-ganadero, los sistemas forestales representan para la comunidad y la opinión pública un elemento nuevo en la vida nacional (Lima, 1996), lo cual ha generado preocupación en la sociedad y en las instituciones nacionales respecto a su impacto sobre los recursos naturales, en particular aguas y suelos.

A nivel internacional existen programas de investigación y monitoreo a largo plazo y desde hace muchos años, de los efectos hidrológicos resultantes del cambio en el uso de la tierra. No obstante es necesario generar información a nivel nacional que tome en cuenta el clima local y en particular la variabilidad temporal y espacial de las precipitaciones, así como el tipo y uso de suelos y las formaciones hidrogeológicas. Es necesario obtener indicadores sobre los cambios del ciclo hidrológico, que resultan de esta modificación del uso de los suelos, a efectos de contar con información que sustente la toma de decisiones políticas para propender a un Manejo Forestal Sustentable. Asimismo, las empresas forestales necesitan incrementar sus conocimientos sobre el uso del agua por las plantaciones y cuál es el impacto sobre el ciclo hidrológico, para poder responder a los cuestionamientos del público, poder ajustar sus sistemas de manejo con el objetivo de la sustentabilidad a largo plazo, así como también para lograr las certificaciones ambientales impuestas por la demanda de un mercado que cada vez exige más garantías de políticas ambientales correctas. Estudios hidrológicos y ecofisiológicos a largo plazo, a escala de cuencas, parece ser la mejor forma para mejorar las técnicas de manejo forestal y optimizar el uso del agua, incrementando así la productividad forestal (Almeida *et al.* 2007).

En la última década se han realizado investigaciones a nivel nacional, cuantificado y evaluando algunos de los componentes del ciclo hidrológico y el impacto que sobre los mismos genera pasar de una cobertura de pasturas a una forestal (Silveira *et al.* 2011, Chescheir *et al.* 2008). Sin embargo existen escasos antecedentes sobre información nacional en cuanto al consumo de agua por parte de las plantaciones forestales y su relación con la disponibilidad de agua en el suelo,

cuya información ayudaría a responder a algunos de los cuestionamientos realizados por diferentes sectores de la sociedad.

En el año 1998 las Facultades de Ingeniería y Agronomía de la Universidad de la República, en el marco de la Red Temática de Ingeniería Agrícola iniciaron, un programa de investigación y monitoreo en macrocuencas, microcuencas y parcelas forestadas con el propósito de obtener información sobre los cambios ocasionados en el ciclo hidrológico y en los suelos, producto de las modificaciones anteriormente mencionadas.

Para obtener resultados confiables en trabajos de investigación con las características del que aquí se presenta se necesita una serie de datos que comprenda varios años, por lo que los obtenidos hasta el momento son considerados como resultados preliminares. Dado que, a nivel nacional existe escasa información sobre el consumo de agua de las plantaciones forestales, consideramos que los resultados presentados, aunque preliminares, son relevantes y constituyen el punto de partida para futuras investigaciones en éste ámbito.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

Estimación del consumo de agua de una plantación adulta de *Eucalyptus globulus* y su comparación con el consumo correspondiente a una pastura natural, mediante la metodología de balances hídricos en cuencas apareadas.

1.1.2 Objetivos Específicos

a) Estimación del consumo de agua a nivel estacional y anual de una plantación adulta de *Eucalyptus globulus*

b) Generar información que permita fácilmente determinar las variaciones en el consumo de agua en una cuenca o parcela cuando se modifica parcial o totalmente el uso del suelo, pastura a forestación o viceversa.

1.2 ANTECEDENTES

1.2.1 Efecto de los sistemas forestales en el ciclo hidrológico

El cambio en el uso del suelo de una cuenca generalmente conduce a cambios en los componentes de su balance hídrico, cuya magnitud está generalmente determinada por el clima; principalmente la precipitación; las características de la vegetación, las propiedades de la cuenca y de las prácticas de manejo del suelo y de la vegetación.

El potencial de los árboles para competir por recursos hídricos limitados ha recibido específica atención en Sud África, India, Australia, Brasil y Chile (Whitehead y Hinckley 1991, Kaufmann y Linder 1996, Mielke *et al.* 1999, Huber y Trecaman 2000, Soares y Almeida 2001). Hay evidencias que las plantaciones forestales con Pinos o Eucaliptos reducen el escurrimiento superficial, resultado que es consecuencia de la capacidad de las plantaciones de influenciar todos los procesos en el ciclo hidrológico.

La cantidad de agua almacenada en una cuenca está determinada por el balance entre: la precipitación como flujo de entrada al sistema, y el escurrimiento superficial, recarga de aguas subterráneas y evapotranspiración (ET) como flujos de salida del mismo. La cantidad total de precipitación que alcanza al suelo, la distribución espacial del contenido de agua edáfica, los montos de agua involucrados en la ET y percolación se modifican cuando se altera, sustituye o elimina una cubierta vegetal. Según Kallarackal y Somen (2008) la ET, compuesta de la transpiración desde las hojas, la interceptación y evaporación del agua desde el follaje y evaporación desde el suelo, es la principal forma de pérdida de agua; y en climas templados alcanza valores superiores al 65 % del total de precipitación que llega a la cuenca.

Una manera de aproximarse al valor de ET de una cuenca es asumir que la misma, desde una superficie con vegetación, está controlada por la disponibilidad de agua, que puede ser estimada a través de la precipitación, y la demanda atmosférica que determina la máxima cantidad posible de agua que puede ser evapotranspirada. En ambientes secos la ET máxima excedería a la precipitación, por tanto la ET real será equivalente a ésta última. Sin embargo, en condiciones húmedas la

disponibilidad permite que la ET real se aproxime asintóticamente a la ET máxima. (Zhang *et al.* 1999).

Según Cornish 1993, Ruprecht y Schofield 1989; los valores de ET en un monte nativo y en plantaciones son mayores que en pasturas y cultivos, debido a: 1) una mayor y más persistente área foliar que los pastos, derivando en una mayor intercepción de lluvia y transpiración; 2) mayor rugosidad aerodinámica lo que aumenta la posibilidad de que el calor advectivo y el aire seco puedan suplementar energía para la transpiración; 3) una mayor profundidad radicular permitiendo mejor acceso al agua del suelo; 4) una mayor capacidad para extraer humedad desde el suelo en condiciones secas; 5) un menor albedo (o reflectividad) lo que significa mas absorción de energía radiante.

Aunque la transpiración es considerada habitualmente como el componente más importante de la evapotranspiración forestal, la intercepción y su posterior evaporación desde el follaje puede también incrementarse sustancialmente. (Huber *et al.*, 2000) La evaporación de lo interceptado en sistemas pastoriles se considera nulo o de un valor bajo por lo cual generalmente se desprecia cuando se consideran en los cálculos de ET, sin embargo en sistemas forestales éste componente alcanza valores relativos entre 8 % y 100 %, con respecto a la precipitación total incidente (Silveira *et al.*, 2008). El mismo estudio determinó que un 66,7 % de la variabilidad estuvo explicada por la precipitación incidente y el 33,3 % remanente se debió a otras variables: incidencia de la intensidad de la lluvia, velocidad del viento, disponibilidad de agua, características de la especie (forma y tamaño de hojas y ramas) y las condiciones atmosféricas al momento del evento de lluvia. En follajes húmedos el valor de evaporación de la precipitación interceptada puede transformarse en un componente significativo del balance hídrico de la cuenca. Muchos estudios remarcan que el valor de evaporación en follajes forestales húmedos puede exceder a la cantidad de energía aportada por la radiación neta, debido a la energía aportada por la advección. La diferencia entre la evaporación ocurrida en follaje forestal y pasturas o cultivos cortos es probablemente el principal factor que determina las diferencias entre balances hídricos de cuencas forestadas y no forestadas.

Algunos autores, como Lansberg (1999), plantean que la cantidad de agua disponible en el suelo juega un importante rol en el mantenimiento de la transpiración durante los períodos sin precipitaciones, siendo la principal causa de la mayor transpiración ocurrida desde las cubiertas forestales comparada con pasturas y cultivos. Los árboles aprovechan mejor el agua del suelo debido a su extenso desarrollo radicular que les permite explorar un mayor volumen de suelo y alcanzar napas freáticas superficiales. En ambientes donde la precipitación es menor que el uso potencial de agua de la plantación, y no hay barreras para el desarrollo de las raíces, las plantaciones de *E. globulus* eventualmente usarán toda el agua almacenada en el suelo incluso hasta 20 m de profundidad en el perfil (Smettam *et al*, 1999). Sin embargo el control estomático de la transpiración ayuda grandemente en reducir el consumo de agua durante los periodos del año con alta demanda atmosférica, estudios realizados en *E. globulus* han mostrado que la transpiración a nivel de hoja estuvo principalmente controlada por el cierre estomático en respuesta al déficit de vapor de agua. (David *et al*. 1997, Kallarackal y Somen 1997)

Existen numerosos estudios concernientes a determinar el consumo de agua en coberturas forestales, así como también cuantificar la magnitud de los efectos que producen los cambios de la cobertura vegetal y las prácticas de manejo en el rendimiento de agua a nivel de cuencas (Bosch y Heweltt 1982; Brown *et al*, 2005). Algunas investigaciones abarcan el análisis de los cambios producidos a nivel de una misma cuenca, evaluando el impacto generado por la forestación o deforestación, y otras analizan los efectos considerando dos cuencas de similares características en cuanto a suelo, topografía, área, características hidrológicas, clima, vegetación, geología: “cuencas apareadas”. Éstas últimas tienen como ventaja la eliminación de la variabilidad climática, ya que se comparan simultáneamente dos cuencas sujetas a diferentes usos de la tierra. (Zhang *et al*. 1999; Brown *et al*. 2005). Ambos tipos de experimentos, una misma cuenca o cuencas apareadas, son confiables si se evalúan los efectos en el largo plazo como forma de disminuir la alta variabilidad interanual, principalmente al considerar la precipitación, y ambos han sido usados en diferentes zonas del mundo con el objetivo de determinar la magnitud del impacto ocasionado sobre el ciclo hidrológico al ser modificada la cobertura vegetal.

Bosch y Heweltt (1982) analizaron los resultados de 94 cuencas experimentales, la mayoría instaladas en climas templados, y a partir de los resultados obtenidos concluyen que puede estimarse con cierta exactitud la magnitud de los cambios sobre los recursos hídricos a partir de un cambio en el uso de la tierra. Cubiertas de Pinos o Eucaliptos causan en promedio un cambio de 40 mm en rendimiento de agua por cada 10 % de cambio en el área de la cubierta forestal. Sin embargo especies de hoja caduca y arbustivas generan cambios de 25 y 10 mm respectivamente. También concluyen que la respuesta del escurrimiento superficial a cambios en la cobertura vegetal, forestación o deforestación, dependen tanto de la precipitación media anual de la región como de la precipitación en el año bajo tratamiento. En zonas de alta precipitación la magnitud de los cambios en el rendimiento de agua, tanto los incrementos debido al corte como las disminuciones con la plantación, son mayores. El efecto del raleo, sin embargo, es menor en las zonas de alta precipitación con respecto a aquellas de bajas precipitaciones debido al rápido recrecimiento de la vegetación en las primeras.

Brown *et al.* (2005) incluyó, a la revisión antes mencionada, 72 estudios en cuencas apareadas, totalizando 166 experimentos analizados. Concluyeron que el estudio en cuencas apareadas provee una metodología útil para determinar las relaciones entre el porcentaje de cambio en la vegetación y el rendimiento de agua en pequeñas cuencas. Sin embargo, para que el impacto sea detectado el cambio en la vegetación debe ser de por lo menos un 20 % del área de la cuenca.

Según Samraj *et al.* (1988) en un estudio en cuencas apareadas en el sur de India, con una precipitación anual de 1300 mm, el rendimiento total de agua en una cuenca plantada con *Eucalyptus globulus* se redujo 87 mm año⁻¹ en el promedio de los 10 años de monitoreo. La reducción del escurrimiento generado por la cobertura forestal fue un 16 % comparándolo con el escurrimiento generado en la cuenca control bajo condiciones de pasturas naturales. En un estudio realizado en el norte del Uruguay, en una cuenca de pasturas naturales (aproximadamente 2000 km²), se indica que el rendimiento hídrico disminuyó, especialmente en el verano, posteriormente a que un 25 % de su superficie fuera cultivada con *Eucalyptus*, (Silveira y Alonso 2009, Silveira *et al* 2006). Nosetto *et al.* (2005) trabajando con

117 parcelas apareadas (*Eucalyptus* – Pasturas), estimó el valor de ET por medio de imágenes satelitales LANDSAT. Los resultados obtenidos demostraron que para una lluvia anual de 1300 mm el rendimiento hídrico de la pastura fue de 720 mm año⁻¹ y 200 mm año⁻¹ bajo forestación. Esta disminución, más del 70 %, afectaría el aporte de agua a nivel local y la generación de energía hidroeléctrica; lo cual se intensificaría en años secos, donde la forestación puede causar una reducción total de los escurrimientos. Este incremento en los valores de ET bajo similares condiciones de lluvia limitaría el agua disponible para los otros procesos responsables de la recarga de acuíferos y rendimientos de los ríos.

Aunque la metodología en cuencas apareadas es adecuada para evaluar impacto de la forestación sobre el rendimiento de agua, tiene como desventaja el alto costo de instalación y que para obtener información relevante es necesaria su evaluación por un extenso período de tiempo. Considerando lo anterior, han sido desarrollados diversos modelos empíricos, los cuales son capaces de predecir el efecto del cambio de cobertura a partir del valor de la precipitación media anual, evapotranspiración máxima y cambio relativo en la cobertura de la cuenca (Zhang *et al.* 1999, Holmes y Sinclair 1986, Lu *et al.*, 2003). Según Zhang *et al.* (2001) el principal proceso responsable de cambios en el rendimiento de agua como resultado de alteraciones en la vegetación, para una escala anual, es la evapotranspiración, dado que el almacenamiento de agua en el suelo se vuelve despreciable cuando se trabaja con balances hídricos a esa escala y por tanto el escurrimiento puede predecirse desde cambios en la evapotranspiración. A partir de la premisa anterior, Zhang *et al.* (1999, 2001) desarrollaron un modelo simple de dos parámetros para estimar la evapotranspiración media anual a escala de cuencas para dos tipos de vegetación: forestal y pasturas. Su estudio se basó en el análisis de los resultados obtenidos en 250 estudios alrededor del mundo, con diferentes tipos de vegetación a través de un gradiente de precipitación.

