
ESTUDIO DEL FLUJO SATURADO DE AGUA EN SUELOS FORESTALES DE PIEDRAS BLANCAS, ANTIOQUIA

Adriana Londoño¹, Diana Cristina Montoya¹, Juan Diego León¹ y Maria Isabel González²

1. Departamento de Ciencias Forestales - Facultad de Ciencias Agropecuarias

Universidad Nacional de Colombia, Sede de Medellín

2. Área de Edafología y Química Agrícola - Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales

Universidad de Salamanca, España

jdleon@unalmed.edu.co

Recibido para evaluación: 29 de Agosto de 2005 / Aceptación: 26 de Octubre de 2005 / Recibida versión final: 08 de Noviembre de 2005

RESUMEN

Las láminas de flujo saturado de agua (FSA) en el suelo fueron medidas en bosques montanos de *Quercus humboldtii* y reforestados (*Pinus patula* y *Cupressus lusitanica*) de la región de Piedras Blancas, Antioquia, por un período de tiempo de dos años. Se utilizaron lisímetros de tensión cero con el fin de estimar las láminas de agua drenada a diferentes profundidades en el perfil del suelo. El mayor valor anual de lámina en el nivel más profundo (50-80 cm), fue hallado en la cobertura de ciprés (492,7 mm), seguido por pino pátula (14,2 mm) y roble (2,0 mm). Para el horizonte orgánico, los valores anuales de agua recogidos en las parcelas de roble, pino pátula y ciprés pusieron de manifiesto su dominancia frente al FSA recogido en los horizontes minerales, para los cuales se encontró un patrón inverso, predominando al parecer los movimientos subsuperficiales del agua en el caso de las plantaciones forestales. El FSA en las coberturas mostró una mayor relación con las variables de intensidad y cantidad de la lluvia, mientras que no se encontró relación con el contenido de humedad del suelo.

PALABRAS CLAVES: Cupressus Lusitanica, Pinus Patula, Quercus Humboldtii, Bosques Montanos Tropicales, Plantaciones Forestales Tropicales, Flujo Saturado de Agua, Infiltración, Percolación, Agua de Drenaje.

ABSTRACT

Saturated water fluxes (SWF) were measured in montane oak forests (*Quercus humboldtii*) in pine (*Pinus patula*) and cypress (*Cupressus lusitanica*) plantations in Piedras Blancas, Antioquia over two years. Zero tension lysimeters were used to estimate water flow values at different depths in the soil profile. The highest annual water flow value at the greatest depth (50-80 cm) was obtained in the cypress plot (492,7 mm), followed by pine (14,2 mm) and oak forest (2,0 mm). For the organic horizon, the annual values of water collected in oak, pine and cypress plots revealed its superiority over mineral horizon SWF, for which the opposite pattern was found, with subsurface water flows apparently prevailing in the case of forest plantations. SWF in the forests showed strongest relation with rainfall intensity and quantity, whereas no relation was found with soil moisture content.

KEY WORDS: Cupressus Lusitanica, Pinus Patula, Quercus Humboldtii, tropical Montane Forests, Tropical Forest Plantations, Saturated Water Flow, Infiltration, Percolation, Drainage Water.

1. INTRODUCCIÓN

A continuación se presentan los resultados de una investigación orientada a estudiar los flujos saturados de agua (FSA) en tres coberturas boscosas -roble, pátula y ciprés- de la región de Piedras Blancas, Antioquia. Estos flujos se corresponden con movimientos gravitacionales del agua una vez los poros del suelo se encuentran ocupados por agua, es decir, bajo condiciones de saturación del suelo. Se empleó la aproximación lisimétrica, disponiendo baterías de lisímetros a diferentes profundidades del suelo, siendo el período de monitoreo de dos años. El objeto de estudio comprendió además la determinación de relaciones existentes entre las láminas de FSA, la precipitación y las condiciones edáficas y de cobertura vegetal imperantes. La investigación buscó verificar la hipótesis de que los ecosistemas forestales naturales exhiben una economía más eficiente del recurso hídrico que las plantaciones forestales.

2. MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La zona de estudio se localiza al oriente del departamento de Antioquia, cuenca hidrográfica de la quebrada Piedras Blancas, a una altitud aproximada de 2.400 m. La temperatura media anual es de 14,9 °C, la humedad relativa promedio anual 82%, y la precipitación media anual, período 1942-1997, de 1.698 mm¹. Las condiciones climáticas señaladas se corresponden con la zona de vida bosque húmedo Montano Bajo (bh-MB) (Holdridge 1987). La fisiografía se caracteriza por colinas de pendiente media y suelos derivados de ceniza volcánica, bajo la cual se encuentra anfíbolita.

2.2. Métodos de campo

Entre los meses de febrero y marzo de 2001 se establecieron tres (3) parcelas permanentes de 0,5 ha en bosques de roble, pino pátula y ciprés, dotadas con dispositivos de medición para el estudio y registro de variables climáticas y procesos del ciclo hidrológico. Algunas características de estos bosques se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1.

Caracterización de los rodales para las tres parcelas experimentales.

