



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE LA INTERCEPCIÓN DE LLUVIA EN UN BOSQUE DE
ENCINO: APLICACIÓN A LA MICROCUENCA LA BARRETA.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Línea Terminal Recursos hídricos y ambiental

Presenta

Leonilo Santiago Hernández

Santiago de Querétaro, Querétaro
Julio de 2007



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en ciencias (Recursos hídricos y ambiental)

**MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE LA INTERCEPCIÓN DE LLUVIA EN UN
BOSQUE DE ENCINO: APLICACIÓN A LA MICROCUENCA LA BARRETA.**

Que como parte de los requisitos para obtener grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

Leonilo Santiago Hernández

Dirigido por:

Dr. Miguel A. Domínguez Cortázar

SINODALES

Dr. Miguel A. Domínguez Cortázar
Presidente

Dr. Luís G. Hernández Sandoval
Secretario

Dr. Alfonso Gutiérrez López
Vocal

Dr. Nabil Mobayed Khodr
Suplente

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos
Suplente

Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Director de la Facultad

Dr. Luís G. Hernández Sandoval
Director de Investigación y Posgrado

RÚBRICA

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Julio 2008
México

Resumen

La intercepción de lluvia por el dosel de la vegetación es uno de los factores que intervienen en la humedad del suelo y escurrimiento, debido a que gran parte retorna a la atmósfera en forma de evaporación. En México existen pocos estudios relacionados con bosque de encino y su relación con los procesos hidrológicos, principalmente con las pérdidas por intercepción (*I*). El objetivo del presente trabajo fue estimar la cantidad y distribución de agua de lluvia a través del proceso de intercepción por dosel en encino. El estudio fue realizado en la microcuenca experimental La Barreta. El monitoreo de la precipitación se realizó con un pluviómetro de flujo continuo en el periodo de lluvia 2006 y 2007. La precipitación directa (flujo de traslocación) se evaluó mediante pluviómetros tipo botella en un área aproximada de 1 ha en ecosistemas con uno (*Eupatorium sp.*), dos (*Eupatorium sp.* + *Quercus sp.*) y tres (*Eupatorium sp.* + *Ptelea trifoliata* + *Quercus sp.*) estratos, y la humedad del suelo se midió con sensores de humedad de la marca *Water Mark* y *TDR*. Para simular la intercepción (*I*) se aplicaron los modelos de Gash *et al.* (1979, 1995) y, Gash y Valente (1997). Los resultados indicaron que la intercepción fue de 23.8%, 28.0% y 23.9% para los ecosistemas con uno, dos y tres estratos respectivamente, la retención de humedad volumétrica en el suelo resultó ser en promedio de 4.61% y 7.24% para los ecosistemas con uno y dos estratos. Los modelos de intercepción arrojaron mejores resultados en el ecosistema con un estrato.

Palabras clave: Pérdidas por intercepción, procesos hidrológicos, Ecosistema, humedad del suelo.

Summary

The rainfall interception by the canopy of vegetation is one of the factors involved in soil moisture and runoff, largely because it returns to the atmosphere as evaporation. In Mexico there are few studies related to forest of oak and its relationship to the hydrological processes, mainly to losses by interception (*I*). The purpose of this study was to estimate the amount and distribution of rainwater through the process of interception by a canopy oak. The study was conducted in the basin La Barreta. The monitoring of rainfall was conducted with a rain gauge continuous flow of rain over the period 2006 and 2007. The direct precipitation (*throughfall*) was assessed using raingauges type bottle in an area of approximately 1 hectare in ecosystems with one (*Eupatorium* sp.), Two (*Eupatorium* sp. + *Quercus* sp.) and three (*Eupatorium* sp. + *Ptelea trifoliata* + *Quercus* sp.) layers, and soil moisture was measured with sensors humidity of the mark Water Mark and TDR. To simulate the interception (*I*) were applied models Gash *et al.* (1979, 1995) and Gash and Valente (1997). The results showed that the interception was 23.8%, 28.0% and 23.9% for ecosystems with one, two and three layers respectively, retention of moisture in the soil volume turned out to be an average of 4.61% and 7.24% for ecosystems one two layers. The models interception thrown better results in the ecosystem with a stratum.

Keywords: Interception loss, hydrological processes, ecosystems, soil moisture.

Dedicatorias

*A mis Padres,
A mis Hermanos
y a toda la gente que me apoyo en la
realización de esta etapa de mi formación académica*

Agradecimientos

Antes que nada quiero agradecer todo el apoyo recibido por parte de mis padres: Leonilo y Micaela, así como de mis hermanos: Hilario, Adrian, Ramón, Erica y Alma.

Asimismo, quiero expresar mi más sincero agradecimiento al resto de mis amigos, colegas y a todas aquellas personas que contribuyeron con su granito de arena para que la realización de este trabajo fuera posible.

También hago extensivo mi agradecimiento a la comunidad académica de hidráulica por todos los conocimientos adquiridos dentro y fuera de las aulas de clase durante estos dos años, a mi tutor Dr. Miguel A. Domínguez, al Dr. Eusebio Jr. Ventura, Dr. Nabil Mobayed, Dr. Enrique González, M.C. Filiberto Luna, Dr. Gilberto Herrera, Dr. Caballero, al grupo de sinodales que formaron parte del jurado de examen, y a todo el personal que trabaja en el Laboratorio de Hidráulica.

A la Facultad de Ingeniería por el apoyo que otorga a los estudiantes de posgrado y por estar siempre pendiente de los proyectos que se realizan y de facilitar los apoyos necesarios en la medida de lo posible.

Por último, deseo expresar mi sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico recibido para la realización de mis estudios de maestría, ya que sin ello tal vez no hubiera sido posible.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	i
SUMMARY	ii
DEDICATORIAS	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
SIMBOLOGÍA	xii

1. INTRODUCCIÓN -----	1
2. INTERCEPCIÓN Y SU EFECTO EN EL BALANCE HÍDRICO -----	3
2.1 Ciclo Hidrológico-----	3
2.1.1 Balance Hídrico -----	4
2.2 Procesos Hidrológicos que se presentan en un Ecosistema -----	5
2.3 Antecedentes del estudio de la Intercepción -----	7
2.4 Estudio de Intercepción en México -----	11
2.5 Factores que influyen en la Intercepción -----	13
2.6 Clásicos Modelos de Intercepción -----	14
2.6.1 Modelo de Rutter et al. 1971-----	15
2.6.2 Modelo analítico de Gash et al. 1979 -----	18
2.6.3.Gash 1995 -----	20
2.6.4 Gash y Valente 1997-----	20
2.7 La vegetación y Bosque de encinos en México -----	21
2.8 Efecto Ambiental de la Intercepción -----	22
3. ESTUDIO EXPERIMENTAL: MICROCUENCA LA BARRETA -----	24
3.1 Ubicación y descripción de la Microcuenca la Barreta-----	24
3.1.1 Clima -----	24
3.1.2 Tipo de suelo -----	25
3.1.3 Vegetación -----	25

3.1.4 Orografía -----	25
3.2 Área de Estudio -----	25
3.2.1 Estudio dasométrico de la vegetación y selección de Cuadrantes -----	26
3.2.2 Selección de árboles y determinación de la edad del Bosque-----	28
3.3 Medición de los componentes de la intercepción -----	30
3.3.1 Pluviómetros de Botella -----	30
3.3.2 Medición del flujo de traslocación (Th) -----	31
3.3.3 Flujo Cortical -----	33
3.4 Equipos de Medición -----	33
3.4.1 Pluviómetro digital -----	33
3.4.2 Medición de la Humedad del Suelo -----	34
3.4.34 Fracción de cobertura del dosel -----	37
3.5 Análisis de la Modelación -----	42
4. RESULTADOS -----	45
4.1 Precipitación en la zona de estudio -----	45
4.1.1 Precipitación incidente, intensidad de la lluvia e independencia de eventos para la determinación de la intercepción -----	46
4.2 Características del bosque de <i>Quercus</i> -----	48
4.2.1 Clasificación por ecosistemas en el bosque de <i>Quercus</i> -----	50
4.2.2 Cobertura de la vegetación en función del LAI -----	51
4.3 Intercepción y sus componentes -----	55
4.3.1 Flujo de Traslocación -----	55
4.3.2 Flujo Cortical -----	59
4.3.3 Determinación de la Intercepción por Ecosistemas-----	60
4.3.4 Relación de la Intercepción y la Pg por Ecosistemas-----	62
4.4 Determinación de la capacidad de almacenamiento (s) y el coeficiente libre del del <i>Th</i> -----	64
4.5 Relación de la Intercepción con la Intensidad y la Pg -----	68
4.6 Parámetros y modelación de la intercepción-----	70

4.6.1 Gash et al. 1979 -----	72
4.6.2 Gash 1995 -----	73
4.6.3 Gash y Valente 1997 -----	74
4.7 Distribución espacial -----	79
4.7.1 Intercepción - LAI -----	79
4.7.2 Precipitación Neta – Humedad del Suelo -----	80
5. DISCUSIÓN-----	81
5.1 Precipitación-----	81
5.2 Bosque de <i>Quercus sp.</i> -----	81
5.3 Intercepción -----	81
5.4 Capacidad de almacenamiento -----	82
5.5 Modelos de Intercepción-----	83
5.6 Variación espacial del <i>Th</i> , Intercepción, LAI y humedad del suelo-----	84
6. CONCLUSIONES -----	85
7. RECOMENDACIONES -----	87
8. REFERENCIAS-----	88
ANEXO I -----	89
ANEXO II -----	96
ANEXO III -----	99
ANEXO IV -----	103

INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1	Estudios de intercepción realizados en ambientes semiáridos en México (Citado por Mastachi, 2007)1 ----- 11
2	Intercepción de lluvia en <i>Quercus sp.</i> en México y Otros países----- 12
3	Capacidades de almacenamiento en <i>Quercus sp.</i> ----- 12
4	Componentes de la perdida por intercepción de Gash (1979) ----- 21
5	Componentes de la perdida por intercepción de Gash (1995) ----- 23
6	Componentes de la perdida por intercepción de Valente (1997) ----- 24
7	Cuadrantes de nuestro seleccionado y numero de estratos ----- 33
8	Altura y número de pluviómetros de botella instalados en los cuadrantes Seleccionados ----- 37
9	Altura de medición del Índice de Área Foliar de las diferentes especies De vegetación ----- 40
10.	Precipitación mensual (Periodo de lluvias) 2006 y 2007----- 43
11	Datos Generales de la Precipitación de la Zona Experimental ----- 45
12	Características principales del Bosque de <i>Quercus sp.</i> ----- 46
13	Valor de importancia (V.I) de las diferentes especies de vegetación de la zona experimental----- 47
14.	Características principales de las especies con mayor Valor de Importancia (V.I) de la Zona experimental (Septiembre de 2005) -----47
15	Cobertura de la vegetación e índice de área foliar ----- 48
16	Parámetros de los ecosistemas Cobertura (C), LAI, porosidad y Coeficiente libre de Th 49
17	Resumen del th en un Ecosistemas de Encinos de 1, 2 y 3 estratos----- 51
18	Coeficientes de variación para los 3 tipos de ecosistemas ----- 53
19	Flujo de cortical para ecosistemas de 2 y 3 estratos ----- 54
20	Resumen de la intercepción y sus componentes----- 54
21	Resumen de la intercepción total----- 55
22	Capacidad de almacenamiento y coeficiente libre del th----- 61
23	Parámetros derivados del Bosque de <i>Quercus</i> para el modelo Gash (1979, 1995)

	Y Gash – Valente (1997)-----	63
24	Valores de intercepción observados y simulados por el modelo de Gash (1979)	64
25	Valores de intercepción observados y simulados por el modelo de Gash (1995)	65
26	Valores de intercepción observados y simulados por el modelo de Valente (1997)-----	66
27	Eficiencia (E), Sesgo (B) y Raíz del error cuadrático medio (RMSE) de los modelos de Gash (1979, 1995) y Valente (1997)-----	70
28	Correlación espacial entre el LAI y el % de intercepción. -----	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1 Ciclo Hidrológico-----	4
2 Representación de los flujos de agua en un bosque (Tomado de Schellekens, 2000)-----	5
3 Proceso de la Intercepción -----	8
4 Modelo de Rutter esquematizado por Gash y Morton (1978) -----	19
5 Zonas de bosque de coníferas y encinos en México (John Woodward, 2005)----	26
6 Ubicación de la Microcuenca la Barreta -----	29
7 Parcela experimental -----	31
8 Estratos vegetativos -----	32
9 Cuadrantes de muestreo seleccionados -----	33
10 Barrena de pressler -----	34
11 Muestras de encinos para el conteo de anillos, a) lijado de las muestras cilíndricas, b) Conteo de anillos, c) Vista microscópica de los anillos -----	34
12 Esquema de los dispositivos de medición, a) Armado del pluviómetro de Botella, b) Pluviómetro de botella -----	35
13 Dispositivos de medición, a) Cuadrantes con un estrato vegetativo, b) Cuadrantes con 2 estratos vegetativos, c) Cuadrantes con 3 estratos vegetativos, T_h es el flujo de traslocación, $S - T_h$ es el Sub – Flujo de traslocación que deja pasar el segundo estrato, y el $S - S - T_h$ es el sub –sub – flujo de traslocación que deja pasar el tercer estrato -----	36
14 Pluviómetro digital, a) Partes del pluviómetro, b) Colocación del pluviómetro, c) Ubicación del pluviómetro -----	38
15 Distribución espacial de los puntos de muestro para la humedad del suelo en los ecosistemas con 2 y 3 estratos, a) Sensores sensores de humedad, b) TDR -----	39
16 LI – COR LAI – 2000 -----	40
17 Laminas de precipitación registrada en el 2006 y 2007 -----	42
18 Lamina de lluvia por evento registrada en el sitio experimental-----	44
19 Intensidad de lluvia por evento registrada en el sitio experimental -----	44
20 Relación entre el índice de área foliar (LAI) y la fracción de la cobertura del dosel del estrato herbáceo. -----	49

21	Relación entre el índice de área foliar (LAI) y la fracción de la cobertura del dosel del estrato arbóreo. -----	49
22	Relación de la $P_g - T_h$ para un ecosistema con 1 estrato-----	50
23	Relación de la $P_g - T_h$ para un ecosistema con 2 estrato-----	50
24	Relación de la $P_g - T_h$ para un ecosistema con 3 estrato-----	51
25	Relación entre el C.V. del flujo de traslocación y la precipitación incidente Ecosistemas con a) 1 estrato, b) 2 estratos y c) 3 estratos -----	52
26	Relación de la precipitación incidente y la intercepción para ecosistemas de a) 1 estrato, b) 2 estratos y c) 3 estratos -----	56
27	Ecosistema con 1 estrato, a) Lámina acumulada de la precipitación incidente (PG), intercepción (I) y Flujo de traslocación (Th), b) Capacidad de almacenamiento para el Ecosistema de 1 Estrato -----	58
28	Ecosistema con 2 estratos, a) Lámina acumulada de la precipitación incidente (PG), intercepción (I) y Flujo de traslocación (Th), b) Capacidad de almacenamiento para el Ecosistema de 2 Estratos -----	59
29	Ecosistema con 3 estratos, a) Lámina acumulada de la precipitación incidente (PG), intercepción (I) y Flujo de traslocación (Th), b) Capacidad de almacenamiento para el Ecosistema de 3 Estratos -----	60
30	Intercepción para intensidades ligeras (≤ 2.5 mm/hr)-----	61
31	Intercepción para intensidades Moderadas ($>2.5 - \leq 7.5$ mm/hr)-----	62
32	Intercepción para intensidades Fuertes (>7.5 mm/hr)-----	62
33	Intercepción observada contra simulada con los modelos de Gash 1979, 1995 y Valente 1997 en ecosistemas con 1 Estrato-----	67
34	Intercepción observada contra simulada con los modelos de Gash 1979, 1995 y Valente 1997 en ecosistemas con 2 Estratos-----	68
35	Intercepción observada contra simulada con los modelos de Gash 1979, 1995 y Valente 1997 en ecosistemas con 3 Estratos-----	69
36	Comportamiento de la humedad del suelo con respecto a la P_g , a) Eventos individuales de P_g , b) Contenido de humedad Volumétrica en el ecosistema de 2 estratos, c) Contenido de Humedad Volumétrica en el ecosistema de 3 estratos-----	72

SIMBOLOGIA

Simbología	Descripción	Unidades
A	Coeficiente de la relación entre la evaporación media del dosel húmedo y la intensidad media de la lluvia	-
<i>b</i>	Coeficiente de drenaje del modelo de Rutter	-
C	Cantidad de agua almacenada en el dosel	mm
C	Fracción de la cobertura del dosel	m ²
CP	Encharcamiento	mm
<i>C_p</i>	Calor específico del aire seco a presión constante	J kg ⁻¹ °C ⁻¹
D	Tasa de Drenaje	mm min ⁻¹
DP	Percolación Profunda	mm
<i>D_o</i>	Tasa de drenaje cuando C=S	mm min ⁻¹
DPS	Precipitación directa en áreas saturadas	mm
<i>d</i>	Altura de desplazamiento con respecto a un plano de referencia	m
\bar{E}_c	Evaporación media escalado a la fracción de la cobertura del dosel	
Sc	Capacidad de almacenamiento escalado a la fracción de cobertura del dosel	
E _A	Evaporación por cuerpos de agua	mm
E _I	Evaporación por intercepción	mm
ET	Evapotranspiración	mm día ⁻¹
Et	Transpiración	mm
E _{SD}	Evaporación del Suelo desnudo	mm
E _P	Evaporación por Transpiración de las plantas	mm
E _w	Tasa de evaporación del dosel húmedo	mm min ⁻¹
\bar{E}_w	Evaporación media del dosel húmedo	mm hr ⁻¹
G	Flujo Subterráneo	m ³ /s
HOF	Flujo Hortoniano	m ³ /s
I	Intercepción de lluvia	mm
I _w	Agua que Moja del dosel	mm
I _s	Agua que Llena del dosel	mm
I _d	Agua que se evapora del dosel	mm
<i>k</i>	Constante de Von Karman 0.41	-
P	Precipitación	mm
P _g	Precipitación incidente sobre el dosel de la vegetación	mm
P'g	Precipitación necesaria para saturar el dosel de la vegetación	mm
P _{pt}	Volumen de precipitación	ml
P _t	Porción de la lluvia que se desvía por la corteza del árbol	-
P	Coeficiente libre del Th	-
P _t	Coeficiente libre del St	-
Q	Escurrimiento	m ³ /s
Q _b	Flujo Base	m ³ /s
Q _s	Escurrimiento producido por las tormentas	m ³ /s
R	Intensidad de la precipitación	mm min ⁻¹
\bar{R}	Intensidad media de la precipitación en un dosel saturado	mm hr ⁻¹
RF	Flujo que se reincorpora al escurrimiento	m ³ /s
R _N	Radiación neta	MJ m ⁻² día ⁻¹
R	Radio de la boquilla del pluviómetro de botella	mm
<i>r_a</i>	Resistencia aerodinámica al transporte de vapor de agua desde la cubierta en un plano de referencia de 2 m sobre ella	s m ⁻¹
S	Capacidad de almacenamiento del dosel	mm
St	Flujo Cortical	mm
SOF	Flujo superficial debido a la saturación del suelo	m ³ /s
SSSF	Flujo Sub – Superficial	m ³ /s

S_t	Capacidad de retención de agua en el tronco	mm
Th	Flujo de Traslocación	mm
u_z	Velocidad del viento a la altura z con respecto a la superficie del suelo	$m\ s^{-1}$
z_h	Altura de Medición de la Humedad	m
z_m	Altura de medición del viento	m
z_{oh}	Longitud de la rugosidad que gobierna la transferencia de calor y vapor de agua	m
z_{om}	Longitud de la rugosidad en que gobierna la transferencia del momentum	m

Siglas	Descripción	Unidades
ε	Constante del modelo de Valente (0.023)	-
λ	Calor latente de vaporización	$J\ kg^{-1}$
γ	Constante Psicrometrico	$Pa\ K^{-1}$
ρ_a	Densidad de aire	$kg\ m^{-3}$
Δ	Pendiente de la curva de la presión de vapor a saturación	$kPa\ ^\circ C^{-1}$
Π	Pi	Adimensi onal
δe	Déficit de presión de vapor	$J\ Kg^{-1}$

1. INTRODUCCIÓN

Las precipitaciones y el patrón de recarga de los acuíferos son decisivos para entender el efecto que una plantación forestal ejerce sobre el recurso hídrico y su manejo. El agua acumulada en el suelo, de donde es extraída por las raíces de los árboles, es un factor determinante del crecimiento forestal y por ende, de su nivel de producción. Los ecosistemas forestales interceptan entre 10 y 35% de la precipitación incidente (Zeng *et al.* 2005), y el agua disponible es aprovechada por el sistema radicular.