La comprensión del impacto de la vegetación en el rendimiento de agua medio anual se encuentra avanzado y hay disponibles métodos robustos para predecir la magnitud del cambio de la vegetación en el balance hídrico medio anual (Zhang *et al.*, 2001). Sin embargo el efecto de los cambios de vegetación en los flujos hídricos

estacionales, mensuales y diarios se encuentran menos comprendidos; el rendimiento hídrico estacional puede ser tan o más importante que el impacto sobre el rendimiento anual. Actualmente no existen modelos propuestos que contemplen la respuesta del rendimiento de agua estacional a cambios en la vegetación, principalmente como consecuencia de la naturaleza cualitativa y gráfica de muchos de los flujos estacionales reportados en la literatura, lo cual no permite obtener una serie de datos cuantitativos a partir de los cuales ajustar un modelo similar a los desarrollados considerando cambios en el rendimiento de agua a nivel anual (Brown *et al.* 2005). A una escala de tiempo estacional otras características de la cuenca tales como tipo, profundidad y contenido de agua en el suelo determinan interacciones de importancia que afectan significativamente el balance hídrico, modificando las respuestas con respecto a cuando se trabaja en períodos anuales. (Brown *et al.* 2005, Johnson y Kovner 1956)

1.2.2 Consumo de agua por coberturas forestales

Según Céspedes-Payret *et al.* (2009) el consumo anual de agua de un cultivo de *Eucalyptus* es variable de acuerdo a las diferentes situaciones, dependiendo de la disponibilidad de agua en el sistema. Esta variación puede alcanzar un rango entre 400 y más de 1500 mm año⁻¹, siendo la demanda potencial de agua del cultivo alrededor de los 1200 mm año⁻¹, similares valores son registrados bajo plantaciones de pinos (Calvo de Anta 1992).

Para dos sitios en China, Lane *et al.* (2004) reportan valores de ET total anual en *Eucalyptus* de 1118 mm y 969 mm, representando el 71 y 66 % de la precipitación respectivamente, la cual varió entre 1300 a 1800 mm anuales. La metodología utilizada para determinar la transpiración fue la del pulso de calor y la evaporación del suelo fue medida mediante microlisímetros. También surge que la transpiración, el consumo real de agua por la plantación, no excedió de los 600 mm para ambos sitios y que la evaporación del suelo representó el 15 % de la ET, el resto de la ET total anual está representado por la interceptación. También concluyen que en las estaciones secas el balance hídrico muestra que la ET excede o es casi igual al valor de la precipitación, indicando el uso del agua desde el suelo mas profundo o desde

agua almacenada en profundidad determinando una disminución del contenido de agua en el suelo. Sin embargo las napas alcanzaron nuevamente su nivel en las estaciones húmedas al incrementarse la recarga.

Soares *et al.* (2001) en base a datos disponibles para una plantación de *Eucalyptus* de 9 años de edad, en una cuenca experimental al este de Brasil, desarrollaron y parametrizaron un modelo de balance hídrico específico para plantaciones de *Eucalyptus* (UAPE: “Uso de Água em Plantações de Eucalipto”), cuyo objetivo es poder determinar el uso del agua por las mismas. Para el año de estudio en el cual corrieron el modelo la ET que surge del mismo fue de 1345 mm para un total de precipitación de 1396 mm. Valores de ET entre 1134 y 781 mm, determinados con el modelo UAPE, fueron reportados por Almeida *et al.* (2007) durante 6 años de evaluación, en los cuales la precipitación anual varió entre 1461 y 653 mm. Considerando un promedio anual de precipitación en la región de 1350 mm, concluyeron que el promedio de ET sobre el ciclo total de rotación del cultivo, se correspondió con el 95% de la de la entrada de agua a la cuenca.

Huber *et al.* (2000) determinaron el consumo de agua para dos plantaciones jóvenes de *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*. Los valores de ET (sin considerar pérdidas por interceptación) fueron equivalentes al 47 y 55 % de la precipitación anual (1089 y 1418 mm para dos años consecutivos), mientras que para una situación de pradera ésta alcanzó entre un 44 y un 47 %. Las diferencias entre ambas coberturas se acentuaron cuando se adicionaron las pérdidas por interceptación (25-30 % de la precipitación anual) en las plantaciones. Los resultados obtenidos asignaron a la interceptación del dosel la principal causa de las diferencias entre la ET de plantaciones forestales y una pastura natural.

En un estudio para 19 cuencas con precipitaciones promedio anual entre 500 y 2500 mm y variando entre mezclas de pasturas y cubiertas por forestación con eucaliptos nativos, (Holmes y Sinclair 1986) concluyeron que para los sitios con una precipitación de 1300 mm, la forestación consumía unos 215 mm más por ET que las pasturas. Analizando el efecto del manejo de la plantación sobre el consumo de agua, Huber *et al.* (1998) determinaron que para tres densidades de *Eucalyptus nitens*, (1560, 850 y 663 árboles ha⁻¹) la evapotranspiración, incluidas las pérdidas por

intercepción, fue de 861, 836 y 776 mm respectivamente, siendo la precipitación en el período 1090 mm. Estos resultados indican que hay una relación directa entre la cantidad de agua involucrada en la ET y la densidad de plantación, una mayor biomasa aérea aumenta las pérdidas por intercepción y ejerce una mayor demanda sobre el agua edáfica por transpiración, quedando de manifiesto el efecto del manejo de la plantación sobre el balance hídrico. Para el mismo sitio y período de medición, Huber *et al.* (2000) determinaron el consumo de agua por ET de una pastura en 476 mm, lo cual representa un 43 % de la precipitación total, significativamente menor al 79 % que representó la ET para la plantación de mayor densidad.

Talsma y Gardner (1986) estudiaron *Eucalyptus* creciendo en suelos profundos cerca de Canberra, determinando por medio de un balance hídrico en el suelo que los árboles usaron cerca de 3,8 mm día⁻¹ durante el período comprendido entre los meses de octubre a marzo, y cerca de 2,6 mm día⁻¹ para el período del año en el cual las lluvias fueron escasas. Soares *et al.* (1997) reportaron 8 mm día⁻¹ de transpiración cuando el agua no era limitante, para plantaciones de *Eucalyptus* en Brasil, también Calder (1992) reporta valores entre 3 y 8 mm día⁻¹ de consumo de agua por transpiración en condiciones tropicales.

Muchos estudios no discriminan entre diferentes tipos de cubierta forestal, sin embargo hay evidencias que indican que los valores de ET difieren entre plantaciones de coníferas y eucaliptos. Estudios sudafricanos indican que la ET de eucaliptos supera a la de los pinos (Bosh 1979, Van Wyk 1987, Smith y Scott 1992, Dye 1996). La tendencia opuesta ha sido observada en Australia, donde mayores valores de ET son normalmente descritos para pinos, principalmente por su mayor índice de área foliar e intercepción de lluvia (Smith *et al.* 1974, Dunin y MacKay 1982, Pilgrim y Cordery 1983, Cornish 1989). Sin embargo hay que considerar que en Australia las comparaciones han sido con eucaliptos nativos y no en plantaciones como en Sudáfrica.

Honeysett *et al.* (1992) demostraron una buena correspondencia entre valores de ET y contenido de agua en el suelo durante dos ciclos de sequía para *E. nitens* y *E. delegatensis* de 4 años en parcelas en Tasmania, con todas las raíces en los 2 m superiores del suelo. Durante el primer período la ET de las dos especies fue

estimada en 3,5 y 3,2 mm día⁻¹ respectivamente, la cual fue solo levemente menor que la ET de referencia. Durante el segundo período el suelo estaba mucho más seco y los valores correspondientes fueron sólo de 2,4 y 2,2 mm día⁻¹. En una plantación de *Eucalyptus grandis*, a una densidad de 725 árboles ha⁻¹ y con una precipitación de 1250 mm de promedio anual, Dye (1987) determinó una transpiración promedio diaria de 4,7 mm utilizando la ecuación de Penman-Monteith para un período de 57 días durante el invierno. Las determinaciones en días de primavera y principios del verano alcanzaron un valor promedio de 8,5 mm. En la aplicación de la ecuación de Penman-Monteith consideró datos meteorológicos y valores de conductancia estomática y de la capa límite, determinados para el sitio de estudio.

En regiones más húmedas tales como la pampa Argentina, Engel *et al.* (2005) determinó, mediante medidas de flujo de savia, valores de transpiración en *Eucalyptus* de 2 mm día⁻¹ en promedio con un máximo de 3,7 mm día⁻¹ disminuyendo la napa freática en 0,5 m con respecto a los alrededores con pastura en los períodos de déficit hídrico.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó la metodología de “cuencas apareadas”, una bajo cubierta forestal y otra de pasturas naturales, con el objetivo de comparar el comportamiento hidrológico bajo ambas coberturas y determinar el consumo de agua, evapotranspiración (ET), mediante la determinación de balances hídricos, a escalas de tiempo trimestral y anual. La elección de la zona de estudio estuvo determinada por la representatividad de la misma en cuanto al rubro forestal; según los datos del Censo Agropecuario (2000) es una de las zonas del país donde la forestación se desarrolla con mayor intensidad (Figura 1). Esto dificultó la selección de las microcuencas dado la escasez de áreas bajo pastura natural, lo cual determinó que las microcuencas quedaran distanciadas aproximadamente 5 km.

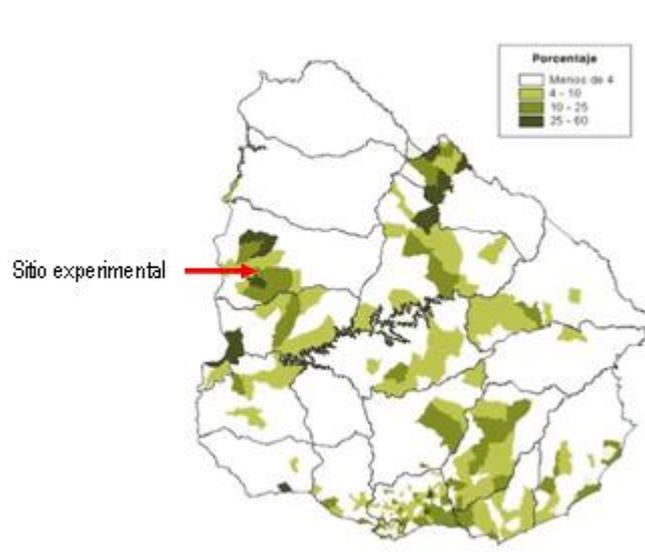


Figura 1. Localización del sitio de estudio

2.1 ANTECEDENTES

Al momento de iniciar el estudio se contaba con la información sobre la caracterización física de las microcuencas, realizada por el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA, 2006), el estudio geológico (Schipilov, A, 2006) y el mapeo y caracterización de los suelos realizado por la División Suelos y Aguas (DSA) perteneciente a la Dirección General de Recursos Naturales

Renovables (RENARE) del Ministerio de Agricultura y Pesca (MGAP). Los resultados de estos estudios demostraron que la metodología de “cuencas apareadas” era posible debido a la similitud entre ambas.

Las microcuencas fueron instrumentadas en el año 2006 en el marco del Programa de Desarrollo Tecnológico (Proyecto PDT 32/03).

2.2 SITIO DE ESTUDIO

Las microcuencas se encuentran en la zona litoral oeste del Uruguay, 15 km al norte de la población Piedras Coloradas, km 48.5 de Ruta Nº 90, departamento de Paysandú. Están localizadas en terrenos de una empresa forestal, ubicación $34^{\circ} 25'$ latitud sur y $55^{\circ} 23'$ de longitud oeste, a 100 msnm, la temperatura y precipitación es de un promedio anual de 18°C y 1200 mm respectivamente, ésta última distribuida uniformemente durante el año.

La microcuenca forestada está situada en el establecimiento “Don Tomás”, con un 55% del área con manejo forestal; y la microcuenca de pasturas en el establecimiento “La Cantera” con un uso específicamente ganadero con vegetación de pasturas naturales, (Figura 2). Sus cauces principales son la Cañada de Baygorria y la Cañada de La Quinta, respectivamente, ambos cauces son afluentes del Arroyo Capilla Vieja en su margen izquierda.



Figura 2. Localización de las microcuencas, con cobertura forestal y de pasturas respectivamente.

2.2.1 Caracterización física

Los parámetros físicos que caracterizan ambas microcuencas pueden observarse en el siguiente cuadro,

Cuadro 1. Parámetros físicos de las dos microcuencas experimentales

Parámetros físicos	Microcuenca	Microcuenca
	Forestal	Pastura
Área (km ²)	2.12	1.20
Perímetro (km)	5.81	4.58
Longitud del Cauce (m)	1783	2168
Pendiente del cauce (%)	0.90	1.58
Pendiente media cuenca (%)	4.68	5.92
Tiempo de concentración (minutos)	39.0	36.5

2.2.2 Geología

La zona relevada es cruzada diagonalmente de SE a NW por los arroyos Capilla Vieja al Noreste y el Bacacué Grande al Suroeste. El terreno define laderas asimétricas con pendientes fuertes hacia el Suroeste y más suaves hacia el Noreste. La topografía está marcada por una serie de escarpas subhorizontales, definidas por niveles endurecidos o cementados de las unidades geológicas subyacentes, que se desarrollan de forma continua a cotas bien establecidas: 50±5m y 65±5m.

El principal antecedente geológico que es posible consultar para esta región es la Carta Geológica del Uruguay a escala 1/500.000 de Bossi et al. (1998) (Figura 3).

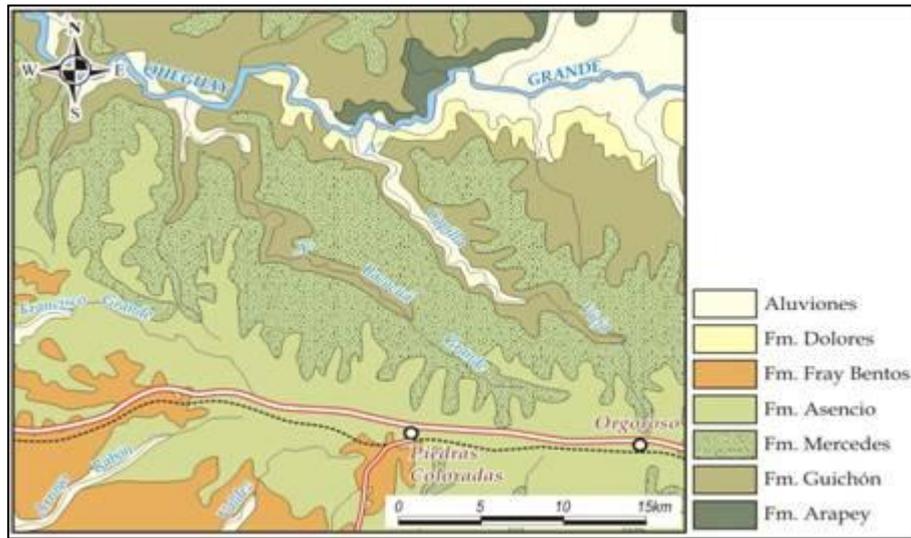


Figura 3. Extracto de la Carta Geológica del Uruguay (1/500.000, 1998)

De la figura se desprende que el subsuelo del sitio en estudio se compone de tres unidades geológicas: Formación Mercedes, Formación Guichón y Aluviones en la base. La Formación Mercedes incluye areniscas finas a medias, a veces conglomerádicas, pero siempre con elevado contenido en materiales finos (pelitas). Esta unidad puede presentar grados variables de cementación con sílice, pero siendo siempre superior al contenido en carbonato de calcio como agente cementante. Los colores dominantes son blancuzcos a grisáceos, a veces con tonalidades verdes. La estructura dominante es la estratificación plano paralela o cruzada, en sets de 1 a 2m de potencia. La Formación Guichón está representada por una arenisca fina a media, relativamente bien seleccionada, de colores rojizos y con abundante contenido arcilloso que puede estimarse como superior al 15%. En las zonas más deprimidas se encuentran los Aluviones, por lo general a cotas inferiores a los 40 metros. Se asocian a los cursos de mayor envergadura: arroyo Bacacua Grande y arroyo Capilla Vieja, sobre todo este último debido a la proximidad de su desembocadura en el Río Queguay Grande. Estos depósitos dan lugar a planicies anegables, en las que en algunos casos se ha entallado el curso superficial permitiendo observar la estructura interna de estos aluviones. Se trata de depósitos de arenas finas a medias, arcillosas esporádicamente con niveles rudáceos que incluyen clastos de hasta 2 cm de

diámetro mayor en lentes discontinuos. El contenido de materia orgánica es variable pero siempre importante. (Schipilov, 2006)

En la Figura 4 se muestra la geología a escala 1:50000 para ambas microcuencas. Las unidades cartografiadas son unidades litológicas homogéneas por lo cual su comportamiento desde el punto de vista hidrogeológico es similar.

