

INTERCEPCION DE LA LLUVIA, ESCORRENTIA SUPERFICIAL Y DRENAJE PROFUNDO EN UNA PASTURA TROPICAL Y UN CULTIVO DE MAIZ EN BARINAS, VENEZUELA

RAINFALL INTERCEPTION, RUNOFF AND DEEP DRAINAGE IN A TROPICAL PASTURE AND A CORN FIELD, IN BARINAS, VENEZUELA

Dimas Acevedo y Guillermo Sarmiento

*Centro de Investigaciones Ecológicas de los Andes Tropicales (CIELAT),
Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Mérida 5101, Venezuela*

RESUMEN

Durante un período de dos años se midió a intervalos de 14 a 30 días, la precipitación total (Pt), la precipitación efectiva y el drenaje vertical a 120 cm, en una pastura permanente de pangola (*Digitaria decumbens* Stent) y en una parcela cultivada con maíz y dejada en barbecho el resto del año, sobre un suelo de la serie Barinas (*Tropustalf óxico*), en la región de sabanas de los Llanos Occidentales de Venezuela. En la parcela con maíz/barbecho también fue medida la escorrentía superficial. Los resultados se expresan como resultados de la Pt. La intercepción de las precipitaciones en la pastura llegó en promedio al 16,7%, mientras que en el maíz/barbecho alcanzó el 13,5%. El flujo caulinar en el maíz fue del 5%. La escorrentía superficial fue de apenas 2,1%, en tanto que el drenaje totalizó el 26,6% bajo pasto y el 40,5% en la parcela cultivada. Se discute el significado ecológico de estos valores para el balance hídrico de los respectivos ecosistemas, así como algunas consecuencias de la conversión de las sabanas originales en pasturas mejoradas y en cultivos anuales.

PALABRAS CLAVES: Intercepción, escorrentía, drenaje, pastura, maíz, sabana, balance de agua.

ABSTRACT

Incident rainfall, throughfall, and deep drainage were monitored for two years at fortnightly or monthly intervals, in a permanent meadow (*Digitaria decumbens* Stent) and a corn/fallow plot, on a soil of the Barinas series (*Oxic tropustalf*), in the seasonal savanna area of the Western Venezuelan llanos. We also measured runoff in the corn/fallow plot. Results are expressed as per cent of incident rainfall. At meadow, rainfall interception attained a two year mean of 16.7% while the crop/fallow vegetation intercepted 13.5%. Stemflow in corn reached 5%. Runoff scarcely attained 2.1%, and deep seepage totalized 26.6% under grass and 40.5% under corn and weeds. The ecological significance of these figures for the water budget of both agroecosystems is discussed, as well as certain consequences of converting the natural savannas into managed grasslands and croplands.

KEY WORDS: Rainfall, interception, throughfall, runoff, drainage, pasture, maize, savanna, water budget.

INTRODUCCION

El flujo de agua a través de un ecosistema constituye uno de los aspectos fundamentales de su funcionamiento ya que no solamente determina la economía hídrica de la vegetación sino que también condiciona la economía del carbono y de los nutrientes minerales. Cuantificar las transferencias de agua entre los diferentes compartimientos de un ecosistema requiere un cuidadoso diseño experimental y mediciones repetidas durante períodos prolongados, pues los flujos de agua varían tanto temporalmente siguiendo las variaciones propias del clima, como a la marcada heterogeneidad espacial de la vegetación y del suelo.

La ecuación general del balance hídrico:

$$Pt = Int + Esc + D + E + T \pm \Delta S$$

donde Pt es precipitación, Int es intercepción, Esc es escorrentía, D es drenaje profundo, E es evaporación, T es transpiración y ΔS es la cantidad de agua almacenada en el suelo. A su vez la intercepción es igual:

$$Int = Pt - (Pe + Fc)$$

siendo Pe la precipitación efectiva y Fc el flujo caulinar. Pe representa la cantidad de agua de lluvia que alcanza la superficie del suelo directamente, sin haber sido interceptada por las superficies vegetales (Pe directa), más la que habiendo sido detenida por la vegetación posteriormente llega al suelo por goteo (Pe por goteo). Ambos componentes son medidos conjuntamente con pluviómetros colocados a nivel del suelo (pluviómetros efectivos). Si además hay Fc, es decir agua de lluvia que fluye por el exterior de ramas y

troncos alcanzando el suelo, la cantidad de agua que llega al suelo es igual a $Pe + Fc$.

Conocer la economía hídrica de un ecosistema implica determinar todos los términos de estas ecuaciones para cuantificar las entradas y salidas de agua del ecosistema.

De todos los componentes del balance hídrico, únicamente la precipitación incidente (Pt) es medida en las estaciones pluviométricas; la evaporación desde una superficie de agua se mide en las estaciones climáticas (evaporación en tanque A); mientras que los restantes términos requieren de dispositivos experimentales propios de investigaciones específicas y son por consiguiente mucho menos conocidos que los dos anteriores. En la mayor parte de los ecosistemas naturales y de los agroecosistemas, recién comienzan a analizarse y evaluarse parámetros como la intercepción, la transpiración, y las variaciones de la humedad del suelo. Esto trae como consecuencia que solo se hayan establecido relaciones empíricas muy generales sobre los factores que participan en estos procesos, como la relación entre la escorrentía superficial, la pendiente, la cobertura de la vegetación y el uso de la tierra (Chow 1964, Hillel and Hornberger 1979, Lal 1981); la relación entre el drenaje y las propiedades físicas del suelo (Black et al. 1969); o las características de las precipitaciones y de la biomasa vegetal que influyen sobre la intercepción (Rutter 1963, Calder 1977, Gash 1979, Aussenac and Boulangeat 1980, Nizinski and Saugier 1988).

La economía hídrica de los ecosistemas de sabanas estacionales y de sus especies dominantes herbáceas y leñosas comienza

a ser conocida (San José y Medina 1976, Sarmiento y Vera 1977, Goldstein et al. 1976, Goldstein y Sarmiento 1977), sin embargo, no ha sido analizado el impacto que sobre los componentes del balance hídrico tiene la transformación de la sabana original en cultivos y pasturas.

El objetivo del presente trabajo es cuantificar los componentes del balance hídrico en un cultivo anual (maíz) y en una pastura (pangola: *Digitaria decumbens*), no solo por su pertinencia para el

manejo de estos ecosistemas, sino también con el fin de poder compararlos con el funcionamiento de las sabanas originales bajo el mismo clima y sobre el mismo suelo, evaluando así las consecuencias a corto y largo plazo de esta transformación agrícola en términos de balance hídrico regional.

La Fig. 1 esquematiza el modelo utilizado para el análisis de los flujos de agua. De los procesos implicados hemos medido, con diferente grado de precisión y durante diferentes intervalos, la precipitación total, la precipitación efectiva, el flujo por los tallos, la escorrentía superficial, el drenaje vertical, la humedad del suelo, la evaporación y la transpiración. En este trabajo presentamos los resultados referentes a intercepción por la vegetación, la escorrentía superficial y drenaje vertical, en otro trabajo posterior discutiremos los resultados de humedad edáfica y evapotranspiración, intentando luego establecer balances hídricos por período de cultivo y por año, para compararlos posteriormente con el comportamiento de las sabanas originales.

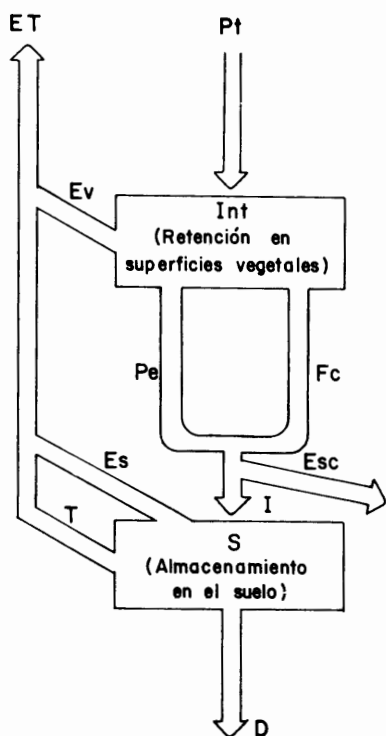


FIGURA 1. Modelo utilizado para el análisis de los flujos de agua a través de la vegetación y del suelo. Entradas: precipitación total o incidente (Pt); transferencias: precipitación efectiva (Pe), flujo caular (Fc), infiltración (I); salidas: evaporación desde las superficies vegetales (Ev), evaporación desde la superficie del suelo (Es), transpiración (T); evapotranspiración (Et); escorrentía superficial (Esc), drenaje profundo (D); reservorios: intercepción en las superficies vegetales (Int), almacenamiento de agua en el suelo (S).