Parcela	Edad* (años)	Árboles** (ha ⁻¹)	Diámetro promedio (cm)	Área basal (m ² ha ⁻¹)	Biomasa*** (Mg ha ⁻¹)
Roble	Madura	358	15,9	17,3	166,4
Pino Pátula	39	439	23,1	41,7	328,2
Ciprés	39	615	18,2	36,6	194,8

* Plantaciones establecidas en julio 1 de 1965, ** Árboles de diámetro \geq 10 cm, *** Calculada a partir de ecuaciones de biomasa (Universidad Nacional de Colombia 1999)

El período de estudio comprendió más de dos años continuos de monitoreo semanal, entre los meses de marzo de 2001 y mayo de 2003. Para el estudio de las láminas de FSA a diferentes profundidades del suelo, se abrieron dos calicatas (2x1 m) en cada parcela (Figura 1a), dispuestas ambas a media ladera. En los perfiles de cada una de estas calicatas, se instalaron ocho lisímetros plásticos, dos por cada nivel de profundidad, coincidiendo el primero de ellos con la capa orgánica o mantillo (hojarasca en diferentes grados de fragmentación y descomposición) (Figura 1b). Las profundidades o niveles definidos para la distribución de estos dispositivos en el perfil vertical del suelo para la recolección de las aguas gravitacionales, fueron los siguientes: N0 correspondiente a la primer capa del suelo que comprende el material orgánico en descomposición o mantillo, N1 ubicado en un rango de profundidad de 0 a 30 cm, N2 de 30 a 50 cm y N3 a una profundidad de 80 cm.

1. Estación Chorrillos localizada a una altitud de 2.353 m. Información suministrada por Empresas Públicas de Medellín

Los lisímetros consistieron en bandejas de 20 x 30 cm seccionadas e introducidas en el suelo siguiendo la dirección de la pendiente topográfica, conectadas mediante mangueras plásticas, a tarros de plástico de alta densidad. Estos permiten recoger tanto el flujo vertical como el horizontal, y se corresponden con la descripción de un lisímetro ideal (Keller & Vedy 1991, Moreno 1994), consistente en un dispositivo de tensión cero, abierto, de pequeña talla, inerte desde el punto de vista físico-químico y con escasa demanda de mantenimiento. En cada uno de los niveles de muestreo, se instalaron bloques de yeso con electrodos en acero inoxidable, a través de los cuales se registró el contenido de humedad del suelo, empleando un lector digital de humedad (Delmhorst modelo KS-D10) (Figuras 1c y 1d).

La precipitación se registró mediante pluviómetros de 6 pulgadas de diámetro construidos en PVC, y dispuestos 1 m sobre la superficie del terreno. Estos pluviómetros se localizaron tanto a condición de campo abierto para monitoreo de la precipitación incidente (Pp), como dentro de los bosques en estudio, para monitoreo de la precipitación interna o neta (PI) (Figura 1e). La información para las variables de intensidad de la precipitación fue tomada de la Estación Chorrillos de EPM. Semanalmente fueron medidos los volúmenes recogidos en los lisímetros y en los pluviómetros, mediante probetas plásticas y pipetas graduadas -dependiendo de las magnitudes de los flujos semanales- así como registrado el contenido de humedad del suelo (Figura 1f).

2.3. Métodos de laboratorio

El trabajo de laboratorio consistió en la construcción de curvas de calibración para los bloques de yeso empleados (Lector Delmhorst), con el fin de convertir la escala arbitraria de 0 a 100 que suministra el aparato, en términos de la humedad disponible del suelo (tensión de humedad del suelo). Para ello, se realizó un montaje de muestras de suelo -mínimamente disturbadas y correspondientes al horizonte en que se encontraban los bloques de yeso en campo - en pequeños cilindros de malla plástica, en cada uno de los cuales se dispuso un bloque de yeso de iguales características al empleado en campo. Mediante sometimiento de tales muestras a diferentes niveles de humedecimiento y lectura correspondiente con el aparato y registro de peso, se construyeron las curvas de calibración mencionadas.

2.4. Procesamiento de datos

El procesamiento de datos comprendió, inicialmente, la realización de un análisis de varianza (ANAVA) en arreglo factorial. En éste se incluyeron simultáneamente como factores las variables cobertura, nivel y semana, siendo excluida esta última de las interacciones.

Mediante este análisis, se determinó cuáles factores tenían un efecto estadísticamente significativo sobre la variable lámina de FSA, para lo cual fue necesario transformar logarítmicamente dicha variable con el fin de normalizar los datos. Se obtuvieron las interacciones entre niveles de una misma cobertura y entre coberturas para un mismo nivel, determinando diferencias estadísticamente significativas a partir del criterio DMS (diferencia mínima significativa).

Se practicó además un Análisis de Componentes Principales (ACP), con el fin de explicar la estructura de varianzas y covarianzas existente entre las variables estudiadas (Johnson y Wicher, 1998; Lema, 2002). Para esto se seleccionaron datos correspondientes a la característica de la precipitación intensidad: intensidad promedio e intensidad máxima, realizándose el análisis sobre los datos para duraciones de lluvia de 15 minutos. Así mismo, para las diferentes coberturas, se incluyeron las variables precipitación incidente e interna, lámina de FSA correspondiente a cada nivel y contenido de humedad respectivo. Se conformaron tres grupos ACPR, ACPP y ACPC, correspondientes a las coberturas de roble, pátula y ciprés respectivamente, dentro de los cuales se involucraron las variables descritas. A partir de los resultados del ACP se identificaron las variables que presentaron mayor relación con las láminas de FSA en cada cobertura, relaciones para las cuales se ajustaron modelos de regresión lineal múltiple. Para los análisis fueron empleados los programas estadísticos SPAD versión 3,5 y Statgraphics Plus versión 4,0.



FIGURA 1.