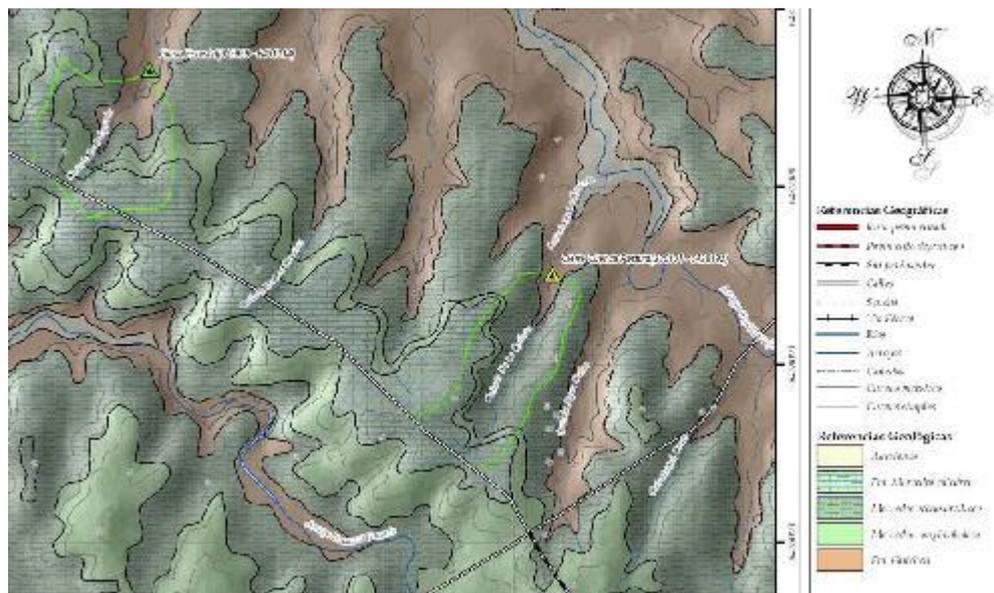


Figura 4. Extracto de la Carta Geológica Regional. (1/50.000, Schipilov 2006)

2.2.3 Suelos

De acuerdo con la cartografía de suelos escala 1/1.000.000 (1976) las cuencas en estudio se encuentran ubicadas geográficamente dentro de la Unidad Bacacúa, La cartografía CONEAT distingue el Grupo 10.4 ocupando las posiciones de las cabeceras de ambas cuencas, el Grupo 9.1 asociado a las áreas de escarpas y el Grupo 9.2 se corresponde con las laderas disectadas de posiciones altimétricas inferiores. Los dos últimos grupos CONEAT se encuentran dentro de los denominados “suelos de prioridad forestal”.

La DSA realizó un levantamiento semidetallado de suelos escala 1:20.000 de ambas microcuencas a partir del cual se determinó que en las cabeceras se encuentran asociaciones de suelos que clasifican como Brunosoles Subéutricos Típicos/Lúvicos y Vertisoles Rúpticos Lúvicos (IAp(L)Kca) como suelos accesorios,

siendo los primeros la asociación dominante. Por debajo del interfluvio aplanado se encuentran sucesivos niveles de escarpas formadas por materiales cretácicos consolidados con afloramientos rocosos que a su vez presentan variaciones importantes del punto de vista litológico. El nivel superior de escarpas, inmediatamente por debajo del interfluvio, está constituido por materiales con alto contenido de calizas, en cuyas áreas de retroceso se desarrollan suelos francos a arenoso francos profundos identificados como Brunosoles Subéutricos Típicos (LcK), asociados a suelos más superficiales. Por debajo existe otro nivel de escarpas formado por areniscas silicificadas de la Formación Guichón en cuyas áreas de retroceso se encuentran suelos pardos muy diferenciados texturalmente y bajo contenido de materia orgánica (Argisoles Dístricos Melánicos Abrúpticos, Esc-K) a ellos se encuentran asociados suelos superficiales o muy superficiales (Litosoles Subéutricos Ocricos). A diferencia de lo que ocurre en la cuenca de la Cañada de la Quinta, en la cual esta unidad de suelos llega hasta el valle que acompaña la vía de drenaje, en la cuenca de la cañada de Baygorria existe un nivel inferior de escarpas que da lugar a una unidad de suelos con una asociación muy similar a la que está en posición altimétricamente superior, compuesta por Litosoles y Argisoles. (Figura 5)

Para cada cuenca se tomaron como suelos representativos aquellos que en conjunto ocupaban el 90% del área de las mismas. En cada uno de los suelos, y en ambas cuencas, se realizaron calicatas con el objetivo de realizar una mejor descripción morfológica y extraer muestras para su caracterización físico-química en laboratorio. También se extrajeron muestras imperturbadas para determinar en cada horizonte los valores de densidad aparente y su capacidad de retención de agua. En el horizonte C no fue posible extraer muestras debido a la presencia de gravas y gravillas que dificultaron obtener la muestra en forma imperturbada, similares situaciones se encontraron en algunos casos en el horizonte A o B, consecuencia de la presencia de “línea de piedras”. Los análisis físico-químicos fueron realizados en el laboratorio de la División Suelos y Aguas perteneciente al MGAP, y las curvas tensión-humedad, mediante la metodología de platos de presión (Olla de Richards), en el laboratorio de suelos de la Estación Experimental “Wilson Ferreira” de INIA. (Datos morfológicos y analíticos de los suelos en ANEXO 6.2)

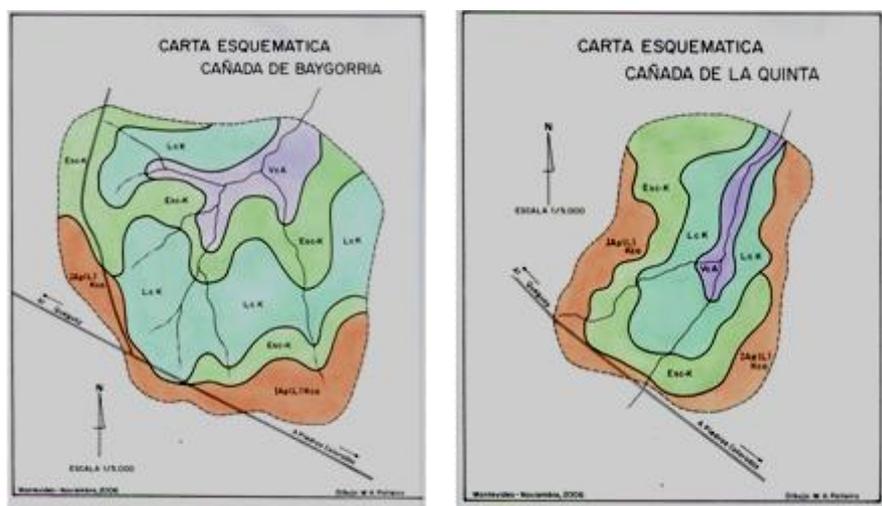


Figura 5. Cartas esquemáticas (1/5000) de los suelos presentes en la Microcuenca Forestal (Cañada Baygorria) y en la Microcuenca de Pasturas (Cañada de la Quinta). (W.A.Palleiro, DSA 2006).

2.2.4 Vegetación

La vegetación en la cuenca forestal está compuesta por *Euycaliptus globulus* en un 55% del área y pastura natural en el 45% restante (corta fuegos, protección de riberas). La caracterización de la plantación al momento de la instalación del experimento se presenta en el siguiente cuadro:

Cuadro 2. Características de la plantación

Especie	<i>Eucalyptus globulus</i>
Edad al 2006	8 años (fecha implantación Otoño-Primavera 1998)
DAP medio	14 cm
Altura media	14,9 m
Densidad	895 árboles ha ⁻¹

Debajo de la cobertura forestal se encuentra una vegetación rala y de bajo porte compuesta principalmente por carquejas, (*Baccharis sp*). Las zonas desprovistas de árboles tienen una composición botánica propia de pasturas naturales: *Baccharis sp*, *Bromus sp*, *Paspalum sp*, *Stipa sp*, etc. La cuenca de pastura, localizada en el establecimiento “La Cantera”, presenta una vegetación

característica de pasturas bajo uso ganadero, similar a la descrita para el área de pastura en la cuenca forestal.

2.3 PARÁMETROS MEDIDOS

La metodología consistió en la aplicación de la ecuación de balance hídrico a paso de tiempo mensual, posteriormente los resultados se analizaron a nivel semestral y anual. La precipitación y el escurrimiento se registraron en forma continua y el contenido de agua en el suelo a nivel mensual en ambas microcuencas. La evapotranspiración, a paso de tiempo mensual, se determinó mediante la ecuación general de balance hídrico [1] (UNESCO-PHI, 2006), la cual bajo una cubierta forestal toma la siguiente forma:

$$Pd + Pf + Ic - Ei - ET - Q - Perc \pm \Delta H = 0 \quad [1]$$

Donde:

Pd: Precipitación directa, mm

Pf: Precipitación fustal, mm

Ic: Intercepción, mm

Ei: Evaporación de la precipitación interceptada, mm

ET: Evapotranspiración, mm

Q: Escurrimiento superficial, mm

Perc: Percolación, mm

ΔH : Variación en el contenido de agua en el suelo, mm

La precipitación total incidente (Pt) sobre la microcuenca forestal fue registrada cada 5 minutos con un pluviógrafo digital marca Rainwise, instalado en la zona central de la microcuenca en un claro libre de árboles. Debido a que la distancia entre baricentros de las microcuencas es de 5 km, se entendió necesario colocar otro pluviógrafo en la microcuenca de pastura con el objetivo de obtener un registro preciso de la precipitación total incidente sobre la misma.

La Pt al caer sobre una cubierta forestal se subdivide en distintos componentes antes de alcanzar el suelo: una parte es interceptada por el follaje,

ramas y tronco (I_c), y es evaporada a la atmósfera (E_i); otra parte escurre a través de ramas y fuste, precipitación fustal (P_f), hasta alcanzar el suelo en forma localizada junto al tronco; y la mayor parte atraviesa directamente el follaje, precipitación directa (P_d), y alcanza el suelo en forma distribuida. Para cuantificar las diferentes formas en la cuales se redistribuye la P_t se instaló una “parcela de redistribución” en la zona central de la melga más cercana al cierre de la microcuenca forestal, procurando evitar posibles efectos de borde de la plantación. El registro de la P_d se realizó mediante la metodología usada por (Iroumé y Huber 2000); se instaló una canaleta de chapa galvanizada de sección triangular de 15 cm de ancho y 35 m de longitud ($5,25 \text{ m}^2$), fue colocada en el sentido de la pendiente natural del terreno y de forma tal que en su recorrido cubriera la variabilidad generada por la diferente densidad del dosel (Figura 6). El agua recolectada fue conducida y almacenada en un tanque de 600 litros de capacidad, donde las variaciones de nivel son registradas mediante un sensor de boya (Thalimedes, OTT) en el primer periodo del monitoreo y uno de presión durante el último año (WT-HR, Trutrack). Para el vaciado automático del tanque se colocó una pequeña bomba de desagote con un sensor de nivel, alimentada mediante una batería de 12 voltios.

El escurrimiento fustal (P_f) fue medido en 10 árboles cercanos a la canaleta, alrededor de los troncos se ajustaron y sellaron collarines de goma con el objetivo de recolectar el agua que escurre por los mismos (Ford y Deans, 1978; Iroumé y Huber, 2000, Likens y Eaton 1970). Estos collarines fueron conectados a tubos de PVC de 50 mm de diámetro los cuales unidos a una tubería de iguales características se conduce el agua hasta un segundo tanque de 600 litros de capacidad, provisto con un sistema de registro y vaciado idéntico al descrito anteriormente (Figura 7).



Figura 6. Detalle de la canaleta instalada en la parcela de redistribución para medir la precipitación directa



Figura 7. Detalle de los collarines de goma instalados en la parcela de redistribución para medir la precipitación fustal

La cuantificación de la precipitación directa (P_d) y el escurrimiento fustal (P_f) permite obtener el monto de precipitación interceptado por el follaje mediante la siguiente relación:

$$I_c = P_t - (P_d + P_f) \quad [2]$$

Ic: Intercepción, mm

Pt: Precipitación total, mm

Pd: Precipitación directa, mm

Pf: Precipitación fustal, mm

El escurrimiento superficial (Q) fue medido mediante vertederos instalados en los cierres, en ambas microcuencas, del tipo triangular de lámina delgada, estableciéndose para su diseño que el caudal máximo de funcionamiento se correspondiera con eventos extremos inferiores a 1,5 años de período de retorno, logrando así medir con muy buena confiabilidad un gran porcentaje de valores de caudal a lo largo del año (menores a $1\text{m}^3\text{s}^{-1}$) (Figura 8). El registro de caudales fue continuo, cada 5 minutos, midiéndose a través limnógrafos de boya, Marca OTT Talhimides colocados en cada uno de los cierres. Los eventos de mayor caudal, que superaran a los vertederos anteriormente descritos, se evaluaron mediante la construcción de vertederos de excedencia y la correspondiente curva altura-caudal mediante modelación hidrodinámica.



Figura 8. Vertedero instalado en el punto de cierre de la microcuenca forestada.