METODOLOGIA

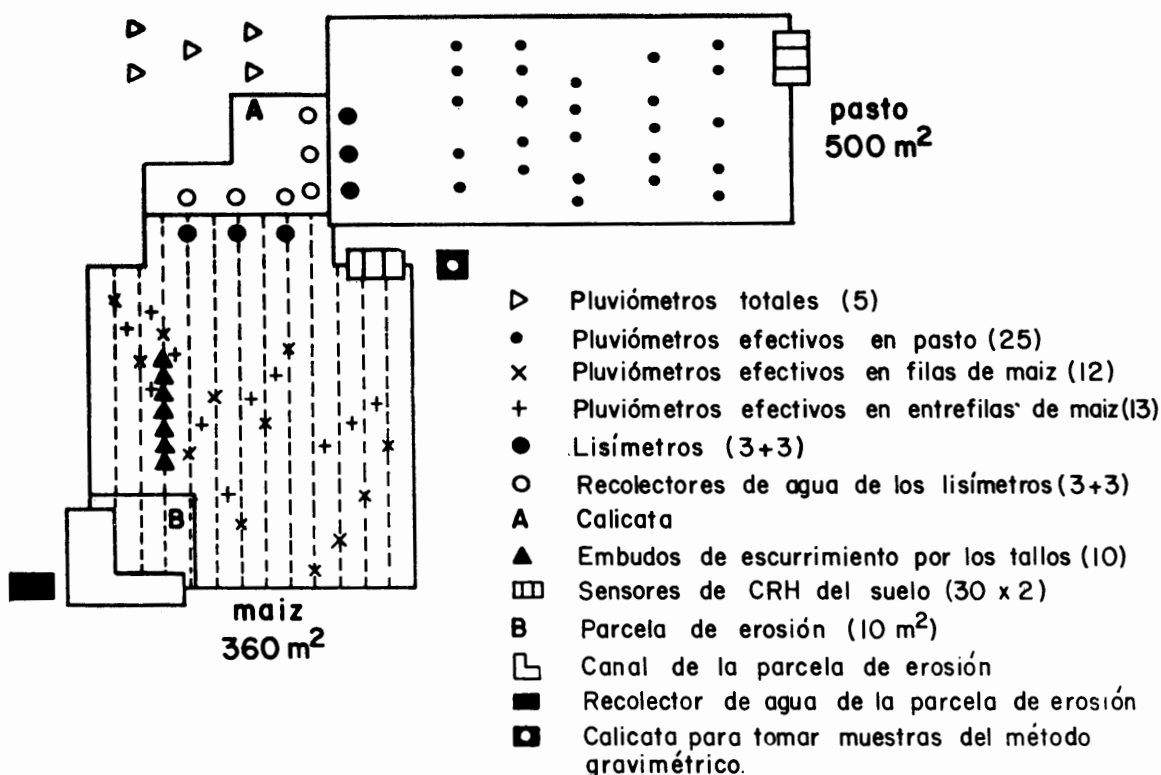
Se midieron los movimientos del agua en una parcela de maíz y otra de pangola (*Digitaria decumbens* Stent). Ambas se instalaron adyacentes en el área experimental del Jardín Botánico de la UNELLEZ, en Barinas.

El Jardín Botánico está localizado en una acumulación aluvial del Cuaternario medio (Q_2), de relieve muy plano, con pendientes locales inferiores al 1%. El suelo en las parcelas corresponde a la serie Barinas (Zinck y Stagno 1966), es

un *Tropustalf* óxico, de buen drenaje, textura franco - arenosa en superficie, haciéndose franco - arcillo - arenosa en profundidad, con bajo contenido de materia orgánica y baja fertilidad. Originalmente la vegetación natural era una sabana estacional con árboles dispersos (Sarmiento y Vera 1977).

La parcela de pasto, de 500 m², fue sembrada en mayo de 1986 con estolones de pangola provenientes del mismo Jardín Botánico. La parcela de maíz fue sembrada en 1986, a fines de mayo. Se sembraron 14 hileras de 30 m de largo, espaciadas 0,90 m, con 5 plantas por metro lineal,

lo que equivale a una densidad de 55.000 plantas/ha. En 1987, se repitió el mismo diseño de siembra. Para medir la precipitación total (Pt) se instalaron al borde de las parcelas 5 pluviómetros, a 150 cm de altura, fabricados con tubos de polivinilo de 10 cm de diámetro. Para medir la precipitación a nivel del suelo (Pe) se colocaron 50 pluviómetros del mismo tipo, enterrados de modo que la boca estuviera a 5 cm por encima del suelo. La mitad se colocó en la parcela de pasto, la otra mitad en la de maíz (Fig. 2). Como el pasto adquirió una cobertura relativamente homogénea, los



Distancia entre filas de la parcela de maíz = 0.90 m

Distancia entre plantas = 0.20 m

Densidad = 5.5 plantas/m²

FIGURA 2. Distribución del equipo de medición en las dos parcelas: pasto y maíz.

pluviómetros se dispusieron escogiendo 5 líneas al azar y colocando también al azar 5 pluviómetros sobre cada línea (Fig. 3). El área de captación de cada pluviómetro es de 89,3 cm² y consiste

de un tubo de Polivinilo cerrado en el fondo con un embudo que ajusta perfectamente en la boca un filtro, todo colocado dentro de otro tubo de diámetro mayor. De este modo, el tubo interior

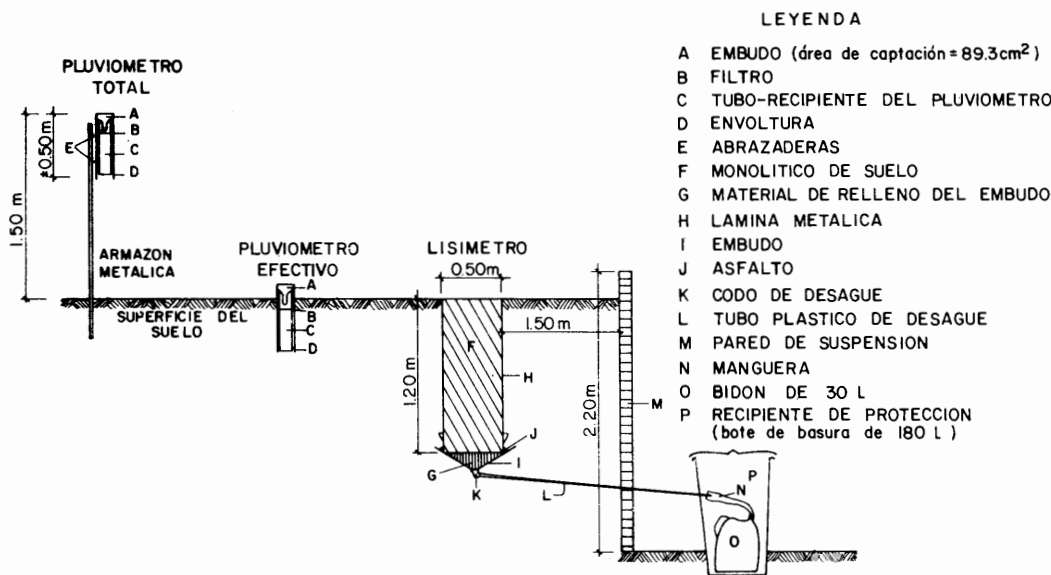


FIGURA 3. Descripción de los pluviómetros y lisímetros utilizados.

se puede retirar fácilmente para medir el agua recogida. Después de cada lectura se agregan unas gotas de parafina que forman una película delgada que impide la evaporación del agua recogida.

Como el cultivo de maíz ofrece una cubierta vegetal espacialmente heterogénea, 12 de los pluviómetros se distribuyeron al azar uno en cada fila, excluyendo las dos filas laterales. Los 13 pluviómetros restantes se dispusieron también al azar, uno en cada entrefila. De esta manera se cuantifica la precipitación que llega al suelo en función de la disposición espacial de las plantas de maíz (Fig. 2).

Para medir el flujo caulinar (Fc), una vez desarrolladas las plantas, se instalaron en diez plantas escogidas al azar en una fila del cultivo, dispositivos que recogen

el agua escurrida por los tallos en la base de los mismos. Alrededor de la base del tallo se construyó un embudo con una fina lámina de cobre, sellada en su parte interior con mastique, y cuyo borde superior quedaba separado 1 mm del borde del tallo. Una manguera plástica desagua el embudo en un recipiente enterrado cerca de la planta que recoge el agua de escurrimiento.

El drenaje vertical (D) fue medido en seis lisímetros instalados en grupos de tres, en uno de los bordes de cada parcela (Fig. 2). Los lisímetros son cilindros de acero, introducidos a presión en el suelo de manera gradual (Roose 1979 y 1981). Cada lisímetro tiene una superficie de 0,25 m², sobresale unos 5 cm de la superficie del terreno y llega a 1,20 de

profundidad. El agua que drena a través del suelo intacto dentro del lisímetro es recogida mediante un embudo metálico ajustado herméticamente a la base del cilindro y luego es conducida a través de una tubería hasta un bidón colocado en un foso de 3 m de profundidad cavado en el borde de las parcelas (Fig. 3). El drenaje obtenido subsuperficialmente no se midió considerando que su participación en el drenaje total es insignificante (Roose 1979).

La escorrentía superficial (Esc) fue medida en una parcela de erosión (Roose 1981) de 10 m² aislada, dentro de la parcela de maíz, con una lámina plástica de 30 cm de ancho, la mitad enterrada en el suelo. En la parte más inclinada de la parcela, un canal de polivinilo techado recoge el agua y la dirige a un foso donde es almacenada en dos bidones, conectados entre sí de modo que el primero sirva como trampa de sedimentos.