Detalles metodológicos de la instrumentación y monitoreo de los flujos saturados de agua en las parcelas experimentales.

a. Perfil de calicata y lisímetros acoplados a mangueras y envases de recolección.

b. Bandeja lisimétrica localizada por debajo del horizonte orgánico.

c. Registro del contenido de humedad del suelo.

d. Terminales de los bloques de yeso para registro de humedad del suelo.

e. Pluviómetro localizado al interior del bosque.

f. Medición del agua colectada y registro en libreta de campo

Mediante este análisis, se determinó cuáles factores tenían un efecto estadísticamente significativo sobre la variable lámina de FSA, para lo cual fue necesario transformar logarítmicamente dicha variable con el fin de normalizar los datos. Se obtuvieron las interacciones entre niveles de una misma cobertura y entre coberturas para un mismo nivel, determinando diferencias estadísticamente significativas a partir del criterio DMS (diferencia mínima significativa).

Se practicó además un Análisis de Componentes Principales (ACP), con el fin de explicar la estructura de varianzas y covarianzas existente entre las variables estudiadas (Johnson y Wicher, 1998; Lema, 2002). Para esto se seleccionaron datos correspondientes a la característica de la precipitación intensidad: intensidad promedio e intensidad máxima, realizándose el análisis sobre los datos para duraciones de lluvia de 15 minutos. Así mismo, para las diferentes coberturas, se incluyeron las variables precipitación incidente e interna, lámina de FSA correspondiente a cada nivel y contenido de humedad respectivo. Se conformaron tres grupos ACPR, ACPP y ACPC, correspondientes a las coberturas de roble, pátula y ciprés respectivamente, dentro de los cuales se involucraron las variables descritas. A partir de los resultados del ACP se identificaron las variables que presentaron mayor relación con las láminas de FSA en cada cobertura, relaciones para las cuales se ajustaron modelos de regresión lineal múltiple. Para los análisis fueron empleados los programas estadísticos SPAD versión 3,5 y Statgraphics Plus versión 4,0.

3. RESULTADOS

En la Tabla 2 se muestran las láminas de FSA anuales para cada uno de los dos períodos estudiados, según cobertura vegetal y nivel de profundidad. La precipitación incidente (Pp) se presenta en la Figura 2, y en las Figuras 3, 4 y 5, en su orden, las láminas de FSA en las coberturas de roble, pino pátula y ciprés. En la Tabla 3 se presentan los resultados del ANAVA en arreglo factorial. Allí se muestran las interacciones entre niveles de la misma cobertura, observándose en la mayoría de los casos diferencias estadísticamente significativas, exceptuando la relación de los niveles 2 y 3 de la cobertura de ciprés.



FIGURA 2.
Precipitación incidente durante el período de estudio

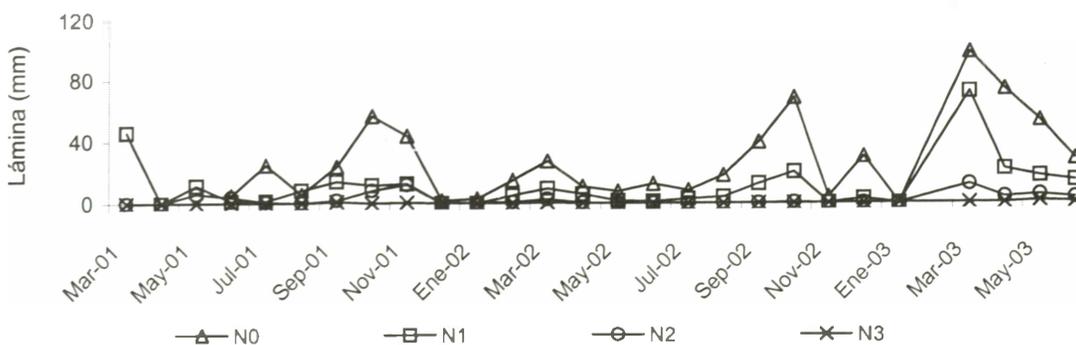


FIGURA 3.
Lámina de FSA en la cobertura de roble durante el período de estudio

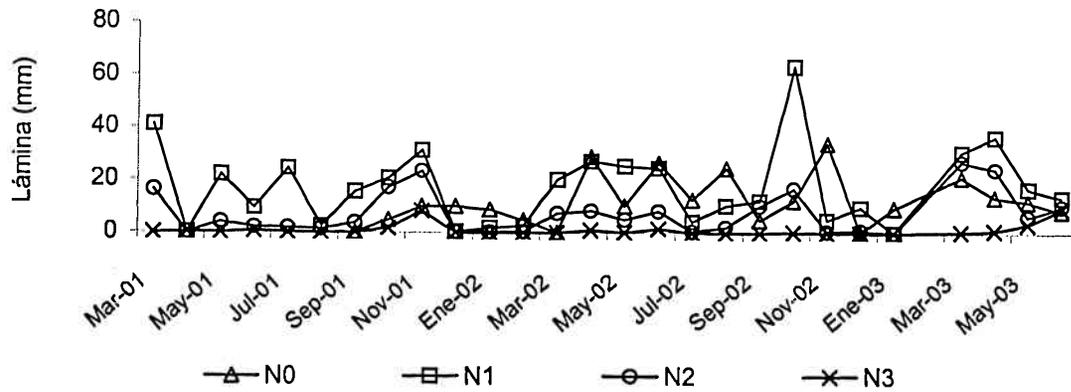


FIGURA 4.
Lámina de FSA en la cobertura de pino pátula durante el período de estudio