La cantidad de agua percolada o sea la cantidad de agua que se “pierde” por debajo de la profundidad radicular y por tanto no queda disponible para la cubierta vegetal fue medida en forma manual, una vez por mes, en 6 piezómetros de 5 m de profundidad (3 en cada microcuenca). La ubicación de los piezómetros se determinó según el estudio geológico realizado.

El contenido de agua en el suelo fue obtenido mediante la metodología basada en la termalización de neutrones, la cual consiste en la toma de registros de contenido de agua en el suelo mediante una sonda de neutrones (marca CPN, modelo 503DR HYDROPROBE con fuente de neutrones de 1.85 GBq (50 mCi) Americio-241: Berilio), las medidas fueron realizadas para las profundidades de: 15, 30, 50, 70, 90 y 110 cm. La variabilidad en el espesor de los suelos determinó que la profundidad hasta la cual se toman registros varía de 0,5 m a 1,1 m, éstos fueron obtenidos aproximadamente una vez al mes durante el período de evaluación.

A partir del mapa de suelo, en ambas microcuencas se seleccionaron los más relevantes, en cuanto a su área, para el estudio de la evolución en el contenido de agua de los mismos en las distintas coberturas (Cuadro 3)

Cuadro 3. Suelos característicos de las cuencas y el área (%) ocupada por los mismos.

Suelos	Cuenca Pastura	Cuenca Forestal
	% área	% área
Argisoles Dístrico (Esc K)	29	30
Brunos. Subéut./Vertisoles (IAp LK)	31	20
Brunos. Subéut. Típicos (LcK)	32	39
Total del área (%)	92	89

En ambas microcuencas se seleccionaron puntos representativos para cada tipo de suelo en los cuales fueron instalados tubos de acceso para la sonda de neutrones: en la microcuenca forestal se seleccionaron 7 sitios de muestreo, en cada

uno de los cuales se colocaron tubos en la fila y en la entrefila, lo que determina un total de 14 tubos. En la cuenca de pastura fueron instalados 7 tubos. Debido a que los perfiles de los diferentes suelos tienen profundidades variables, las estimaciones de contenido de agua se realizaron hasta una profundidad en el perfil de 80 cm.

Para obtener el contenido de agua en volumen a partir del valor (número de cuentas) emitido con la sonda, la metodología exige de una calibración. La misma se realizó obteniendo muestras de suelos con diferente contenido de humedad, a las cuales se les determinó el contenido de agua mediante el método gravimétrico, obteniéndose la correlación entre los valores obtenidos por termalización de neutrones y el contenido de agua gravimétrico para cada profundidad, lo cual junto con el valor de densidad aparente permite obtener las ecuaciones correspondientes para estimar el contenido de agua volumétrico a las distintas profundidades de suelo. A modo de ejemplo, en el Cuadro 4 se transcriben las ecuaciones utilizadas, para uno de los suelos de la cuenca forestal, en la determinación del contenido de agua en milímetros para una profundidad de 80 cm.

Cuadro 4. Ejemplo de las curvas de calibración utilizadas para estimar el contenido de agua en el suelo a partir de las medidas con sonda de neutrones.

Suelo	Profundidad (cm)	Ecuación de calibración
Brunos. Subéut. Típicos (LcK)	0 - 22.5	13.701 X + 1.3813 ($r^2 = 0.87$)
	22.5 - 40	13.157 X + 0.7295 ($r^2 = 0.77$)
	40 - 60	27.395 X - 21.922 ($r^2 = 0.78$)
	60 - 80	7.8391 X + 11.192 ($r^2 = 0.77$)

X = es el valor que se obtiene con la sonda

2.4 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

2.4.1 Determinación de la evapotranspiración de la cubierta vegetal

Con los datos obtenidos durante el periodo octubre 2006 - setiembre 2009 se realizó el balance hídrico en ambas microcuencas con el objetivo de estimar, a partir del mismo, la evapotranspiración total (ETt), considerando la magnitud de éste parámetro como una estimación del consumo de agua por parte de la vegetación correspondiente a cada uno de los sitios. La evapotranspiración total (ETt) incluye el monto de agua transpirada por la vegetación así como también aquel afectado a la intercepción (Ic), se corresponde con el total de agua consumida por las diferentes coberturas. Los balances hídricos fueron realizados para períodos de tiempo comprendidos entre dos medidas sucesivas de agua en el suelo, aproximadamente mensuales.

Posteriormente las estimaciones mensuales de ETt en ambas microcuencas se acumularon a nivel semestral y anual con el objetivo de cuantificar y comparar a esa escala de tiempo la ETt de ambas coberturas.

La determinación de ETt se realizó a partir de la siguiente ecuación:

$$ETt = Pt - Q - Perc \pm \Delta H \quad [3]$$

Donde:

ETt: Evapotranspiración total, mm

Pt: Precipitación total incidente, mm

Q: Escurrimiento superficial, mm

Perc: Percolación, mm

ΔH : Variación en el contenido de agua en el suelo, mm

En la cuenca forestada se determinó el balance considerando solo la cubierta forestal, para lo cual se corrigió el escurrimiento superficial descontándole una fracción que correspondería al escurrimiento generado por área de pastura (45 % del área total de la cuenca). Para determinar el monto a descontar se calcularon los coeficientes de escorrentía en la cubierta de pastura, en base a los datos caudal y precipitación de la microcuenca de pastura. Con el objetivo de considerar la diferencia en la pendiente entre ambas microcuencas, 5,9 % en la pastura y 4,7 % en

la forestal, el coeficiente de esorrentía anteriormente calculado se corrigió multiplicándolo por la relación entre las pendientes, asumiendo proporcionalidad entre las mismas. Luego de obtenidos los coeficientes para cada período se determinó el escurrimiento proveniente del área de la cuenca que está bajo pastura, el cual fue descontado al escurrimiento total generado en la cuenca forestal. El escurrimiento restante se asumió como el generado únicamente por el área forestada. A partir de balances mensuales se determinó la ETt, semestral y anual para la cubierta forestal.

Posteriormente, con el objetivo de obtener el valor de la evapotranspiración (ET), entendiendo a esta como la cantidad de agua efectivamente transpirada por la cobertura forestal más la evaporada por el sotobosque, al valor de ETt obtenido en la cobertura forestal se le descontó el monto correspondiente a la Ic, o sea:

$$ET = ETt - Ic \quad [3]$$

ET: Evapotranspiración, mm

ETt: Evapotranspiración total, mm

Ic: Intercepción, mm

La ETt y la ET en la cobertura de pasturas se consideraron equivalentes bajo el supuesto de que la intercepción en dicha cobertura es despreciable.

En la cuenca de pastura el escurrimiento superficial fue corregido, descontándole una fracción correspondiente a escurrimiento base, dado que ésta cuenca presenta flujo de agua permanente, aún en épocas de sequía debido a que la cuenca subterránea es de mayor tamaño que la cuenca superficial. Para los períodos de tiempo entre los cuales se realizó cada balance se estimó gráficamente el aporte correspondiente al flujo base, el cual se descontó al escurrimiento total con el objetivo de no subestimar un valor de ETt. A partir de los registros obtenidos se procedió a calcular la ETt mediante balances hídricos semestrales y anuales para una cubierta de pastura natural, con un manejo ganadero tradicional.

En ambas microcuencas no fue considerada la cantidad de agua percolada debido a que las medidas fueron realizadas manualmente en cada visita, no contándose con la información suficientemente detallada como para ser utilizada en los balances. Por lo tanto el valor de ETt determinado como residual desde la

ecuación de balance hídrico, se encuentra afectado por la magnitud de éste parámetro, en mayor grado en aquellos períodos de altas precipitaciones.

2.4.2 Determinación de la evapotranspiración de referencia (ET_o)

El objetivo de determinar este parámetro fue evaluar la magnitud de la ET_t forestal con respecto al máximo consumo que puede realizar una pastura que se encuentre en condiciones ideales de crecimiento (ET_o). Por definición los únicos factores que afectan ET_o son los parámetros climáticos por lo que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos y su valor expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo (Allen et al, 1998). Desde este punto de vista, el método FAO Penman-Monteith se recomienda como el único método de determinación de ET_o, este método ha sido seleccionado debido a que aproxima de una manera cercana la ET_o de cualquier localidad evaluada, tiene bases físicas sólidas e incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos.

El valor de la ET_o se determinó mediante la fórmula de Penman-Monteith (Allen et al, 1998), debido a problemas en la obtención de datos a partir de la estación meteorológica instalada en la microcuenca forestal, los valores de las variables climáticas necesarias se obtuvieron de la estación meteorológica perteneciente a la empresa Forestal Oriental, situada a 40 km, en el establecimiento “La Nueva Esperanza” localizado en las proximidades de la población Paso de los Mellizos (Dpto de Rio Negro). En la misma se registra temperatura máxima y mínima, humedad relativa, velocidad del viento y radiación fotosintéticamente activa (PAR) cada 10 minutos. Para usar la formula de Penman-Monteith es necesario el valor de radiación solar total para la cual se estimó con el valor de PAR, considerando a ésta última como un 50 % de la radiación solar.

Los valores de ET_o se determinaron a nivel diario, utilizándose los valores promedios diarios de humedad relativa, temperatura máxima y mínima y velocidad del viento, y el valor acumulado diario de radiación, sumándolos luego para obtener los correspondientes valores de ET_o para cada uno de los períodos analizados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 EVAPOTRANSPIRACIÓN TOTAL DE LA COBERTURA FORESTAL

El Cuadro 5 muestra resultados parciales del balance hídrico computado en la microcuenca forestal (DT) entre medidas sucesivas del contenido de agua en el suelo. Igual procedimiento se siguió para determinar la ETt en la microcuenca La Cantera (LC). Los resultados, en ambas microcuencas, para cada una de las fechas durante el período de medición octubre 2006 – setiembre 2009 se encuentran en el Anexo 6.3 y 6.4.

Cuadro 5. Extracto del balance hídrico computado entre medidas sucesivas del contenido de agua en el suelo, en la microcuenca DT.

Fecha	Período (días)	Pt (mm)	Q sup total ⁽¹⁾ (mm)	C esc Pastura ⁽²⁾	Q Pastura ⁽³⁾ (mm)	Qsup forestal corregido ⁽⁴⁾ (mm)	Agua suelo (mm)	ΔH (mm)	ETt (mm)	ETo (mm)
3-2-07	78	380,4	41,0	0,08	14,0	276,9	163,8	-82,7	436,1	384,2
20-4-07	76	560,6	119,0	0,22	54,0	65,0	224,2	60,4	435,2	251,3
22-5-07	32	162,7	84,0	0,31	22,4	61,6	227,2	3,0	98,1	38,3
20-6-07	28	21,3	32,0	0,35	3,3	32,7	215,6	-11,6	0,2	16,6
25-7-07	35	21,8	15,0	0,001	0,01	14,8	182,6	-33,0	39,8	49,5
21-8-07	27	19,8	9,0	0,07	0,6	8,4	172,9	-9,7	21,1	48,4
28-9-07	38	130,0	27,0	0,22	12,5	14,5	190,1	17,2	98,3	104,6
24-10-07	26	160,0	50,0	0,31	22,1	27,9	213,2	23,1	109,0	88,4
18-11-07	25	84,1	16,0	0,12	4,4	11,6	178,4	-34,8	107,3	117,2
19-12-07	31	51,0	10,0	0,09	2,0	8,0	161,3	-17,1	68,1	170,2

(1) Escurrimiento total medido en la microcuenca DT (forestal)

(2) Coeficiente de escorrentía de la microcuenca LC (pasturas) corregido por relación de pendiente entre microcuencas

(3) Escurrimiento de la superficie cubierta por pasturas (45 % del área total) en la microcuenca DT

(4) Escurrimiento de la superficie forestada (55 % del área total) en la microcuenca DT

El Cuadro 6 se presentan los valores anuales de ETt que se calcularon para la cubierta forestal, y su relación con la precipitación y evapotranspiración de referencia (ETo) para igual periodo.

Cuadro 6. Precipitación total (Pt), evapotranspiración total (ETt), interceptión (Ic), evapotranspiración ($ET=ETt-Ic$), y relación ETt/Pt y ETt/ETo resultantes del balance hídrico en la microcuenca DT (forestal).

Año	Pt (mm)	ETt (mm)	Ic (mm)	ET (mm)	ETt/Pt	ETt/ETo
Oct/06 – Set/07	1.592	1.318	301	1.017	0,83	1,2
Oct/07 – Set/08	1.050	1.011	214	797	0,96	0,7
Oct/08 – Set/09	812	829	193	637	1,02	0,6
Promedio	1.152	1.053	236	817	0,91	0,8

La ETt anual en la cobertura forestal varió entre 1.318 y 829 mm, correspondiéndose a valores entre 83 y 100 % de la precipitación anual, respectivamente. La ETt media en el período monitoreado fue 1.053 mm año⁻¹, afectando un 91 % de la precipitación media. Si se analiza sólo el monto de ET (ETt-Ic) realizado por la plantación tenemos que el valor medio fue 817 mm, para los 3 años. Este último valor podría estar sobrestimado; principalmente en el primer año de estudio en que la precipitación (1.592 mm) fue superior a la media anual (1.250 mm); debido a que no pudo medirse la percolación profunda, lo que sugiere que esté incluida en la ET, afectando la cuantificación del consumo adjudicado a los árboles y el sotobosque.

La Figura 9 nos muestra la magnitud de los distintos procesos hidrológicos analizados. Puede observarse que no hay diferencia en el contenido de agua en el suelo (ΔH) en el segundo año de estudio y es negativa en el último, debido a que la precipitación fue la menor de los 3 años analizados y parte de la ET fue extraída del agua almacenada en el suelo. Al analizar la relación entre ETt forestal y Pt, puede

observarse en el Cuadro 6 que fue 0,96 y 1,02 en los años de déficit hídrico, lo cual reafirma la hipótesis sobre la disminución del contenido de agua en el suelo.

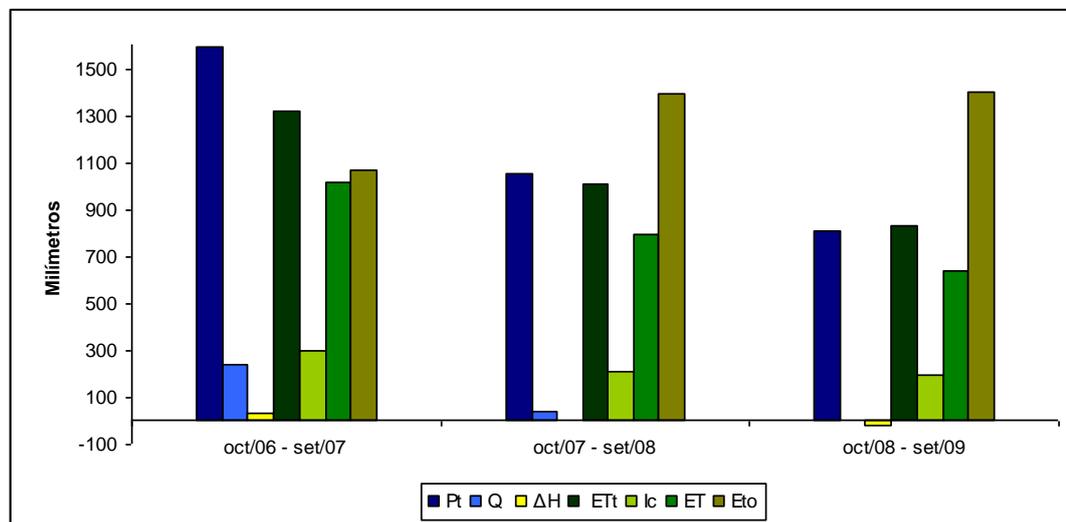


Figura 9. Precipitación total (Pt), escurrimiento superficial (Q), variación en el contenido de agua en el suelo (ΔH), evapotranspiración total (ETt), interceptación (Ic), evapotranspiración (ET) y evapotranspiración de referencia, para cada uno de los años hidrológicos monitoreados en la microcuenca DT (forestal).