Todas las lecturas en el campo se realizaron a intervalos de aproximadamente 15 días durante la estación de lluvias y de 30 días en la época seca. Periódicamente se determinó la biomasa aérea total y el índice de área foliar del pasto y del maíz mediante 3 cuadrados de 1 m², distribuidos al azar en el caso del pasto, y escogiendo cinco plantas al azar en el caso del maíz. El área foliar fue medida con un medidor de área foliar (LI-Cor 3000). La biomasa cosechada de pasto en cada corte se midió en 6 cuadrados de 1 m².

Cada vez que el pasto alcanzaba suficiente desarrollo como para no sufrir con el corte era cortado a machete a 10 cm de altura y, la cosecha sacada de la parcela como si fuese una pastura de

corte. Después de cosechar el maíz, el rastrojo fue cortado, picado a machete y posteriormente enterrado. Este procedimiento se realizó porque también se deseaba determinar la economía de nutrientes con este tipo de manejo que incorpora el rastrojo al suelo en lugar de quemarlo. Los lisímetros de maíz, después de incorporarles el rastrojo se mantuvieron siempre libres de malezas, es decir con el suelo desnudo. Por el contrario, en la parcela se desarrolló una cubierta abierta e irregular de malezas. De modo que la Pe refleja las condiciones de la parcela, al igual que la escorrentía, en cambio el drenaje vertical corresponde a los lisímetros con suelo desnudo y sin escorrentía. La siembra del maíz se hizo a mano cada año, para evitar que el tractor dañara los instrumentos.

RESULTADOS

Precipitación total

La precipitación incidente o total (Pt) fue medida durante dos años consecutivos, desde el 28/05/86 al 01/06/88, abarcando en el caso del cultivo de maíz dos ciclos agrícolas de cultivo - rastrojo. En la Tabla 1 aparecen los resultados de todo el período de medición, de cada año agrícola y de los correspondientes períodos de cultivo de maíz y de rastrojo.

Como los intervalos de lectura de los pluviómetros variaron entre 14 y 30 días, en la Tabla 1 se expresan también los correspondientes totales en mm/día de precipitación. La Fig. 4 indica la repartición de las lluvias en mm/día durante todo el período de mediciones.

Tabla 1. Precipitación total (Pt), precipitación efectiva (Pe), flujo caular (Fc) e intercepción (Int), en diferentes intervalos durante el período de mediciones. Todas las variables están expresadas en mm a menos que se indique de otro modo.

	28-05-86 al 21-05-87 (359 días)		21-05-87 al 01-86-88 (376 días)		28-05-86 al 01-06-88 (735 días)		Maíz		Rastrojo	
							28-05-86 al 15-10-86 (142 días)	21-05-87 al 08-10-87 (139 días)	15-10-86 al 21-05-87 (217 días)	08-10-87 al 01-06-88 (237 días)
Pt	1720,9	1493,6	3214,5	1191,6	896,3	529,3	597,4			
Pe pasto	1413,7	1265,5	2679,2	958,6	741,8	455,1	533,7			
Pe maíz (% Pt)	82,1	84,7	83,3	80,4	82,8	86,0	87,7			
Pe maíz (filas - entre f)	1476,4	1143,7	2620,1	966,1	584,4	510,3	555,3			
Pe maíz (% Pt)	85,8	76,6	81,5	80,4	65,6	96,4	93,0			
Fc maíz	78,2 ^a	83,5 ^b	161,7	78,2 ^a	83,5 ^b					
Fc maíz (% Pt)	4,5	5,6	5,0	6,6	9,3					
Int pasto	307,2	228,1	535,3	233,0	154,5	74,2	73,7			
Int pasto (% Pt)	17,9	15,3	16,7	19,6	17,2	14,0	12,3			
Int maíz	166,3	266,4	432,7	147,3	224,4	19,0	42,1			
Int maíz (% Pt)	9,7	17,8	13,5	12,4	25,0	3,6	7,0			

^aA partir del 02-07-86

^bA partir del 16-07-87

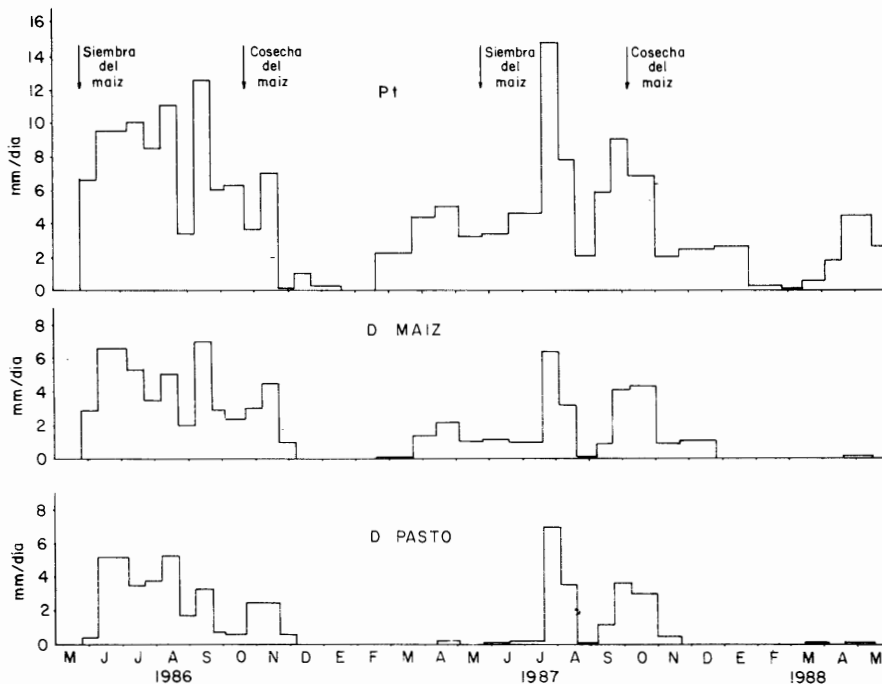


FIGURA 4. Variación de la precipitación total (Pt) y del drenaje (D), en mm/día, durante los dos años de mediciones. Se indican las fechas de siembra y cosecha.

La precipitación anual medida en la estación Barinas - Aeropuerto, situada a 5 km en línea recta de las parcelas experimentales, fue durante el período 1975-86 de $1629,2 \pm 270$ mm. Nuestras mediciones, aunque no corresponden al año calendario, sugieren un total anual equivalente, con el primer período anual 100 mm por encima de la media interanual, mientras el segundo presentó 140 mm por debajo de este promedio. Por otra parte la lluvia en las parcelas no fue significativamente diferente de la registrada durante los mismos períodos en la estación Barinas - Aeropuerto.

En la Fig. 4 puede apreciarse claramente la estacionalidad de las lluvias característica de este clima de sabana tropical. Diciembre, Enero, Febrero y Marzo son normalmente secos. En el verano o período seco del 1986-1987, la lluvia total apenas alcanzó los 100 mm, en tanto que en el 1987-1988 no llegó a 200 mm. La estación de lluvias se extiende entonces desde Abril hasta Noviembre, de modo que el período de cultivo de maíz (Mayo -Octubre) se sitúa enteramente durante esta estación favorable. Es notable la alta pluviosidad durante estos meses de "invierno" caracterizados por largos intervalos con lluvias diarias promedio por encima de 6 mm, como también quincenas donde llovió más de 10 ó 12 mm por día (Fig. 4).

Los 5 pluviómetros instalados entre las dos parcelas permitieron tener una idea de la precisión de los datos pluviométricos. A lo largo de todo el período se obtuvieron en cada pluviómetro lecturas ligeramente diferentes entre sí, aunque el rango de variación de cada fecha se mantuvo siempre por debajo del 5% de la media respectiva. Estas diferencias en

las lecturas de pluviómetros adyacentes son seguramente debidas a la acción del viento durante los eventos pluviales.

Precipitación efectiva, flujo caulinar e interceptación

En la parcela de pangola la Pe alcanzó en los años de mediciones un promedio del 83,3% de la Pt (Tabla 1). Aunque las variaciones en las cantidades interceptadas durante los dos años son importantes, la Pe relativa es más bien constante (82 a 85% de la Pt). La interceptación relativa es algo menor durante el período menos lluvioso, correspondiente a la fase rastrojo en el ciclo de cultivo, bajando a 12-14% de la Pt. En el maíz la interceptación varió bastante de un año a otro: 9,7 y 17,8% de la Pt respectivamente, produciéndose la mayor parte de la interceptación anual durante el desarrollo del cultivo, mientras que las malezas que le suceden apenas interceptan las lluvias: 3,6 y 7,0% de la Pt en los respectivos períodos.

El flujo caulinar por los tallos del maíz alcanzó cantidades significativas, del orden de los 80 mm por período de cultivo, lo que representa entre el 6,6 y el 9,3% de las lluvias en esos períodos. Sin embargo estas medidas subestiman el valor real del flujo caulinar. Para medirlo, se colocaron al pie de cada planta seleccionada recipientes de 2 litros de capacidad, que en algunas ocasiones también se llenaron, por lo cual se utilizaron recipientes de 4 lt. Sin embargo en el cálculo del flujo caulinar se tomaron estas lecturas de 2 y 4 litros, cuando realmente el flujo fue mayor, de manera que el Fc total durante el período de crecimiento del maíz

posiblemente este próximo a los 100 mm. De modo que del agua que llega al suelo en las parcelas de maíz durante los dos períodos de cultivo, entre el 10 y el 20% corresponde al flujo caulinar y el resto la Pe.