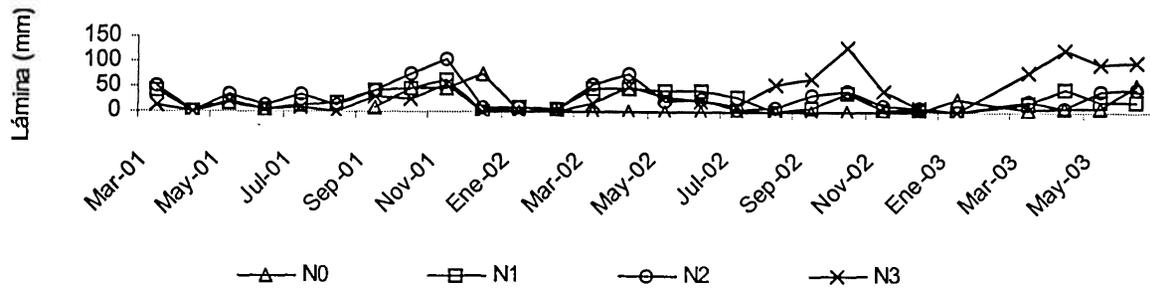


FIGURA 5.
Lámina de FSA en la cobertura de ciprés durante el período de estudio

TABLA 2.
Lámina anual de FSA (mm) según cobertura y nivel

Cobertura	Nivel			
	N0	N1	N2	N3
<i>Roble</i>				
Año 1	214,8	125,6	35,8	2,0
Año 2	440,9	170,1	24,5	1,9
<i>Pino pátula</i>				
Año 1	66,9	218,6	86,5	12,2
Año 2	189,1	252,0	111,9	16,3
<i>Ciprés</i>				
Año 1	174,9	345,0	516,7	225,4
Año 2	104,3	269,5	277,1	760,1

TABLA 3.
Interacciones entre niveles de la misma cobertura

Interacción	Nivel	N _(i)	N _(j)	Media _(i)	Media _(j)	DMS	Distancia
N0 _(i) - N1 _(j)	Roble	100	112	-0,045	-1,482	0,055	1,437
N0 _(i) - N2 _(j)	Roble	100	112	-0,045	-3,522	0,055	3,478
N0 _(i) - N3 _(j)	Roble	100	112	-0,045	-5,228	0,055	5,183
N1 _(i) - N2 _(j)	Roble	112	112	-1,482	-3,522	0,052	2,040
N1 _(i) - N3 _(j)	Roble	112	112	-1,482	-5,228	0,052	3,746
N2 _(i) - N3 _(j)	Roble	112	112	-3,522	-5,228	0,052	1,706
N0 _(i) - N1 _(j)	Pino pátula	84	112	-1,006	-0,437	0,060	0,569
N0 _(i) - N2 _(j)	Pino pátula	84	112	-1,006	-1,751	0,060	0,745
N0 _(i) - N3 _(j)	Pino pátula	84	112	-1,006	-4,212	0,060	3,206
N1 _(i) - N2 _(j)	Pino pátula	112	112	-0,437	-1,751	0,052	1,314
N1 _(i) - N3 _(j)	Pino pátula	112	112	-0,437	-4,212	0,052	3,775
N2 _(i) - N3 _(j)	Pino pátula	112	112	-1,751	-4,212	0,052	2,461
N0 _(i) - N1 _(j)	Ciprés	84	84	-3,105	-0,604	0,069	2,501
N0 _(i) - N2 _(j)	Ciprés	84	84	-3,105	-0,135	0,069	2,969
N0 _(i) - N3 _(j)	Ciprés	84	84	-3,105	-0,159	0,069	2,945
N1 _(i) - N2 _(j)	Ciprés	112	112	-0,604	-0,135	0,052	0,469
N1 _(i) - N3 _(j)	Ciprés	112	112	-0,604	-0,159	0,052	0,444
N2 _(i) - N3 _(j)	Ciprés	112	112	-0,135	-0,159	*0,052	*0,024

En la Tabla 4, se presentan las interacciones entre coberturas para un mismo nivel, obteniéndose diferencias significativas para la totalidad de los casos. La representación gráfica del primer plano factorial del análisis de componentes principales practicado para roble (ACPR), pino pátula (ACPP) y ciprés (ACPC) se muestra en las Figuras 6, 7 y 8, respectivamente.

TABLA 4.
Interacciones entre coberturas para un mismo nivel*

Interacción	Nivel	N _(i)	N _(j)	Media _(i)	Media _(j)	DMS	Distancia
roble _(i) - pino pátula _(j)	0	100	84	-0,045	-1,006	0,063	0,962
roble _(i) - ciprés _(j)	0	100	84	-0,045	-3,105	0,063	3,060
pino pátula _(i) - ciprés _(j)	0	84	84	-1,006	-3,105	0,069	2,098
roble _(i) - pino pátula _(j)	1	112	112	-1,482	-0,437	0,052	1,045
roble _(i) - ciprés _(j)	1	112	112	-1,482	-0,604	0,052	0,878
pino pátula _(i) - ciprés _(j)	1	112	112	-0,437	-0,604	0,052	0,167
roble _(i) - pino pátula _(j)	2	112	112	-3,522	-1,751	0,052	1,771
roble _(i) - ciprés _(j)	2	112	112	-3,522	-0,135	0,052	3,387
pino pátula _(i) - ciprés _(j)	2	112	112	-1,751	-0,135	0,052	1,616
roble _(i) - pino pátula _(j)	3	112	112	-5,228	-4,212	0,052	1,016
roble _(i) - ciprés _(j)	3	112	112	-5,228	-0,159	0,052	5,068
pino pátula _(i) - ciprés _(j)	3	112	112	-4,212	-0,159	0,052	4,053

DMS: Diferencia mínima significativa, *: Existe diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$)

Los modelos de regresión lineal ajustados para las láminas de FSA en los diferentes niveles por cobertura y sus estadísticos se presentan en la Tabla 5. Para los niveles faltantes, no se encontraron modelos que mostraran un ajuste estadístico satisfactorio.

TABLA 5.