La vegetación tiene gran influencia en el ciclo hidrológico. Los árboles interceptan y almacenan la lluvia que cae sobre ellas para posteriormente ser evaporada hacia la atmósfera. La lluvia interceptada por los árboles es la principal causa de la diferencia en caudales en cuencas (Gash y Morton, 1978), y su evaporación posterior “no es considerada como significativa” en el proceso del ciclo hidrológico (Llorens y Gallart, 2000). En realidad la vegetación juega un papel importante en la evaporación de la precipitación, debido a que su follaje llega a retener una cantidad de lluvia que va del 20 al 50% de la precipitación total (Gerrits, *et al.* 2006). Además, el agua sobre el dosel de la vegetación es un importante factor ecológico que condiciona los procesos químicos, físicos y biológicos que ocurren sobre las superficies foliares (Bouten, 1992).

Regularmente cuando se modela en hidrología, la interceptación es tomada como un porcentaje fijo de la precipitación; sin embargo la interceptación influye fuertemente en las condiciones de humedad del suelo, la cual es muy importante para la generación de escurrimiento (Roberts y Klingeman, 1970; Savenije, 2004).

En México se han realizado pocos estudios sobre interceptación del agua de lluvia. La mayoría de ellos se ha centrado en vegetación semiárida (Navar y Bryan, 1994; Navar y Darryl, 1998; Navar y Charles, 1999; Cantú y González, 2005; Mastachi, 2007).

Sin embargo, en el estado de Queretaro la intercepción de lluvia no ha sido cuantificada en un bosque relictico de Encino (*Quercus sp.*). Por eso, se ha propuesto efectuar la presente investigación con el siguiente objetivo general:

Estimar la cantidad y distribución de agua de lluvia a través del proceso de intercepción por dosel en encino. Como objetivos específicos se han planteado los siguientes:

- Establecer relaciones entre las características dasométricas de una comunidad de encinos y la intercepción de lluvia.
- Aplicar y evaluar el modelo de Gash *et al.* (1971, 1995) y Valente *et al.* (1997).
- Determinar la cantidad de agua de lluvia interceptada por el bosque de encino.

Como hipótesis básica se tiene que: entre los principales tipos de vegetación en el estado de Querétaro el bosque de encino tiene un alto potencial de intercepción del agua de origen pluvial.

2. INTERCEPCIÓN Y SU EFECTO EN EL BALANCE HIDRICO

2.1 Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico comprende una serie de procesos continuos de: movimiento y transferencia de agua en la tierra, océanos, cuerpos de agua y en la propia atmósfera. Para explicar el ciclo hidrológico se puede comenzar por la evaporación que se produce en el océano, en lagos, embalses, cuerpos de agua, y por la evapotranspiración de las plantas, la cual es la combinación del agua que se pierde por evaporación en el suelo y transpiración en el material vegetal. Esta evaporación y evapotranspiración, son producidas por la energía suministrada por el sol e influenciadas por las condiciones climáticas e hídricas de temperatura, radiación, viento y humedad. De esta forma, el agua cambia de un estado líquido a un estado gaseoso. El agua en forma de vapor pasa a la atmósfera y, en este ascenso, pierde calor y se produce el proceso de condensación alrededor de núcleos de condensación (los cuales pueden ser partículas de polvo que flotan en el aire), creando pequeñas gotas de agua. Estas gotas, crean nubes, y en su circulación se van uniando entre ellas, creando gotas más grandes las cuales, por su peso, se precipitan finalmente en forma de lluvia (nieve o granizo). Parte de la precipitación es interceptada por la vegetación, otra parte cae al suelo y dependiendo de las condiciones de cobertura, tipo de suelo y pendiente del terreno, el agua puede quedar encharcada, escurrir superficialmente o infiltrarse. El agua que escurre superficialmente corre hacia los cuerpos de agua y finalmente al mar. Una parte del agua que se infiltra es retenida por el suelo, cuya capacidad de retención depende de su textura y estructura (porosidad); otra parte del agua infiltrada se convierte también en escorrentía superficial al ser saturada la capacidad de almacenamiento suelo; una más se convierte en flujo sub-superficial y por ultimo otra se percola hacia capas inferiores, produciendo la recarga de aguas subterráneas. El agua que se infiltra viaja lentamente y llega a alimentar a ríos y manantiales, y finalmente al mar (SNET, 2005).

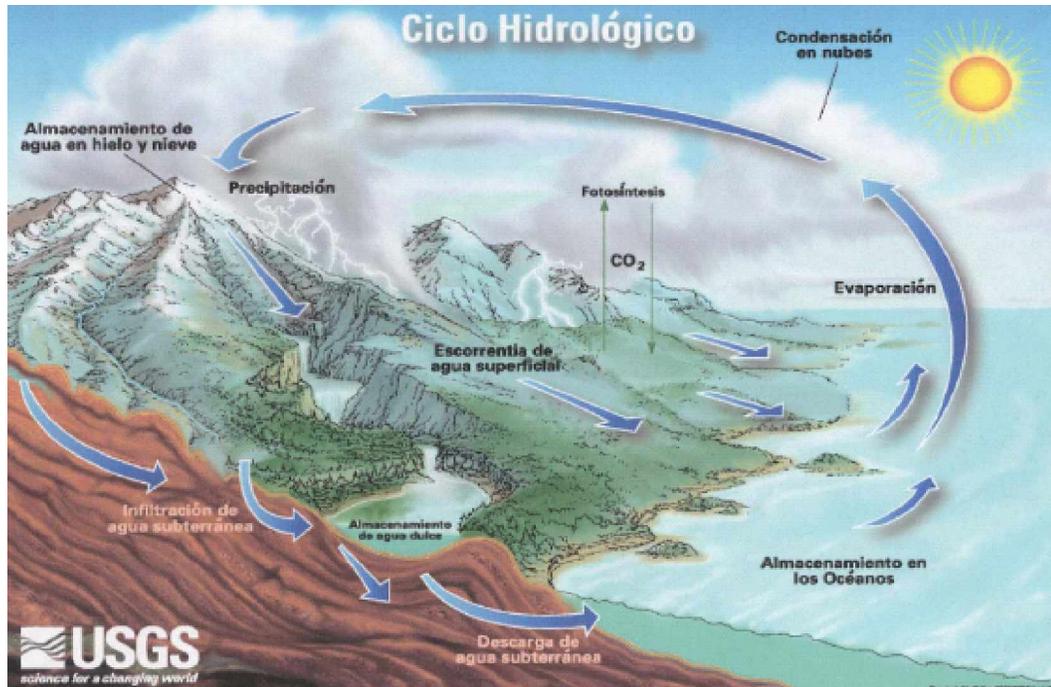


Figura 1. Ciclo Hidrológico (Tomado de SNET, 2005)

2.1.1 Balance Hídrico

Un balance hídrico comprende la cuantificación de los parámetros involucrados en el ciclo hidrológico así, como diversos componentes relacionados con los consumos de agua de los sectores usuarios en una cuenca y la interrelación que guardan entre si, dando como resultado un diagnóstico de las condiciones reales del recurso hídrico en cuanto a su oferta, disponibilidad y demanda en dicha área. Dado que el balance hídrico presenta un diagnóstico de las condiciones reales del recurso hídrico en un área en particular, éste permite tomar medidas y establecer lineamientos y estrategias para su protección y utilización de una manera integrada, de tal forma que se garantice su disponibilidad tanto en cantidad como en calidad (SNET, 2005).

El modelo de balance hídrico se basa en la ecuación de conservación de masa:

$$\text{Cambio de almacenamiento} = \text{Entradas} - \text{Salidas}$$

El modelo de balance hídrico considera como variable principal de entrada a la precipitación y a la evaporación como la variable principal de salida.

2.2 Procesos hidrológicos que se presentan en un ecosistema

Los componentes de los procesos hidrológicos que se presentan en un ecosistema pueden ser representados de la siguiente manera (Figura 2).

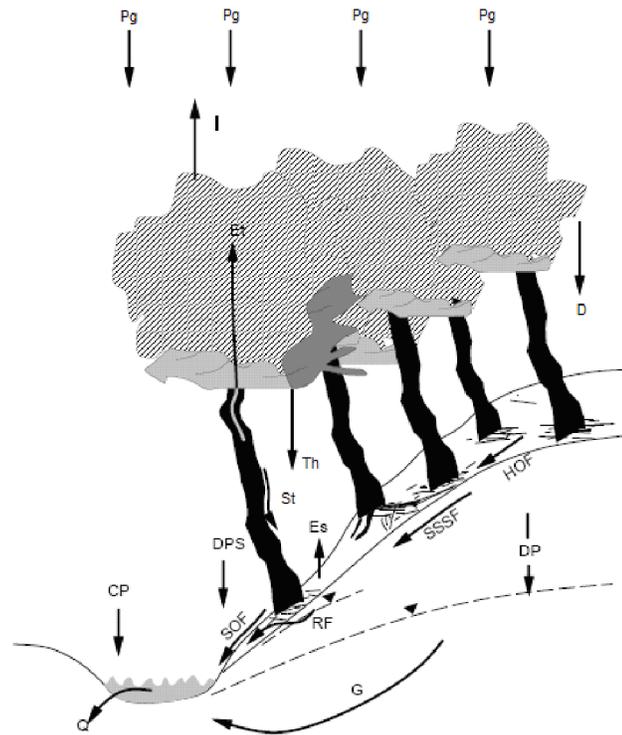


Figura 2. Representación de los flujos de agua en un bosque. (Tomado de Schellekens, 2000).

La precipitación incidente (Pg) en bosques tropicales por lo regular es en forma de lluvia, y esta llega a la superficie del suelo como flujo de traslocación (Th , fracción de la precipitación incidente pasa a través de las hojas sin tocarlas, y alcanza el suelo del bosque), flujo Cortical (St , Fracción de la precipitación que fluye en la corteza de los árboles) y drenaje (D , agua que gotea de ramas y hojas).

En general, no es posible distinguir directamente en campo el goteo del agua de la lluvia por efecto del dosel y las gotas que pasan sin tocar el dosel de la vegetación. Por lo tanto, los dos se combinan y se les da el nombre de flujo de traslocación (Th). La fracción del agua que alcanza al suelo del bosque es evaporada y regresada a la atmósfera (Es_D).

Si la capacidad de infiltración del suelo es menor que la intensidad del flujo de traslocación y del flujo cortical, se presentará el escurrimiento de exceso de agua llamado flujo hortoniano (*HOF*).

Una parte considerable del agua que se infiltra es tomada por la vegetación y devuelta a la atmósfera por efecto de la transpiración (*Et*). Así la suma de la transpiración (*Et*), Evaporación del suelo (*Es_D*) y la interceptación (*I*) es llamada evaporación total (*ET*).

Durante las tormentas, el agua puede fluir como flujo sub -superficial (*SSSF*) en suelos saturados o no saturados. Cuando el perfil del suelo o cuando la parte superior de ella esta saturada, la lluvia que cae escurrirá como flujo superficial (*SOF*). La contribución del flujo sub - superficial (*SSSF*) y del Flujo superficial (*SOF*) representan las corrientes que alimentan los encharcamientos (*CP*). La humedad restante del suelo es drenada y encauzada a las corrientes (Bruijnzeel, 1989a). Los principales componentes del balance hídrico de una vegetación en un ambiente tropical húmedo (Figura 2) son: precipitación (*P*), evapotranspiración Total (*ET*), escurrimiento (*Q*), percolación profunda (*DP*) y el cambio de almacenamiento (ΔS), (Ecuación 1).

$$\Delta S = P - ET - Q - DP$$

1

2.3 Antecedentes del estudio de la Intercepción

El estudio de las pérdidas por intercepción tiene gran importancia en el balance hídrico de las cuencas, en especial cuando las precipitaciones son escasas e irregulares y cuando gran parte del porcentaje interceptado es evaporado. La presencia o ausencia de vegetación no solamente afecta la cantidad de agua precipitada que alcanza el nivel del suelo; afecta también la energía cinética, y a través de ella la capacidad de desprendimiento del suelo ante los impactos de las gotas de lluvia (Morgan, 1985).

Se sabe que el dosel de la vegetación puede interceptar la lluvia y prevenir la erosión del suelo, porque la precipitación interceptada se evapora. Muchos autores (como Horton, 1919) han estudiado la intercepción del agua de lluvia por efecto de la vegetación. Estos estudios están basados principalmente en bosques de coníferas de clima templado y bosques tropicales.

Los estudios sobre la intercepción tomaron auge en la década de los años setenta (Aussenac, 1968, 1970; Rapp y Romane, 1968) cuyos estudios fueron realizados en bosque de *Quercus ilex*; Rutter y Morton, 1971, 1975, 1977, desarrollaron un modelo de predicción de la intercepción que posteriormente fue modificado por Gash, 1978, 1979. Los procesos de partición de lluvia se han estudiado principalmente en formaciones arbóreas relativamente homogéneas, de cubierta continua y en muchos casos monoespecíficas de zonas templadas y tropicales, (Horton, 1919; Kittredge *et al.* 1948; Law, 1956; Rutter, 1963; Zinke, 1967; Herwitz, 1985; Crockford *et al.* 2000; Levia, 2004). En cambio, se ha prestado poca atención a otros tipos de vegetación, como arbustos y herbáceas, debido a la dificultad que supone medir en ellos los flujos de partición de lluvia especialmente si se desea separar el goteo y la escorrentía cortical (Belmonte & romero, 1994). Tradicionalmente, la cantidad de precipitación interceptada por el dosel ha sido determinada indirectamente de la diferencia entre la precipitación incidente y la lluvia que pasa a través del dosel de la vegetación, la cual es dividida en el flujo de traslocación y el flujo cortical (Dolman, 1987; Dunin *et al.* 1988; Jonson, 1990), Citado por Huang *et al.* 2004.

Rutter *et al.* (1970) desarrollaron el modelo para predecir la evaporación interceptada por la lluvia en bosques (frecuentemente llamada pérdidas de interceptación), derivado de observaciones en un bosque de pino al SE de Inglaterra. Con el paso de los años, los datos obtenidos de observaciones han mejorado los modelos de interceptación y también se han desarrollado otros modelos para determinar la pérdida de la precipitación por interceptación (Toba y Ohta, 2005); lo anterior comprende modelos analíticos (Gash, 1979; Gash *et al.* 1995; Carlyle – Moses y Price, 1999), de almacenamiento (Rutter *et al.* 1971; Hashino *et al.* 2002), y modelos de interceptación de base física (Liu, 1997). Para determinar la cantidad de lluvia interceptada por el dosel de la vegetación, se mide la precipitación que pasa a través de la cubierta vegetal (figura 3).

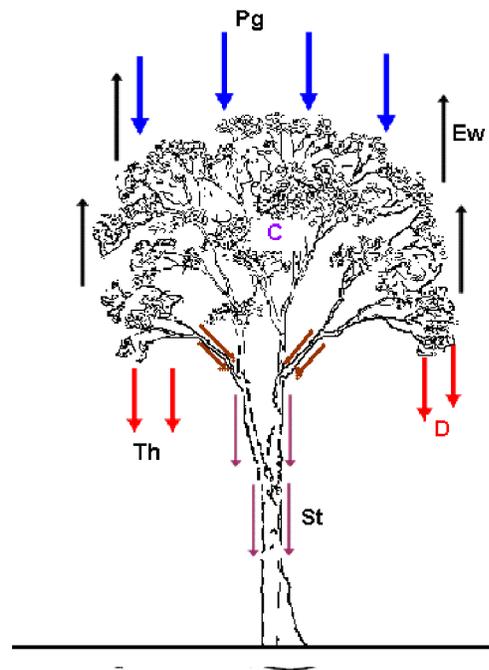


Figura 3. Proceso de la interceptación

$$C + E_w \approx P_g - (Th + D + St)$$

2

donde

C es el agua almacenada en la vegetación, E_w es la evaporación, P_g la precipitación incidente, Th el flujo de traslocación, St el flujo Cortical y D el drenaje.

Existen metodologías para la interceptación, basadas en mediciones en la parte inferior del follaje, la primera es considerar la vegetación como comunidad (Dunkerley, 2000; Rodrigo y Avila, 2001; Carlyle-Moses, 2004; Fleischbe *et al.* 2004; Iida *et al.* 2005) en donde todas las especies que conforman la vegetación se evalúan conjuntamente, y el segundo, a nivel de especie, en donde se analizan individuos aislados ya sea in situ (Návar y Bryan, 1990, Xiao *et al.* 2000; David *et al.* 2006; Owens *et al.* 2006; Guevara-Escobar *et al.* 2007) o ex situ mediante la simulación de lluvia (Bui y Box, 1992; Abrahams *et al.* 2003).

Las formas en que se cuantifican el flujo de traslocación y drenaje foliar a nivel de comunidad son: por canaletas (Loescher *et al.* 2002), pluviómetros o dispositivos que sirvan como tales (Gómez *et al.* 2002) y parches de captación (Pypker *et al.* 2005). A nivel de especie existen estudios en donde se cuantifica con pluviómetros (Jackson, 2000; Staelens *et al.*, 2006; David *et al.* 2006) extensómetros (Huang, Chen y Lin, 2005) y mediante dispositivos que abarquen la mayor parte de la cobertura de la copa (Xiao *et al.* 2000; Guevara-Escobar *et al.* 2007) (Figura 4).

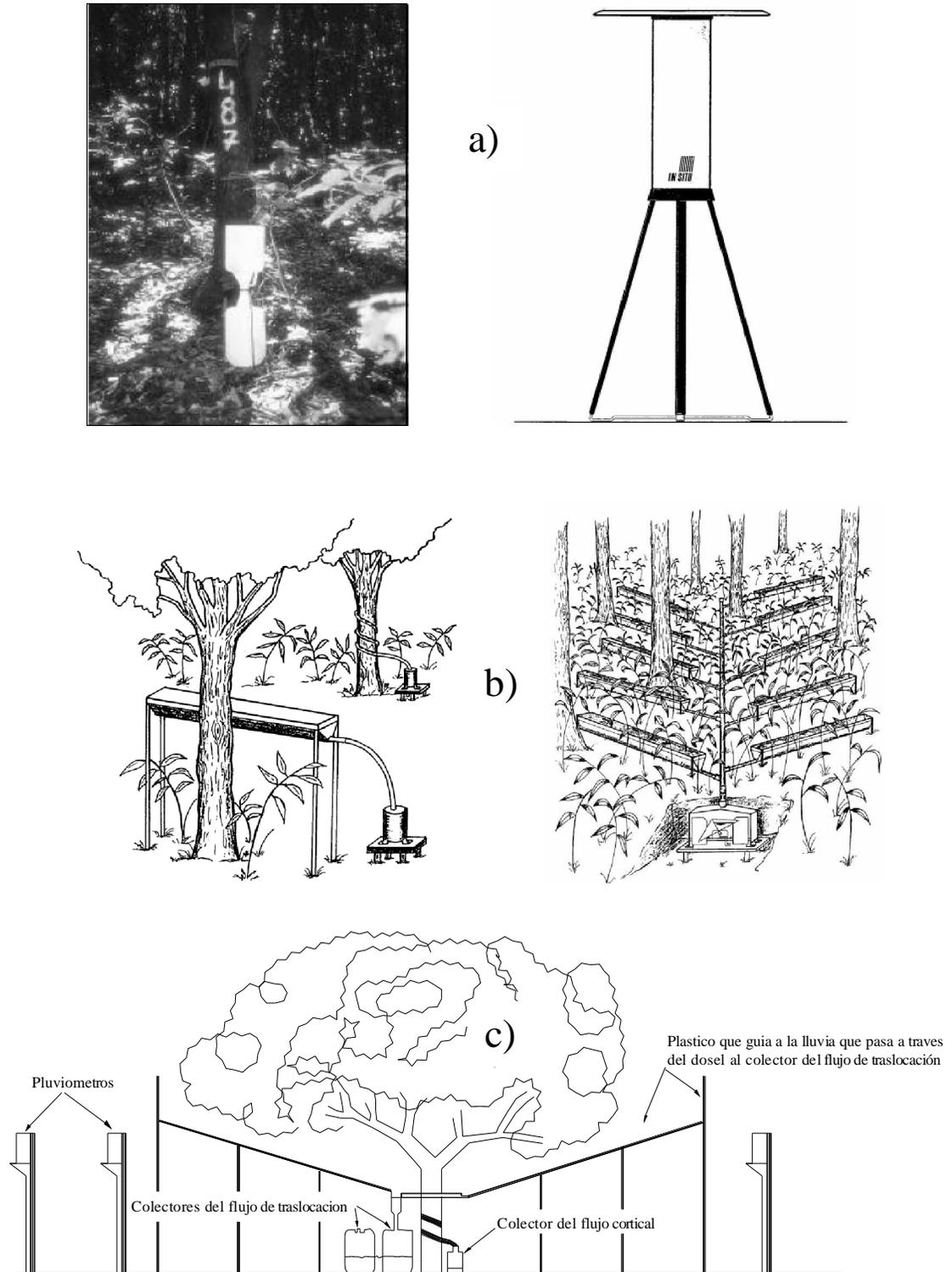


Figura 4. Formas de cuantificación del flujo de traslocación, a) Pluviómetros o dispositivos, b) Canaletas y c) Dispositivo que abarca la mayor parte de la copa del árbol.

2.4 Estudio de intercepción en México

En México son contados los trabajos que se han realizado sobre pérdidas por intercepción. La mayoría de estas investigaciones se han centrado en vegetación de ambientes semiáridos en el norte del país, como se muestra en la Tabla 1. Sin embargo, no existen suficientes estudios de intercepción en México sobre el género *Quercus sp.* Salvo algunas investigaciones como las citadas en las tablas 2 y 3.