En cuanto a la heterogeneidad espacial de la Pe en el maíz la diferencia es significativa, siendo la Pe medida entre las filas del cultivo del 10 al 20% mayor que en las filas. Es decir, con la distancia entre filas utilizada (90 cm), la concentración de la biomasa aérea es mayor en las filas, lo que induce una menor Pe.

Probablemente disminuyendo esta distancia a 50 ó 60 cm, el efecto fila - entrefila desaparezca. Pero aún con 90 cm, si sumamos la Pe en filas con el Fc, se obtiene un valor equivalente a la Pe entre las filas.

Escorrentía superficial

La Tabla 2 presenta los totales de la Esc en varios períodos de tiempo, en tanto que la Fig. 5 muestra la variación anual del proceso y lo compara con la fluctuación de las precipitaciones. Siguiendo a Roose (1981), expresaremos la cantidad anual de

Tabla 2. Escorrentía superficial (Esc) y drenaje profundo (D) en diferentes intervalos de tiempo durante el período de mediciones. Todas las variables están expresadas en mm a menos que se indique de otro modo.

			Maíz		Rastrojo		
	28-05-86 al 21-05-87 (359 días)	21-05-87 al 01-06-88 (376 días)	28-05-86 al 01-06-88 (735 días)	28-05-86 al 15-10-86 (142 días)	21-05-87 al 08-10-87 (139 días)	15-10-86 al 21-05-87 (217 días)	08-10-87 al 01-06-88 (237 días)
Esc	32,2 ^a	34,0 ^b	66,2 ^a	21,6 ^a	18,7	10,6	15,14 ^b
Esc (% Pt)	1,9	2,3	2,1	1,8	2,1	2,0	2,6
D pasto	517,9	336,2	854,1	387,4	248,5	130,5	87,7
D pasto	30,1	22,5	26,6	32,5	32,3	24,6	12,1
D maíz - rastrojo	851,1	450,0	1301,1	560,1	284,9	291,0	165,1
D maíz - rastrojo (% Pt)	49,5	30,7	40,5	47,0	31,9	54,9	22,8

^aDesde el 16-07-86, es decir son 309 días de medida en el primer año, de los cuales 92 días en el período de cultivo del maíz,

^bHasta el 19-05-88, es decir 363 días en el año y 224 días durante el período rastrojo-maleza.

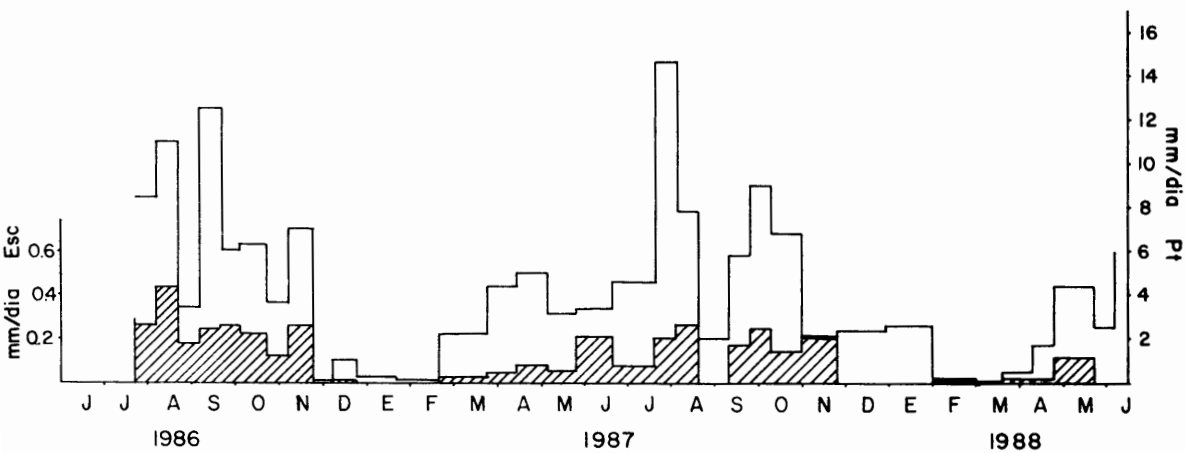


FIGURA 5. Variación de la precipitación total (Pt) y de la escorrentía superficial (Esc) en la parcela de maíz/barbecho en mm/día, durante los dos años de mediciones ($r = 0,78$).

agua que fluye sobre la superficie del suelo como porcentaje de la Pt, lo que Roose denomina Coeficiente de Escorrentía Anual Medio (CEAM), igualmente se utiliza el coeficiente de escorrentía máximo (CEMax), también como porcentaje de la Pt.

Los valores obtenidos son muy bajos ya que la escorrentía superficial solo representa alrededor del 2% de la Pt (CEAM = 2). No existen grandes diferencias entre años ni entre los diferentes períodos de medición.

En la Fig. 5 se evidencia la dependencia de la Esc con la Pt ($r = 0,78$). En general la Esc se mantuvo por debajo del 5%, alcanzando durante la estación seca un CEMax de 9% (11,6% de la Pe), pero ya después de la cosecha de maíz, cuando el suelo estaba apenas protegido por las malezas. La Esc relativa aumenta ligeramente durante este período seco, quizás a causa del endurecimiento de la superficie del suelo provocado por el impacto de las lluvias, que aunque de poca magnitud, encuentran un suelo casi desprovisto de protección vegetal.

Drenaje

La Fig. 4 y la Tabla 2 presentan los resultados del drenaje medido en los lisímetros. La primera comprobación de importancia es que en el maíz el drenaje durante todo el año es bastante superior al medido en los lisímetros con pasto (40,5% vs 26,6% de la Pt en el promedio de 2 años). Estas diferencias se acortan durante el año más seco. La diferencia en el drenaje entre ambos tipos de cobertura vegetal se mantiene aún si se consideran únicamente los períodos de cultivo de maíz, aunque la diferencia frente al pasto se acentúa por supuesto durante el período en que el suelo permanece desnudo.

Es interesante notar que durante todo el año el drenaje en el maíz/suelo desnudo es mayor que en el que justamente corresponde al pico del desarrollo de la biomasa verde del cultivo, sugiriendo una mayor evapotranspiración, mayor interceptación y por ende menor drenaje.

En cuanto a la extensión del período del ciclo anual cuando el drenaje vertical resulta cuantitativamente importante, puede

observarse en la Fig. 4, que bajo ambos tipos de cobertura vegetal, el drenaje comienza a ser notable recién hacia finales de Mayo o mediados de Junio, es decir de dos a tres meses después del inicio de la estación lluviosa. El drenaje comienza antes bajo suelo desnudo que bajo pasto por el efecto de la vegetación, transpiración e intercepción, aunque las cantidades drenadas durante los primeros meses de la estación lluviosa son pequeñas aún en el caso del suelo desnudo. Anualmente el drenaje deja de ser cuantitativamente importante en Noviembre, en seguida después de finalizar las lluvias, pero también el suelo desnudo drena más, o durante un tiempo mas prolongado, que el suelo bajo pasto.

Esto significa que para alcanzar la máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo hasta 120 cm de profundidad (~ 200 mm) lleva poco mas de un mes en el caso del suelo desnudo, mientras que bajo una cubierta herbácea tarda tres o cuatro meses durante los cuales recibe casi 450 mm de precipitación total.

DISCUSION

Precipitación efectiva e intercepción

Las Figs. 6 y 7 muestran la marcha de la intercepción relativa en ambas parcelas durante todo el período de mediciones. También se ha representado la variación respectiva en la biomasa aérea