Al comparar la ETt con respecto a la ETo, se observa que para el año hidrológico con mayor precipitación, la ETt fue un 23 % mayor que la ETo, y que representó un 83 % de la precipitación total. Como se mencionó anteriormente, el valor de ETt puede estar sobrevalorado puesto que también contiene la percolación profunda.

Sin embargo, en los siguientes años hidrológicos con precipitaciones inferiores a la media nacional, la ETt total varió entre 59 y 72 % de la ETo y representó casi el 100 % de la precipitación. En el último año hidrológico 08-09, la ETt fue mayor que la precipitación, con el consiguiente descenso en el contenido de agua en el suelo ya mencionado. Por consiguiente, en estos dos últimos años hidrológicos caracterizados por déficit de precipitaciones, el error en la estimación de ETt sería mínimo al considerar que, dadas las condiciones de precipitaciones ocurridas en ese período, la cantidad de agua percolada no alcanzó una magnitud significativa.

Al igual que para la cobertura forestal en el primer año de estudio, caracterizado por exceso de precipitaciones, la ETt determinada en pasturas fue mayor que la ETo, lo que denota la sobrestimación de la ETt al incluir ésta la percolación o recarga del acuífero superficial. En los dos años hidrológicos que siguen representó entre 48 y 67 % de la ETo, puesto que el déficit de precipitaciones limitó el consumo de agua (Figura 10).

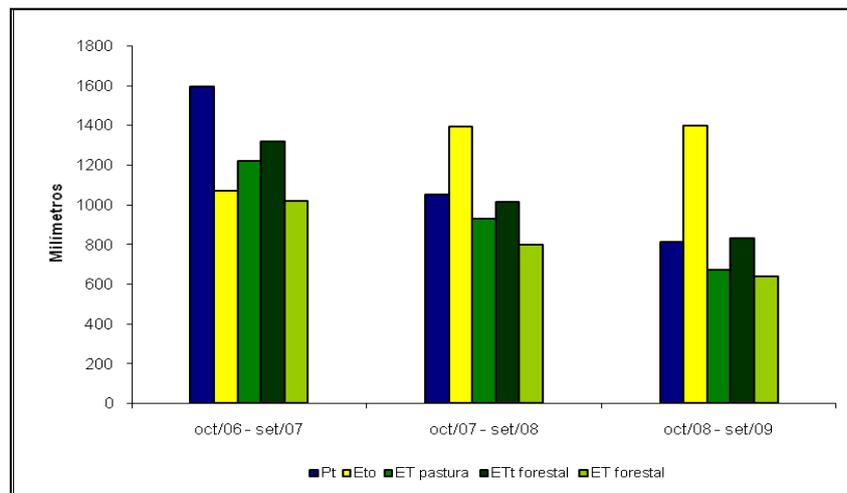


Figura 10. Precipitación total (Pt), evapotranspiración de referencia (ETo), evapotranspiración pastura (ET pastura), evapotranspiración total forestal (ETt forestal) y evapotranspiración forestal (ET forestal), para cada uno de los años hidrológicos monitoreados en la microcuenca DT (forestal).

Los resultados para la ET forestal, entre 637 y 1.017 mm anuales y 817 mm en promedio anual no difieren significativamente a los encontrados por otros autores (Cuadro 6). Huber *et al.* (2000) determinaron valores de transpiración de 512 y 780 mm en *Eucalyptus nitens* durante dos años de evaluación, en los cuales las precipitaciones fueron de 1.089 y 1.418 mm respectivamente. En el mismo estudio, la ETt de la plantación representó entre 77 y 85 % de la precipitación anual. Valores de similar magnitud fueron encontrados en la microcuenca DT, entre 83 y 100 % de la precipitación anual, que varió entre 1.592 mm (exceso) y 812 mm (déficit), respectivamente.

En una cuenca experimental al este de Brasil, Soares *et al.* (2001) determinaron que la ETt fue 1.345 mm (96,3 % de la precipitación) en una plantación de *Eucalyptus* de 9 años de edad. Lane *et al.* (2004) para dos sitios en China determinaron una ETt anual en *Eucalyptus* de 1.118 y 969 mm, representando el 71 y 66 % de la precipitación respectivamente, la cual varió entre 1.800 y 1.300 mm anuales. En el mismo estudio se determinó que la transpiración, el consumo real de agua por la plantación, no excedió de los 600 mm para ambos sitios. También concluyeron que en las estaciones secas el balance hídrico muestra que la ETt excede o es casi igual a la precipitación, produciendo una disminución del contenido de agua almacenada en el suelo.

Esto último coincide con los resultados obtenidos en los 2 años con déficit de precipitaciones, en los cuales la relación entre ET y Pt en la plantación de *Eucalyptus* fue 0,96 y 1,02 respectivamente (Cuadro 4), lo que determinó que no hubiera diferencias en el contenido de agua en el suelo (ΔH) en el segundo año hidrológico y fuera negativa en el último, en el cual la precipitación registrada fue la menor del período de estudio, por lo que parte de la ET en la cobertura forestal provino del agua almacenada en el suelo (Figura 9).

3.2 COMPARACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA ENTRE COBERTURAS.

Si observamos el consumo de agua para ambas coberturas, *Eucalyptus globulus* y pasturas, sin considerar el agua interceptada por la cobertura forestal, queda de manifiesto para todos los años un menor valor en la cobertura afectada por los árboles. Cuando se incluye la intercepción por la cobertura forestal, la cual varió entre un 19 y 24 % de la precipitación anual, el consumo total en la cobertura forestal es mayor que en pasturas, considerando despreciable la intercepción para esta última. (Cuadro 7)

Cuadro 7. Precipitación total (Pt), evapotranspiración total (ETt), interceptión (Ic), evapotranspiración (ET=ETt-Ic), resultantes del balance hídrico en las microcuencas DT (forestal) y LC (pasturas)

Año	Pt (mm)	Microcuenca DT (forestal)			Microcuenca LC (pasturas)
		ETt (mm)	Ic (mm)	ET (mm)	ET (mm)
Oct/06 – Set/07	1.592	1.318	301	1.017	1.220
Oct/07 – Set/08	1.050	1.011	214	797	929
Oct/08 – Set/09	812	829	193	637	670
Promedio	1.152	1.053	236	817	940

Cuando se comparan los valores de ET, observamos que el consumo de agua en el monte es menor cuanto menor es la precipitación, ubicándose debajo de ETo en años con déficit de precipitaciones. En estos últimos, ET representó un 50 % de ETo. (Figura 9)

Lane *et al.* (2004) determinó que una plantación de *Eucalyptus* de 9 años de edad intercepta entre 15 y 27 % de la precipitación anual del orden de 1.800 mm. Valores similares de interceptión fueron reportados por Huber *et al.* (2000), quienes al comparar el consumo de agua entre dos plantaciones jóvenes de *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*, y una pradera, encontraron que las diferencias con ésta última se acentuaron cuando se adicionó la interceptión en las plantaciones forestales, variando éstas entre un 25 y 30 % de la precipitación anual. La ETt de las plantaciones forestales alcanzó entre un 47 y 55 % de la precipitación anual (1.089 y 1.418 mm), y en la pradera fue entre un 44 y un 47 %. A nivel nacional, en el litoral oeste del país, Silveira *et al.* (2011) determinaron que en sistemas forestales compuestos por *Eucalyptus* el componente Ic alcanza, a escala de eventos precedidos de un período sin precipitaciones no menor a 12 horas, un valor promedio de 17 % de la Pt, correspondiendo un 79 % a la Pd y un 4 % a la Pf. Para 2 sitios localizados en

el Departamento de Lavalleja (zona Este) la I_c promedio varió entre 18 y 21 %. Según Silveira *et al.* (2008) la I_c ocasionada por la cobertura con *Eucalyptus*, en plantaciones localizadas en el litoral-oeste del Uruguay, varió entre 8 y 100 % de la P_t , un 66,7 % de la variabilidad estuvo explicada por la precipitación incidente y el 33,3 % remanente se debió a otras variables: incidencia de la intensidad de la lluvia, velocidad del viento, disponibilidad de agua, características de la especie (forma y tamaño de hojas y ramas) y de las condiciones atmosféricas al momento del evento de precipitación.

Según Lima (1996), el efecto hidrológico más importante causado por las plantaciones forestales en su ámbito local es la intercepción de la lluvia. En un estudio realizado por Lima *et al.* (1990), se analizaron los procesos que intervienen en el balance hídrico en parcelas de *Eucalyptus*, *Pinus* y vegetación nativa, encontrándose que la ET_t en *Eucalyptus* superó en 345 mm a la vegetación nativa, sin embargo en meses secos la ET_t mensual de *Eucalyptus* fue sensiblemente menor, resultando en un mayor almacenamiento de agua bajo esta cobertura. Durante el período húmedo la transpiración de las tres coberturas fue muy similar, siendo la intercepción por la cobertura forestal la determinante del mayor valor total de ET_t .

Los valores en el Cuadro 6 muestran que la ET_t forestal anual representa entre un 83 y 100 % de la precipitación total. Si sólo se consideran los valores de ET en la cobertura forestal, éstos representaron un 64 % de la P_t en el año hidrológico más húmedo y 76 a 78 % en los más secos, respectivamente. En la cobertura de pastos, la ET correspondió a valores entre 77 y el 87 % de la precipitación total. Las diferencias entre años estuvieron dadas por el régimen hídrico, cuanto menor es la entrada de agua al sistema (precipitación anual) mayor es el consumo porcentual por la vegetación

Cuando a la ET_t se le resta el agua interceptada por las copas de los árboles, asumiendo que la intercepción en pasturas es despreciable, la cobertura forestal consumiría menos agua que la pastura en todos los años analizados. La diferencia encontrada, promedio de los tres años de evaluación, fue 123 mm, variando entre 203 mm en el año hidrológico más húmedo y 33 mm en el más seco. Es decir, cuando la cantidad de agua fue limitante, el consumo tendió a igualarse.

Sin embargo, puesto que los árboles tienen la capacidad de explorar un mayor volumen de suelo y por lo tanto ser capaces de extraer más agua disponible para su transpiración, es esperable que las diferencias entre coberturas sean mayores en períodos de escasez. Estos resultados pueden deberse a que las medidas del contenido de agua en el suelo se efectuaron hasta 80 cm de profundidad, consecuencia de la presencia de gravas o horizontes C con menor grado de meteorización lo que dificultó la instalación de tubos de acceso de mayor longitud. Por consiguiente, se estaría subestimando el consumo en la plantación forestal, ya que su sistema radicular le permite obtener agua a mayores profundidades en los períodos de déficit hídrico. También podría estar incidiendo la percolación, incluida en la ET de cada cobertura. Knight (1999) hace mención a que el mayor porcentaje de raíces activas se encuentran en los primeros 50 cm, lo cual no impide que en períodos de disminución del contenido de agua en el suelo, raíces a mayores profundidades puedan absorber agua y satisfacer la demanda por ET.

Holmes y Sinclair (1986) analizando 19 cuencas con precipitaciones promedio anual entre 500 y 2.500 mm y con vegetación representada por mezclas de pasturas y forestación con eucaliptos nativos, concluyeron que para los sitios con una precipitación promedio de 1.300 mm, la forestación consumía unos 215 mm más por ETt que las pasturas. La escasa diferencia encontrada, en la zona litoral oeste del Uruguay, puede deberse a la alta variabilidad de la precipitación anual ocurrida en el período de estudio, caracterizada por años extremos (1 húmedo y 2 secos), que incide en la cantidad de agua consumida e interceptada por la cubierta forestal.

3.3 VALORES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DIARIA

Los valores promedios diarios de ETt para el período estival (octubre - marzo) fueron 3,9 y 3,6 mm para la cobertura forestal y pasturas, respectivamente; en los meses de invierno (abril - setiembre) alcanzaron 1,7 y 1,5 mm. Lo esperado era encontrar mayores diferencias en los meses de verano, períodos en los que suelen darse los mayores déficit hídricos, por lo tanto aquí corresponde la misma aclaración realizada anteriormente con respecto a las diferencias encontradas entre coberturas en períodos con distinta oferta de agua. Talsma y Gardner (1986) evaluaron una plantación de

Eucalyptus en suelos profundos, próximos a Canberra, mediante balance hídrico en el suelo, y encontraron que los árboles consumieron 3,8 mm día⁻¹ entre octubre a marzo, y 2,6 mm día⁻¹ en meses en que las lluvias fueron escasas, alcanzando un total anual de 1.167 mm.

Valores más altos fueron reportados por Soares *et al.* (1997) para plantaciones de *Eucalyptus* en Brasil, donde en condiciones de agua no limitante obtuvieron valores de 8 mm día⁻¹ de transpiración. A su vez Calder (1992) determinó un consumo de agua por transpiración entre 3 y 8 mm día⁻¹ para *Eucalyptus* en condiciones tropicales y para una plantación de *Eucalyptus grandis* en Sudáfrica, con una densidad de 725 árboles ha⁻¹ y precipitación promedio anual 1.250 mm, Dye (1987) estimó con la ecuación de Penman-Monteith una transpiración promedio diario de 4,7 mm. Como se desprende de los diferentes estudios, los valores diarios de ET difieren mucho según el sitio, puesto que los mismos dependen de las características locales: precipitación (cantidad y distribución temporal), suelos (capacidad de retener agua y profundidad) y energía disponible (latitud).

Honeysett *et al.* (1992) demostraron una buena correspondencia entre valores de ET y contenido de agua en el suelo durante dos ciclos de sequía para *E. Nitens* y *E. Delegatensis* de 4 años en parcelas en Tasmania, con el sistema radicular en los 2 m superiores del suelo. Durante el primer período la ET de las dos especies fue estimada en 3,5 y 3,2 mm día⁻¹ respectivamente, la cual fue solo levemente menor que la ETo. Durante el segundo período, en el cual el suelo estaba más seco, los valores de ET fueron de 2,4 y 2,2 mm día⁻¹.