Autor	Sitio	Tipo de cobertura	No. de eventos	Método de medición	Período de medición	Área o número de individuos muestreados	Th^*+D^* (%)	I^* (%)	St^* (%)
Návar (1993)	Linares Nuevo León	<i>Acacia farnesiana</i>	17	Manguera alrededor del tronco	Verano de 1987	7	-	-	.76
		<i>Prosopis laevigata</i>	17			8	-	-	1
		<i>Diospyros texana</i>	17			15	-	-	5.14
Návar y Bryan (1994)	Linares Nuevo León	<i>Acacia farnesiana</i>	17	Botes (178 cm ²) Manguera alrededor del tronco	Verano de 1987	7 (6 botes para cada uno)	-	27.94	.6
		<i>Prosopis laevigata</i>	17			7 (6 botes para cada uno)	-	27.94	.6
		<i>Diospyros texana</i>	17			6 (6 botes para cada uno)	-	27.94	5.6
Návar <i>et al.</i> (1999)	Sierra Madre Oriental Nuevo León	Matorral subinerme	36	Botes (78 cm ²) Canaletas (20 x 100 cm)	Sep. 1995-Abril 1997	220 botes 4 canaletas 600 m ²	-	17.3 canaletas 18.3 botes	-
Návar <i>et al.</i> (1999)	Linares Nuevo León	Matorral subinerme	35	Canaletas (10 x 100 cm) Manguera alrededor del tronco	Abril 1997-Abril 1998	6 parcelas (5 x 5m)	78.1	18.9	3
Carlyle-Moses (2004)	Sierra Madre Oriental Nuevo León	Matorral subinerme	25	Botes de polietileno (103 cm ²)	1999-2001	55 botes	83.3	8.2	8.5
Carlyle-Moses <i>et al.</i> (2004)	Sierra Madre Oriental Nuevo León	<i>Quercus cupreata</i>	18	Botes (660 cm ²)	2000-2001	2 parcelas con 25 botes	84.2	-	-
Cantú y González (2005)	Linares Nuevo León	<i>Acacia berlandieri</i>	78	Canaletas (10 x 100 cm)	Febrero 1999- Julio 2001	1 Parcela de 10 x10 m para cada especie con 4 canaletas cada una	82	18	-
		<i>Acacia rigidula</i>	70				85	15	-
		<i>Diospyros texana</i>	70				78	22	-

Tabla 1. Estudios de intercepción realizados en ambientes semiáridos en México (citado por Mastachi, 2007).

Th^* es el flujo de traslocación, D^* es el drenaje, I^* es la intercepción y St^* es el flujo cortical.

Tabla 2. Intercepción de lluvia en *Quercus sp.* en México y otros países

Autor	Especie		Edad (años)	País	I (%)
Rutter <i>et al.</i> (1975)	<i>Quercus robur</i> (con hoja)	Bosque		Reino Unido	18%
Rutter <i>et al.</i> (1975)	<i>Quercus robur</i> (sin hoja)	Bosque		Reino Unido	12%
Schöeder (1984, 1985)	<i>Quercus robur F. sylvatica</i> (con hojas)	Bosque		Alemania	12%
Nizinski y Saugier 1989	<i>Quercus petraea</i>			Francia	29%
Cantú S. y González R. (2002)	<i>Pinus pseudostrobus</i> indl., <i>Quercus sp.</i> y <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl y <i>Quercus sp.</i>	Bosque	80 a 100	México	19.2, 13.6 y 23%
Soares T. (2002)	<i>Quercus rotundifolia</i>	Árbol individual		Portugal	21.7%
Mateos Rodríguez, 2003	<i>Quercus ilex</i>			España	30%

Tabla 3. Capacidades de almacenamiento en *Quercus sp.*

Autor	Especie	Edad (años)	País	S (mm)
Rutter <i>et al.</i> (1975)	<i>Quercus robur</i> (con hoja)		Reino Unido	0.875
Rutter <i>et al.</i> (1975)	<i>Quercus robur</i> (sin hoja)		Reino Unido	0.275
Schöeder (1984, 1985)	<i>Quercus robur F. sylvatica</i> (con hojas)		Alemania	0.6
Dolman (1987)	<i>Quercus robur</i> (con hoja)			0.8
Lankreijer <i>et al.</i> (1993)	<i>Quercus rubra</i>		Holanda	0.7
Cantú S. y González R. (2002)	<i>Pinus pseudostrobus</i> indl., <i>Quercus sp.</i> y <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl y <i>Quercus sp.</i>	80 a 100	México	0.25 y 0.17
Soares T. (2002)	<i>Quercus rotundifolia</i>		Portugal	0.282

2.5 Factores que Influyen en la Intercepción

Duración e Intensidad de la lluvia: En condiciones atmosféricas secas la intercepción es controlada por la intensidad de la lluvia y por su duración (Llorens *et al.* 1997). La intensidad y duración de la lluvia también puede aumentar o disminuir la cantidad de agua interceptada en el dosel de la vegetación (Tsukamoto *et al.* (1988), Toba y Otha, 2005, Raat, *et al.* 2006).

Velocidad y Dirección del viento: Herwiz y Slye (1995) mencionan que velocidades altas de viento teóricamente pueden orientar las hojas en su dirección y disminuir la probabilidad de la intercepción; sin embargo, con lluvias en zonas tropicales y con densa vegetación, la probabilidad de que una gota pase a través del dosel sin tocar la superficie de la vegetación es relativamente baja, incluso bajo fuertes condiciones de viento.

Índice de área foliar (LAI): El LAI varía de acuerdo a la especie de árbol/planta, a la temperatura, a la etapa fenológica de un cultivo y a la disponibilidad de agua (Wulder, 1998, Spanner *et al.* 1994). Se han hecho diversidades de estudios para evaluar este índice y confirmar que la intercepción se incrementa proporcionalmente con respecto a su magnitud (J. Martín y Stephens W., 2005, G. Pypker *et al.* 2005).

Ecosistemas: La manera en que cae la precolación y su contenido químico puede variar dependiendo de su proximidad a ciudades, océanos o terrenos montañosos en donde la pendiente, elevación, condiciones climatológicas, así como las actividades antropogénicas juegan un papel importante (Delphis y Frost, 2006 citado por Mastachi, 2007).

Arquitectura de la vegetación: Las hojas y ramas de la vegetación presentan variaciones morfológicas dependiendo de la especie (variación inter-específica) lo cual hace que las capacidades de intercepción difieran (Horton, 1919; Liu, 1998, citado por Mastachi, 2007). Los individuos de una misma especie también presentan diferencias (variación intra-específica) debido a la edad o a que su crecimiento no sigue un patrón determinado, estas variaciones también se ven reflejadas en sus capacidades de intercepción. (Navar *et al.* 1999 citado por mastachi, 2007)

Dispositivos de medición: Algunos autores (Llorens *et al.* 1997, Crockford y Richardson, 2000; Kuraji y Tanaka, 2003) mencionan que la posición de los dispositivos de medición del flujo de traslocación, así como las diferencias en la sincronización del tiempo para registrar los datos de lluvia influye en el registro de la pérdida por intercepción.

2.6 Modelos clásicos de intercepción

Rutter (1967) encontró que la tasa de evaporación por intercepción de lluvia en un bosque de pino era varias veces mayor que su tasa de transpiración. De acuerdo con los resultados de Stewart (1977) en los bosques, las tasas de evaporación por transpiración y por intercepción son muy diferentes, lo que hace importante determinar individualmente estas tasas de forma independiente, ya que la estimación en conjunto tiene desventajas (Rutter *et al.* 1971).

Se han propuesto diferentes modelos de intercepción (modelo de almacenamiento, numérico y estocástico entre otros). Estos modelos requieren información sobre la tasa de evaporación durante las lluvias, drenaje desde la cubierta, evaporación desde las cubiertas mojadas, resistencia aerodinámica, coeficiente de traslocación, proporción de la lluvia interceptada por las ramas y troncos y capacidad de almacenamiento de la cubierta saturada (Rutter *et al.* 1975 y Gash, 1979).

La ventaja de los modelos es que están basados en la física con empirismos restringidos, con una infalibilidad mayor y más adecuados en situaciones extremas de sequía (Gash y Morton 1978). En cuanto a los principales modelos, Rutter (1971, 1975) desarrolló un modelo para la intercepción basado en la estructura de la vegetación y en el clima. Posteriormente Gash (1979) simplificó el modelo mediante la introducción de menor cantidad de información (precipitación diaria en vez de horaria), siendo esta última la razón del éxito de este moldeo analítico (Gash *et al.* 1995).

Existen otros modelos numéricos con un nivel de complejidad intermedio (Mulder 1985, Whitehead y Kelliher 1991) o con un nivel de complejidad mayor como el modelo de cascada de Jetten (1996), y otros tipos de modelo como el modelo estocástico de Calder (1986).

2.6.1 Modelo de Rutter et al. (1971)

Rutter *et al.* (1971, 1975) desarrollaron un modelo numérico de intercepción de la precipitación, basado en el equilibrio de balance de agua en el dosel de la vegetación. Originalmente, el modelo de intercepción fue desarrollado para un bosque de pino *Corsican* en Gran Bretaña y fue aplicado a numerosos tipos de bosques alrededor del mundo, incluyendo bosques tropicales (Calder *et al.* 1986; Lloyd *et al.* 1988; Hutjes *et al.* 1990). Tanto el modelo de Rutter (Modelo de almacenamiento) y Gash (Modelo Analítico) ambos con base física, tienen empirismos restringidos al máximo posible a los valores de los parámetros cuya significación física es conocida (Lloyd *et al.* 1998). El modelo de Rutter requiere el conocimiento de la estructura de la cubierta vegetal como S (capacidad de almacenamiento del dosel), ρ (coeficiente libre del flujo de traslocación), S_t (capacidad de almacenamiento de agua en el tronco) y pt (coeficiente de lluvia que se desvía por la corteza del árbol). El modelo realiza un balance hídrico de la cubierta y troncos, en donde las entradas son las cantidades de lluvia a cada hora y los parámetros meteorológicos necesarios para estimar la evaporación potencial, teniendo como resultados la precipitación incidente, el flujo cortical y la evaporación de agua de lluvia interceptada. Los valores de C (agua almacenada en la vegetación) pueden ser mayores o menores a los de la capacidad de almacenamiento, S . Se asume que existe una tasa de evaporación potencial E_w a la que se llega cuando todas las superficies de la cubierta están mojadas, es decir cuando $C > S$. Cuando $C \leq S$ se asume que:

$$-\frac{dC}{dt} = E_w \cdot \frac{C}{S} \quad 3$$

La evaporación potencial E_w , se calcula a partir de la ecuación de Penman – Monteith (Monteith, 1965):

$$E_w = \frac{\Delta R_N + \frac{\rho_a C_p (\delta e)}{r_a}}{\lambda(\Delta + \gamma)} \quad 4$$

donde R_N es la radiación neta, Δ la pendiente de la curva de la presión de vapor a saturación, γ es la constante psicrométrica, r_a la resistencia aerodinámica al transporte de vapor de agua desde la cubierta en un plano de 2 m sobre ella, ρ_a la densidad de aire, C_p es el calor específico del aire seco a presión constante, δe el déficit de presión de vapor y λ el calor latente de vaporización del agua.

La resistencia aerodinámica (r_a) generalmente se calcula de la velocidad del viento y la rugosidad superficial, usando una relación que asume que los efectos de la estabilidad atmosférica y fuerzas de resistencia (Thom, 1975):

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_m - d}{z_{om}}\right) \ln\left(\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right)}{k^2 u_z} \quad 5$$

donde k es la constante de Von Karman 0.41, z_m la altura de medición del viento, z_{om} la longitud de la rugosidad en que gobierna la transferencia del momentum, z_{oh} la longitud de la rugosidad que gobierna la transferencia de calor y vapor de agua, z_h la altura de medición de la humedad, d es la altura de desplazamiento con respecto a un plano de referencia y u_z es la velocidad del viento a la altura z sobre la superficie del suelo.

También se precisan los parámetros de drenaje D_o y b , que se utilizan para describir el goteo de la cubierta, el cual usa una función exponencial:

$$D = D_o e^{b(C-S)} \quad 6$$

donde D es la tasa de drenaje, D_o la tasa de drenaje cuando $C=S$ (Dosel saturado), y b es el coeficiente de drenaje.

Con la definición de S escrita anteriormente, D tiende a cero cuando $C < S$. Con esto se evita el problema de un drenaje finito cuando $C = 0$ (Calder, 1977).

Originalmente el modelo de Rutter se aplicó en un bosque de Pino *Corsican*, teniendo un valor de $D_o = 0.0019$ mm/min. Para otras coberturas con diferente LAI, tal valor podría ser 0.0019 LAI/LAIc , donde LAIc fué el índice de área foliar del bosque de pino de Rutter. Asumiendo que S es directamente proporcional al LAI, la tasa de drenaje para otras cubiertas vegetales pueden ser obtenidos de los valores como $S = 1.05$, valor obtenido por Rutter *et al.* (1975) para un bosque de pino (Rutter y Morton, 1977; Lloyd *et al.* 1988; Jetten, 1996).

De acuerdo a lo anterior:

$$D_o = \frac{0.0019}{1.05 \cdot S} = 0.0018 \cdot S \quad 7$$

$$b = \frac{3.7 \cdot 1.05}{S} = 3.86 \cdot S \quad 8$$

Así los cambios de almacenamiento en el dosel de la vegetación se determinan por la porción de lluvia que golpea el dosel, el drenaje del dosel y la evaporación del agua interceptada.

$$\frac{dC}{dt} = (1 - p - p_t)R - E_w - D \quad \text{Cuando } C \geq S \quad 9$$

$$\frac{dC}{dt} = (1 - p - p_t)R - \left(\frac{C}{S}\right)E_w - D \quad \text{Cuando } C < S \quad 10$$

donde C es la cantidad de agua almacenada en el dosel, R la intensidad de la precipitación E_w la tasa de evaporación del dosel húmedo y D es la tasa de drenaje.

Para la comprensión del modelo se presenta el siguiente esquema representando por Gash y Morton (1978).

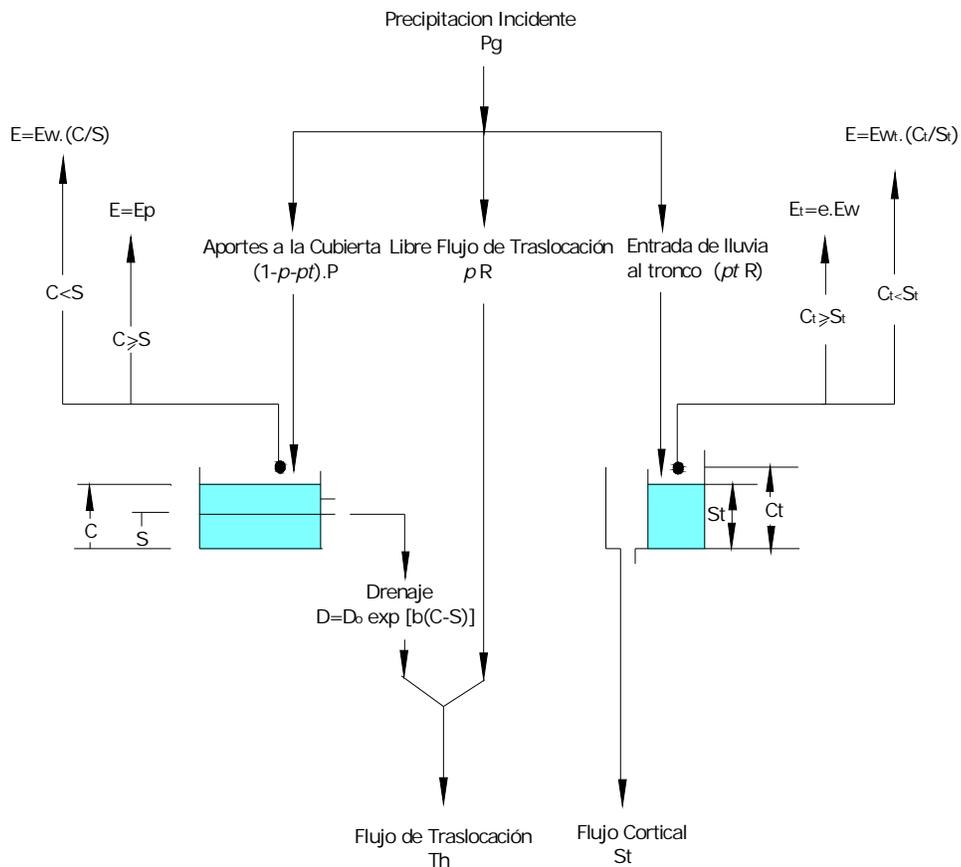


Figura 5. Modelo de Rutter esquematizado por Gash y Morton (1978)

2.6.2 Modelo analítico de Gash (1979)

El modelo analítico de Gash (1979) es una simplificación del modelo de Rutter *et al.* (1971) basado en eventos singulares de lluvia, que se calibra utilizando datos meteorológicos horarios y se aplica luego con valores de lluvia diarios (lo que genera errores, Pearce y Rowe, 1981; Herbst y Thamm, 1994). Este modelo ha sido reformulado por Gash *et al.* (1995). El modelo ya había intentado introducir cambios para situaciones especiales como alta evaporación de los troncos (Gash *et al.* 1980) o lluvias de gran magnitud (Pearce y Rowe, 1981). El modelo de Gash ha sido aplicado en diferentes condiciones especialmente en bosques tropicales (Bruijnzeel y Wiersum, 1987; Waterloo, 1994; Gash *et al.* 1995; Wickel, 1997; Schellekens *et al.*, 1999; Van Dijk, 2002), en bosque siempre verde en Nueva Zelanda (Pearce y Rowe, 1981), en bosque natural amazónico (Lloyd *et al.* 1988), en los desiertos de México (Navar y Bryan, 1994) y con menos éxito en bosque abierto (Teklehaimanot *et al.* 1991); este último inconveniente condujo a la reformulación del modelo de Gash (1979) conocido como *Sparse Canopy* (Gash *et al.* 1995; citado por Van Dijk y Bruijnzeel, 2001).

El modelo analítico de Gash (Gash, 1979) considera que la lluvia ocurre en una serie de eventos discretos, y cada uno comprende tres distintas fases:

1. La primera para mojar la cubierta vegetal, en el cual la lluvia P_g es menor que la lluvia necesaria para mojar totalmente el dosel de la vegetación $P'g$.
2. La segunda fase es el de saturación
3. Un tercer periodo en el que la cubierta vegetal se seca tras haber cesado la lluvia.

La estructura de la cubierta vegetal es de nuevo descrita por S , p , St y pt . Se asume que las condiciones meteorológicas prevalecen durante las dos primeras fases y que son los mismos valores medios de intensidad de la precipitación \bar{R} y evaporación \bar{E}_w . Las simplificaciones que Gash (1979) introdujo, permite que el modelo pueda ser aplicado en un periodo de base diaria. La cantidad de agua que se necesita para saturar completamente el dosel $P'g$ (Gash, 1979) es definida como:

$$P'g = \frac{-\bar{R}S}{\bar{E}_w} \ln \left[1 - \frac{\bar{E}_w}{\bar{R}} (1 - p - p_t)^{-1} \right] \quad 11$$

donde $P'g$ es la cantidad de agua que se necesita para saturar el dosel, \bar{R} la Intensidad media de la precipitación en un dosel saturado y \bar{E}_w es la evaporación media del dosel húmedo.

El modelo usa una serie de expresiones para calcular la pérdida de intercepción durante las diferentes fases de una tormenta. De acuerdo a lo descrito anteriormente, la cantidad total de lluvia interceptada y disponible para la evaporación es la suma de las tres etapas mencionadas:

$$I = I_w + I_s + I_d \quad 12$$

Las ecuaciones para calcular cada una de las fases descritas anteriormente y enunciadas en la ecuación 12, son:

$$I_w = P'g(1 - \rho) - S \quad 13$$

$$I_s = \frac{\bar{E}}{\bar{R}}(Pg - P'g) \quad 14$$

$$I_d = S \quad 15$$

En ausencia de medición de variables climáticas que no permitan determinar la evaporación a través de la ecuación de Penman – Monteith (Monteith, 1965), se puede hacer una regresión lineal de la intercepción con respecto a la precipitación incidente tal que:

$$I = aP_g + b \quad 16$$

donde I es la intercepción, P_g la altura de la precipitación; siendo a y b las constantes del ajuste.

El coeficiente de regresión de pérdidas por intercepción de la precipitación (con base en una tormenta) está dada por dada por:

$$a = \frac{\bar{E}_w}{\bar{R}} \quad 17$$

$$b = \left(S + \int E dt \right) \left\{ 1 - \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}} \right) (1 - \rho)^{-1} \right\} \quad 18$$

donde a es la pendiente de la regresión, \bar{E}_w es la tasa de evaporación media del dosel húmedo y \bar{R} es la tasa de la precipitación media.