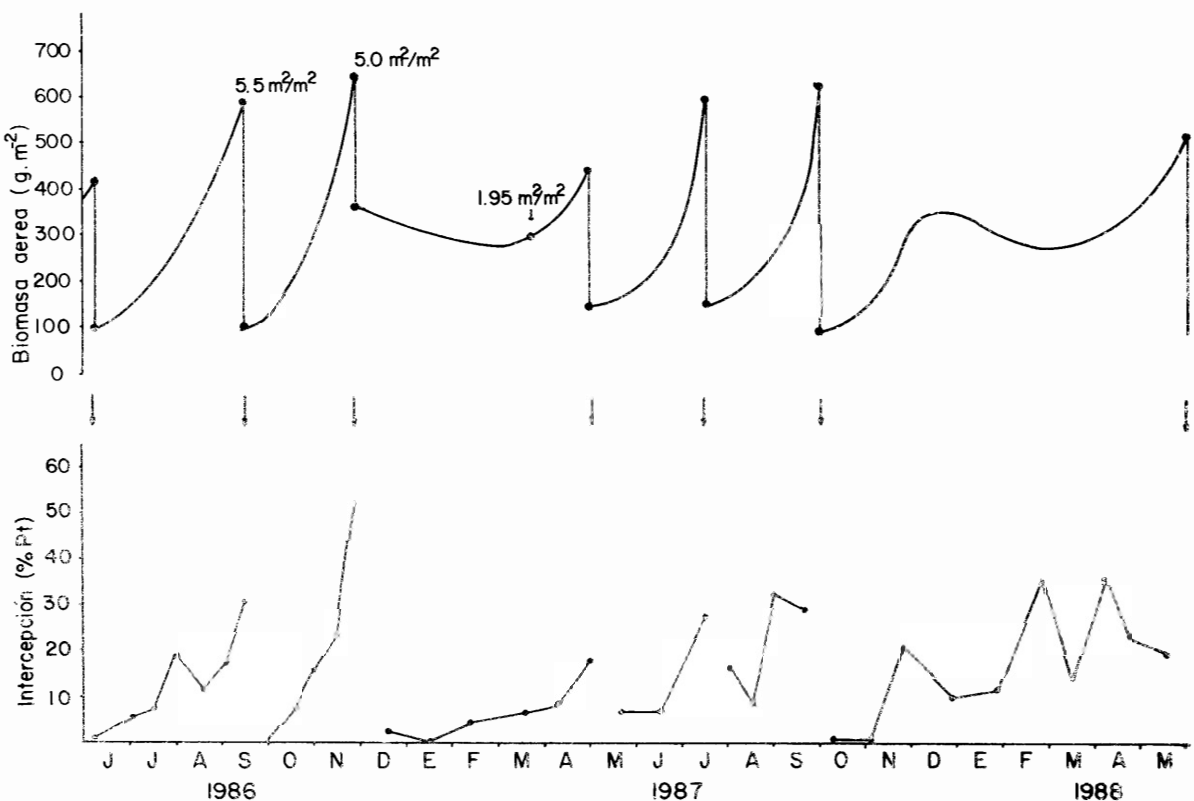


FIGURA 6. Dinámica de la intercepción (como % de Pt) y de la biomasa aérea en el pastizal de *Digitaria decumbens*. Se indican las fechas de corte (↓) y los valores de ISF.

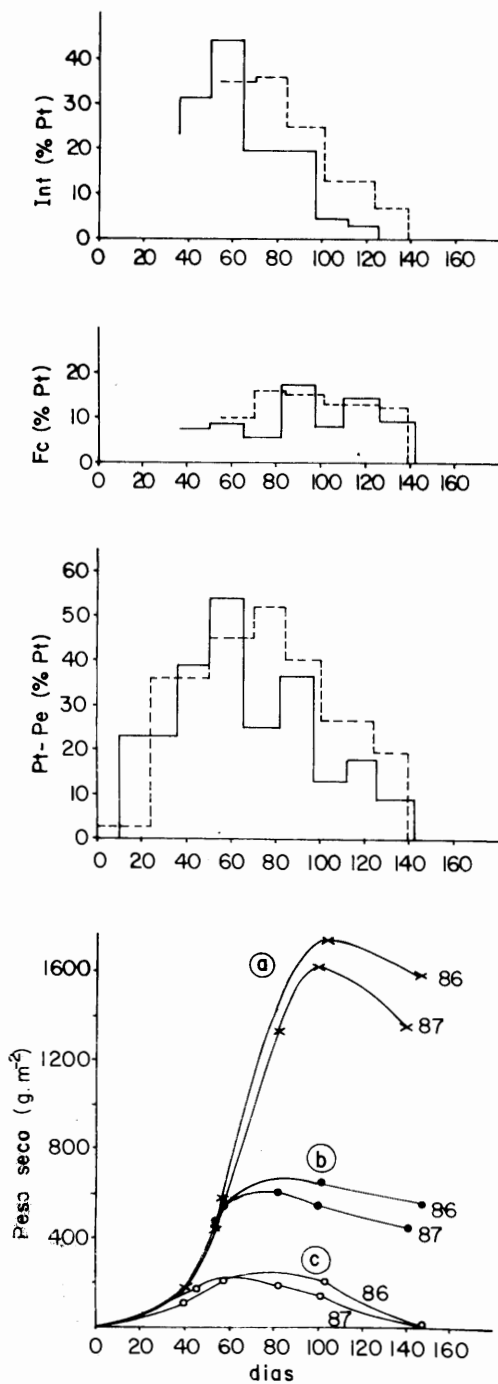


FIGURA 7. Dinámica de la biomasa aérea del maíz, la relación $Pt-Pe/Pt$, el flujo caulinar (Fc y la intercepción Int). Cambios en la biomasa: a) biomasa aérea total; b) biomasa de tallos, hojas e inflorescencias masculinas; c) biomasa de láminas foliares verdes.

de la vegetación. Comenzando con la intercepción en la parcela de pangola (Fig. 6), se han indicado las fechas del corte del pasto.

La tendencia de la intercepción aparece claramente en la Fig. 6, aumentando desde un mínimo inmediatamente después de cortado el pasto hasta valores máximos en el momento anterior al próximo corte. Únicamente durante la estación seca, particularmente la de Diciembre 1987 a Abril 1988, esta tendencia de la intercepción con respecto a la biomasa no es evidente. Si comparamos las variaciones anuales de la intercepción con el desarrollo de la biomasa aérea total del pasto (verde mas seca), la relación aparece a primera vista, especialmente durante los meses lluviosos. Durante la estación seca, la pangola sufre severas limitaciones hídricas, la mayor parte de la biomasa aérea muere, lo que modifica le relación entre biomasa e intercepción, probablemente debido a que el comportamiento de la necromasa difiere del de la biomasa verde. Aunque solo tenemos tres valores de área foliar, su relación con la intercepción no parece ser lineal, sugiriendo que también los tallos y las inflorescencias que forman mas de la mitad de la biomasa aérea, participan activamente en la intercepción de las lluvias.

En el caso de la parcela de maíz, la precipitación que interceptada por la vegetación no llega a los pluviómetros efectivos ($Pt - Pe$) siguió durante los dos períodos de cultivo el mismo patrón (Fig. 7), con un rápido incremento durante los primeros 70 días de crecimiento de las plantas, para disminuir luego hasta la fecha de cosecha, es decir durante los 60 o 70 días restantes. La relación

con el desarrollo de la biomasa durante la primera de estas dos fases es evidente, pero en la segunda fase el crecimiento aéreo del maíz (órganos vegetativos) resulta menos marcado que el de la intercepción. La explicación probablemente es la misma que en el caso del pasto durante la estación seca, ya que después de alcanzar un pico de biomasa total y de biomasa verde, el cultivo de maíz muestra no solo un decrecimiento de la biomasa total del tallo y hojas, sino que gran parte del follaje se va secando hasta encontrarse totalmente seco en el momento de la cosecha. Estas hojas muertas interceptan mucho menos las precipitaciones que el follaje verde, debido a su misma disposición espacial y a la falta de turgor. Igualmente comprobamos que la dependencia de la Pt - Pe con respecto a la biomasa aérea total (vegetativa mas reproductiva) no es evidente, por la influencia predominante de las mazorcas en la biomasa total durante la maduración de los granos; tampoco se relaciona muy estrechamente con la biomasa total, lo que indica el papel activo jugado por los tallos.

El flujo caulinar (Fig. 7) sigue un patrón similar al de la intercepción, acompañando el desarrollo y la declinación de las superficies verdes y los tallos. Es decir que al desarrollarse el maíz, la cantidad de agua retenida y evaporada desde su superficie se incrementa, pero en compensación también aumenta el Fc, de manera que el agua que alcanza el suelo no disminuye tan fuertemente como en el caso del pasto.

Tanto en el pasto como en el maíz, la intercepción es insignificante cuando la biomasa aérea total es inferior a los 100 ó 150 g/m², es decir durante los

primeros 15 días después del corte en el caso de la pangola y las tres primeras semanas después de la siembra del maíz. En tanto que alcanza valores del 30% de la Pt o aún superiores, cuando la biomasa supera los 400-500 g/m², con un ISF del orden de 5. Los valores mas altos registrados en este estudio (50% en pasto y maíz), en ambos casos con una biomasa de 650 g/m², pero en este último considerando solamente (Pt-Pe), representa una reducción muy significativa de la cantidad de agua de lluvia que alcanza la superficie del suelo, aunque en el maíz parte del agua retenida en las superficies vegetales llega al suelo vía flujo caulinar (15-18% de la Pt en el momento del mayor desarrollo del cultivo).

Otro aspecto que puede esclarecer la relación entre precipitación efectiva y vegetación, se basa en el análisis de la heterogeneidad espacial del fenómeno, detectada mediante nuestro diseño de muestreo. Ya mencionamos cómo en el maíz, aparecen diferencias significativas determinadas por el dispositivo de siembra en hileras. Pero tanto en el pasto como en maíz, se detecta otra heterogeneidad espacial mas aleatoria debido al mismo desarrollo de la cubierta vegetal.