Modelos de regresión lineal múltiple ajustados para las láminas semanales de FSA⁺ según cobertura discriminados por nivel*

Cobertura	Nivel	Modelo	R ² (%)	D-W	N
Roble	0	$R0 = 0,077076 \cdot Imax + 0,186787 \cdot PI_R$	65,32	1,62	101
	1	$R1 = 0,487772 \cdot R0 - 0,0338541 \cdot PI_R$	70,02	2,03	101
	2	$R2 = 0,00750196 \cdot PI_R + 0,160636 \cdot R1$	45,74	1,85	107
Pino pátula	0	$P0 = 0,185248 \cdot Cant \text{ Imax} + 0,0622739 \cdot PI_P$	71,58	1,34	81
	1	$P1 = 0,132132 \cdot PI_P$	80,27	1,63	108
	2	$P2 = 0,00705895 \cdot PI_P + 0,283898 \cdot P1$	79,64	1,67	108
	3	$P3 = -0,0393161 \cdot Pp + 0,0499559 \cdot PI_P + 0,204782 \cdot P2$	84,66	1,74	98
Ciprés	1	$C1 = -0,361592 \cdot C0 + 0,181186 \cdot Pp_C$	67,68	2,05	81
	2	$C2 = 0,536053 \cdot C1 + 0,1529 \cdot Pp_C$	85,86	1,57	107
	3	$C3 = -0,458916 \cdot C2 + 0,43536 \cdot PI_C$	74,16	1,53	105

*: Todos los modelos significativos al 95%, +: lámina de agua semanal expresada en mm, R0 (mm): Lámina de FSA 0 de roble, R1 (mm): Lámina de FSA del nivel 1 de roble, R2 (mm): Lámina de FSA del nivel 2 de roble P0 (mm): Lámina de FSA del nivel 0 de pino pátula, P1 (mm): Lámina de FSA del nivel 1 de pino pátula P2 (mm): Lámina de FSA del nivel 2 de pino pátula, P3 (mm): Lámina de FSA del nivel 3 de pino pátula C1 (mm): Lámina de FSA del nivel 1 de ciprés, C2 (mm): Lámina de FSA del nivel 2 de ciprés C3 (mm): Lámina de infiltración del nivel 3 de ciprés, Imax: Intensidad máxima (mm h⁻¹) Cant. Imax: Cantidad de agua asociada a la intensidad máxima (mm en 15 minutos), refleja en sí la intensidad máxima, PI_R: Precipitación Interna roble (mm) PI_P: Precipitación Interna pino pátula (mm), PI_C: Precipitación Interna ciprés (mm) Pp_C: Precipitación Incidente ciprés (mm), R²: Coeficiente de determinación D-W: Estadístico Durbin-Watson, N: Tamaño muestral