Si se considera que ni $\overline{E_w}$ ni \overline{R} varían considerablemente en el tiempo, entonces $\overline{E_w}$ puede estimarse de \overline{R} en ausencia de observaciones climáticas arriba del dosel (Rowe, 1983; Bruijnzeel y Wiersum, 1987; Dykes, 1997). El valor de $\overline{E_w}$ calculado de esta manera, tiende generalmente a ser más alto que el calculado con la ecuación 4 (Gash *et al.* 1980; Bruijnzeel y Wiersum, 1987; Waterloo *et al.* 1999).

2.6.3 Gash (1995)

Este modelo asume una estructura cuasi – bidimensional de la superficie. Se introduce un parámetro adicional que es la fracción de cobertura del dosel, c , donde la capacidad de almacenamiento del dosel, S y la evaporación del dosel húmedo son linealmente dependientes.

Al hacerlo evitaron un error conceptual, como lo fue hecho en el modelo original, es decir que la tasa relativa de evaporación $\frac{\overline{E}}{\overline{R}}$, es independiente de $(1 - p - pt)$. Esto resultaría un logaritmo negativo cuando se calcula la lluvia necesaria para saturar el dosel de la vegetación, P'_G , en una situación donde $(1 - p - pt)\overline{R} < \overline{E}$ (Gash *et al.* 1995).

También fue ligeramente cambiada la formulación del flujo cortical y la capacidad de almacenamiento en los troncos, y para efectos de la reformulación del modelo la precipitación no llega directamente a los troncos antes de que el dosel se sature (Gash *et al.*, 1995).

2.6.4 Gash y Valente (1997)

Los autores hicieron una pequeña modificación al modelo de Gash *et al.* (1995) en donde se reemplaza la evaporación del dosel ($\overline{E_c}$) con un término que relaciona la evaporación de troncos cuando el dosel está saturado, $(1 - \epsilon)\overline{E_c}$ (donde $\epsilon = 0.023$ es una constante del modelo, asumiendo que la evaporación es cero en áreas sin vegetación).

Tabla 4. Componentes de la pérdida por intercepción de Gash *et al.* (1979, 1995) y Gash y Valente (1997).

Parámetros	Gash <i>et al.</i> (1979)	Gash <i>et al.</i> (1995)	Gash y Valente (1997)
Cantidad de lluvia necesaria para saturar el dosel (P'_G)	$-\frac{\bar{R}}{\bar{E}_w} S \ln \left[1 - \frac{\bar{E}_w}{\bar{R}(1-\rho-\rho t)} \right]$	$-\frac{\bar{R}}{\bar{E}_c} S_c \ln \left[1 - \frac{\bar{E}_c}{\bar{R}} \right]$	$-\frac{\bar{R}}{(1-\varepsilon)\bar{E}_c} \frac{S}{c} \ln \left[1 - \frac{(1-\varepsilon)\bar{E}_c}{\bar{R}} \right]$
Tasa de evaporación media del dosel húmedo	$\bar{E} = \bar{E}_w$	$\bar{E} = c\bar{E}_c$	$\bar{E} = c\bar{E}_c$
Capacidad de almacenamiento	S	$S = cS_c$	$S = cS_c$
Fracción de la cobertura vegetal	$1-p$	c	c
Componentes de las pérdidas por intercepción			
Para m , pequeñas tormentas ($P_G < P'_G$) insuficientes para saturar el dosel	$(1-p-p_t) \sum_{j=1}^m P_{G,j}$	$c \sum_{j=1}^m P_{G,j}$	$c \sum_{j=1}^m P_{G,j}$
Para n grandes tormentas ($P_G \geq P'_G$) suficientes para saturar el dosel	$n(1-p-p_t)P'_G - nS$	$ncP'_G - ncS_c$	$ncP'_G - ncS_c$
Evaporación durante la tormenta	$\frac{\bar{E}_w}{\bar{R}} \sum_{j=1}^n (P_{G,j} - P'_G)$	$\left(c \frac{\bar{E}_c}{\bar{R}} \right) \sum_{j=1}^n (P_{G,j} - P'_G)$	$\left(\frac{c(1-\varepsilon)\bar{E}_c}{\bar{R}} \right) \sum_{j=1}^n (P_{G,j} - P'_G)$
Evaporación después de que ha finalizado la lluvia	nS	ncS_c	ncS_c
Pérdida de Intercepción por los Troncos:			
Para q tormentas que saturan el tronco $\left(P_G \geq \frac{S_t}{p_t} \right)$	qS_t	qS_c	qS_t
Para $m+n-q$ tormentas que no saturan el tronco $\left(P_G < \frac{S_t}{p_t} \right)$	$p_t \sum_{j=1}^{m+n-q} P_{G,j}$	$p_t \sum_{j=1}^{n-q} P_{G,j}$	$p_t c \left[1 - \frac{(1-\varepsilon)\bar{E}_c}{\bar{R}} \right] \sum_{j=1}^{n-q} (P_{G,j} - P'_G)$

2.7 La Vegetación y bosque de encinos en México

Rzedowski (1978) señala, que en el territorio mexicano están presentes todos los grandes biomas que se han descrito en la superficie de nuestro planeta; desde desiertos, donde la aridez permite sólo el desarrollo de algunas especies, hasta las densas y frondosas selvas húmedas, donde la vegetación es completamente tropical; y de las zonas bajas y calientes hasta los páramos de alta montaña, donde todas las noches hay heladas o al menos la temperatura baja a niveles cercanos a 0°C.

En el estado de Querétaro existen diversos tipos de vegetación, en gran parte encontramos al matorral xerófilo, pero también bosque de pino, pino-encino, encino por mencionar alguno de ellos. La localización depende desde luego en gran parte de la topografía y tipo de suelo.

Los bosques de encinos están constituidos por especies del genero *Quercus*, constituyen uno de los tipos de vegetación mas importantes y característicos de las regiones montañosas de clima templado en México. Los hay de muchos tipos, desde los caducifolios hasta los perennifolios, y desde los bosques bajos o matorrales hasta los que alcanzan alrededor de 30 m o más de alto. Se presentan en toda una gama de condiciones climáticas y edáficas, a veces mezclándose con otros tipos de vegetación o formando bosques cuyos dominantes son una o varias especies de encinos (Zavala, 2000).

Los encinos de México crecen en distintas zonas climáticas, desde las secas y frías hasta las cálidas y húmedas, y desde las templadas y relativamente semiáridas hasta las relativamente frías y húmedas (Zavala, 1990). Su distribución en el hemisferio norte alcanza las 500 especies, de las cuales 250 son americanas y la gran mayoría de éstas se distribuyen en México y Centroamérica (Trelease, 1924, citado por Amador, 2005). La diversidad de estas especies se ve influenciada por una gama muy amplia de condiciones ecológicas de nuestro país, condiciones que afectan la conformación y propiedades hidrológicas del dosel de las comunidades que forman.



Figura 6. Zonas de bosque de coníferas y encinos en México (Tomado de Woodward, 2005)

Según Rzedowski (1978), la presencia de estas comunidades vegetales ocurre en todos los estados excepto Yucatán y Quintana Roo, y a una altitud preferencial entre 1200 y 2800 msnm. Se distribuyen sobre diversas clases de roca y clima, con un rango de precipitación media anual entre 350 y 2000 mm y donde las temperaturas por debajo de los 0°C son comunes en el período más frío del año (González Medrano, 2003, citado por Amador, 2005).

2.8 Efecto ambiental de la intercepción

Los árboles y los bosques ayudan a la retención de agua. Debido a la estructura y su composición, muchos suelos cubiertos de bosques tienen una gran capacidad para retener agua. Un primer fenómeno biofísico es el que cumplen las hojarascas y el humus proveniente de la descomposición de hojas, ramas y frutos, que se acumula sobre el suelo. Las hojarascas y el humus protegen al suelo del impacto directo del agua, ayudando a mantener la infiltración de agua sin perturbar los suelos.

De la precipitación un cierto porcentaje se infiltra, escurre y se percola en los suelos. La diversidad de cultivos, su biomasa y los distintos niveles de intercepción determinan el inicio de la captación de agua que constituye el más importante recurso hídrico, ya que estos forman los ríos, riachuelos, espacios de humedad para la producción de los cultivos, formación de lluvias y el mantenimiento de las cuencas hidrográficas; entre los factores que parecen influir en el resultado, se incluye a las especies arbóreas y el uso de suelo. En el caso específico de los bosques brumosos, la existencia de mayores cantidades de agua se debe a la intercepción de nubes (la neblina sobre la vegetación) que compensa las tasas más altas de

evapotranspiración, dando como resultado un mayor caudal durante una temporada seca (Bruijnzeel, 2000). Ahí donde se asocia la deforestación con la compactación del suelo (por ejemplo, debido a la construcción de caminos, uso de maquinaria agrícola pesada o la conversión a tierras de pastoreo), el escurrimiento puede aumentar y reducirse, menores volúmenes de recarga (niveles freáticos mas profundos).

Los bosques pueden mitigar el riesgo de inundaciones al reducir la cantidad de agua que escurre sobre la superficie durante las tormentas de alta intensidad, en zonas de mayor captación pueden inundarse durante tormentas fuertes y prolongadas pero probablemente ocurra una reducción de escurrimiento si en esas zonas hay bosques (Bruijnzeel y Bremmer, 1989 citados en Chomitz y Kumari, 1998).

El control de la erosión es otro beneficio para la cuenca hidrológica que se atribuye al bosque. Se plantea que la filtración de agua pluvial es mayor en los bosques naturales y mixtos, lo que permite la reducción del escurrimiento y la erosión, así también las cubiertas vegetales modifican significativamente la distribución espacial de la precipitación neta que alcanza la superficie del suelo, y como consecuencia se producen variaciones espaciales de la humedad y de las propiedades físicas y químicas de los suelos (Durocher, 1990). Además, al retener el suelo, se cree que las raíces de los árboles reducen la vulnerabilidad del suelo a la erosión, especialmente en las pendientes más pronunciadas. La presencia de árboles también puede ayudar a reducir el impacto de la lluvia en el suelo y, por ende, el nivel de desalojamiento de partículas. Es extremadamente difícil establecer una relación clara entre la cubierta forestal y la erosión. La evidencia más clara tiene que ver con el papel que los bosques representan en la reducción de la erosión laminar. El uso y la administración del bosque también son factores críticos, y algunos estudios muestran que los diferentes regímenes de explotación forestal y prácticas de construcción de caminos producen diferentes niveles de erosión laminar (Douglas *et al.* 1992). Los bosques ayudan a prevenir la sedimentación de los cuerpos de agua de la parte baja de la cuenca y, por lo tanto, preservan o prolongan el valor de la infraestructura acuática: los canales de riego, los puertos y las vías marítimas, las represas para las hidroeléctricas y las plantas de tratamiento de agua. De hecho, la proporción de descarga de sedimentos depende de una serie de factores del sitio, incluyendo el tamaño de la cuenca de captación, la geología y topología locales, la estabilidad de las márgenes de los ríos y el estado del uso de suelo y de los caminos (Chomitz y Kumari, 1998).

3. ESTUDIO EXPERIMENTAL: MICROCUENCA LA BARRETA

3.1 Ubicación y descripción del la microcuenca La Barreta

Las coordenadas geográficas en unidades UTM del área de interés son: 2304000 Norte; 2300000 Sur; 338000 Oeste; 343000 Este. La Microcuenca la Barreta tiene un área aproximada de 471 hectáreas; forma parte de la cuenca Santa Catarina, que se encuentra ubicada en la Delegación Santa Rosa Jáuregui en el municipio de Santiago de Querétaro (Figura 7), y se ubica dentro de la región hidrológica número 12 Lerma-Chapala (Domínguez, 2005).

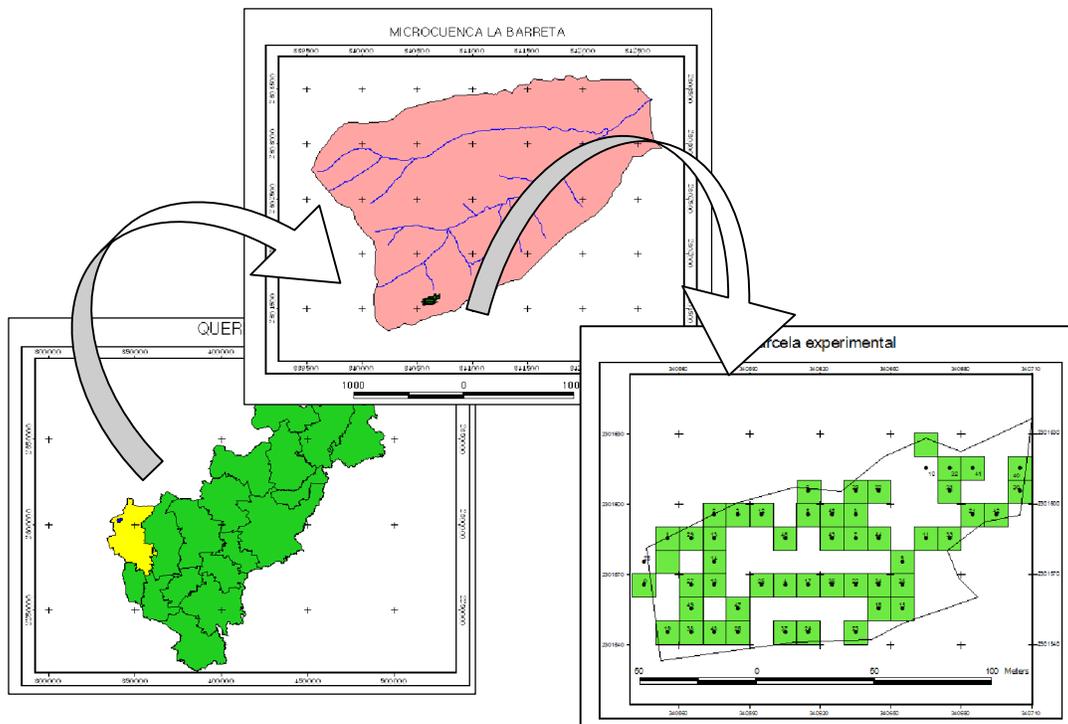


Figura 7. Ubicación del la Microcuenca La Barreta

Clima

El clima en el municipio de Querétaro es templado y semi - seco, con una temperatura media anual de 18° C, alcanzando temperaturas máximas de 36° C entre mayo y junio, siendo estos meses los más calurosos, los meses mas fríos son diciembre y enero, en los que se registran temperaturas mínimas de -3° C. La precipitación media anual es de 555 mm. Los vientos predominantes son del noroeste, sur y suroeste (INEGI, 2007).

Tipo de suelo

Los suelos de La microcuenca la Barreta son de origen residual en las partes altas y coluvio-aluviales en las partes bajas, con dominancia de phaeozems, vertisoles, litosoles y kastanozems (INEGI, 2007).

Vegetación

En la microcuenca La Barreta existen diferentes tipos de vegetación; algunos presentan buenas condiciones como el matorral *crasicaule* y relictos de encinos (*Quercus* aff. *Castanea* y *Quercus* aff. *Laeta*) en las partes más altas, formando un dosel de hasta 8 metros de altura. Las especies arbóreas asociadas son poco frecuentes y se pueden mencionar al tepozán (*Buddleja cordata*) y al granjeno (*Condalia mexicana*). También se pueden encontrar especies como el huizache chino (*Acacia schaffneri*), mezquite (*Prosopis laevigata*), tepehuaje (*Senna polyantha*), ocotillo (*Dodonaea viscosa*), maguey (*Agave salmiana*), nopal hartón (*Opuntia hyptiacantha*), biznaga de huamiche (*Ferocactus histrix*) y biznaga de chilitos (*Mammillaria magnimamma*), entre otras especies.

Orografía

La microcuenca La Barreta está conformada principalmente por lomeríos y sierras. Litológicamente se compone de conglomerados, calizas, esquistos y de rocas ígneas extrusivas, siendo estas últimas las más predominantes. La microcuenca La Barreta está comprendida entre los 2100 y 2600 msnm (INEGI, 2007).

3.2 Área de Estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la unidad de escurrimiento de la microcuenca La Barreta, específicamente en el Parque Ecológico Joya – La Barreta. El parque está formado por una serie de fragmentos de seis tipos de vegetación, desde conservada a altamente modificada y perturbada, ubicados en un gradiente altitudinal con una diferencia de 500 m. En cuanto a la vegetación de encinos, esta se encuentra en las partes altas, cerca del parteaguas de la unidad de escurrimiento (Domínguez, 2005).

La parcela experimental es de aproximadamente 1 hectárea, y es representativo del ecosistema de encino (*Quercus* aff. *Castanea*) que se encuentra en el parque ecológico Joya – La Barreta. La parcela experimental se ha dividido en cuadrantes de muestreo con dimensiones de 10 X 10 metros, de las cuales se seleccionaron aleatoriamente 50 de ellos. Los cuadrantes de muestreo fueron enumerados para facilitar su identificación e instrumentación (Figura 8).

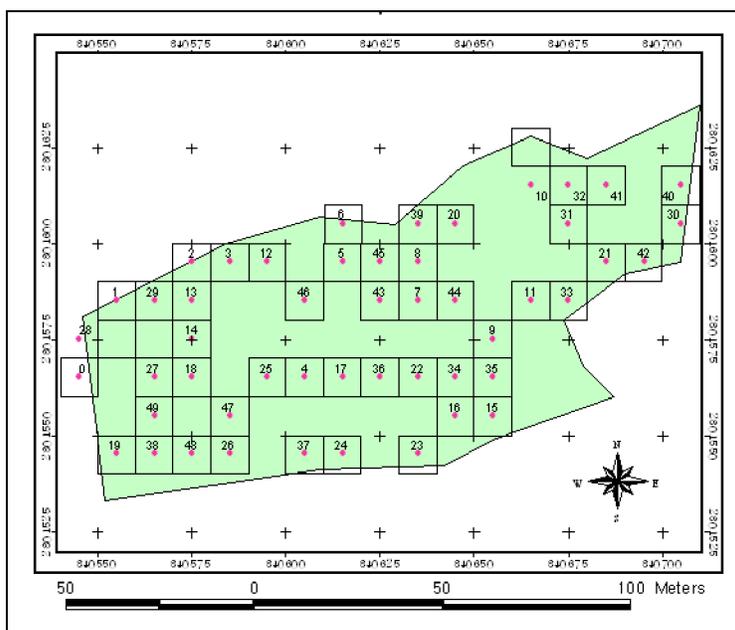


Figura 8. Parcela experimental dentro del bosque de encino

3.2.1 Estudio dasométrico de la vegetación y selección de cuadrantes

La dasometría se ocupa de la medición de los árboles, de la determinación del volumen de los bosques y de los crecimientos de los árboles y bosques.

En la microcuenca La Barreta se ha realizado la caracterización detallada de los atributos de la vegetación (especie, altura total, altura de la primera rama, diámetro nominal, radio de copas, altura de estratos, etc.) presentes en los cuadrantes de muestreo (Figura 8), en donde se encontraron las siguientes especies en el estudio dasométrico: *Condalia mexicana*, *Buddleia* sp., *Quercus* sp., *Eupatorium* sp., *Montanoa* sp., *Ptelea trifoliata* y *Salvia* sp. (Estudio realizado por el Dr. Luis G. Hernández Sandoval de la Facultad de Biología de la Universidad Autónoma de Querétaro).

Se graficaron las alturas de las diferentes especies encontradas para los 50 cuadrantes de muestreo seleccionados aleatoriamente, a fin de identificar los diferentes estratos y para la selección de los posibles cuadrantes que, en su momento, habrían de ser instrumentados para el monitoreo de la intercepción de lluvia en la comunidad del bosque de encino (Figura 9).

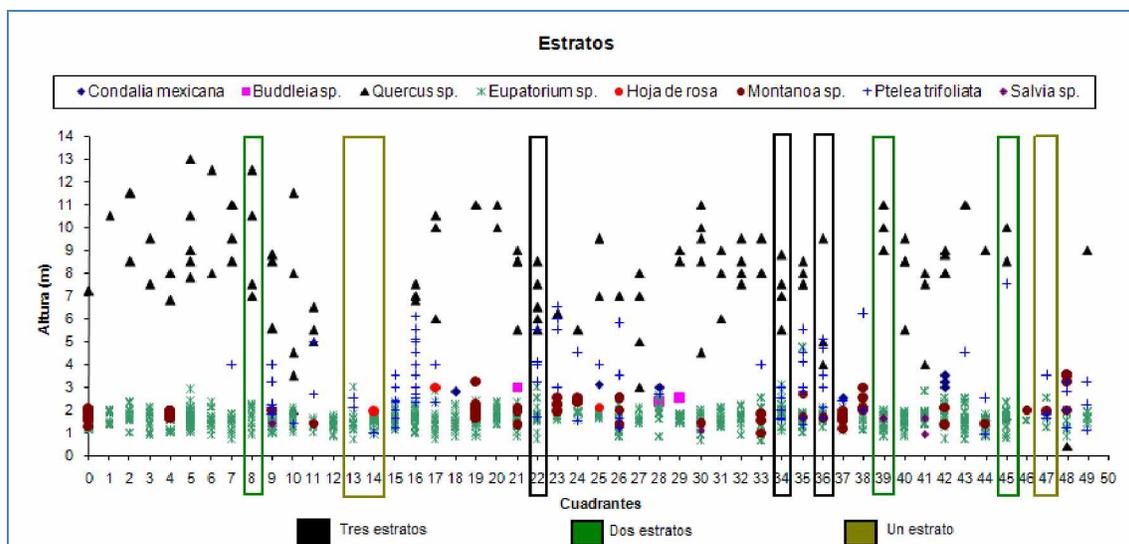


Figura 9. Estratos de vegetación observados en 50 cuadrantes (de 10 x 10 m) del área experimental con bosque de encino, en la microcuenca La barreta, Qro.