La dispersión estadística de las medidas de Pe (Coeficiente de variación, CV), aumenta notablemente con el desarrollo de la biomasa aérea (Figs. 8 y 9). En el pasto, el patrón es bastante claro, excepto quizás en la estación seca donde como ya mencionamos cambia la calidad de la biomasa debido a la alta mortalidad. En el maíz la curva del CV sigue fielmente la intercepción y refleja también la evolución de la biomasa viva. Es decir, en los dos ecosistemas la heterogeneidad

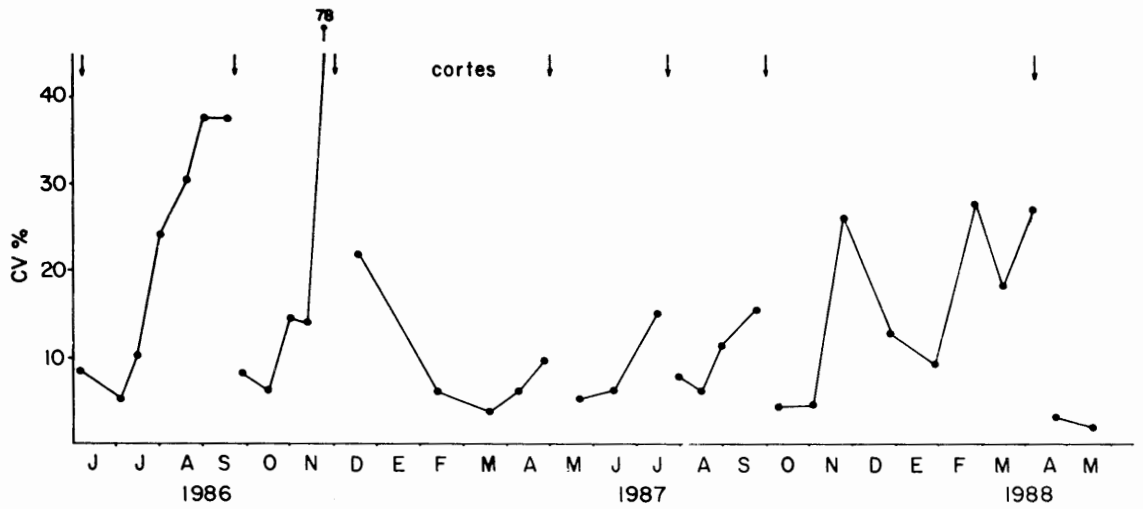


FIGURA 8. Cambios del coeficiente de variación de la precipitación efectiva (CV %) en la parcela de *Digitaria decumbens*. Se indican las fechas de corte.

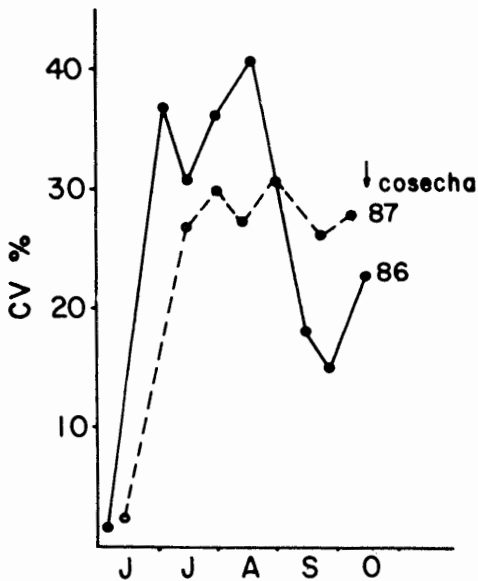


FIGURA 9. Cambios del coeficiente de variación de la precipitación efectiva (CV %), en el cultivo de maíz, durante los dos ciclos de cultivo. Resultados basados en 25 pluviómetros, 12 en filas y 13 en entrefilas.

ha alcanzado un desarrollo mínimo, la intercepción es baja y su variabilidad espacial insignificante. Al aumentar el biovolumen de vegetación, aumenta la intercepción y se hace más heterogénea, con una variabilidad espacial de tipo aleatorio reflejada en coeficientes de variación del orden de 30 ó 40%.

Otro aspecto a mencionar es la dependencia de la P_e con respecto a otras características de la P_t además de la cantidad, la frecuencia de los eventos y la intensidad de los mismos. En la literatura (Jackson 1971, Nizinski y Saugier 1988) se encuentran relaciones lineales entre P_t y P_e por encima de un cierto umbral mínimo, así como relaciones de tipo exponencial entre intensidad e intercepción (Rutter 1963, Benecke 1976), con un valor máximo de intercepción que se estabiliza por encima de cierta intensidad, equivalente a la capacidad máxima de retención de las superficies vegetales. Estos modelos son válidos, para una cubierta vegetal que no cambie

espacial de la intercepción está directamente relacionada con el valor de la misma y con la biomasa o superficie interceptante. Cuando esta superficie no

significativamente durante el año (bosques perennifolios) o al menos durante la estación de crecimiento (bosques decídúos). Así Nizinski y Saugier (1988) encuentran para un bosque decídúo templado de robles, la relación:

$$Pe \text{ (mm)} = 0,73 Pt \text{ (mm)} - 2,62$$

para el período en que los árboles tienen su follaje. Es decir que cuando la $Pt = 3,22$ mm, la Pe es nula, representando entonces esta cantidad la máxima retención posible de lluvia por la cubierta vegetal. Estos autores proponen un modelo de la intercepción, donde además de tomar en cuenta el flujo caulinar y la intercepción por la hojarasca en el suelo, introduce como variable el ISF, obteniendo buenas equivalencias entre los valores que predice el modelo y los valores medidos.

En el presente estudio no podemos relacionar la intercepción con la Pt ni con su intensidad, ya que el factor determinante es la variación en la biomasa de la vegetación. Vale la pena a este respecto comparar la magnitud de este proceso en ecosistemas con características estructurales y funcionales muy diferentes como bosques y comunidades herbáceas por un lado y ecosistemas templados y tropicales por otro lado.

El proceso de intercepción ha sido mucho más estudiado en bosques que en pastizales y cultivos herbáceos, quizás con la asunción implícita de que el proceso no era tan importante en estos últimos ecosistemas como en los bosques, los que dada su biomasa mucho mayor debían naturalmente constituir una barrera más significativa interpuesta entre la atmósfera y el suelo. Existen varias revisiones de

la literatura sobre intercepción en bosques templados (Helvey and Patric 1965, Leyton et al. 1967), así como trabajos más recientes donde se cuantifica la intercepción en bosques de coníferas, bosques deciduos templados y formaciones siempre verdes mediterráneas (Rapp and Romane 1968, Anderson and Pyatt 1986, Aussenac and Boulangeat 1980, Gash et al. 1980, Pontailier et al. 1988). Los valores encontrados oscilan del 9 al 35% de la Pt , mientras que en los bosques de conífera la intercepción anual puede ser algo mayor que en los de hojas anchas (Nizinski y Saugier 1988).

La información existente sobre bosques tropicales es muy limitada y en general los valores son menores a los reportados para la zona templada (Kline et al. 1968, Mc Ginnies et al. 1969, Roose 1979, Lawson et al. 1981). Los valores menores en bosques tropicales pueden deberse por una parte a la alta precipitación anual, lo que disminuye el porcentaje interceptado y por otra parte, a que una alta proporción de la lluvia total ocurre en pocos eventos de alta intensidad y volumen.

Es difícil saber la representatividad de estas cifras pero en cualquier caso es evidente que la intercepción en formaciones forestales templadas y tropicales es cuantitativamente importante en el balance hídrico de los respectivos ecosistemas, alcanzando cifras tan altas como el 35% de la Pt .

La información disponible sobre intercepción en ecosistemas herbáceos es más limitada. Clark (1940) en su estudio sobre praderas, malezas y cultivos en Nebraska, USA demuestra la dependencia directa de la intercepción con la intensidad de las lluvias. También encontró que tanto

bajo cobertura de gramíneas nativas de la pradera como de cultivo, la intercepción durante la fase de máximo desarrollo de la biomasa aérea alcanzaba valores tan altos como el 25 a 50% de la Pt con intensidades fuertes mientras que con lloviznas suaves (0,5 a 1,5 mm/hora) la Int llegaba a valores del 70 al 95% de la Pt.

Pareciera que la intercepción en formaciones herbáceas tanto de ecosistemas naturales como de cultivos, es tanto o mas elevada que en bosques, al menos durante las fases o períodos de alto desarrollo de la cobertura y de la biomasa aérea. Por supuesto, en el caso de pastizales de actividad muy estacional, activos únicamente algunos meses del año o de cultivos anuales de ciclo corto, la intercepción anual disminuye en relación a un bosque siempreverde o aún a un bosque decídúo.

En nuestro caso, la relación entre intercepción y biomasa para los dos agroecosistemas es clara, siendo la Pe en el maíz menor que en la especie de pasto utilizada, aunque la proporción de la Pt que llega al suelo es similar en ambas especies debido al flujo caulinar en el maíz. A este respecto conviene aclarar que de acuerdo a los datos que presenta Clark (1940), en algunas especies como el maíz, la alfalfa o la soya, el flujo caulinar es importante, mientras que en otras como el trigo, la cebada o algunas gramíneas de igual forma de crecimiento, no se evidencia este fenómeno del flujo por los tallos.

Escorrentía superficial

Al presentar los resultados observamos como la escorrentía superficial en la parcela

de cultivo, medida en una microparcela de erosión de 10 m², resultó sumamente baja, del orden del 2% de la Pt (CEAM) o del 2,5% de la Pe. En la época seca ya con el suelo poco cubierto, los valores aumentan levemente, hasta alcanzar un CEmax de 9 (10,5% de la Pe). De cualquier forma durante este período las precipitaciones disminuyen, de manera que el volumen de agua de escurrimiento se mantiene bajo, influyendo apenas en la economía hídrica del ecosistema.