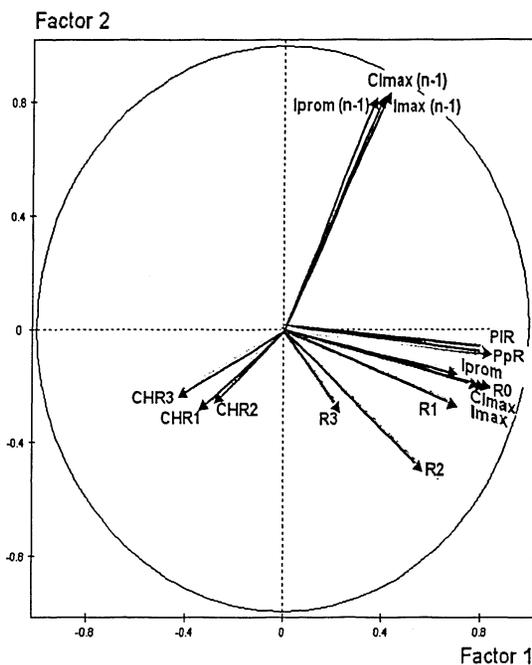


FIGURA 6.
Primer plano factorial de ACPR

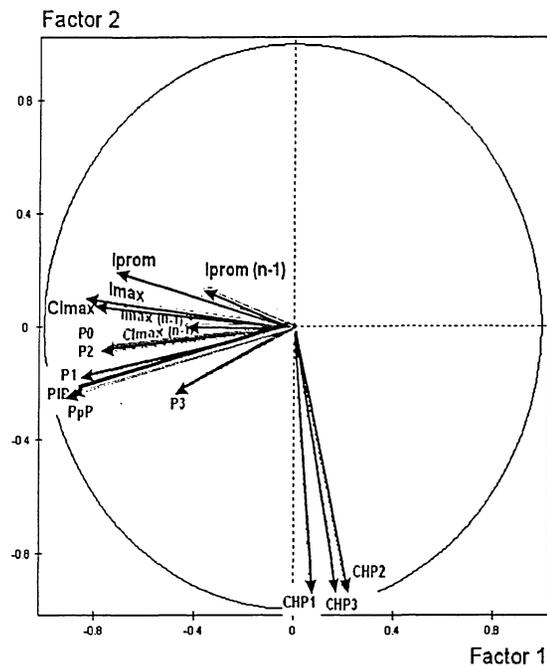


FIGURA 7.
Primer plano factorial de ACPP

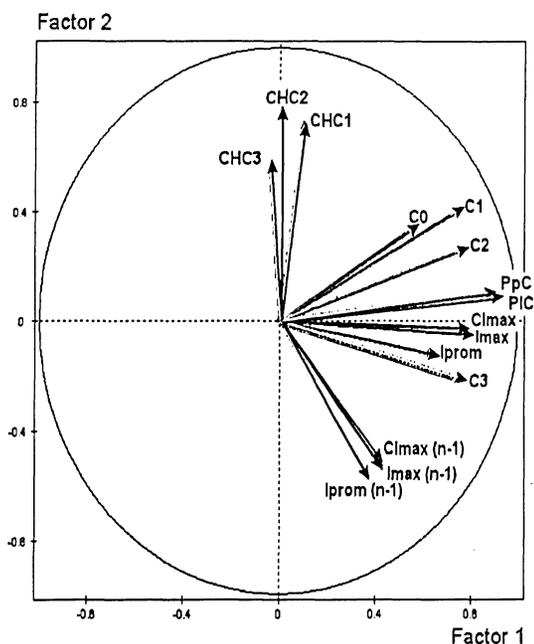


FIGURA 8.
Primer plano factorial de ACPC

Iprom: Intensidad promedio (mm h^{-1}), Imax: Intensidad máxima (mm h^{-1}), Cant. Imax: Cantidad de agua asociada a la intensidad máxima (mm en 15 minutos), refleja en sí la intensidad máxima, Iprom n-1: Intensidad promedio asociada al período inmediatamente anterior (mm h^{-1}), Imax n-1: Intensidad máxima asociada al período inmediatamente anterior (mm h^{-1}), Cant. Imax n-1: Cantidad de agua asociada a la intensidad máxima del período inmediatamente anterior (mm), PpP: Precipitación incidente roble (mm), PIR: Precipitación interna roble (mm), R0: Lámina FSA (mm) del nivel 0 de roble, R1: Lámina de FSA (mm) del nivel 1 de roble, R2: Lámina de FSA (mm) del nivel 2 de roble, R3: Lámina de FSA (mm) del nivel 3 de roble, CHR1: Contenido de humedad del nivel 1 de roble (%), CHR2: Contenido de humedad del nivel 2 de roble (%), CHR3: Contenido de humedad del nivel 3 de roble (%), PpP: Precipitación incidente pino pátula (mm), PIP: Precipitación interna pino pátula (mm), P0: Lámina de infiltración (mm) del nivel 0 de pino pátula, P1: Lámina de FSA (mm) del nivel 1 de pino pátula, P2: Lámina de FSA (mm) del nivel 2 de pino pátula, P3: Lámina de FSA (mm) del nivel 3 de pino pátula, CHP1: Contenido de humedad del nivel 1 de pino pátula (%), CHP2: Contenido de humedad del nivel 2 de pino pátula (%), CHP3: Contenido de humedad del nivel 3 de pino pátula (%), PpC: Precipitación incidente ciprés (mm), PIC: Precipitación interna ciprés (mm), C0: Lámina de FSA (mm) del nivel 0 de ciprés, C1: Lámina de FSA (mm) del nivel 1 de ciprés, C2: Lámina de FSA (mm) del nivel 2 de ciprés, C3: Lámina de FSA (mm) del nivel 3 de ciprés, CHC1: Contenido de humedad del nivel 1 de ciprés (%), CHC2: Contenido de humedad del nivel 2 de ciprés (%), CHC3: Contenido de humedad del nivel 3 de ciprés (%).

4. DISCUSIÓN

Las láminas de FSA en todas las coberturas estudiadas y durante todo el rango de medición se comportaron siguiendo el patrón de lluvias, situación que se observa en las Figuras 2 a 5. Allí, los picos en las láminas de FSA están asociados a los de la precipitación, en los diferentes niveles de cada cobertura. En términos generales, la observación conjunta de las Figuras 2, 3, 4 y 5, permite identificar la similitud en la respuesta del FSA de las coberturas de roble, pino pátula y ciprés, respecto a sus patrones de distribución temporal y sus relaciones con los eventos de precipitación.

En la Tabla 2, se aprecia cómo las láminas de FSA en ciprés para todos los niveles minerales, superaron ampliamente aquellas generadas en las otras dos coberturas (roble y pino pátula). Así mismo, se presentan diferencias de magnitud del FSA para los distintos niveles entre coberturas. En el caso de la cobertura de roble el N0 y el N3 presentan la mayor y menor magnitud respectivamente, denotando por una parte una alta infiltración de agua a través del mantillo forestal, y por otra una captura por el ecosistema de las aguas infiltradas, lo cual se traduce en unos muy bajos aportes por parte del FSA para la recarga subterránea. En la parcela de pino pátula son los niveles N1 y N3 quienes representan el patrón recién descrito, en tanto que un patrón inverso se tiene en la cobertura de ciprés, en donde se registraron flujos saturados de agua mayores para el N3 y menores para el N0.

Los valores anuales de las láminas de FSA para roble, pino pátula y ciprés, según nivel, señalan un claro comportamiento dominante para la infiltración ocurrida en roble al nivel del horizonte orgánico frente a las otras coberturas, situación que se manifiesta de manera inversa para el FSA en el caso de los horizontes minerales, en donde al parecer predominan los movimientos subsuperficiales del agua en las plantaciones forestales.

En la cobertura de ciprés se obtuvo el mayor valor para la relación precipitación interna/precipitación incidente (87,36 %), lo cual indica una menor interceptación de la precipitación por el dosel, lo que favorece mayores cantidades potenciales de agua para infiltración en el suelo y posterior descenso gravitacional. A esto pueden contribuir factores tales como la arquitectura del dosel, la inclinación de las ramas, el número de ellas por unidad de longitud y el área foliar, entre otros. Esto podría explicar parcialmente la dominancia que presenta esta cobertura en sus valores anuales de FSA a nivel de los horizontes minerales.