Los cuadrantes de muestreo se agruparon por estratos, es decir, a los cuadrantes que presentaron solo vegetación herbácea se les denominó como *ecosistema con un estrato de vegetación*, a los que presentaron vegetación herbácea y arbórea como *ecosistema con dos estratos de vegetación* y finalmente a los cuadrantes con vegetación herbácea, arbustiva y arbórea se les denominó *ecosistema con tres estratos de vegetación*, así también, se seleccionaron en campo los cuadrantes definitivos para la instrumentación procurando tener accesibilidad y que estuvieran juntos para la instalación de los dispositivos de medición (Figura 10).

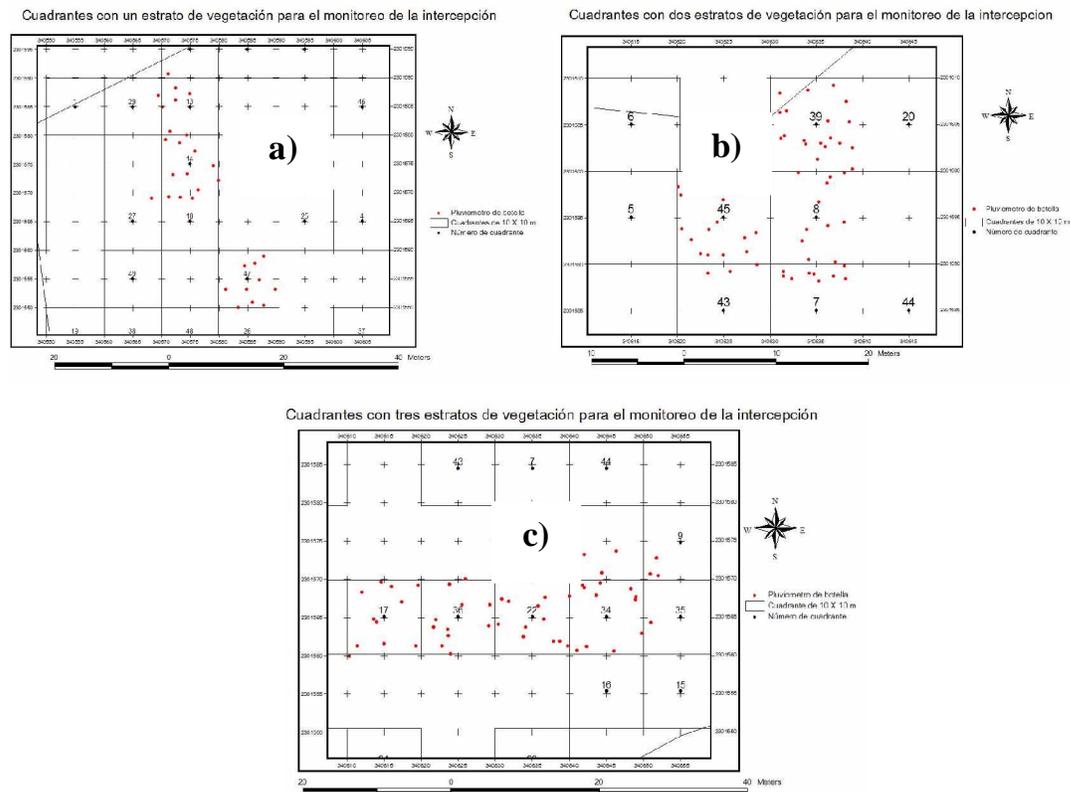


Figura 10. Cuadrantes de muestreo seleccionados en la parcela experimental para la determinación de la intercepción. a) Con un estrato de vegetación, b) Con dos estratos de vegetación y c) Con tres estratos de vegetación.

Después de haber clasificado las áreas y revisado las condiciones de medición, se seleccionaron los cuadrantes de muestro indicados en la tabla 5, para determinar la intercepción de lluvia.

Tabla 5. Cuadrantes de muestreo seleccionados y número de estratos en la parcela experimental.

No. cuadrante	Número de estratos	Tipo de vegetación
13, 14 y 46	1	<i>Eupatorium</i> sp.
8, 39 y 45	2	<i>Eupatorium</i> sp. y <i>Quercus</i> sp.
36, 22 y 34	3	<i>Eupatorium</i> sp., <i>Ptelea trifoliata</i> y <i>Quercus</i> sp.

3.2.2 Selección de árboles y determinación de la edad del bosque

Los encinos muestreados se encuentran en los cuadrantes 8, 22, 34, 36, 39 y 45 (el total fue de 18 árboles). Se seleccionaron 10 árboles de encinos siguiendo las recomendaciones del Dr. Humberto Suzán Azpiri (Profesor Investigador de la Universidad Autónoma de Querétaro, expresadas de manera verbal), en el sentido de que: (a) se eligieran árboles de diámetro diferente, y (b) los ejemplares fueran lo más verticales que fuera posible. Existen varias herramientas para extracción de muestras de arboles, una de ellas es la barrena de Pressler que es un instrumento para obtener muestras de madera en árboles vivos y estudiar su evolución y desarrollo; la barrena es de acero con una longitud que varía de 150 a 800 mm en incrementos de 50 mm.



Figura 11. Barrena de Pressler

Las muestras se extrajeron sin daño alguno en forma cilíndrica de madera desde la corteza hasta la médula (se realizó con una barrena de Pressler, Figura 11). La muestra fue procesada posteriormente (Figura 12) para el conteo de los anillos en el Laboratorio de Fisiología Vegetal ubicado en la Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Juriquilla; todas las muestras fueron lijadas y colocadas bases de madera de tal manera que no presentaran movimiento alguno (Figura 12, a) para facilitar el conteo de anillos.

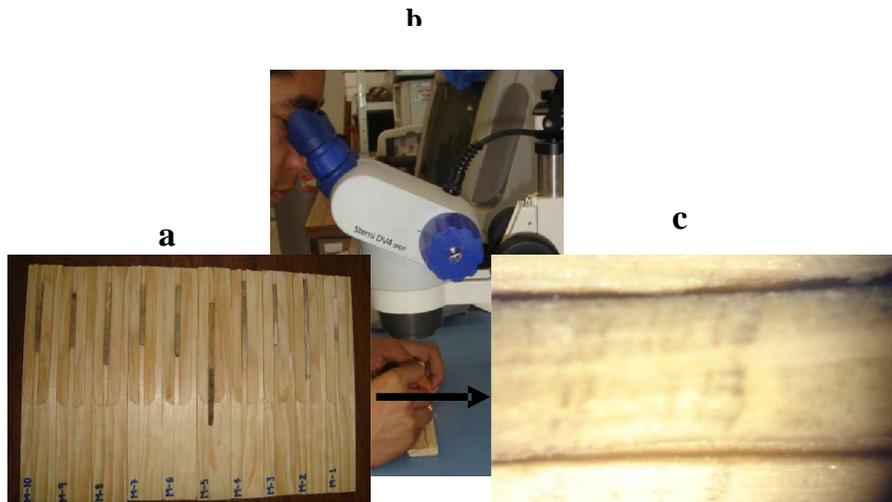


Figura 12. Muestras de encinos de la parcela experimental de la microcuenca La Barreta. (a) Lijado de muestras cilíndricas, (b) conteo de anillos, (c) vista microscópica de los anillos

3.3 Medición de los componentes de la Intercepción

3.3.1 Pluviómetros de Botella

Investigadores de la Universidad de Dakota del Sur realizaron una calibración de botellas plásticas de 2 litros para correlacionar la precipitación registrada en pluviómetros digitales y la que se pueden medir con botellas plásticas, llegando a la conclusión que no existe una diferencia significativa (Keith J. Wrage, F. Robert Gartner y Jack Butler, 1994). En la parcela experimental de bosque de encinos se ha ocupado un total de 180 pluviómetros de botella para la medición del flujo de traslocación, debido al alto costo de adquisición de pluviómetros digitales. Los pluviómetros de botella construidos tienen las siguientes características (Figura 13):

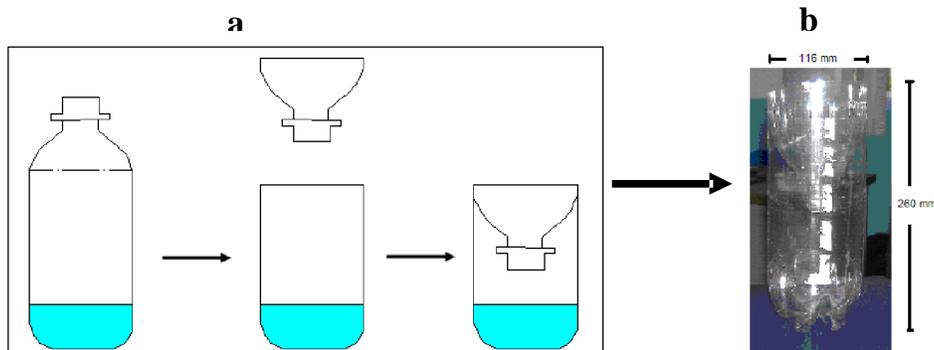


Figura 13. Esquema del dispositivo de medición, a) Armado del pluviómetro de botella, b) Pluviómetro de botella

El agua captada en los pluviómetros de botella fue medida con una probeta en mililitros de agua y se convirtieron a milímetros de precipitación con la siguiente expresión:

$$p = \frac{1000 V_p}{A_p}$$

19

donde p es la precipitación acumulada en mm, V_p es el volumen colectado en la probeta en ml y A_p es el área de la boquilla del pluviómetro de botella.

3.3.2 Medición del flujo de traslocación (Th)

Los pluviómetros de botella se colocaron aleatoriamente pero tratando de conservar una homogeneidad en el espacio de cada cuadrante de muestreo, de modo que al quedar debajo de cada estrato el agua captada por cada uno de estos dispositivos fuera la que dejara pasar cada estrato de vegetación superior. La figura 14 ilustra la forma en que fueron colocados los pluviómetros.

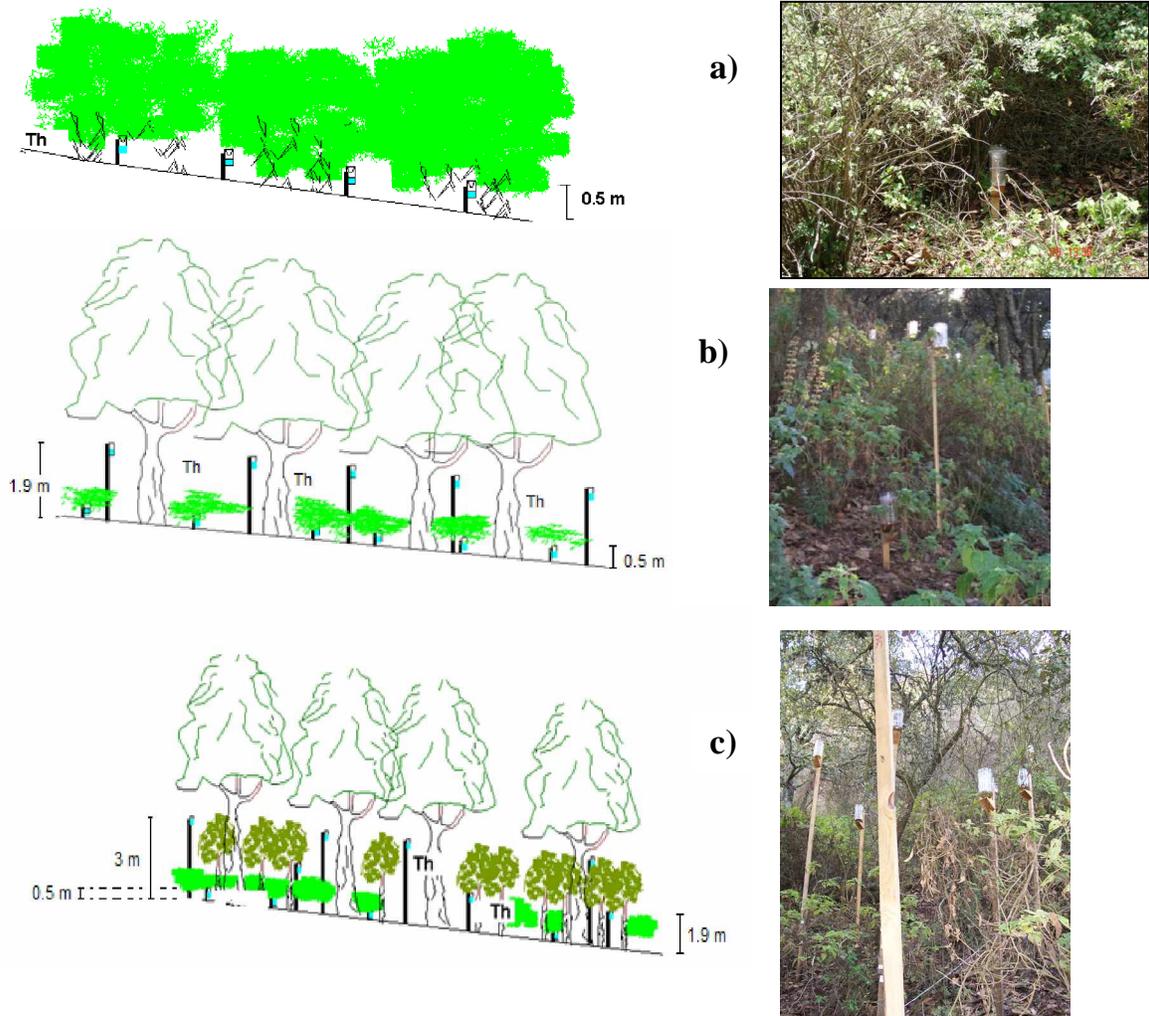


Figura 14. Dispositivos de medición del flujo de traslocación en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta. (a) Ecosistema con un estrato de vegetación, (b) Ecosistema con 2 estratos de vegetación, (c) Ecosistema con 3 estratos de vegetación (esquema sin escala), **Th** es el flujo de traslocación.

Cada dispositivo de medición se encuentra georeferenciado y está colocado en una base de madera ajustada con cinchos de plástico para evitar movimientos laterales. También se ha identificado a cada uno con una clave, para referirlo al cuadrante en que se ubica y al estrato de medición. Por ejemplo:

13B09 {

- 13 - Corresponde al número de cuadrante
- B - Corresponde a la vegetación baja
- M - Corresponde a la vegetación media
- A - Corresponde a la vegetación alta
- 09 - Corresponde al número de pluviómetro instrumentado dentro del cuadrante

En la tabla 6 se presenta el número de pluviómetros de botella instalados en cada cuadrante de muestreo, así como las alturas de cada estrato de vegetación con las cuales se definieron las necesarias para colocar las bases de madera.

Tabla 6. Altura y número de pluviómetros de botella instalados en los cuadrantes seleccionados, en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta.

Cuadrante	Especie de vegetación	Altura de instalación de los dispositivos (m)	Dispositivos por cuadrante	Altura de los estratos de vegetación (m)		
				mínima	media	máxima
13, 14 y 47	<i>Eupatorium</i> sp.	0.5	10	0.7	1.4	3
8, 39 y 45	<i>Eupatorium</i> sp.	0.5	10	0.73	1.63	2.3
	<i>Quercus</i> sp.	1.9	10	7	9.5	12.5
34, 22 y 36	<i>Eupatorium</i> sp.	0.5	10	0.7	1.8	3
	<i>Ptelea trifoliata</i>	1.9	10	1.6	2.4	5.5
	<i>Quercus</i> sp.	3	10	4	6.7	9.5

Respecto a la medición del flujo de traslocación, esta se realizó con una probeta para cada pluviómetro de botella después de haberse presentado un evento de lluvia. Sin embargo no siempre se logro medir al instante debido a la disponibilidad del transporte, pero, se vaciaban todos los pluviómetros de botella de nueva cuenta para evitar que al presentarse otra lluvia se acumulara el flujo de traslocación.

3.3.3 Flujo Cortical

Otro componente importante de la intercepción es el flujo cortical. Para su medición se seleccionaron árboles de encino que no tuvieran ramas ni bifurcaciones en la parte baja del tronco, y que además fueran lo más recto posible. El escurrimiento fustal se midió en troncos de 6 árboles de encino, cada tronco se le quitó parte de la corteza con un cincel formando una ranura alrededor del tronco, se preparó también una especie de mezcla de parafina con vaselina que fue adherida en la ranura para fines de protección (contra enfermedades de hongos y/o pudrición debido a la humedad). Se utilizó una manguera de 1.5 cm de diámetro colocada (después de cortarla en sentido longitudinal) en la ranura en forma de espiral alrededor del tronco que formó dos 2.5 vueltas, y a una altura de un metro del suelo, también se sujetó en la parte superior e inferior manguera con alcayatas (clavo en forma de ángulo) para evitar movimientos. El agua que escurrió de los troncos fue almacenada en botellas plásticas de 3 L y medida con probetas.

3.4 Equipos de Medición

3.4.1 Pluviómetro digital

La precipitación fue registrada mediante un pluviómetro digital de flujo continuo (Figura 15). El pluviómetro tiene un diámetro de 160 mm y registra eventos de precipitación con distintos intervalos de tiempo (de 1, 5, 10, 15, 30, 60 y 120 minutos). Para la investigación se eligieron intervalos de 10 minutos; se identificó el inicio y término de cada evento y se almacenó la información en milímetros de precipitación.

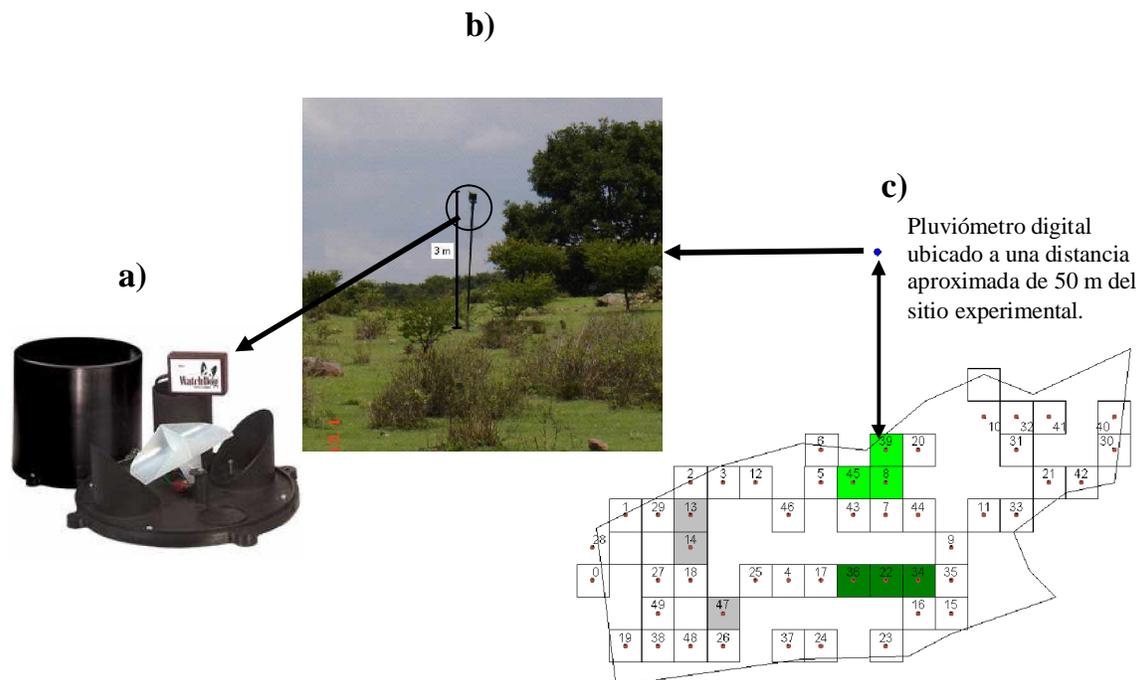


Figura 15. Pluviómetro digital instalado en el área experimental de la microcuenca La Barreta, a) Partes del pluviómetro, b) Colocación del pluviómetro, c) Localización del pluviómetro en el área.

Debido a que las ramas de la vegetación arbórea pueden actuar como barreras y afectar las mediciones de los eventos, se ubicó al pluviómetro digital en una zona despejada y a una distancia de 50 metros del área de estudio.

3.4.2 Medición de la humedad en el suelo

El monitoreo de la humedad del suelo fue determinado por sensores de humedad (marca Water Mark) y por TDR (Reflectometría de dominio temporal).

La reflectometría de dominio temporal (*time domain reflectometry*, TDR) es un dispositivo móvil, su técnica y principios físicos fueron establecidos a finales de la década de los sesenta. Básicamente, el método determina el contenido volumétrico de agua contenida en un suelo (% o m^3/m^3 , por ej.) midiendo el tiempo requerido de una onda electromagnética para atravesar un par de varillas metálicas introducidas en un material (Gray y Spies, 1995).