Estos bajos valores de escorrentía pueden relacionarse en primer lugar con la cubierta vegetal y con el tratamiento del suelo después de la cosecha. En efecto, el suelo durante el desarrollo del maíz queda bien protegido por la cubierta herbácea que llega a alcanzar índices de área foliar de mas de 5. Después de la cosecha el rastrojo en pie se cortaba y picaba a machete, incorporándolo luego al suelo con el doble propósito de facilitar el reciclado de los nutrientes contenidos en la necromasa y de mejorar las condiciones físicas del suelo. De este modo, mejorando la estructura, la permeabilidad se mantuvo alta, solo esporádicamente la baja cobertura vegetal (malezas) condujo a cierto compactamiento, alcanzando entonces mayor Esc y el CEmax. Otro factor importante sin duda es la pendiente reducida así como las grandes longitudes de las vertientes, características ambas que tienden a disminuir fuertemente la escorrentía.

Podemos comparar nuestros resultados con los de Roose (1981) obtenidos con parcelas de erosión en la Costa de Marfil en un medio sabánico similar. A pesar del alto índice de agresividad en este clima sabánico fuertemente estacional, se

obtuvieron en condiciones de cultivo de maíz o de sorgo, con pendientes del 0,7 al 4%, CEAM entre 15 y 30, en función de la precipitación total, con valores más altos en los años más húmedos. En cambio en rastrojos, con la técnica de enterrarlos después de la cosecha, los CEAM variaron de 5 a 8. Nuestros valores en Barinas, aún más bajos, pueden explicarse quizás por las menores pendientes ($< 1\%$), probablemente una agresividad de las precipitaciones algo menor y un mejor manejo del cultivo y de la parcela después del cultivo. Roose enfatiza que de todos los factores que regulan el escurrimiento y también la erosión, el más importante es la cobertura del suelo, sea por la vegetación o por el mantillo, que en ambos casos cumple el rol fundamental de disminuir la energía cinética de las gotas de lluvia. Roose (1981) demuestra que el efecto sobre la energía cinética de la lluvia de una selva de 40 m de altura o de una cubierta de hojarasca de 2 cm es similar.

Algunos autores han determinado que únicamente se produce una escorrentía significativa conducente a importantes pérdidas de suelo cuando la intensidad de las precipitaciones supera cierto umbral relativamente elevado. Así por ejemplo Maass et al. (1988) en un estudio sobre erosión y pérdida de nutrientes en pastizales de ladera y cultivos de maíz en Jalisco, México, con pendientes de $22,5^\circ$, toman un umbral de 30 mm por evento como desencadenante de escorrentía y erosión. Aunque nosotros no tenemos medidas directas de la intensidad de la lluvia, podemos usar como una aproximación los valores diarios de la estación Barinas - Aeropuerto que

como ya dijimos presenta un régimen pluviométrico similar al de las parcelas del Jardín Botánico. Así en 1986, primer año de nuestras mediciones, el 63% de la Pt en la estación Barinas se produjo en eventos diarios con lluvia superior a 20 mm, en tanto que hubo 7 días con precipitación superior a 50 mm, cuando cayó el 28% del total anual de lluvias. Estos valores son similares a los valores medios para el período 1977-86.

Es decir, el régimen de precipitación en la región de Barinas y, posiblemente también en el resto de los Llanos Occidentales, se caracteriza porque una proporción elevada de la lluvia anual se produce en pocos eventos diarios de alta intensidad. Solamente durante los 4 meses secos, el volumen de precipitación en eventos mayores de 20 mm disminuye significativamente con respecto al de la estación lluviosa. Por otra parte, los eventos de distinta intensidad se distribuyen regularmente durante todos los meses de la época de lluvias. Por consiguiente, aún si la escorrentía se relacionara con eventos de alta intensidad, la relación Esc/Pt se mantendría y ocultaría la dependencia con la intensidad. Sin embargo, el leve incremento de la Esc durante la estación seca, cuando los eventos de intensidad superior a 20 mm/día solo representan el 24% del total de las lluvias del período, pareciera sugerir que en nuestro caso, de haber un umbral mínimo por debajo del cual no hay escorrentía, este umbral tendría que ser relativamente bajo, no superior a los 5 mm/día. Posiblemente, para producir una erosión hídrica significativa el umbral sea mayor.

No se midió la escorrentía superficial en la parcela de pasto, con la hipótesis

de que la escorrentía sería mínima en el maíz y aún menor en pasto, por tener una mayor cobertura vegetal durante todo el ciclo anual. Los resultados obtenidos, tanto durante el período de desarrollo del cultivo como durante los muchos meses en que el suelo permaneció bajo una cobertura abierta de malezas, refuerzan la idea de que la escorrentía en pasturas permanentes bien manejadas, en las condiciones de pendientes muy débiles de los Llanos Occidentales, debe ser prácticamente despreciable dentro de la economía hídrica de estos ecosistemas.

Drenaje

En el pasto, durante los dos años de mediciones, una cuarta parte del agua de lluvia (algo más del 30% de la P_e) atraviesa 120 cm de suelo drenando hacia niveles más profundos, más allá del alcance de las raíces de las gramíneas. Estas proporciones son algo mayores en años relativamente lluviosos y un poco más bajas en años más secos.

Esta cantidad de agua (300 a 500 L/m^2) no es utilizada directamente por el pastizal, continuando en cambio su paso a través del ciclo hidrológico hacia las aguas subterráneas o hacia la red de drenaje superficial. Si comparamos con la situación en la sabana original que cubría estos suelos antes de su conversión en pasturas y cultivos, podemos deducir que se han producido alteraciones drásticas en el balance hídrico. En efecto, la sabana estacional como ecosistema de estructura mixta con una cubierta gramínea continua y un estrato arbóreo abierto (Sarmiento 1984) utiliza más exhaustivamente los recursos hídricos disponibles, ya que además de la utilización del agua de los

niveles superiores del suelo por parte de las gramíneas y otras plantas herbáceas, las leñosas siempreverdes de radicación profunda usan el recurso hídrico almacenado en los niveles inferiores más allá del alcance del estrato herbáceo (Sarmiento et al. 1985, Goldstein y Sarmiento 1987).

Considerando las tasas transpiratorias de los árboles, así como su densidad poblacional en las sabanas estacionales del área, puede establecerse que una proporción importante del agua drenada hacia los horizontes profundos es reciclada hacia la atmósfera vía transpiración. Esta diferencia sustancial entre una pastura y una sabana arbolada, repercute sin duda en el ciclo hidrológico, quizás de una manera positiva aumentando las reservas subterráneas o el caudal de los ríos. Pero en todo caso el cambio en las cantidades de agua drenada a través del suelo debe tener consecuencias a mediano plazo sobre el lavado de nutrientes y sobre la misma pedogénesis. Una situación similar se produce cuando los cultivos anuales reemplazan al bosque húmedo tropical, lo que induce un aumento significativo en el drenaje, si los suelos lo permiten (Roose 1981).

En el caso del cultivo anual con sus dos fases de maíz y de suelo desnudo/barbecho, las cantidades anuales de agua pérdidas por drenaje son aún más importantes: del orden del 40% de la P_t o la mitad de la P_e . Puede decirse entonces que un manejo como este está subutilizando el recurso hídrico disponible para la agricultura. El drenaje durante el período de barbecho alcanzó un promedio anual de 228 mm, lo que conjuntamente con el agua almacenada en el suelo en

el momento de la cosecha, contribuiría a mantener un segundo cultivo anual de ciclo corto antes de la sequía crítica de finales de la estación seca.

Los datos sugieren que una pastura bien manejada, independientemente de que por su producción vegetal puede ser económicamente comparable a un cultivo, constituye un mejor utilizador de la humedad edáfica que el cultivo anual. El drenaje bajo pasto es superior al drenaje bajo maíz, aún considerando únicamente los 140 días de desarrollo del cultivo. Además, las consecuencias sobre el empobrecimiento de los suelos e incluso sobre el uso eficiente de fertilizantes, que serán más lixiviados en el cultivo que en el pasto, otorgan ventajas ecológicas al uso de la sabana estacional como pastura mejorada frente a la alternativa de la agricultura de secano con cultivos anuales. Solamente un cultivo permanente como la caña de azúcar podría jugar un rol equivalente al de las pasturas en el ciclo del agua.

Terminaremos con una indicación sobre el consumo de agua por los dos agroecosistemas y sus respectivas especies: pangola y maíz, estableciendo un balance comparativo provisional hasta tanto presentemos los datos de agua en el suelo y de evapotranspiración (Sarmiento y Acevedo en preparación). Calculando la evapotranspiración real ETR como:

$$ETR = P_e - (E_{sc} + D) \pm \Delta S$$

y considerando por ahora que el agua almacenada en el suelo (ΔS), varía muy poco de un año a otro, la ETR en la pastura, con E_{sc} nulo, sería de 912,6 mm (promedio de los dos años), en tanto que en el sistema maíz/barbecho alcanzaría

solamente a 707,3 mm. Es decir la pastura consume una cantidad apreciablemente mayor de agua que el otro agrosistema.