3.4 GENERACIÓN DE UN MODELO SIMPLE PARA DETERMINAR LA VARIACIÓN EN EL CONSUMO DE AGUA AL MODIFICAR LA CUBIERTA VEGETAL

En los Cuadros 8 y 9 se muestran los distintos términos del balance hídrico determinados para períodos de tiempo aproximadamente trimestral, a partir de registros mensuales obtenidos durante el período octubre de 2006 – setiembre 2009. Los valores de ETt son el resultado de aplicar la ecuación [2] en ambas microcuencas, forestal y pastura respectivamente.

Cuadro 8. Componentes del balance hídrico trimestral en la microcuenca forestal

Períodos	Días	Pt (mm)	Q corregido (mm)	ΔH (mm)	ETt (mm)
<i>Puntos de ajuste:</i>					
Oct 06 – Ene 07	126	637	46	48	543
Feb 07 – May 07	108	685	131	63	490
Jun 07 – Ago 07	90	92	55	-54	91
Set 07 – Nov 07	89	363	55	6	302
Dic 07 – Feb 08	100	271	0	-15	285
Mar 08 – May 08	107	255	0	8	247
Jun 08 – Ago 08	88	198	0	19	178
<i>Puntos de verificación:</i>					
Set 08 – Nov 08	94	137	0	-34	171
Dic 08 – Mar 09	104	397	0	30	367
Abr 09 – Jun 09	84	118	0	-22	140
Jul 09 – Set 09	102	190	0	8	182

Cuadro 9. Componentes del balance hídrico trimestral en la microcuenca de pastura

Períodos	Días	Pt (mm)	Q corregido (mm)	ΔH (mm)	ET (mm)
<i>Puntos de ajuste:</i>					
Oct 06 – Ene 07	126	643	53	15	575
Feb 07 – May 07	108	659	199	66	394
Jun 07 – Ago 07	90	74	12	-4	66
Set 07 – Nov 07	89	371	108	-34	297
Dic 07 – Feb 08	100	283	8	-51	326
Mar 08 – May 08	107	249	10	31	208
Jun 08 – Ago 08	88	211	41	49	121
<i>Puntos de verificación:</i>					
Set 08 – Nov 08	94	153	25	-67	195
Dic 08 – Mar 09	104	389	54	58	277
Abr 09 – Jun 09	84	117	6	-15	126
Jul 09 – Set 09	82	186	20	13	153

Se puede apreciar que para los años evaluados las precipitaciones presentaron anomalías en cuanto a su distribución. En los dos primeros períodos de evaluación, de unos 4 meses de duración, la precipitación fue aproximadamente el 50 % de la precipitación media anual (1250 mm) en cada uno de ellos. A su vez, los 3 años evaluados fueron atípicos en cuanto a la cantidad de precipitación, el primero estuvo por encima de la media (1592 mm), mientras que, el segundo y el tercero (1050 y 812 mm respectivamente) muy por debajo. Los valores anuales mencionados se corresponden con los registros en la microcuenca forestada.

Con la información disponible para 11 períodos, correspondientes a los balances calculados según la ecuación [2], se obtuvo la correlación entre la Pt y la ETt para los dos tipos de vegetación existentes: pasturas y plantación de *Eucalyptus* (Figura 11 y 12).

A partir de las relaciones obtenidas se desarrollo el Modelo Simple (Ecuación 3), 7 períodos fueron utilizados en la correlación de las variables y los 4 restantes para su verificación, la cual se realizó solo de manera gráfica,

$$ETt = 1.737(Pt)^{0.8855}(AF) + 0.7486(Pt)^{1.0083}(AP) \quad [3]$$

donde:

ETt: evapotranspiración real trimestral (mm)

Pt: precipitación total trimestral (mm)

AF: proporción del área afectada por forestación

AP: proporción del área afectada por pastura

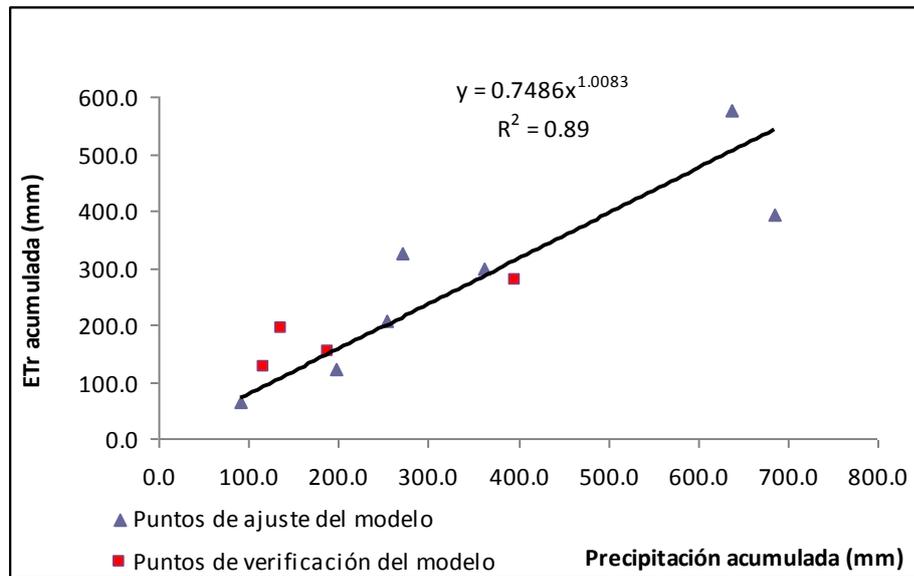


Figura 11. Relación entre la precipitación y la evapotranspiración total a escala trimestral para la cobertura de pastura

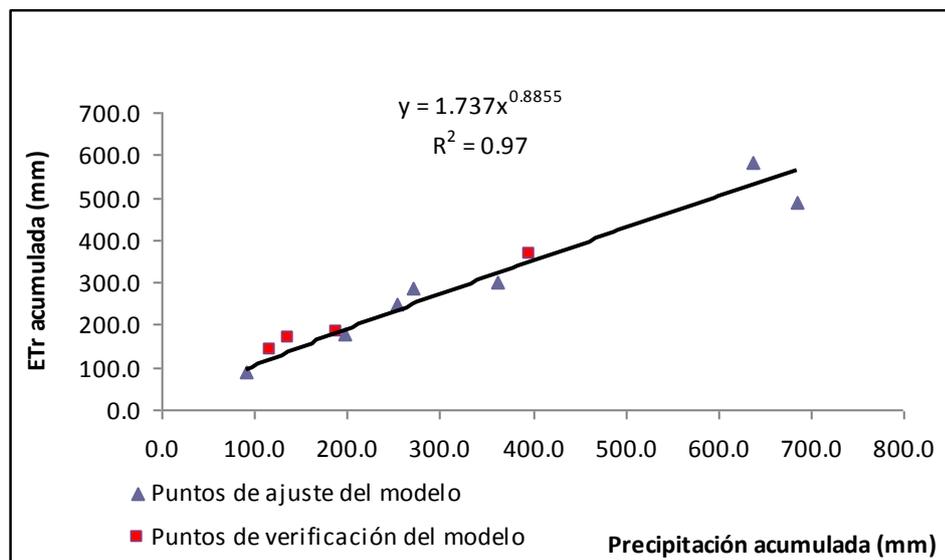


Figura 12. Relación entre la precipitación y la evapotranspiración total a escala trimestral para la cobertura forestal

En el Cuadro 10 se presenta la comparación de los valores de ETt obtenidos mediante la aplicación del modelo propuesto por Zhang et al. (2001) para una escala anual y el aquí presentado (Modelo Simple, determinado para una escala trimestral).

Para determinar exactamente la ETt anual a partir del Modelo Simple, ésta se obtuvo a través de la suma de la ETt calculada para cada uno de los trimestres correspondientes a cada año. El monto de Pt considerado en las determinaciones se corresponde con los registros trimestrales acumulados en la microcuenca bajo cobertura forestal.

El modelo asume que la ETt desde un microcuenca o parcela, para el período considerado, es la suma de la ETt, para igual período, desde la vegetación herbácea y de la ETt proveniente de los árboles, con un peso lineal de acuerdo con el área afectada por cada una de las cubiertas vegetales.

Cuadro 10. Comparación valores de ET total estimados a partir del Modelo propuesto por Zhang y el Modelo Simple

Año	Precipitación Anual (mm)	Modelo de Zhang ETt (mm)	Modelo Simple ETt (mm)
Oct/06 - Set/07	1545	954	1239
Oct/07 - Set/08	988	742	805
Oct/08 - Set/09	807	647	686

Al comparar los resultados aportados por ambos modelos se observa una estimación mayor del Modelo Simple con respecto a los estimados con el modelo de Zhang *et al.* (2001). Si ésta diferencia la relacionamos con la precipitación anual obtenemos valores que van desde un 18,4 % para el primer año a 6,4 % y 4,7 % en el segundo y tercer año respectivamente. La diferencia encontrada entre ambos modelos estaría explicando el monto de agua percolada, término que se encuentra incorporado en el valor de ETt estimado por el Modelo Simple. La validación de la relación lineal hallada requiere contar con mayor número de años de monitoreo para su validación.

4. CONCLUSIONES

El consumo de agua promedio de una plantación forestal, estimado a partir de la metodología de balance hídrico a escala de microcuenca, fue de 1053 mm año⁻¹, representando un 11 % más que el correspondiente valor en la microcuenca con pasturas naturales, 940 mm año⁻¹. Este resultado muestra que la diferencia entre coberturas (*Eucalyptus globulus* y pasturas) fue menor que la intercepción por las copas de los árboles, cuyo valor promedio anual fue 21 %. El agua interceptada por las pasturas, que no fue cuantificada, seguramente explique esa menor diferencia entre coberturas con respecto a si consideráramos al total interceptado por el follaje forestal como la diferencia de consumo entre coberturas.

Los resultados obtenidos, al comparar coberturas, en diferentes condiciones de disponibilidad de agua, fueron contrarios a los esperados. Esto probablemente se deba a que el contenido de agua en el suelo se midió hasta 80 cm, por lo que seguramente se subestimó el consumo por la plantación forestal, puesto que su sistema radicular más extenso le permite extraer agua a mayores profundidades en períodos de déficit hídrico. No disponer de registros de la percolación por debajo de los 80 cm incidió en los valores de ETt, el efecto de la misma quedó incluido en el consumo total de agua e incidiendo con diferente magnitud según la cobertura vegetal.

Los valores promedios diarios de ETt para el período estival (octubre - marzo) fueron 3,9 y 3,6 mm para la cobertura forestal y pasturas, respectivamente; en los meses de invierno (abril - setiembre) alcanzaron 1,7 y 1,5 mm. Valores de similar magnitud han sido registrados por otros autores en situaciones de clima y suelo semejantes a los de éste estudio.

La metodología de balance hídrico mostró ser una buena herramienta para el estudio de los cambios generados sobre los recursos hídrico al modificar la cobertura vegetal. Sin embargo, es necesario evaluar, principalmente en plantaciones forestales, el contenido de agua en el suelo a mayores profundidades, así como también la percolación profunda que no puede ser aprovechada por las plantas. Esto

permitiría una estimación más ajustada de la ETt en ambas coberturas y por tanto una mejor apreciación en cuanto a las diferencias entre ellas.

Se propuso un modelo simple, con base en el balance hídrico, para determinar la ETt de una cuenca o parcela cuando se efectúan cambios en el uso del suelo, de pasturas a forestación o viceversa. Los resultados muestran que, a pesar de haber sido evaluados años atípicos en cuanto a cantidad y distribución de las precipitaciones, presenta una buena confiabilidad en ambas coberturas, considerándose una herramienta útil al evaluar la variación del consumo de agua a nivel estacional frente a un cambio, total o parcial, en la cobertura vegetal. No obstante, a pesar de las limitantes mencionadas, los valores obtenidos resultan una primera aproximación válida en la determinación de las diferencias en el consumo de agua entre coberturas forestales y pasturas en el Uruguay.

La comparación con el modelo propuesto por Zhang resulta en una sobrestimación en los valores de ETt estimados por el modelo aquí propuesto. La diferencia corresponde en promedio, para los tres años analizados, a un 9.8% de la precipitación anual, siendo más evidente dicha sobrestimación para el primer año de evaluación donde la misma alcanzó un 18,4 %, coincidiendo con el período de ocurrencia de precipitaciones muy por encima de los valores medios. Consideramos que este monto se relaciona con la magnitud de la percolación, término que por no haberse podido medir directamente se encuentra incorporado en los valores estimados de ETt.

Para obtener resultados confiables en trabajos de investigación con las características como el que aquí se presenta se necesita una serie de datos con un mayor número de años. Por lo tanto, estos resultados deben ser considerados como preliminares. Dado que, a nivel nacional existe escasa información sobre el consumo de agua de las plantaciones forestales, consideramos que los resultados presentados, aunque preliminares, son relevantes y constituyen el punto de partida para futuras investigaciones en éste ámbito.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Almeida A, J Soares, L Landsberg, G Rezende. 2007. Growth and water balance of *Eucalyptus grandis* hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. *Forest Ecology and Management* 251:10-21.
- Bosch JM, Hewlett JD. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55: 3-23.
- Bosch JM. 1979. Treatment effects on annual and dry period streamflows at Cathedral Peak. *South African Forestry Journal* 108: 29-38.
- Brown A, Zhang L, McMahon TA, Western AW, Vertessy RA. 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 310: 28-61.
- Calder, I.R. 1992. The hydrological impact of land-use change. Proceedings of the Conference on Priorities for Water Resources Allocation and Management, Natural Resources and Engineer Advisers Conference, Southampton, July 1992, p. 91-101
- Calvo De Anta R. 1992. El eucalipto en Galicia. Sus relaciones con el medio natural. Publicación Universidad de Santiago de Compostela. 220 pp
- Céspedes-Payret C, G Piñeiro, M Achkar, O Gutiérrez, D Panario. 2009. The irruption of new agro-industrial technologies in Uruguay and their environmental impacts on soil, water supply and biodiversity: a review. *International Journal of Environment and Health* 3(2):175-197
- Chescheir GM, Skaggs RW, Amatya DM. 2008. Hydrologic impacts of converting grassland to managed forestland in Uruguay. p. 1-9 In E.W. Tollner and A. Saleh (ed.) 21st Century Watershed Technology: Improving Water Quality and Environment. Proc. Int. conf., Chile, 29 March – 3 April 2008. ASABE Publication Number 701P0208cd
- Cornish PM. 1993. The effects of logging and forest regeneration on water yields in a moist eucalypt forest in New South Wales, Australia. *Journal of Hydrology* 150: 301-32

- Cornish PM. 1989. The effect of radiata plantation establishment and management on streamflows and water quality - a review. Forestry Commission of NSW, Technical Paper 49, 53 p.
- David TS, Ferreira MI, David JS, Pereira JS. 1997. Transpiration from mature *Eucalyptus globulus* plantation in Portugal during a spring-summer period of progressively higher water deficit. *Oecología*, 110:153-159
- Dirección General Forestal-MGAP-FAO. 2010. Monitoreo de los Recursos Forestales, Inventario Forestal Nacional, Resumen de Resultados, Etapa 1. Proyecto: UNJP/URU/027/UNJ. Uruguay.
- Dunin F.X. y SM Mackay. 1982. Evaporation by Eucalypt and coniferous plant communities. In: O'Loughlin, E.M. and Bren, L.J. (eds). The First National Symposium on Forest Hydrology, Melbourne, 11-13 May, 1982. The Institute of Engineers, Australia. Preprints of papers. pp 18-25.
- Dye P. 1996. Response of *Eucalyptus grandis* trees to soil water deficits. *Tree Physiology*, 16, 233-23
- Dye P. 1987. Estimating water use by *Eucalyptus grandis* with the Penman-Monteith equation. *Forest Hydrology and Watershed Management* (Proceedings of the Vancouver Symposium): IAHS-AISH Publ. N° 167: 329-337.
- Engel V, EG Jobbágy, M Stieglitz, M Williams, RB Jackson. 2005. Hydrological consequences of *Eucalyptus* afforestation in the Argentine Pampas. *Water Resources Research* 41, 14 p.
- Ford ED, Deans JD. 1978. The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young sitka spruce plantation. *Journal of Applied Ecology*, 15: 901-917.
- Holmes JW, Sinclair JA. 1986. Streamflow from some afforested catchments in Victoria. Hydrology and Water Resources Symposium, Griffith University, Brisbane, 25-27 November 1986. The Institution of Engineers, Australia, Preprints of papers. Pp 214-218.
- Honeysett JL, Beadle CL, Turnbull CRA. 1992. Evapotranspiration and growth of two contrasting species of eucalypts under non-limiting and limiting water availability. *Forest, Ecology, and Management*, 50(3-4) 203-216.