La medición del tiempo se realiza por los cambios más o menos bruscos producidos por las variaciones en la impedancia conforme la onda pasa del cable al suelo al principio de las varillas, lo que produce una reflexión parcial de la onda que regresa al reflectómetro, y un segundo reflejo que se produce cuando dicha onda alcanza el campo abierto al salir del extremo final de las varillas. El tiempo transcurrido entre ambas reflexiones está determinado por la denominada constante dieléctrica aparente, que depende del material. *El fundamento de este método es que la constante dieléctrica del agua es muy alta en comparación con el suelo seco y con el aire.* Cuanto mayor humedad tenga el medio, la velocidad de propagación será menor, y el tiempo requerido por la onda para recorrer las varillas será mayor

El WATERMARK mide la fuerza con la que las plantas extraen el agua del suelo (en centibares). Los sensores se dejan colocados en el área de estudio, y con el medidor (es una pantalla de lectura) sirve para realizar las lecturas de los sensores.

Se instalaron aleatoriamente un total de 15 sensores de humedad a una profundidad de 20 cm, manera tal que se tuviera cierta homogeneidad en el espacio (cuadrantes de muestreo 39, 8, 45, 36, 22 y 34, Figura 16a). La toma de datos se realizó con un medidor de humedad (marca Water Mark). El rango de valores va de 0 a 200 centibares. Cuando los valores son cercanos a 0, el suelo tiene mayor disponibilidad de humedad; y con valor cercano a 200 indica un suelo con menor disponibilidad de humedad. Cabe mencionar que el registro de los valores de tensión (en centibares) se hizo antes y después de las tormentas, esto para determinar la cantidad de agua de lluvia que retiene el suelo (en porcentaje) debido al paso de las gotas a través de la vegetación.

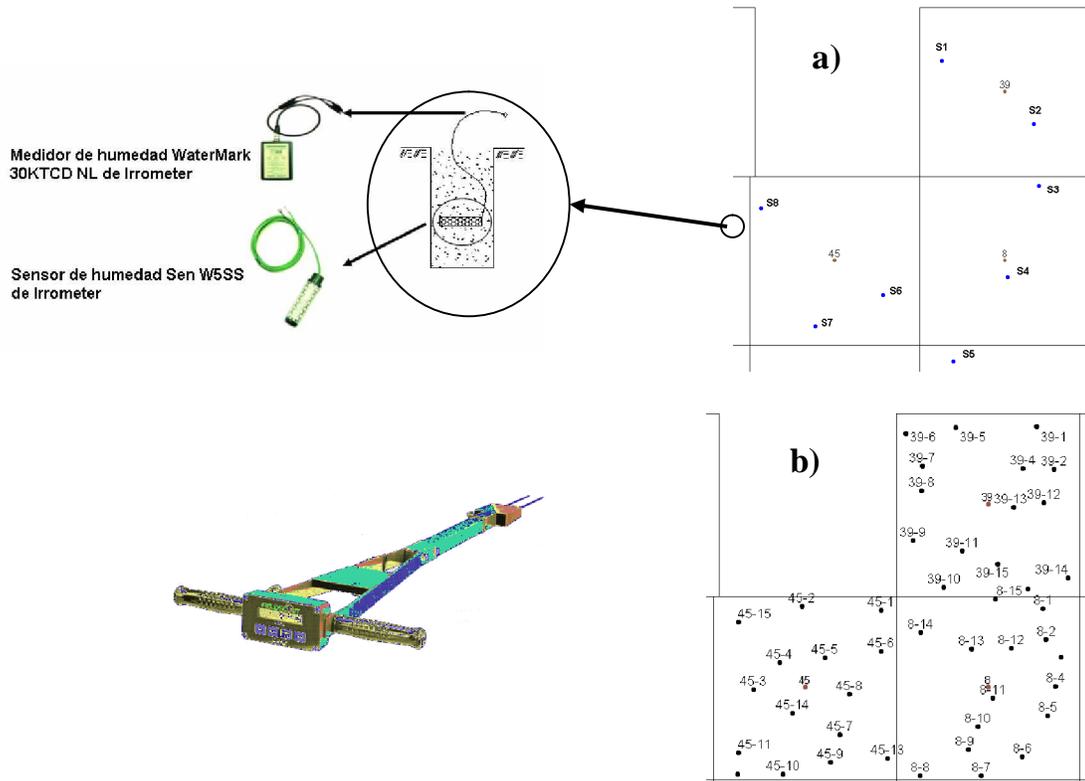


Figura 16. Distribución espacial de los puntos de muestro para la humedad del suelo en los Ecosistemas con 2 y 3 estratos, a) Sensores de humedad, b) TDR

Para mayor detalle de la distribución de la humedad del suelo, se utilizó el TDR. Este equipo arrojó valores en porcentaje de humedad en el suelo el cual fue monitoreado antes y después de cada evento de precipitación (tal como se realizó con los sensores Water Mark). Las mediciones se realizaron a una profundidad de 20 cm y con 15 puntos de muestreo por cuadrante (cuadrantes 39, 8, 45, 36, 22 y 34), según muestra la figura 16b.

Los puntos de muestro se ubicaron de acuerdo a la profundidad del suelo, cuyo espesor es variable en los cuadrantes pero no tiene más de 25 cm.

3.4.3 Fracción de cobertura del dosel

Partiendo del hecho que la estructura del dosel de la vegetación es uno de los principales factores que influyen en los procesos de intercepción, se decidió hacer un análisis de la estructura del dosel del bosque de encinos con base en los trabajos realizados por Zhu *et al.* (2003), Guevara *et al.* (2005), Behrens y Diepenbrock (2006), en los cuales a partir de imágenes digitales y mediciones del LAI de la vegetación se busca caracterizar su estructura.

Índice de Área Foliar (LAI)

El índice de área foliar (LAI) es uno de los parámetros más útiles para caracterizar la vegetación. Se define como unidades de superficie de hoja verde por unidad de superficie de terreno, pudiéndose valorar como total (ambas caras) o proyectada (superficie capaz de interceptar la radiación). La relación entre total y proyectada es de 2.0 para las especies de hoja ancha y oscila entre 2 y 3 para las hojas aciculares, con valores típicos entre 2.4 y 2.6 (Waring *et al*, 1982). En lo sucesivo LAI será siempre el proyectado si no se dice otra cosa.

Como medidas directas están las destructivas (cortar árboles y medir la superficie del follaje, Curran *et al*, 1992) o las medidas usando la hoja caída (Chason *et al*, 1991, Fassnatch *et al*, 1997) Estos procedimientos pueden llegar a ser extremadamente engorrosos y caros en tiempo y personal. Las medidas indirectas se pueden basar en relaciones alométricas (White *et al*. 1997) o en la comparación entre la radiación solar dentro y fuera del bosque (Fassnatch *et al*. 1994). Representan un gran avance a pesar de sus limitaciones.

Cuando se desea conocer el LAI a escala regional o mayor, la teledetección es una herramienta muy útil. Existen bastantes referencias de su aplicación para determinar LAI en bosques de coníferas (Danson y Curran, 1993; Peterson *et al*. 1987; Spanner *et al*, 1990; Chen y Cihlar, 1996; Nemani *et al*. 1993; Fassnatch *et al*. 1997).

Para determinar el LAI sobre el terreno se empleo un LICOR 2000, es un aparato diseñado específicamente para medir el LAI y ha sido ampliamente usado (Welles y Norman, 1991; Villalobos, Orgaz y Mateos, 1995; Deblonde *et al*. 1994). Este aparato relaciona al LAI con la radiación bajo y sobre el dosel.

Se tomaron lecturas del LAI de los diferentes estratos de vegetación con ayuda del dispositivo mencionado en el párrafo anterior (ver Figura 17). El LAI fue medido una sola vez en la época de lluvias de 2007. Las mediciones se realizaron en cada punto de muestro (y para cada dispositivo de medición), de tal manera que se tuviera registro de la cobertura total por cada uno de los estratos.



Figura 17. LI – COR LAI-2000

En la tabla 7 se presentan las alturas de las mediciones del LAI para las especies de vegetación encontradas en los cuadrantes de muestreo instrumentados.

Tabla 7. Altura de medición del índice de área foliar de las diferentes especies de vegetación en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta.

Estrato	Cuadrante	Altura de medición del LAI (metros)	Especie
Herbáceo	13, 14, 47, 39, 8, 45, 34, 22 y 36	0.5	<i>Eupatorium</i> sp.
Arbustivo	34, 22 y 36	1.9	<i>Pteleatrifoliata</i>
Arbóreo	34, 22 y 36	2.5	<i>Quercus</i> sp.
	39, 8 y 45	1.9	<i>Quercus</i> sp.

Análisis de imágenes

En este estudio, el análisis estuvo enfocado a estudiar la porosidad del dosel en los diferentes estratos, buscando correlacionar ésta propiedad con la interceptación calculada a partir de los registros de los pluviómetros. Para ello se obtuvo una serie de 50 fotografías digitales tomadas con una cámara Sony modelo DSC-P200 de 7.2 Mega píxeles de resolución (Sony Corporation, 2005) montada sobre una base tipo trípode, la cual tuvo una altura variable de 0.1 y 1.7 m con la finalidad de contar con imágenes bajo cada uno de los estratos presentes, conservando el plano horizontal nivelado y tratando de evitar efectos de sombras o proyecciones anómalas de las hojas y ramas. Las imágenes tomadas fueron de una profundidad de color de 16 millones y un tamaño de 2592 por 1944 píxeles, para su análisis posterior.

Las imágenes fueron tomadas en cada uno de los puntos donde se instalaron los pluviómetros, pero sólo en tres de los cuadrantes instrumentados. Para ello se eligió un cuadrante para cada una de las combinaciones de estratos (Figura 18). Así, la toma de las imágenes se realizó buscando que las condiciones climáticas fueran aptas para evitar reflejos

brillantes o la inclusión de elementos ajenos a nuestro estudio. Por ello, las imágenes obtenidas fueron tomadas entre las siete y las nueve de la mañana.

Para el análisis, se decidió separar las imágenes en grupos de acuerdo al cuadrante y al tipo de estrato que les corresponde, asignándoles un nombre compuesto por el número de cuadrante, la inicial del tipo de estrato (B para el estrato bajo, M para el estrato medio y A para el estrato alto) y el número de punto muestreado. Por ejemplo: para el punto tres, del cuadrante ocho, correspondiente al estrato medio se le asignó el nombre 8M03. En la Figura 19 se presentan algunas de las imágenes tomadas en los diferentes cuadrantes y para los diferentes tipos de estratos.

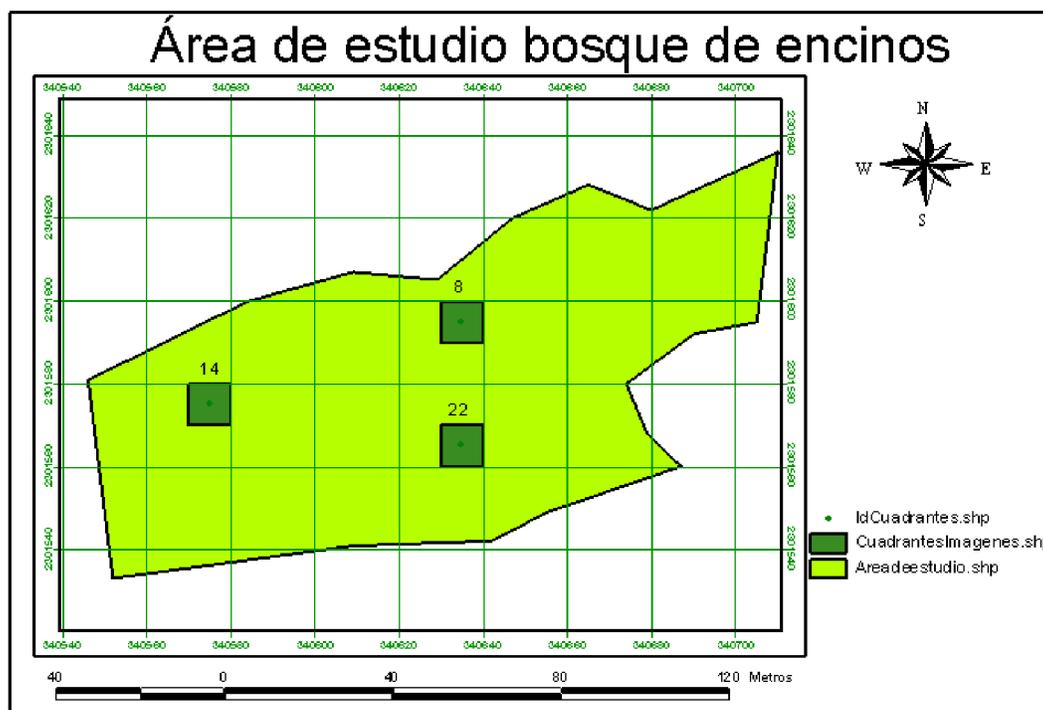


Figura 18. Cuadrantes seleccionados para el análisis de imágenes

El análisis de las imágenes se realizó utilizando la técnica basada en la *segmentación y conteo de píxeles* de los rasgos de interés. Se realizó un pre-tratamiento de las imágenes. La primera etapa de este pre-tratamiento consistió en hacer la conversión de las imágenes de formato *color* a un formato de *escala de grises*; para ello, se utilizó el paquete de cómputo Paint Shop Pro versión 7 (Jasc Software, 2004).



a



b



c



d



e



f

Figura 19. Muestra fotográfica de imágenes obtenidas para el análisis de la estructura de la vegetación: a) y b) estrato bajo, c) y d) estrato medio, y e) y f) estrato alto

Posteriormente se procedió a realizar cortes de las imágenes utilizando el paquete de cómputo Adobe Photoshop CS2. Se generan imágenes circulares con el propósito de evitar el efecto de borde, limitando el análisis con un radio determinado. Se busca además que el área representativa de las imágenes no fuera traslapada con otra. Enseguida, se procede a determinar el número de píxeles que ocupa el conjunto de nuestro interés (vegetación), el cual se divide posteriormente entre el número total de píxeles de la imagen para obtener el porcentaje de área ocupada por la vegetación, y mediante su inverso, el porcentaje de área porosa.

3.5 Análisis y modelación

Coefficiente de variación

Una medida de la dispersión relativa de los datos, que toma en cuenta su magnitud, está dada por el coeficiente de variación, este, es una medida de la dispersión relativa de un conjunto de datos, que se obtiene dividiendo la desviación estándar del conjunto entre su media aritmética.

$$CV = \frac{S_x}{\bar{X}} \quad 20$$

donde CV es el coeficiente de variación, S_x es la desviación estándar de los datos y \bar{X} a media aritmética.

Sesgo

En el muestreo probabilístico, se define el sesgo como la diferencia entre el valor esperado del estimador y la cantidad de población que está siendo estimada. Cuando esta diferencia es cero, se dice que el estimador es *insesgado*. Cuando se escoge un estimador hay que tener cuidado para estar seguro de que no esté subestimando o sobrestimando sistemáticamente la cantidad poblacional.

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (y_i^{model} - y_i^{obs}) \quad 21$$

donde B es el sesgo, y_i^{model} es el valor predicho por el modelo y y_i^{obs} es el valor observado.

Raíz cuadrada del error cuadrático medio

Otro criterio razonable para escoger un determinado estimador de un parámetro es tomar aquel que cometa, en promedio, el menor error en la estimación.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} (y_i^{model} - y_i^{obs})^2} \quad 22$$

donde $RMSE$ es la raíz cuadrada del error cuadrático medio, y_i^{model} es el valor predicho por el modelo y y_i^{obs} es el valor observado.

Eficiencia

Se realizó un análisis para determinar la eficiencia de los modelos utilizados (modelo de Gash 1979 y 1995; Gash y Valente 1997)

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{1=n} (y_i^{model} - y_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^{1=n} (\bar{y}^{obs} - y_i^{model})^2} \quad 23$$

donde E es la eficiencia del modelo, y_i^{model} es el valor predicho por el modelo y y_i^{obs} es el valor observado.

Coefficiente de correlación de Pearson

Para verificar el grado de ajuste de los datos se usará el coeficiente de correlación de Pearson que es un índice estadístico que mide la relación lineal entre dos variables cuantitativas.

$$Sx = \sqrt{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2} \quad 24$$

$$Sy = \sqrt{n \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)^2} \quad 25$$

$$R = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)}{S_x \bullet S_y}$$

26

donde R el coeficiente de correlación de pearson S_x es la desviación estándar de los valores medidos, S_y es la desviación estándar de los valores calculados, X_i son los valores medidos y Y_i son los valores calculados.

4. RESULTADOS

4.1 Precipitación en la Zona de Estudio

En el área de estudio se registraron un total de 78 eventos durante los meses que comprenden los periodos Agosto – Noviembre de 2006 (330.96 mm) y Junio – Septiembre de 2007 (415.15 mm), teniendo un evento máximo de 40.0 mm, uno de 0.3 mm y un valor medio de 9.5 mm (Ver figura 20).

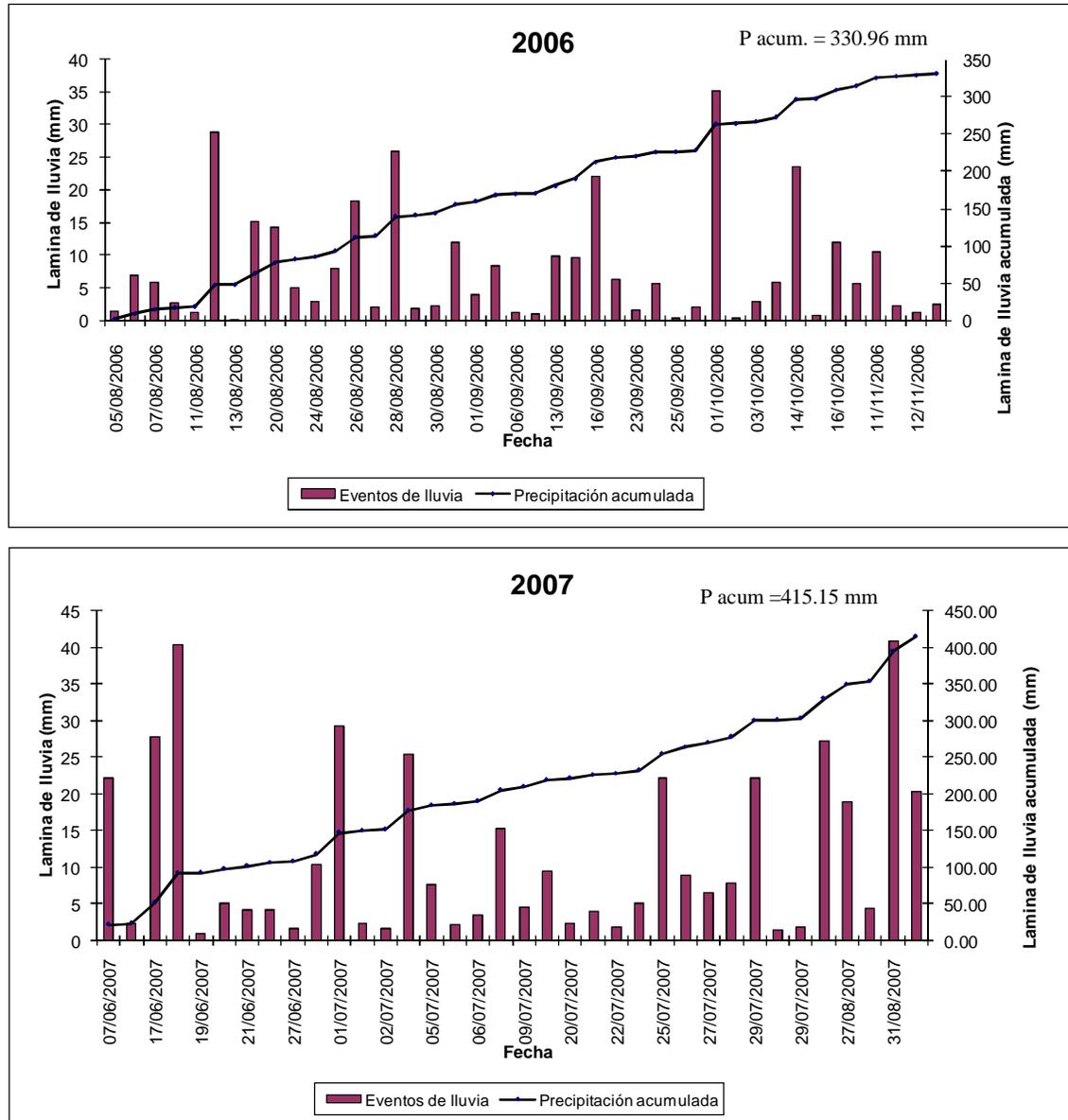


Figura 20. Láminas de Precipitación registradas durante 2006 y 2007, en el la parcela experimental de la microcuenca La Barreta.