Para que la comparación nos indique mejor el comportamiento divergente de ambas especies, es necesario tener en cuenta la ETR únicamente durante el lapso de desarrollo del cultivo. Los valores alcanzados en estos períodos fueron de 522,3 mm y 415,5 mm en pasto y maíz respectivamente. Aunque estas son cifras de apenas dos años, indican que *Digitaria decumbens* en este clima y sobre este suelo, y con el tipo de manejo a que fue sometida, consume más agua que *Zea mays*. Calculando finalmente la eficiencia en el uso del agua mediante la relación entre agua consumida y biomasa producida, tendríamos para el pasto: 498 L/kg peso seco (dos cortes durante el período de maíz) y para el maíz 287 L/kg peso seco aéreo total, es decir, el maíz bajo las mismas condiciones, utiliza más eficientemente el recurso hídrico.

AGRADECIMIENTOS

Resulta grato agradecer el apoyo recibido de parte de las autoridades de la UNELLEZ, quienes nos facilitaron las instalaciones del Jardín Botánico para realizar este trabajo. Los directivos del Jardín Botánico: Eliseo Castellano, Cecilia Gómez M. y Freddy Paez colaboraron en todo momento, lo mismo que el personal administrativo, técnico y obrero, a los que extendemos nuestro reconocimiento. David Dugarte participó con entusiasmo en el trabajo de campo, lo mismo que Luis Nieto en la delicada tarea de la instalación de los lisímetros. Lina Sarmiento y Michele Ataroff revisaron críticamente el

manuscrito, mientras que Nuni Sarmiento cumplió con eficiencia la tarea de descifrar nuestro borrador para convertirlo en un texto presentable. G. Sarmiento recibió un subsidio del CDCH de la ULA (C-288-86) y D. Acevedo una ayuda de CONICIT para financiar su Tesis de Licenciatura cuyos resultados fueron incorporados a este trabajo. Este estudio forma parte asimismo del programa de colaboración científica ULA-ORSTOM conducido por J.M Hétier.

LITERATURA CITADA

- Acevedo, D. 1988. Economía hídrica de dos agroecosistemas tropicales: una pastura permanente y un cultivo de maíz. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias. Universidad de los Andes.
- Anderson, A. R., y D. G. Pyatt. 1986. Interception of precipitation by pole-stage Sitka spruce and lodgepole pine and mature Sitka spruce at Rielder Forest, Northumberland. *Forestry* 59: 29-38.
- Aussenac, O., y C. Boulangeat. 1980. Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillus (*Fagus sylvatica*) et de résineux (*Pseudotsuga menziessii* Mirb. Franco). *Annales des Sciences Forestières* 37: 91-107.
- Benecke, B. 1976. Soil water relations and water exchange of forest ecosystems, p. 101-131. *In: O.L. Lange, L. Kapper, and E.D. Schultz (eds.), Water and Plant Life, Springer-Verlag, Berlin.*
- Black, T.A., W.R. Gardner, y G.W. Thurtell. 1969. The prediction of evaporation, drainage, and soil water storage for a bare soil. *Soil Science Society of America Proceedings* 33: 655-660.
- Calder, I.R. 1977. A model of transpiration and interception loss from a spruce forest in Plynlimon, Central Wales. *Journal of Hydrology* 33: 247-265.
- Clark, O.R. 1940. Interception of rainfall by prairie grasses, weeds and certain crop plants. *Ecological Monographs* 10: 243-277.
- Chow, V.T. 1964. Runoff, p. 63-97. *In: V.T. Chow (ed.), Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill, New York.*
- Freteand, J.P., R. Poss, y H. Saragoni. 1987. Ajustement d' un modele de bilan hydrique a des mesures tensio-neutroniques *in situ* sous culture de mais. *L' Agronomie Tropicale* 42: 94-102.
- Gash, J.H.C. 1979. An analytical model of rainfall interception by forest. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 105: 43-55.
- Goldstein, G., G. Sarmiento, and F. Meinzer. 1986. Patrones diarios y estacionales en las relaciones hídricas de árboles siempreverdes de la sabana tropical. *Acta Oecológica, Oecología Plantarum* 7: 107-119.
- Goldstein, G., y G. Sarmiento. 1987. Water relations of trees and grasses and their consequences for the structure of savanna vegetation, p. 13-38. *In: B.H. Walker (ed.), Determinants of Tropical Savannas, IRL Press, Oxford.*
- Helvey, J.D., y J.M. Patric. 1965. Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of eastern United States. *Water Resources Research* 1: 193-206.
- Hillel, D. y G.M. Hornberger. 1979. Physical model of the hydrology of sloping heterogeneous fields. *Soil Science Society of America Journal* 43: 434-439.
- Jackson, I.J. 1971. Problems of throughfall and interception assesment under tropical forest. *Journal of Hydrology* 12: 234-254.
- Kline, J.R., C.F. Jordan, y G. Drewry. 1968. Tritium movement in a soil of a tropical rain forest (Puerto Rico). *Science* 160: 550-557.
- Lal, R. 1981. Deforestation of tropical rainforest and hydrological problems, p. 131-140. *In: R. Lal and E.W. Russell (eds.), Tropical Agricultural Hydrology, J. Wiley and Sons, Chichester.*
- Lawson, T.L., R. Lal, y K. Oduro-Afriyic. 1981. Rainfall redistribution and microclimatic changes over a cleared watershed, p. 141-151. *In: R. Lal and E.W. Russell (eds.), Tropical Agricultural Hydrology, J. Wiley and Sons, Chichester.*
- Leyton, L., Reynolds. E.R. y F.B. Thompson. 1967. Rainfall interception in forest and moorland, p. 163-168. *In: W.E. Sopper and*

- H.W. Lull (eds.), *Forest Hydrology*, Pergamon Press, Oxford.
- Maass, J.M., C.F. Jordan, and S.J. Sarukhan. 1988. Soil erosion and nutrient losses in seasonal tropical agroecosystems under various management techniques. *Journal of Applied Ecology* 25: 595-607.
- McGinnis, J.T., F.B. Golley, R.G. Clements, G.I. Child, and M.J. Duver. 1969. Elemental and hydrologic budgets in the Panamanian tropical moist forest. *BioScience* 19: 697-700.
- Morgan, R.P.C. 1979. *Soil Erosion*. Longman, London.
- Nizinski, J. y B. Saugier. 1988. Mesures et modélisation de l'interception nette dans une futaie de chênes. *Acta Oecológica, Oecologia Plantarum* 9: 311-329.
- Pontailleur, J.Y., J. Nizinski, and B. Saugier. 1988. Bilan de l'eau et évapotranspiration des forêts feuillues, p. 329-355. *In: P. Calvet (ed.), Etudes sur les transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère*, INRA, Paris.
- Rapp, M., y F. Romane. 1968. Contribution à l'étude des précipitations sous les peuplements de *Quercus ilex* L. et de *Pinus halepensis* Mill. *Oecologia Plantarum* 3: 271-284.
- Roose, E.J. 1979a. Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique gravillonnaire issu de granite sous culture et sous une savanne arbustive soudanaise du nord de la Côte d'Ivoire (Korhogo: 1967-1975). *Cahiers ORSTOM, série Pédologie* 17: 81-118.
- Roose, E.J. 1979 b. Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique très désaturé sur sédiments argilo-sableux sous culture et sous forêt dense humide subéquatoriale du sud de la Côte d'Ivoire. *Adiopodume: 1964 à 1976. Cahiers ORSTOM, série Pédologie* 17: 259-281.
- Roose, E.J. 1981. Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. *Travaux et Documents de l'ORSTOM*, 130. Paris.
- Rutter, A.J. 1963. Studies in water relation of *Pinus silvestris* in plantation conditions. (I) Measurements of rainfall and interception. *Journal of Ecology* 51: 191-203.
- San José, J.J. y Medina. 1975. Effect of fire on organic matter production and water balance in a tropical savanna, p. 251-264. *In: F.B. Golley and E. Medina (eds.), Tropical Ecological Systems*, Springer-Verlag, New York.
- Sarmiento, G. 1983. The savannas of tropical America, p. 245-288. *In: F. Bourliere (ed.), Tropical Savannas*, Elsevier, Amsterdam.
- Sarmiento, G. 1984. *The Ecology of Neotropical Savannas*. Harvard University Press, Cambridge.
- Sarmiento, G., M. Monasterio, y J. Silva. 1971. Reconocimiento ecológico de los Llanos Occidentales. I. Las unidades ecológicas regionales. *Acta Científica Venezolana* 22: 52-60.
- Sarmiento, G., y M. Vera. 1977. La marcha anual del agua en el suelo en sabanas y bosques tropicales de los llanos de Venezuela. *Agronomía Tropical* 27: 629-649.
- Sarmiento, G., G. Goldstein, y F. Meinzer. 1985. Adaptive strategies of woody species in neotropical savannas. *Biological Reviews* 60: 315-355.
- Suarez de Castro, F., y A. Rodriguez. 1958. Estudio en lisímetros monolíticos del movimiento del agua en el suelo. *Boletín Técnico, Federación de Cafeteros de Colombia*, 2: 1-37.
- Turner, J., y M.J. Lambert. 1987. Forest water usage and interactions with nutrition of *Pinus radiata*. *Acta Oecológica, Oecologia Plantarum* 8: 37-43.
- Zinck, A., y P. Stagno. 1966. Estudio edafológico de la zona Río Santo Domingo-Río Paguey, Estado Barinas. M.O.P., División de Edafología, Guanare.
- Zinke, P.J. 1967. Forest interception studies in the United States, p. 137-161. *In: W.E. Sopper, and H.W. Hull (eds.), Forest Hydrology*, Pergamon Press, London.