En el caso particular de plantaciones forestales de *Pinus patula* y *Cupressus lusitanica* de la cuenca hidrográfica de la quebrada Piedras Blancas, ha sido verificado el fenómeno de hidrofobicidad en los niveles más superficiales (Jaramillo, 2001), no obstante, la repelencia al agua por el suelo puede incluso alcanzar capas subsuperficiales. La importancia de detectar posibles horizontes hidrófobos en un suelo radica en que éstos pueden afectar las propiedades hidráulicas de la zona no saturada modificando la curva característica del suelo (DiCarlo et al., 1999; Bauters et al., 2000), con lo que se favorece la aparición de vías preferenciales para el movimiento de agua y solutos y se generan frentes irregulares de humedecimiento (Wallis y Horne 1992). En los horizontes minerales de la parcela de ciprés se manifiesta una notoria superioridad de los FSA, lo cual se corresponde con el comportamiento típico del flujo preferencial recién descrito, dada la velocidad y magnitud que puede alcanzar el movimiento del agua a través de los macroporos, reduciéndose las posibilidades para su almacenamiento en el suelo.

En el ritmo de infiltración, influyen varios factores que son peculiares a los bosques, siendo uno de los más importantes la hojarasca que reposa sobre el suelo o mantillo forestal. Casi todos los bosques que tienen intacta su capa de hojarasca poseen elevados ritmos de infiltración porque el suelo se halla protegido del impacto de la lluvia y además posee la capacidad de conservación del agua debido a que detiene la escorrentía potencial (Buchinger *et al.* 1999). Así, una mayor profundidad en la capa de hojarasca incrementa la rugosidad de la superficie del suelo, con un consecuente aumento del tiempo de permanencia del agua en la superficie del terreno, favoreciendo el proceso de infiltración (Alegre y Rao, 1996; Hartanto et al., 2003). A pesar de que los mayores espesores de hojarasca se encuentran en las coberturas de roble (40-60 cm) y pino pátula (35-40 cm), únicamente en la primera se observó tal efecto con claridad. Por otra parte, existe una clara diferencia en el comportamiento de las láminas de FSA según la profundidad de que se trate. El análisis de varianza del diseño experimental, con base en un arreglo factorial, permitió observar en las interacciones entre niveles de la misma cobertura (Tabla 3) efectos altamente significativos, exceptuando la relación de los niveles 2 y 3 de la cobertura de ciprés. Al analizar las interacciones entre coberturas para un mismo nivel (Tabla 4), se revela una influencia del factor cobertura en el flujo gravitacional del agua, situación que pone de manifiesto el papel diferencial que potencialmente ejerce cada ecosistema sobre el movimiento de agua en el suelo, lo cual es el resultado tanto de las propiedades estructurales de la comunidad vegetal en sus componentes aérea y subterránea, como de las propiedades que deriva el suelo, especialmente físicas, a partir de la vegetación que soporta.

En la búsqueda del establecimiento de relaciones entre el FSA en las coberturas estudiadas y los factores climáticos -en nuestro caso con la lluvia- se encontró que en términos generales son las variables de intensidad y cantidad las que inciden más claramente en las magnitudes de los flujos saturados recogidos en las bandejas lisimétricas, siendo la excepción las variables de intensidad asociadas al período inmediatamente anterior (n-1), lo cual puede manifestar que este tiempo de rezago semanal tiene poco significado dada la ocurrencia eventual de una respuesta más rápida de la variable estudiada a los eventos de lluvia. En particular, la lámina de FSA de ciprés correspondiente al N1, fue la única que mostró relaciones significativas con las variables de intensidad máxima asociadas al período de recolección, en contraste con los niveles restantes, lo cual podría suponer un menor efecto regulador del mantillo en esta cobertura, en donde se tienen precisamente los espesores mínimos del mismo, del orden de cinco (5) centímetros en promedio.

Un aspecto que merece destacarse, es que no se halló relación entre el FSA y el contenido de humedad para el total de las coberturas (Figuras 6, 7 y 8). A diferencia de los resultados obtenidos para este estudio, Buchinger et al. (1999), afirman que en el ritmo de infiltración influye además de otros factores, el contenido de humedad del suelo. No obstante, los resultados obtenidos con el método empleado en este estudio, corresponden a mediciones puntuales que

podrían no ser representativas de los períodos de muestreo. Además, los efectos que un mismo contenido de humedad puede producir sobre el proceso de infiltración en distintos suelos, dependerán de las propias características de ellos y de los antecedentes climáticos (Regalado et al., 2003).

La identificación previa de las relaciones existentes entre variables a partir del ACP, fue posteriormente respaldada por los modelos de regresión lineal múltiple construidos por cobertura y por nivel (Tabla 5). Los modelos en general, mostraron una tendencia similar en cuanto a las variables independientes que explican las láminas de FSA en cada nivel de las diferentes coberturas. Así, las láminas correspondientes al nivel inmediatamente anterior –suprayacente- explican junto con la precipitación interna (PI) y en algunos casos con la precipitación incidente (Pp), la mayoría de los modelos ajustados. Esto revela un patrón de movimiento del agua regular en el suelo, siendo fundamentalmente la entrada de agua a través de la lluvia y la fuerza de la gravedad, tras alcanzar un punto de saturación o movimiento a través de macroporos, los que gobiernan los FSA.

Los modelos obtenidos mostraron un buen ajuste estadístico (valores altos de R^2 , y valores P muy pequeños), además los valores del estadístico Durbin-Watson indicaron ausencia de autocorrelación de los errores en el tiempo. La relación encontrada entre las láminas de FSA y las de PI, señala que el tipo de cobertura influye sobre ellas. Las características de cada cobertura intervienen en la interceptación y posterior llegada del agua al piso forestal, constituyéndose la PI en un vector fundamental de transferencia para el suelo.