De los 78 eventos de lluvia registrados en el 2006 y 2007, el 69% son menores a 10 mm, el 19% oscilan entre 10 y 25 mm y el 12% son mayores a los 25 mm. De igual manera se tiene que, de los 78 eventos, un 38% comprende una duración de 0 – 60 minutos, un 38% con una duración de 60 – 180 minutos y por último se tiene un 23 % con eventos mayores a los 180 minutos (referencia tabla 8). Se tiene que la duración característica de una tormenta en la micro cuenca La Barreta oscila entre una y tres horas tal como lo menciona Núñez, 2007. Así también las precipitaciones anuales del 2005 y 2006 para la microcuenca la Barreta son menores a los reportados para el estado de Querétaro, en donde se registran valores de precipitaciones entre 500 y 600 mm (INEGI, 2007).

Tabla 8. Precipitación mensual (periodo de lluvias) 2006 y 2007 en la parcela de la microcuenca La Barreta.

		2006				2007		
		Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Junio	Julio	Agosto
Lámina (mm)	No. eventos	17	13	8	4	10	22	3
	Total	143.4	86.46	86.29	16.67	118.6	212.25	64
	Mínima	0.3	0.5	0.51	1.25	0.9	1.51	4.3
	Media	28.9	22	35.1	10.61	40.3	29.2	40.9
	Máxima	8.43	6.50	10.78	4.16	11.86	9.64	21.33
	Desviación estándar	8.911	6.04	12.38	4.33	13.55	9.32	18.43

4.1.1 Precipitación incidente, intensidad de la lluvia e independencia de eventos en el sitio experimental para la determinación de la intercepción.

Para la determinación de la intercepción de lluvia, se midieron un total de 20 eventos de precipitación en la parcela experimental (6 del 2006 y 14 del 2007.), para los cuales se registraron 40.9, 12.2 y 0.9 mm de lamina máxima, media y mínima, respectivamente. De los 20 eventos medidos en el sitio experimental se tuvo un 35% con una duración menor a una hora, 35% de una a tres horas y un 30% mayor a tres horas.

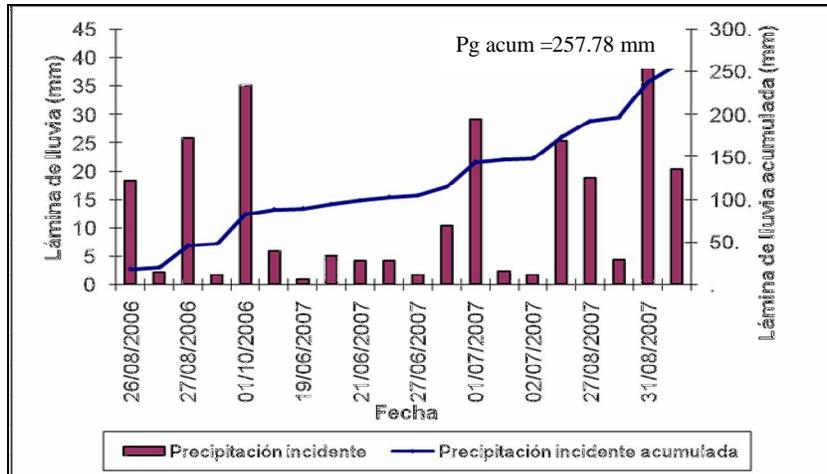


Figura 21. Lamina de lluvia registrada en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta para la determinación de la intercepción.

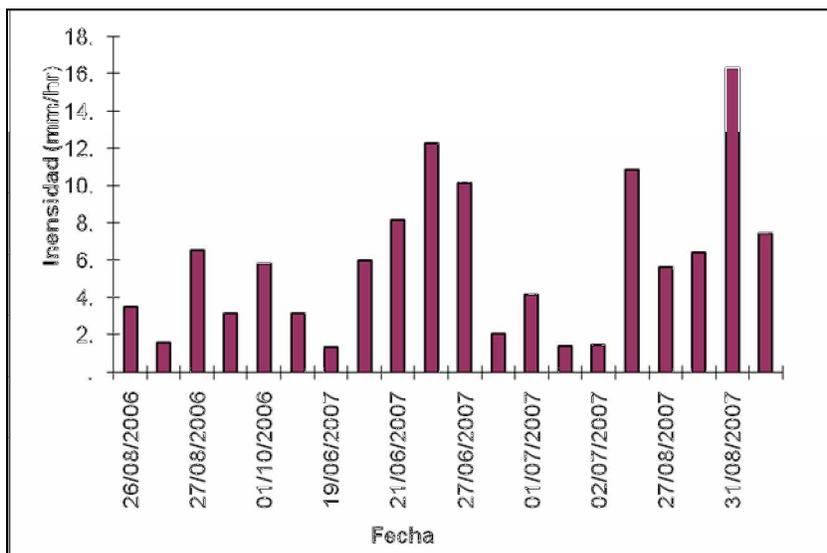


Figura 22. Intensidad media por evento de lluvia registrada en el sitio experimental para la determinación de la intercepción.

Con respecto a la intensidad de la lluvia, se tiene una máxima, media y mínima de 12.3, 5.28 y 1.35 mm/hr respectivamente, teniendo que el 25% fue menor a 2.5 mm/hr, 50% entre 2.5 y 7.5 mm/hr y 25% mayores a 7.5 mm/hr. En la figura 22 y en la tabla 9 se muestran los valores de la intensidad y las fechas en que se presentaron los eventos medidos.

Tabla 9. Datos generales de la precipitación en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta.

Fecha	Precipitación (mm)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	Hora inicio	Hora final	Intervalo de tiempo sin medición del flujo de traslocación (aproximado)
26/08/2006	18.3	5.16	3.54	21:14 pm (25/08/2006)	02:34 am (26/08/2006)	
26/08/2006	2.1	1.33	1.57	13:14 pm (26/08/2006)	14:44 pm (26/08/2006)	11 hr
27/08/2006	25.8	3.93	6.59	10:35 am	14:40	19 hr
23/09/2006	1.6*	0.50	3.20	16:34 pm	17:24 pm	25 días
01/10/2006	35.1*	6.5	5.85	19:44 pm (30/09/2006)	02:44 am (01/10/2006)	7 días
14/10/2006	5.8*	1.83	3.16	19:36 pm	21:26 pm	13 días
19/06/2007	0.9*	1.28	0.70	21:30 pm	22:50 pm	5 días
20/06/2007	5	0.83	6.00	15:10 pm	16:00 pm	16 hr
21/06/2007	4.1*	0.50	8.20	15:10 pm	15:40 pm	24 hr
26/06/2007	4.1*	0.33	12.30	16:05 pm	16:25 pm	5 días
27/06/2007	1.7*	0.33	5.10	15:05 pm	15:25 pm	24 hr
28/06/2007	10.3*	5.00	2.06	17:35 pm	22:35 pm	24 hr
01/07/2007	29.2*	9.75	2.99	23:05 pm (30/06/2007)	08:55 pm (01/07/2007)	2 días
02/07/2007	2.4	1.66	1.44	01:25 am	03:05 am	4.5 hr
02/07/2007	1.7	1.16	1.45	21:35 pm	22:45 pm	18 hr
04/07/2007	25.38*	2.33	10.87	01:23 am	03:43 am	2 días
27/08/2007	18.8*	3.31	5.66	18:06 pm	21:25 pm	1 mes
28/08/2007	4.3	0.66	6.45	15:10 pm	15:50 am	20 hr
31/08/2007	40.9*	8.11	5.03	07:44 am	15:54 pm	3 días
30/09/2007	20.3*	2.71	7.47	17:55 pm	20:45 pm	1 mes

**Eventos seleccionados para el análisis de la interceptación tomando en cuenta que presentan al menos 24 horas de separación entre eventos de lluvia.*

El 50% de las Precipitaciones que se midieron en el sitio experimental son de acuerdo a su intensidad lluvias moderas según la Organización Meteorológica Mundial, cabe mencionar que otros factores como la velocidad del viento no fueron medidos, pero que influyen directamente en la intensidad de la lluvia y en la cantidad de agua interceptada por el dosel de la vegetación tal como lo mencionan Tsukamoto *et al.* (1988), Loescher *et al.*, (2000).

4.2 Características del Bosque de *Quercus*

La edad del bosque de *Quercus* sp. se determinó a través del conteo de anillos con apoyo del Laboratorio de Fisiología Vegetal de la Universidad Autónoma de Querétaro, resultando de 61 años en promedio (Tabla 10).

Tabla 10. Características principales del estrato arbóreo en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta (Septiembre de 2005).

<i>Quercus</i> sp.	Máxima	Media	Mínima
Edad (años)	115	61	26
Altura (m)	13	8	1.5
Cobertura de copas (%)	-	62	-
Densidad (arb ha ⁻¹)	-	222	-
Diámetro de troncos (cm)	60	18	4.6

El sitio experimental compuesto por encinos se clasifica como *Bosque de Quercus* de acuerdo a Rzedowski (1988) y por las características que presenta la zona, tales como: la altitud a la que se encuentran (2100 - 2600 msnm), tipo de suelo (rocas ígneas, suelo rocoso e inclinado, de diferentes texturas), precipitación anual (< 500 mm anuales), temperatura (16 a 26°C), características fisonómicas y estructurales (altura 6 – 30 m, hoja de menor tamaño por el clima seco, etc.). Se menciona que la cantidad de agua interceptada por la vegetación no solo depende de los factores meteorológicos sino también de la edad, tipo de bosque, especie, densidad forestal, arquitectura y estructura del dosel que dicha vegetación presente (Calder, 1990; Lankreijer *et al.*, 1993; G. Pypker *et al.*, 2005), que aunado a esto afecta la distribución espacial de la precipitación neta, capacidad de almacenamiento y por ende la disponibilidad de agua en el suelo para las plantas (Staelens *et al.* 2006). Se determinó la densidad, dominancia y frecuencia por unidad de superficie, estimando el llamado valor de importancia de las especies vegetativas encontradas en los cuadrantes instrumentados (Tabla 11, estudio realizado por la Facultad de Biología de la UAQ) teniendo como resultado 3 especies de vegetación de mayor V.I (*Eupatorium* sp., *Quercus* sp., y *Ptelea trifoliata*) cuyas características principales se presentan en la tabla 11; que por cierto, el valor de importancia (V.I) se determina mediante la expresión 27:

$$V.I = Dr + Dmr + Fr \quad 27$$

donde V.I es el valor de importancia, *Dr* es la densidad relativa (proporción porcentual de cada especie entre el número total de los árboles multiplicados por 100), *Dmr* la dominancia

relativa (la proporción de una especie en el área basal total evaluada multiplicado por 100) y *Fr* la frecuencia relativa (se obtienen a partir del porcentaje de la suma de una especie entre la suma de las frecuencias de todas las especies multiplicado por 100). El valor de importancia (*V.I*) indicado en la tabla 11, resultó ser que, la especie de vegetación *Eupatorium* sp. tiene el *V.I* mas alto en 8 de los 9 cuadrantes muestreados, teniendo en segundo orden a la especie *Quercus* sp. , y por último la especie *Ptelea trifoliata*. Estos no indica de manera directa que la intercepción de lluvia estará directamente influenciada por las especies *Eupatorium* sp., *Quercus* sp. y *Ptelea trifoliata* en los ecosistemas con uno, dos y tres estratos.

Tabla 11. Valor de Importancia (*V.I*) de las diferentes especies de vegetación en los cuadrantes de de muestreo en la parcela experimental, realizado por la Facultad de Biología de la Universidad Autónoma de Querétaro (Septiembre de 2005).

Cuadrante		Especie	Densidad Relativa	Dominancia Relativa	Frecuencia Relativa	V.I
Ecosistema con un estrato	13	<i>Ptelea trifoliata</i>	10	2.53	33.33	45.86
		<i>Eupatorium</i> sp.	90	97.46	66.66	254.135
	14	<i>Rosaceae</i> sp.	3.22	7.22	16.66	27.11
		<i>Ptelea trifoliata</i>	3.22	0.38	16.66	20.28
		<i>Eupatorium</i> sp.	93.54	92.38	66.66	252.60
	47	<i>Salvia</i> sp.	12.5	6.62	12.5	31.62
		<i>Montanoa</i> sp	6.25	4.10	12.5	22.85
		<i>Ptelea trifoliata</i>	18.75	27.28	25	71.03
		<i>Eupatorium</i> sp.	62.5	61.97	50	174.47
Ecosistema con dos estratos	8	<i>Quercus</i> sp.	11.42	62.24	50	116.89
		<i>Eupatorium</i> sp.	88.57	37.75	50	83.10
	39	<i>Salvia</i> sp.	2.63	0.11	12.5	15.24
		<i>Eupatorium</i> sp.	89.47	42.21	50	181.68
		<i>Quercus</i> sp.	7.89	57.67	37.5	103.06
	45	<i>Condalia mexicana</i>	2.5	0.66	12.50	15.66
		<i>Ptelea trifoliata</i>	2.5	4.60	12.50	19.60
		<i>Eupatorium</i> sp	90	40.19	50.00	180.19
		<i>Quercus</i> sp.	5	54.53	25.00	84.53
	Ecosistema con tres estratos	22	<i>Quercus</i> sp.	13.15	0.50	30
<i>Ptelea trifoliata</i>			15.78	27.22	30	73.01
<i>Eupatorium</i> sp.			71.05	72.26	40	183.32
34		<i>Ptelea trifoliata</i>	12.82	10.27	33.33	56.43
		<i>Quercus</i> sp.	10.25	48.24	22.22	80.72
		<i>Eupatorium</i> sp.	76.92	41.47	44.44	162.84
36		<i>Montanoa</i> sp.	2.63	0.26	9.09	11.98
		<i>Ptelea trifoliata</i>	15.78	14.03	27.27	57.10
		<i>Quercus</i> sp.	7.89	56.31	27.27	91.47
	<i>Eupatorium</i> sp.	73.68	29.38	36.36	139.43	

4.2.1 Clasificación por ecosistemas en el bosque de *Quercus*

Las especies con mayor valor de importancia (*V.I*) se agruparon por ecosistemas de uno, dos y tres estratos (Tabla 12). Teniendo mayor cobertura de vegetación en el ecosistema con dos estratos (116%), siguiendo el de uno (86.1%) y tres (69.3%) estratos respectivamente, para el índice de área foliar no se presenta diferencia significativa entre los diferentes ecosistemas presentándose valores de LAI de 3.30, 3.42 y 3.49 para el caso de uno, dos y tres estratos, respectivamente.

Tabla 12. Estructura del bosque por cuadrante seleccionado para la determinación de la interceptación en la parcela experimenta de la micorcuenca La Barreta.

Ecosistema con un estrato (Herbáceas)			
<i>Eupatorium</i> sp.	C - 13*	C - 14*	C - 47*
Altura promedio (m)	1.53	1.43	1.61
Cobertura (%)	88.65	83.56	86.33
Índice de Área Foliar (promedio)	3.811	3.033	3.079

Ecosistema con dos estratos (Encinos + Herbáceas)			
<i>Quercus</i> sp.	C - 8*	C - 39*	C - 45*
Edad promedio(años)	61	61	61
Altura promedio de árboles (m)	9.3	9.7	9.25
Cobertura de copas (%)	62.9	55.3	78.1
Índice de Área Foliar (promedio)	2.015	1.868	2.239
<i>Eupatorium</i> sp.			
Altura promedio de las hierbas (m)	1.5	1.7	1.5
Cobertura hierbas (%)	37.6	62	52.8
Índice de Área Foliar (promedio)	1.234	1.682	1.239

Ecosistema con tres estratos (Encinos + Arbustos + Herbáceas)			
<i>Quercus</i> sp.	C - 22*	C - 34*	C - 36*
Edad promedio(años)	61	61	61
Altura promedio de árboles (m)	6.8	7.2	6.1
Cobertura de copas (%)	43.3	57.2	63.1
Índice de Área Foliar (promedio)	1.734	1.699	1.803
<i>Ptelea trifoliata</i>			
Altura promedio de las hierbas (m)	2.47	1.93	2.04
Cobertura hierbas (%)	7.01	5.07	9.4
Índice de Área Foliar (promedio)	0.48	0.471	0.873
<i>Eupatorium</i> sp.			
Altura promedio de las hierbas (m)	1.53	1.7	1.71
Cobertura hierbas (%)	8.1	7.0	7.8
Índice de Área Foliar (promedio)	1.254	1.228	0.93

*Son los cuadrantes de muestreo instrumentados para la determinación de la interceptación

4.2.2 Cobertura de la vegetación en función del Índice de área foliar (LAI).

De la tabla 12 se tomaron los valores de cobertura y LAI de la especie *Eupatorium* sp. y *Quercus* sp., cabe señalar que los valores de cobertura fueron determinadas en septiembre de 2005 a diferencia del LAI que fue evaluada en 2007 del mismo mes. Para definir una relación entre la cobertura de vegetación y el índice de área foliar, se construyeron gráficas para el estrato herbáceo y el estrato arbóreo (figura 23 y 24), y se aplicaron ajustes de tipo semilogarítmicos (esta función fue la que mejor se ajustó a los datos) obteniéndose coeficientes de determinación de 0.805 y 0.68.

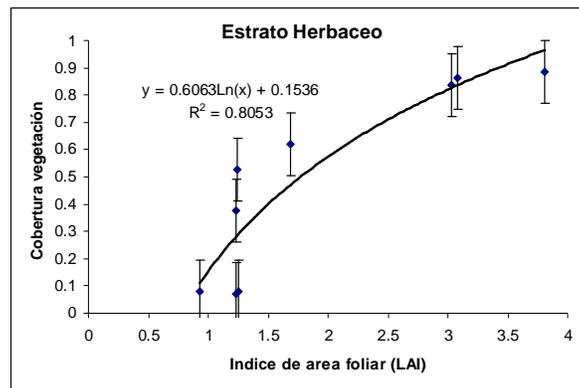


Figura 23. Relación entre el índice de área foliar (LAI) y la fracción de cobertura del dosel del estrato herbáceo.

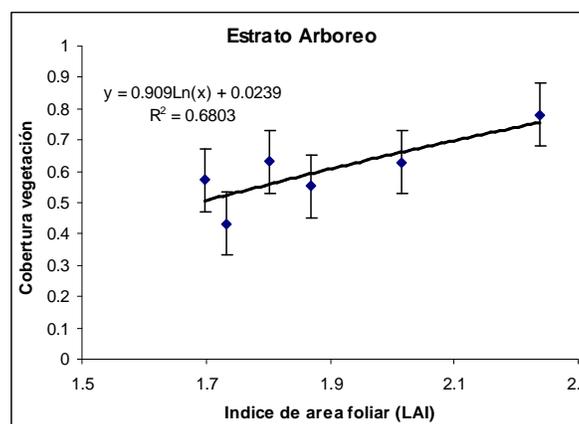


Figura 24. Relación entre el índice de área foliar (LAI) y la fracción de cobertura del dosel del estrato arbóreo.

Las expresiones de los ajustes de las figuras 23 y 24 se usaron para realizar la determinación de la cobertura en función del LAI para los diferentes ecosistemas encontrados en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta, teniendo como resultado una mayor cobertura en el ecosistema con dos estratos que es de 102.3 %, este se obtuvo de la suma de las coberturas de las especies *Eupatorium* sp. y *Quercus* sp., seguido por el ecosistema con un estrato que tuvo un 87.8 % conformado por la especie *Eupatorium* sp. y, en último lugar el ecosistema con tres estratos con un 83.2% de cobertura conformado por las especies *Eupatorium* sp., *Ptelea trifoliata* y *Quercus* sp.

Tabla 13. Parámetros de los ecosistemas, cobertura (C) y LAI determinados a través de la expresión de los ajustes de las figuras 20 y 21.

Tipo de vegetación	Ecosistema	LAI _{prom.}	C (cobertura en %)
<i>Eupatorium</i> sp.	Un estrato	3.307	87.8
<i>Eupatorium</i> sp.	Dos estratos	1.385	35.1
<i>Quercus</i> sp.		2.04	67.2
<i>Eupatorium</i> sp.	Tres estratos	1.137	23.1
<i>Ptelea trifoliata</i> *		0.608	7.1
<i>Quercus</i> sp.		1.745	53.0

*El valor de cobertura para *Ptelea trifoliata* es del determinado directamente de los transectos realizados (Ver Tabla 12)

Para determinar la fracción de la cobertura del dosel a nivel punto de muestreo, se usaron imágenes que fueron tomadas en septiembre de 2006 (usando la técnica basada en la segmentación y conteo de píxeles de los rasgos de interés) y de mediciones con el LAI-LICOR2000, se obtuvo como resultado para los estratos bajo y medio (cuadrantes 14B, 8B, 22B, 8M y 22M) los valores que se muestran en el Tabla 14, donde se puede apreciar que la cobertura de la vegetación sobre una proyección vertical del dosel, es del orden del 85% en promedio con la técnica basada en la segmentación y conteo de píxeles (Núñez, 2007) y en un 44.4% para los valores determinados con las mediciones con el LAI-LICOR2000. Encontrando que los porcentajes reportados por Núñez, (2007) varían en un 40.6% aproximadamente a los valores promedio determinado a través del LAI LICOR2000.

El % de vegetación determinado por la segmentación y conteo de píxeles (suma de todos los estratos que conforman cada ecosistema), en los ecosistemas tenemos que el % de

vegetación es menor en el ecosistema con un estrato y mayores para los ecosistemas con dos y tres estratos (Núñez, 2007).