- Huber A, Trecaman R. 2000. Efectos de la forestación de suelos rojos arcillosos sobre el recurso hídrico en la zona Collipulli, IX Región, Chile. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 45:49-60.
- Huber A, Avila G, Trecaman R. 2000. Modificaciones en el recurso hídrico provocados por la forestación con *Eucalyptus nitens* en la zona de Collipulli, IX Región, Chile. *Medio Ambiente*, 13(2): 19-26
- Huber A, Barriga P, Trecaman R. 1998. Efecto de la densidad de plantaciones de *Eucalyptus nitens* sobre el balance hídrico en la zona Collipulli, IX Región (Chile). *Bosque*, 19(1): 61-69
- Iroumé A, Huber A. 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.
- Johnson E, Kovner J. 1956. Effect on streamflow of cutting a forest understory. *Forest Science*, (2) 82-91
- Kallarackal J, Somen CK. 2008. Water loss from tree plantations in the tropics. *Current Science*, 94(2):201-210
- Kallarackal J, Somen CK. 1997. Water use by *Eucalyptus tereticornis* stands of differing stand density in southern India. *Tree Physiology*, 17: 195-203
- Kaufmann MR, Linder S. 1996. Tree physiology research in a changing world. *Tree Physiology*, 16(1):1-4
- Knight J. 1999. Root distributions and water uptake patterns in eucalypts and other species In *The ways trees use water. Water and salinity issues in agroforestry N°5*, RIRDC Australia, Publication N° 99/37: 55-84
- Lane P, Morris J, Ningnan Z, Guangyi Z, Guoyi Z, Daping X. 2004. Water balance of tropical eucalypt plantations in south-eastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124: 253-267
- Lansberg J J. 1999. Tree water use and its implications in relation to agroforestry systems. In *The ways trees use water. Water and salinity issues in agroforestry N°5*, RIRDC Australia, Publication N° 99/37, pp. 1-31.
- Likens GE, Eaton JS. 1970. A polyurethane stemflow collector for trees and shrubs. *Ecology*, 55(5):938-939.

- Lima W de P. 1996. Impacto Ambiental do Eucalipto. Editorial da Universidad de Sao Pablo, 2ª Edición San Pablo. 301p.
- Lima W de P, Brito MJ, Pereira de Souza A. 1990. Comparative evapotranspiration of Eucalyptus, Pine and natural "Cerrado" vegetation measure by the soil water balance method. IPEF International, Piracicaba: p. 5-11.
- Lu J, Sun G, MacNulty S, Amatya D. 2003. Modeling actual Evapotranspiration from forested watersheds across the southeastern United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 39(4) 887-896
- Mielke MS, Oliva M, de Barros N, Penchel R, Martínez C, de Almeida A. 1999. Stomatal control of transpiration in the canopy of clonal *Eucalyptus grandis* plantation. *Trees*, 13(1):152-160
- Nosetto MD, EG Jobbágy, JM Paruelo. 2005. Land use change and water losses: The case of grassland afforestation across a soil textural gradient in Central Argentina. *Global Change Biology* 11:1101-1117.
- Pilgrim DH, I Cordery. 1983. On the lack of dependence of losses from flood runoff on soil and cover characteristics. Hydrology of Humid Tropical Regions with Particular Reference to the Hydrological Effects of Agriculture and Forestry Practice (Proceedings of the Hamburg Symposium, August 1983). IAHS Publ. no. 140. 10 p.
- Poor M E D, Fries C. 1985. The ecological effects of *Eucalyptus*. FAO Forestry Paper No. 59. FAO, Rome, 87 p.
- Ruprecht JK, NJ Schofield. 1989. Analysis of streamflow generation following deforestation in southwest western Australia. *Journal of Hydrology* 105: 1-17.
- Samraj P, Sharda VN, Chinnamani S, Lakshmanan V, Haldorai B. 1988. Hydrological behaviour of the Nilgiri sub-watersheds as affected by Bluegum plantation: part 1. The annual water balance. *Journal of Hydrology*, 103: 335-345.
- Silveira L. 2011. Efectos de la actividad forestal sobre los recursos suelos y aguas. En: Ing. Luis Silveira PhD. Proyecto FPTA-210 Efecto de la actividad forestal sobre los recursos suelos y aguas, en microcuencas similares sometidas a

- distinto manejo. Serie FPTA-INIA, N° 32. Ed. Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA, pp 11-37.
- Silveira L, Alonso J. 2009. Runoff modifications due to the conversions of natural grasslands to forests in a large basin in Uruguay. *Hydrological Processes*, 23:320-329. Ed. John Wiley. Publicado Online: 31/10/2008 en Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com) DOI:10.1002/hyp.7156
- Silveira L, de Izaguirre P, Visca M. 2008. Redistribución de la precipitación incidente en una plantación de *Eucalyptus* en Uruguay. Memorias del XXIII congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena de Indias, Colombia. 11 p.
- Silveira L, Alonso J, Martínez L. 2006. Efecto de las plantaciones forestales sobre el recurso agua en el Uruguay. *Agrociencia*, 10(2): 75-93
- Smettam K, Farrington P, Harper R, Crombie DS, Williamson D. 1999. Soils constraints to tree water use. Land and Water Research and Development Corporation Grant UWA 15 Final Report.
- Smith MK, KK Watson, DH Pilgrim. 1974. A comparative study of the hydrology of radiata pine and eucalypt forests at Lidsdale, NSW. The Institution of Engineers, Australia, Civil Engineering Transactions, CE16, 82-86.
- Smith RE, DF Scott. 1992. The effects of afforestation on low flows in various regions of South Africa. *Water South Africa* 18:185-194
- Soares JV, Almeida AC. 2001. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing *Eucalyptus* plantation in Brasil. *Journal of Hydrology*, 253: 130-147.
- Soares JV, Almeida AC, Penchel RM. 1997. Balanço hídrico de plantações de eucalipto a partir da estimativa de transpiração pelo método de Penman-Monteith. In: Proceedings of the IUFRO Conference on Silviculture and Improvement of Eucalyptus. Salvador, Brasil, 4:80-88.
- Talsma T, Gardner EA. 1986. Soil water extraction by a mixed eucalypt forest during a drought period. *Australian Journal Soil Research*, 24:25-32
- UNESCO. 2006. Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe, PHI-VI, N°4, 98 p.

- Van Wyk DB. 1987. Some effects of afforestation on streamflow in the Western Cape Province, South Africa. *Water South Africa* 13: 31-36.
- Whitehead D, Beadle C. 2004. Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. *Forest Ecology and Management*, 193, 113–140.
- Whitehead D, Hinckley TM. 1991. Models of water flux through forest stands: Critical leaf and stand parameters. *Tree Physiology*, 18:571-587
- Zhang L, Dawes WR, Walker GR. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 37(3): 701-708
- Zhang L, Dawes WR, Walker GR. 1999. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance. Technical Report 99/12, Coop. Res. Cent. For Catch.Hydrol., Canberra. 42p.

6. ANEXOS

DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES DE SUELOS EN CUENCA DON TOMÁS (FORESTADA) Y LA CANTERA (PASTURA NATURAL)

Unidad IAp(L)K. Interfluvio aplanado con sedimentos cuaternarios sobre rocas cretácicas. Las pendientes son del 1% o menores y ocupa las posiciones de cabecera de las cuencas. Los suelos asociados son Brunosoles Subeutricos Típicos/Lúvicos y Vertisoles Rúpticos Lúvicos con accesorios.

Datos analíticos Brunosol Subeutrico Típico, cuenca Don Tomás (forestada)

HOR	ESP cm	COLOR	%			TEX	M.O. %	P ppm	Cmolc kg ⁻¹ de suelo					
			Ar	L	Ac				K	Ca	Mg	Na	Acidez	C.I.C.
Ap	17	Pardo grisáceo muy oscuro	34.4	35.1	30.5	FAc	5.6	3	0.71	12.5	1.6	0.11	0.05	15.0
A	11	Gris muy oscuro	32.4	34.9	32.7	FAc	4.5	4	0.47	13.8	1.8	0.12	0.06	16.3
Bt₁	7	Gris muy oscuro	28.9	33.3	37.8	FAc	3.9	2	0.48	16.3	1.7	0.11	0.06	18.7
Bt₂	12	Gris muy oscuro	27.0	27.9	45.7	Ac	3.0	2	0.63	19.8	2.1	0.14	0.06	22.7
C		Pardo amarillento claro	36.8	14.2	49.0	Ac	1.2	3	0.75	20.1	2.0	0.22	0.05	23.1

Datos analíticos Brunosol Subeutrico Típico, cuenca La Cantera (pastura natural)

HOR	ESP cm	COLOR	%			TEX	M.O. %	P ppm	Cmolc kg ⁻¹ de suelo					
			Ar	L	Ac				K	Ca	Mg	Na	Acidez	C.I.C.
A₁	17	Pardo grisáceo muy oscuro	52.7	21.2	26.1	FAcAr	3.8	4	0.42	8.5	2.3	0.29	0.16	11.7
AB	8	Gris muy oscuro	53.4	13.3	33.3	FAcAr	2.5	3	0.43	13.6	3.1	0.21	0.07	17.4
Bt₁	10	Gris muy oscuro	55.8	10.2	34.0	FAcAr	1.9	3	0.39	14.3	2.3	0.21		17.2
Bt₂	7	Gris muy oscuro				Ac								
Bt₃	11	Gris oscuro				Ac								

Unidad Esc K. Escarpa de rocas cretácica. Esta unidad incluye afloramientos rocosos suelos superficiales y muy superficiales Litosoles y suelos más profundos de la zona de retroceso de la escarpa Argisoles Dístricos Melánicos/ócricos Abrúpticos/Típicos

Datos analíticos Argisol Dístrico Ocrico Abrúptico, cuenca Don Tomás (forestada)

HOR	ESP cm	COLOR	%			TEX	M.O. %	P ppn	Cmolc kg ⁻¹ suelo					
			Ar	L	Ac				K	Ca	Mg	Na	Acidez	C.I.C.
A ₁	35	Pardo	84.9	2.0	13.1	ArFFAr	1.2	2	0.09	2.1	0.3	0.04	0.12	3
A ₂	20	pardo	83.3	1.6	15.1	FArArF	0.7	2	0.1	2.4	0.2	0.04	0.72	3
B _t	12	Pardo oscuro	65.2	1.1	33.7	FAcAr-AcAr	1.7	3	0.26	7.5	1.0	0.1	2.11	11
C	18y+	Pardo muy oscuro/ pardo amarillento	72.0	0.8	27.2	FAcAr	1.2	2	0.18	5.1	0.7	0.08	1.52	8

Datos analíticos Argisol Dístrico Melánico Abrúptico, cuenca La Cantera (pastura natural)

HOR	ESP cm	COLOR	%			TEX	M.O. %	P ppm	Cmolc kg ⁻¹ suelo					
			Ar	L	Ac				K	Ca	Mg	Na	Acidez	C.I.C.
A ₁	14	pardo	78.8	6.2	15.0	FAr	2.3	3	0.09	3.6	0.7	0.09	0.20	4,7
A ₂	11	Pardo oscuro	77.0	5.6	17.4	FAr	1.6	2	0.08	4.4	0.7	0.12	0.18	5,5
B _{t1}	9	Negro rojizo	74.3	3.6	22.1	FAcAr	1.6	2	0.12	7.2	1.4	0.14	0.32	9,2
B _{t2}	14	Gris oscuro	56.6	5.1	41.9	AcAr	1.4	2	0.33	15.6	3.4	0.30	0.82	20,5
B _{t3}	8	gris	54.6	1.9	43.5	AcAr	1.0	2	0.37	16.7	3.8	0.34	0.92	22,1
C		Gris claro	65.3	0.4	34.3	FAcAr	0.4	1	0.33	14.9	3.4	0.15	0.83	19,6

Unidad LK Lomadas desarrolladas sobre sedimentos de cretácicos, las pendientes oscilan entre 3 y 6 % Los suelos dominantes en esta unidad son Brunosoles subeutricos típicos.