Los flujos saturados de agua aquí encontrados, siguen la secuencia decreciente ciprés > pino pátula > roble. De esta manera, la hipótesis propuesta para verificar en este estudio es rechazada, ya que la economía más eficiente del recurso hídrico se obtiene para las plantaciones forestales y no para la formación natural. Esto es, que en estos ecosistemas implantados, del total de agua que alcanza el piso forestal, los flujos saturados se manifiestan en mayores magnitudes, como resultado probablemente de unos menores consumos de agua por la vegetación y de un proceso de infiltración favorecido, bien sea por alcanzarse en los primeros más rápidamente un equilibrio de humedad en el suelo, o por mediar situaciones en el movimiento gravitacional del agua (v.g. hidrofobicidad) bajo las cuales, aún sin alcanzarse dicho punto de equilibrio, ocurren flujos preferenciales de infiltración que conducen a recolecciones significativas de agua en los dispositivos a cero tensión. Resulta de interés destacar que la eficiencia en la economía de agua que aquí se destaca, se hace a partir las cantidades de agua que alcanzan el piso del bosque como precipitación interna o neta, siendo necesario contabilizar la cantidad de lluvia total para analizar el efecto completo de las diferentes coberturas incluyendo la componente aérea. Esto es que las copas de los árboles que configuran el dosel arbóreo, capturan en diferentes proporciones el agua lluvia bajo el mecanismo de interceptación, afectando las cantidades de ella que llegan hasta el suelo forestal. En este sentido, y para los tres tipos de ecosistemas estudiados, se ha encontrado en el caso particular de ciprés, en donde se han obtenido los mayores valores de flujo saturado de agua, asimismo las mayores cantidades de agua que atraviesan el dosel, siendo el valor medio de interceptación en esta cobertura del orden de

5. RECONOCIMIENTOS

Al Departamento de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, y a su Laboratorio de Ecología y Conservación Ambiental por su apoyo logístico y financiero. Al personal de la Estación Forestal Piedras Blancas por su apoyo en las tareas de campo. A Empresas Públicas de Medellín por su autorización para realizar la investigación en predios de su propiedad y suministro de información meteorológica.

6. BIBLIOGRAFÍA

Alegre, J.C. y Rao, M.R. 1996. Soil and water conservation by contour hedging in the humid tropics of Peru. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 57: pp. 17-25.

- Arbeláez, S.P., Duque, J.R., Jaramillo, D.F. y León, J.D. 2004. Estudio de hidrofobicidad de suelos en robledales (*Quercus humboldtii*) y plantaciones forestales (*Pinus patula* y *Cupressus lusitanica*) en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas. *Revista Facultad Nacional de Agronomía* 57, pp. 2423-2434.
- Bauters, T. W. J., Steenhuis, T. S., Dicarlo, D.A., Nieber, J.L., Dekker, L.W., Ritsema, C.J., Parlange, J. Y. y Haverkamp, R. 2000. Physics of water repellent soils. *Journal of Hydrology*; pp. 231-243.
- Buchinger, M., Dubois, J., Garzón, H., Godoy, G., Guajara, C., Gutierrez, E., Lecarpentier, C., Lehmann, C., Lozano, J., Olivares, A., Oster, R., Padilla, J., Ray, R. y Stanescu, S. 1999. Ecología y conservación de recursos naturales renovables. Bogotá. 164 p.
- Dicarlo, D.A., Bauters, T.W.J., Darnault, C.J.G., Steenhuis, T.S. y Parlange, J.Y., 1999. Rapid determination of constitutive relations with fingered flow. *Proceedings International Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*. Riverside.
- Hartanto, H., Prabhu, R., Widayat, A. y Asdak, C., 2003. Factors affecting runoff and soil erosion: plot-level soil loss monitoring for assessing sustainability of forest management. *Forest Ecology and Management* 6210: pp. 1-14.
- Holdridge, L.R., 1987. Ecología basada en zonas de vida. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica. 216 p.
- Jaramillo, D.F., 2001. Evaluación del método WDPT para medir el grado de repelencia al agua de Andisoles del Oriente Antioqueño. *Revista del ICNE*, pp. 7:63-70.
- Johnson, R.A. y Wicher, D.W., 1998. Applied multivariate statistical analysis. Prentice Hall. New Jersey. 816 p.
- Keller, C. y Vedy, J.C., 1991. Apport de la lisimétrie sans tensions pour l'étude des transferts de Cu et Cd dans le sols forestiers faiblement pollués. *Science du Sol* 29: pp.107-124.
- Lema T., A., 2002. Elementos de estadística multivariada. Silvano. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 430 p.
- Moreno, M. G., 1994. Balances de agua y nutrientes en rebollares (*Quercus pyrenaica* Willd.) de la vertiente Salmantina de la Sierra de Gata. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad de Salamanca. Salamanca, España. 470 p.
- Ramirez C., J.A. y Zapata D., C.M., 2004. Producción de hojarasca en bosques de *Quercus humboldtii*, *Pinus patula* y *Cupressus lusitanica* de la Cordillera Central, Colombia. Trabajo de Grado Ingeniería Forestal. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 80 p.
- Regalado, C. M., García, G., Hernández, J. M., Pérez, A. y Socorro, A.R., 2003. Caracterización de la zona no saturada de un bosque maduro de laurisilva en el parque nacional de Garajonay: hidrofobicidad e implicaciones hidrológicas. *Estudios de la Zona no Saturada del Suelo* 6(3): 193-200 pp.
- Wallis, M.G. y Horne, D.J., 1992. Soil water repellency. *Advances in Soil Science* 20: pp. 91-146.