Datos analíticos Brunosol Subéutrico Típico, cuenca Don Tomás (forestada)

HOR	ESP cm	COLOR	%			TEX	M.O. %	P ppm	Cmolc kg ⁻¹ suelo					
			Ar	L	Ac				K	Ca	Mg	Na	Acidez	C.I.C.
A ₁	14	Gris muy oscuro	55.2	20.9	23.9	FACAr	3.4	3	0.22	8.3	1.7	0.17	0.06	10,5
A ₂	10	negro	57.8	18.5	23.7	FACAr	2.8	2	0.21	8.1	1.5	0.17	0.06	10,0
Bt ₁	18	Gris	45.1	15.1	39.8	AcAr-FAC	1.9	3	0.51	17.4	3.4	0.52	0.02	21,9
Bt ₂	13	Pardo grisáceo muy oscuro	37.2	15.3	47.5	Ac	1.1	3	0.61	22.9	4.8	0.96	0.02	29,3
Bt ₃	7	pardo	35.2	20.4	44.4	Ac	0.6	3	0.70	25.7	4.4	1.11	0.04	32,0
C		Pardo claro	35.2	22.2	42.8	Ac	0.3	2	0.67	24.1	4.4	1.05	0.06	30,3

Datos analíticos Brunosol Subeutrico Típico, cuenca La Cantera (pastura natural)

HOR	ESP cm	COLOR	%			TEX	M.O. %	P ppm	Cmolc kg ⁻¹ suelo					
			Ar	L	Ac				K	Ca	Mg	Na	Acidez	C.I.C.
A ₁	22	Gris muy oscuro	62.7	14.3	23.0	FACAr	3.7	7	0.48	9.8	1.3	0.10	0.08	11,8
A ₂	18	negro	59.7	13.2	27.1	FACAr	2.5	3	0.35	13.1	1.3	0.11	0.07	14,9
Bt ₁	20	negro	54.4	11.8	33.8	FACAr	1.7	3	0.45	16.5	1.3	0.12	0.06	18,4
Bt ₂	15	Pardo grisáceo oscuro	44.4	13.4	42.2	AcAr	0.9	2	0.50	19.8	1.5	0.18	0.04	22,0
Bt ₃	16	pardo	46.1	13.9	40.0	AcAr	0.5	2	0.49	22.7	1.6	0.19	0.06	25,0
C		Pardo claro	41.0	23.8	35.2	FAC	0.3	2	0.45	29.8	1.4	0.19	0.04	31,9

BALANCES HIDRICOS A NIVEL MENSUAL, SEMESTRAL, ESTACIONAL Y ANUAL EN LA MICROCUENCA DE PASTURAS.

Balance Hídrico mensual Cuenca La Cantera con cobertura de pasturas, período octubre 2006 - setiembre 2009

Fecha medida *	PP/período (mm)	Escorrimento (mm)	Escorrimento corregido** (mm)	Contenido agua suelo (mm)	Variación Contenido agua suelo (mm)	Evapotransp. real (mm)
15-09-06					150,9	
28-10-06	119,1	27,0	9,6	194,9	44,0	65,5
17-11-06	197,5	20,0	6,3	264,4	69,5	121,7
03-02-07	366,0	88,0	36,7	165,9	-98,5	427,8
20-04-07	535,7	258,0	138,9	246,3	80,4	316,4
22-05-07	161,7	141,0	60,4	232,0	-14,3	115,6
20-06-07	23,5	63,0	10,0	239,0	7,0	6,5
25-07-07	26,7	57,0	0,0	230,1	-8,9	35,6
21-08-07	26,9	34,0	2,3	228,0	-2,1	26,8
28-09-07	128,1	85,0	36,3	215,5	-12,5	104,4
24-10-07	156,7	97,0	58,4	228,7	13,2	85,1
18-11-07	95,8	42,0	13,7	193,6	-35,1	117,3
19-12-07	52,5	31,0	5,4	160,6	-33,0	80,1
31-01-08	189,7	23,0	2,2	176,1	15,5	172,1
26-02-08	56,6	12,0	0,2	143,1	-33,0	89,4
27-03-08	152,9	24,0	7,0	177,7	34,6	111,3
25-04-08	14,2	19,0	1,4	145,6	-32,1	44,9
13-06-08	95,3	30,0	1,2	174,2	28,6	65,5
26-07-08	111,0	38,0	10,9	241,0	66,8	33,3
09-09-08	105,7	72,0	30,2	222,8	-18,2	93,7
02-10-08	32,0	22,0	1,2	217,7	-5,1	35,9
12-12-08	106,0	67,0	23,3	156,2	-61,5	144,2
5-2-09	176,9	28,0	4,4	215,9	59,7	112,9
26-3-09	212,0	82,0	49,5	214,0	-1,9	164,4
30-4-09	34,0	25,0	2,6	188,3	-25,7	57,1
17-06-09	52,0	34,0	3,3	199,3	11,0	37,7
10-07-09	21,6	17,0	2,1	191,0	-8,3	27,8
30-09-09	164,4	68,0	17,9	211,8	20,8	125,7

Balance Hídrico semestral Cuenca La Cantera con cobertura de pasturas, período octubre 2006 - setiembre 2009.

Período	PP período (mm)	Escurrimiento Pastura (mm)	Escurrimiento corregido** (mm)	Variación Contenido agua suelo (mm)	Evapotransp. real (mm)
oct/06 - abr/07	1218,3	393,0	191,5	95,4	931,4
may/07 - set/07	366,9	380,0	108,9	-30,8	288,8
oct/07 - mar/08	704,2	229,0	86,8	-37,8	655,2
abr/08 - set/08	358,2	181,0	44,8	40,0	273,4
oct/08 - mar/09	494,9	177,0	77,1	-3,7	421,5
abr/09 - set/09	272,0	144,0	25,9	-2,2	248,3

Balance Hídrico estacional Cuenca La Cantera con cobertura de pasturas, período octubre 2006 - setiembre 2009.

Estación	Período	PP/período (mm)	Escurrimiento Pastura (mm)	Escurrimiento corregido** (mm)	Variación Contenido agua suelo (mm)	Evapotransp. real (mm)
Primavera	oct/06 - nov/06	316,6	47,0	15,9	113,5	187,2
Verano	dic/06 - ene/07	366,0	88,0	36,7	-98,5	427,8
Otoño	feb/07 - may/07	697,4	399,0	199,3	66,1	432,0
Invierno	jun/07 - ago/07	77,1	154,0	12,2	-4,0	68,9
Primavera	set/07 - nov/07	380,6	224,0	108,3	-34,4	306,7
Verano	dic/07 - feb/08	298,8	66,0	7,8	-50,5	341,6
Otoño	mar/08 - may/08	262,4	73,0	9,6	31,1	221,7
Invierno	jun/08 - ago/08	216,7	110,0	41,1	48,6	127,0
Primavera	set/08 - nov/08	138,0	89,0	24,5	-66,6	180,2
Verano	dic/08 - mar/09	388,9	110,0	53,8	57,8	277,3
Otoño	abr/09 - jun/09	86,0	59,0	5,9	-14,7	94,8
Invierno	jul/09 - set/09	186,0	85,0	20,0	12,5	125,7

Balance Hídrico anual Cuenca La Cantera con cobertura de pasturas, período octubre 2006 - setiembre 2009.

Año	PP período (mm)	Escorrentamiento Pastura (mm)	Escorrentamiento corregido** (mm)	Variación Contenido agua suelo (mm)	Evapotransp. real (mm)
oct/06 - set/07	1585,2	773,0	300,4	64,6	1220,2
oct/07 - set/08	1062,4	410,0	131,6	2,2	928,6
oct/08 - set/09	766,9	321,0	103,0	-5,9	669,8

BALANCES HIDRICOS A NIVEL MENSUAL, SEMESTRAL, ESTACIONAL Y ANUAL EN LA MICROCUENCA FORESTADA

Balance Hídrico mensual Cuenca Don Tomás con cobertura forestal, período octubre 2006 - setiembre 2009

Fecha medida *	Período (días)	PP/período (mm)	PP efectiva (mm)	Intercepción (mm)	Escurrimiento Forestal (mm)	Coef. Escurrimiento Pastura	Coef. Escurrimiento Pastura corregido	Escurrimiento Pastura (mm) **	Escurrimiento Forestal corregido (mm)	Contenido agua suelo (mm)	Variación Contenido agua suelo (mm)	Evapot. real (mm)	Evapot. Total (mm)
15-09-06										155,3			
28-10-06	28	101,6	81,8	19,8	6,0	0,086	0,069	3,1	2,9	182,6	27,3	51,6	71,4
17-11-06	20	193,5	179,3	14,2	14,0	0,034	0,027	2,3	11,7	246,5	63,9	103,7	117,9
03-02-07	78	380,4	315,3	65,1	41,0	0,105	0,084	14,1	26,9	163,8	-82,7	371,1	436,2
20-04-07	76	560,6	430,8	129,8	119,0	0,275	0,219	54,0	65,0	224,2	60,4	305,4	435,2
22-05-07	32	162,7	135,7	27,0	84,0	0,393	0,313	22,4	61,6	227,2	3,0	71,1	98,1
20-06-07	28	21,3	20,1	1,2	36,0	0,443	0,353	3,3	32,7	215,6	-11,6	-1,0	0,2
25-07-07	35	21,8	15,4	6,4	15,0	0,001	0,001	0,01	15,0	182,6	-33,0	33,4	39,8
21-08-07	27	19,8	12,3	7,5	9,0	0,088	0,070	0,6	8,4	172,9	-9,7	13,6	21,1
28-09-07	38	130,0	100,1	29,9	27,0	0,274	0,219	12,5	14,5	190,1	17,2	68,4	98,3
24-10-07	26	160,0	120,6	39,4	50,0	0,394	0,314	22,1	27,9	213,2	23,1	69,6	109,0
18-11-07	25	84,1	63,3	20,8	16,0	0,150	0,119	4,4	11,6	178,4	-34,8	86,5	107,3
19-12-07	31	51,0	41,6	9,4	10,0	0,110	0,087	2,0	0,0	161,3	-17,1	58,7	68,1
31-01-08	43	193,5	151,8	41,7	0,0	0,012	0,010	0,0	0,0	203,5	42,2	109,6	151,3
26-02-08	26	57,8	43,5	14,3	0,0	0,003	0,003	0,0	0,0	163,8	-39,7	83,2	97,5
27-03-08	29	151,0	121,9	29,1	0,0	0,049	0,039	0,0	0,0	197,6	33,8	88,1	117,2
25-04-08	29	14,5	9,0	5,5	0,0	0,101	0,080	0,0	0,0	169,3	-28,3	37,3	42,8
13-06-08	49	97,2	85,8	11,4	0,0	0,013	0,011	0,0	0,0	171,4	2,1	83,7	95,1
26-07-08	43	112,1	95,4	16,7	0,0	0,099	0,079	0,0	0,0	222,2	50,8	44,6	61,3
09-09-08	45	94,4	77,5	16,9	4,0	0,299	0,238	4,0	0,0	190,7	-31,5	109,0	125,9
02-10-08	23	34,3	25,6	8,7	0,0	0,458	0,365	0,0	0,0	189,9	-0,8	26,4	35,1
12-12-08	71	108,1	63,6	44,5	0,0	0,155	0,124	0,0	0,0	156,7	-33,2	96,8	141,3
5-2-09	55	180,2	135,2	45,0	0,0	0,025	0,020	0,0	0,0	224,7	68,0	67,2	112,2
26-3-09	49	216,4	195,0	21,4	6,0	0,234	0,186	6,0	0,0	186,6	-38,1	233,1	254,5
30-4-09	35	20,6	10,4	10,2	0,0	0,126	0,101	0,0	0,0	163,5	-23,1	33,5	43,7
17-06-09	49	96,9	68,2	28,7	0,0	0,034	0,027	0,0	0,0	165,0	1,5	66,7	95,4
10-07-09	23	22,0	10,1	11,9	0,0	0,098	0,078	0,0	0,0	158,8	-6,2	16,3	28,2
30-09-09	82	167,7	136,6	31,1	0,0	0,109	0,087	0,0	0,0	172,4	13,6	123,0	154,1

Balance Hídrico semestral Cuenca Don Tomás con cobertura forestal, período octubre 2006 - setiembre 2009

Período	PP/período (mm)	PP efectiva (mm)	Intercepción (mm)	Escurrimiento Forestal (mm)	Escurrimiento Pastura (mm) **	Escurrimiento Forestal corregido (mm)	Variación Contenido agua suelo (mm)	Evapotransp. real (mm)	Evapotransp. Total (mm)
oct/06 - abr/07	1236,1	1007,2	228,9	180,0	73,4	106,6	68,9	831,7	1060,6
may/07 - set/07	355,6	283,6	72,04	171,0	38,9	132,1	-34,1	185,5	257,6
oct/07 - mar/08	697,4	542,7	154,7	76,0	28,5	39,5	7,5	495,7	650,4
abr/08 - set/08	352,5	293,3	59,2	4,0	4,0	0,0	-7,7	301,0	360,2
oct/08 - mar/09	504,7	393,8	110,9	6,0	6,0	0,0	-3,3	397,1	508,0
abr/09 - set/09	307,2	225,3	81,9	0,0	0,0	0,0	-14,2	239,5	321,4

Hídrico estacional Cuenca Don Tomás con cobertura forestal, período octubre 2006 - setiembre 2009

Estación	Período	PP/período (mm)	PP efectiva (mm)	Intercepción (mm)	Escurrimiento Forestal (mm)	Escurrimiento Pastura (mm)	Escurrimiento Forestal corregido (mm)	Variación Contenido agua suelo (mm)	Evapotransp. real (mm)	Evapotransp. Total (mm)
Primavera	oct/06 - nov/06	295,1	261,1	34,0	20,0	5,4	14,6	91,2	155,3	189,3
Verano	dic/06 - ene/07	380,4	315,3	65,1	41,0	14,1	26,9	-82,7	371,1	436,2
Otoño	feb/07 - may/07	723,3	566,5	156,8	203,0	76,4	126,6	63,4	376,5	533,3
Invierno	jun/07 - ago/07	62,9	47,8	15,1	60,0	3,9	56,1	-54,3	46,0	61,1
Primavera	set/07 - nov/07	374,1	284,0	90,1	93,0	39,0	54,0	5,5	224,5	314,6
Verano	dic/07 - feb/08	302,3	236,9	65,4	10,0	2,0	0,0	-14,6	251,5	316,9
Otoño	mar/08 - may/08	262,7	216,7	46,0	0,0	0,0	0,0	7,6	209,1	255,1
Invierno	jun/08 - ago/08	206,5	172,9	33,6	4,0	4,0	0,0	19,3	153,6	187,2
Primavera	set/08 - nov/08	142,4	89,2	53,2	0,0	0,0	0,0	-34,0	123,2	176,4
Verano	dic/08 - mar/09	396,6	330,2	66,4	6,0	6,0	0,0	29,9	300,3	366,7
Otoño	abr/09 - jun/09	117,5	78,6	38,9	0,0	0,0	0,0	-21,6	100,2	139,1
Invierno	jul/09 - set/09	189,7	146,7	43,0	0,0	0,0	0,0	7,4	139,3	182,3

Hídrico anual Cuenca Don Tomás con cobertura forestal, período octubre 2006 - setiembre 2009

Año	PP/período (mm)	PP efectiva (mm)	Intercepción (mm)	Escurrimiento Forestal (mm)	Escurrimiento Pastura (mm) **	Escurrimiento Forestal corregido (mm)	Variación Contenido agua suelo (mm)	Evapotransp. real (mm)	Evapotransp. Total (mm)
oct/06 - set/07	1591,7	1290,8	300,9	351,0	112,3	238,7	34,8	1017,3	1318,2
oct/07 - set/08	1049,9	836,0	213,9	80,0	32,5	39,5	-0,2	796,7	1010,6
oct/08 - set/09	811,9	619,1	192,8	6,0	6,0	0,0	-17,5	636,6	829,4