Tabla 14. Análisis de la estructura de la vegetación a partir del análisis de imágenes digitales utilizando la técnica del conteo de píxeles (imágenes tomadas en septiembre de 2006) y mediciones con el LAI LICOR2000 (mediciones hechas en septiembre de 2007).

Punto	% Veg.	% LAI	Punto	% Veg.	% LAI.	Punto	% Veg.	% LAI.
14B01	84.5	64.67	8B01	83.0	49.67	22B01	78.4	48.33
14B02	76.8	46.50	8B02	89.2	57.00	22B02	96.0	77.67
14B03	87.6	58.17	8B03	88.2	39.17	22B03	88.3	46.83
14B04	73.6	53.83	8B04	81.2	36.50	22B04	90.3	40.67
14B05	92.3	59.33	8B05	88.8	50.83	22B05	90.4	47.67
14B06	87.0	36.00	8B06	92.2	65.33	22B06	87.1	77.67
14B07	84.7	29.83	8B07	81.3	35.50	22B07	83.0	67.17
14B08	83.0	45.50	8B08	95.4	52.83	22B08	79.8	39.50
14B09	90.9	57.50	8B09	89.0	76.50	22B09	97.9	39.50
14B10	72.6	54.17	8B10	87.4	78.17	22B10	89.3	38.00
<i>Mín.</i>	72.6	29.83		81.2	35.50		78.4	38.00
<i>Máx.</i>	92.3	64.67		95.4	78.17		97.9	77.67
<i>Media</i>	83.16	50.55		87.69	54.15		88.07	52.30
σ	6.87	11.00		4.60	15.37		6.32	15.78

a) Estrato bajo

Punto	% Vegetación	% LAI	Punto	% Vegetación	% LAI
8M01	82.1	41.50	22M01	87.0	34.00
8M02	76.0	37.00	22M02	79.6	23.83
8M03	77.7	31.50	22M03	90.7	32.67
8M04	86.4	37.67	22M04	79.4	34.67
8M05	88.2	25.00	22M05	89.4	30.83
8M06	79.0	33.50	22M06	81.3	29.17
8M07	72.9	29.83	22M07	84.1	35.00
8M08	77.7	34.17	22M08	90.5	32.83
8M09	77.5	32.67	22M09	91.1	33.83
8M10	78.6	33.00	22M10	96.5	27.17
<i>Mín.</i>	72.9	25.00		79.4	23.83
<i>Máx.</i>	88.2	41.50		96.5	35.00
<i>Media</i>	79.77	33.58		87.13	31.40
σ	4.68	4.52		5.70	3.65

b) Estrato medio

Tomando como base los cuadrantes analizados por Núñez, (tabla 15), la cobertura *C* determinado en función del LAI tiene mayor variación y, arroja valores menores que los determinados por la técnica de conteo de píxeles. Las dos técnicas utilizadas difieren en

menor proporción sus resultados en los cuadrantes 14B y 22B, pero en mayor proporción en el cuadrante 22M; teniendo como variación promedio del 6.5 % entre cuadrantes.

Tabla 15. Comparación de la cobertura de la vegetación calculada en función del LAI y la determinada por Núñez, 2007 aplicando la técnica de conteo de píxeles.

Ecosistema con un estrato		
<i>Eupatorium</i> sp.	C – 14B (En este estudio)	C – 14B (Núñez, 2007)
Altura promedio de hierbas (m)	1.43	1.43
Cobertura (%)	82.63	83.16
Índice de Área Foliar (promedio)	3.033	

Ecosistema con dos estratos		
<i>Quercus</i> sp.	C – 8M (En este estudio)	C – 8M (Núñez, 2007)
Edad promedio (años)	61	61
Altura promedio de árboles (m)	9.3	9.3
Cobertura (%)	67.2	79.77
Índice de Área Foliar (promedio)	2.015	
<i>Eupatorium</i> sp. + Encinos	C – 8B (En este estudio)	C – 8B (Núñez, 2007)
Altura promedio de las hierbas (m)	1.5	1.5
Cobertura (%)	102.7	87.69
Índice de Área Foliar (promedio)	1.234	

Ecosistema con tres estratos		
<i>Quercus</i> sp. + <i>Ptelea trifoliata</i>	C – 22M (En este estudio)	C – 22M (Núñez, 2007)
Altura promedio de las hierbas (m)	2.47	2.47
Cobertura hierbas (%)	55.74	87.13
Índice de Área Foliar (promedio)	0.48	
<i>Quercus</i> sp. + <i>Ptelea trifoliata</i> <i>Eupatorium</i> sp.	C – 22B (En este estudio)	C – 22B (Núñez, 2007)
Altura promedio de las hierbas (m)	1.53	1.53
Cobertura hierbas (%)	84.82	88.07
Índice de Área Foliar (promedio)	1.254	

4.3 Intercepción y sus componentes

Para tener un mejor detalle del comportamiento de la intercepción en función de los estratos que conforman los ecosistemas, se ha realizado una serie de combinaciones el cual está estructurado de la siguiente manera:

- **Ecosistema con un estrato formado por:**
 - *Eupatorium* sp. (Dispositivos de medición colocado a 0.5 m)
 - *Quercus* sp. (Dispositivos de medición colocados a 1.9 m y 3 m)
- **Ecosistema con dos estratos formado por:**
 - *Ptelea trifoliata* y *Quercus* sp. (Dispositivos de medición colocados 1.9 m)

- **Ecosistema con tres estratos formado por:**

-*Eupatorium* sp., *Ptelea trifoliata* y *Quercus* sp. (Dispositivos de medición colocados 0.5 m)

4.3.1 Flujo de Traslocación (Th)

Existe una alta correlación entre la precipitación incidente y el flujo de traslocación en los cuatro diferentes ecosistemas agrupados con diferentes estratos de vegetación (figuras 26, 27, 28 y 29). Como consecuencia, que en la mayoría de las correlaciones el 98% de los datos determinan la variable independiente (*Th*). El flujo de traslocación del ecosistema con un estrato formado por *Eupatorium* sp. tiene que a precipitaciones menores a 15 mm no presenta una dispersión notoria del *Th* en los cuadrantes instrumentados (13B, 14B y 47B), sin embargo a precipitaciones mayores a 15 mm la dispersión empieza a ser significativa, siendo el cuadrante 14B el que presenta mayor heterogeneidad en los valores de flujo de traslocación, no así para el cuadrante 47B (Figura 26).

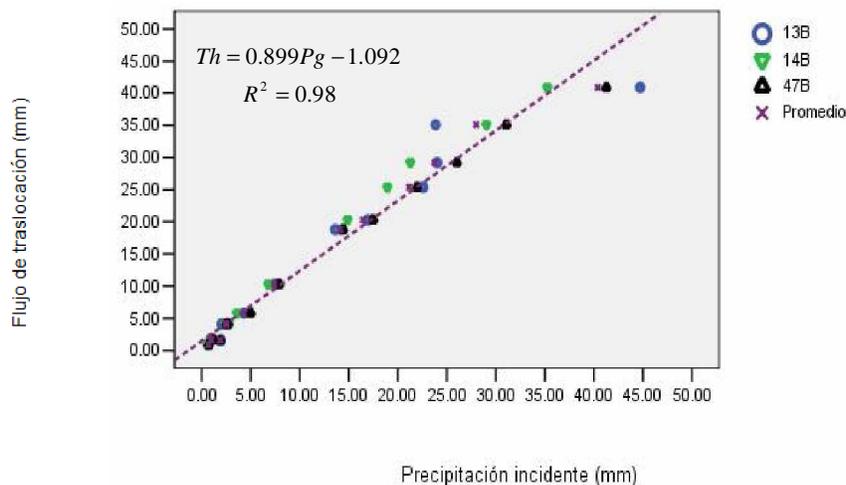


Figura 26. Relación de la Pg – Th para un ecosistema con un estrato formado por *Eupatorium* sp. en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta (Dispositivos de medición colocados a 0.5 m)

En el ecosistema con un estrato formado por *Quercus* sp. los cuadrantes 8M, 39M y 45M (dispositivos de medición del *Th* colocados a 1.9 m) no presentan dispersión notoria en los cuadrantes instrumentados (Figura 27a); no así para los cuadrantes 36A, 22A y 34A que empiezan a presentar dispersiones a precipitaciones mayores a 15 mm siendo el cuadrante 22A que tiene mayor heterogeneidad de los valores de flujo de traslocación (figura 27b), esto podría

deberse a la altura en la que se encuentran ubicados los dispositivos de medición, es decir se colocaron a 3 metros los pluviómetros de botella para la recolección del flujo de traslocación, en donde a esta altura se tiene mayor acercamiento al dosel del encino tal cual como se presenta en el ecosistema con un estrato formado por *Eupatorium* sp.(figura 26).

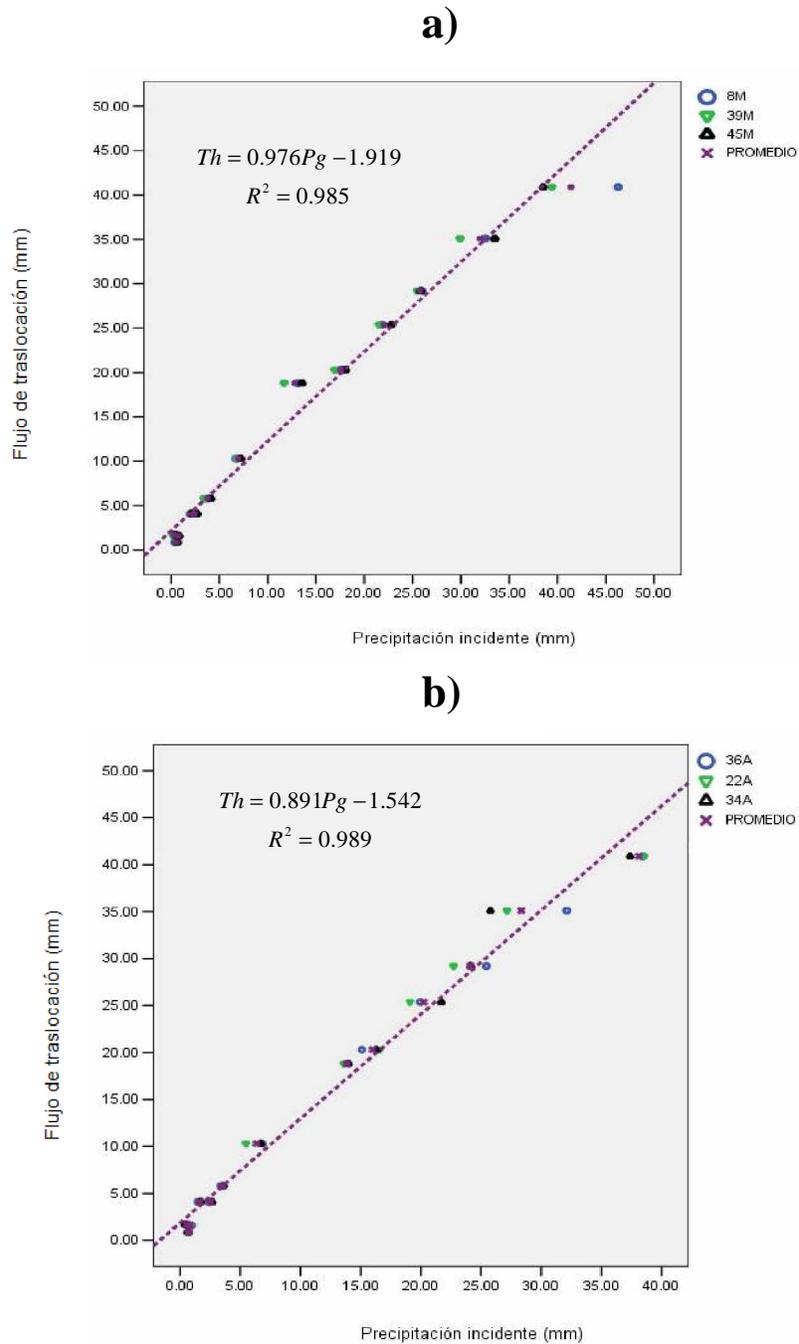


Figura 27. Relación de la Pg – Th para un ecosistema con un estrato formado por *Quercus* sp. en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta. A) Dispositivos de medición colocados 1.9 m, b) Dispositivos de medición colocados a 3 m.

En el ecosistema con dos estratos formado por *Ptelea trifoliata* y *Quercus* sp. no presenta dispersión notoria en los cuadrantes 22M, 34M Y 36 M, teniendo homogeneidad en el flujo de traslocación recolectados en los cuadrantes antes mencionado en este párrafo.

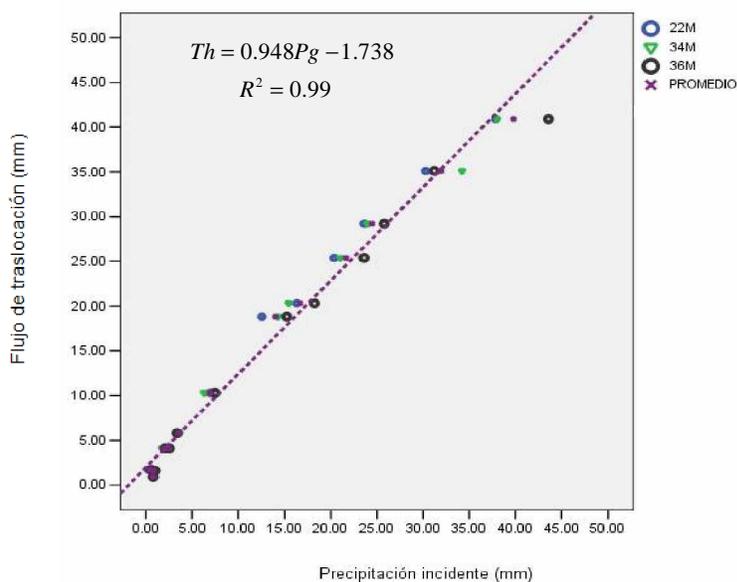


Figura 28. Relación de la Pg – Th para un ecosistema con dos estratos formado por *Ptelea trifoliata* y *Quercus* sp. en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta (Dispositivos de medición colocados 1.9 m)

En el ecosistema con tres estratos de vegetación formado por *Eupatorium* sp. *Ptelea trifoliata* y *Quercus* sp. y con dispositivos de medición colocados a una altura de 0.5 m presentan menor dispersión del flujo de traslocación con precipitaciones menores a 15 mm, pero a precipitaciones mayores a 15 mm el flujo de traslocación empieza a presentar heterogeneidad en los cuadrantes instrumentados que en este caso son el 22B, 34B y 36B, en este ecosistema los pluviómetros de botella también se encuentran cerca del dosel del *Eupatorium* sp.. que por lo visto en los ecosistemas anteriormente mencionados presenta el mismo efecto “dispositivos de medición cercanos al dosel presentan mayor dispersión en la medición del flujo de traslocación con precipitaciones mayores a 15 mm”.

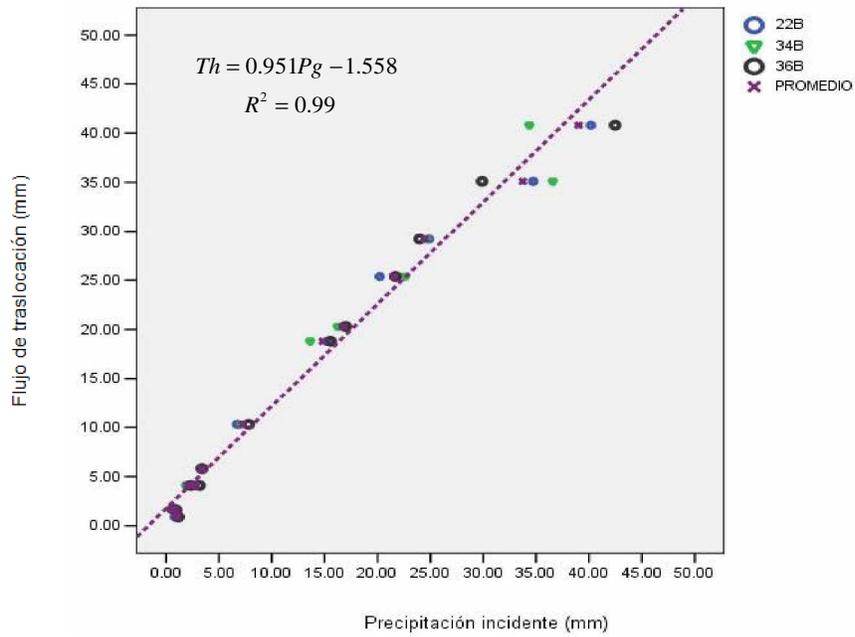


Figura 29. Relación de la Pg – Th para un ecosistema con tres estratos formado por *Eupatorium* sp. *Ptelea trifoliata* y *Quercus* sp. en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta (Dispositivos de medición colocados 0.5 m)

Tabla 16. Resumen del *flujo de traslocación* en un ecosistema de encino de un, dos y tres estratos en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta.

Ecosistema	Especie de vegetación	Altura dispositivos (m)	Pg acumulado (mm)	Th / Pg (%)			Promedio Th (%)
				C - 13	C - 14	C - 47	
Un estrato	<i>Eupatorium</i> sp.	0.5	198.18	C - 13	C - 14	C - 47	82.74
				83.59	76.85	87.79	
	<i>Quercus</i> sp.	1.9		C - 8	C - 39	C - 45	85.01
				87.75	81.35	85.93	
	<i>Quercus</i> sp.	3.0		C - 22	C - 34	C - 36	79.04
				81.44	77.13	78.53	
Dos estratos	<i>Pteleatrifoliata</i> <i>Quercus</i> sp.	1.9	198.18	C - 22	C - 34	C - 36	83.41
				79.65	82.08	88.50	
Tres estratos	<i>Eupatorium</i> sp. <i>Ptelea trifoliata</i> <i>Quercus</i> sp.	0.5	198.18	C - 22	C - 34	C - 36	84.93
				85.45	83.47	85.87	

Coefficiente de Variación del flujo de traslocación

El coeficiente de variación (C.V.) explica la variabilidad espacial de la distribución del *flujo de traslocación* en los cuatro diferentes ecosistemas evaluados. Se determinó aplicando la ecuación 20 para el promedio de *Th* de los cuadrantes de muestro, el cual refleja que el *flujo de traslocación* en el ecosistema con uno y tres estratos presentan mayor variabilidad para tormentas menores a 6.5 mm (Figura 30 y 33), pero a medida que aumenta la precipitación incidente, disminuye asintóticamente el coeficiente de variación (ver tabla 17).

Para el ecosistema con uno (*Quercus* sp.) y dos estratos (*Ptelea trifoliata* y *Quercus* sp.) presentan mayor variabilidad del flujo de traslocación con precipitaciones menores a 3 mm y disminuye a medida que aumenta la cantidad de lluvia (ver tabla 17).

Se le puede atribuir a la similitud en la variación del flujo de traslocación entre el ecosistema con un estrato compuesto por *Eupatorium* sp. y el ecosistema con tres estratos compuesto por *Eupatorium* sp., *Ptelea trifoliata* y *Quercus* sp. a la cobertura total de cada una de ellas, el cual al tener valores altos influiría en la distribución espacial y aunado a esto en la combinación de diferentes arquitecturas de las especies que la componen en el caso del ecosistema con tres estratos, siendo el mismo caso para los ecosistemas con uno (*Quercus* sp.) y dos estratos (*Ptelea trifoliata* y *Quercus* sp.) (Tabla 12).

A manera de ser mas explicito, se tendrían que presentar láminas mayores a 6.5 mm de lluvia para saturar completamente el dosel de los ecosistemas con uno (formado por *Eupatorium* sp.) y tres estratos el cual provocaría de manera directa una menor variación de distribución espacial del flujo de traslocación. Así también se tendrían que presentar láminas de lluvia mayores a 3 mm para los ecosistemas con uno (*Quercus* sp.) y dos estratos (*Ptelea trifoliata* y *Quercus* sp.) para reducir el C.V.

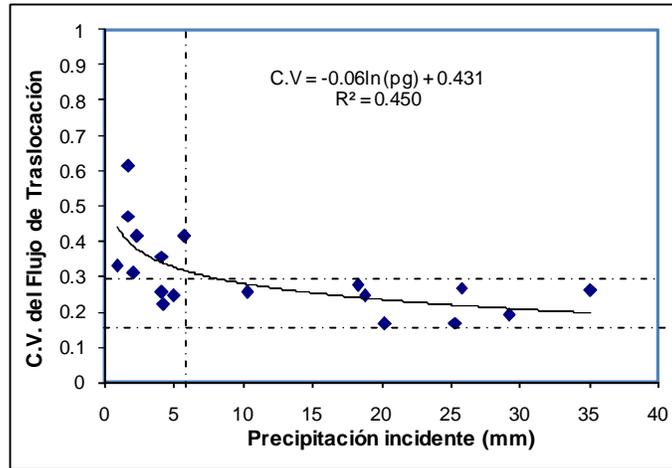


Figura 30. Relación entre el C.V del flujo de traslocación y la precipitación incidente en la parcela de la microcuenca La Barreta en el ecosistema con un estrato formado por *Eupatorium* sp.

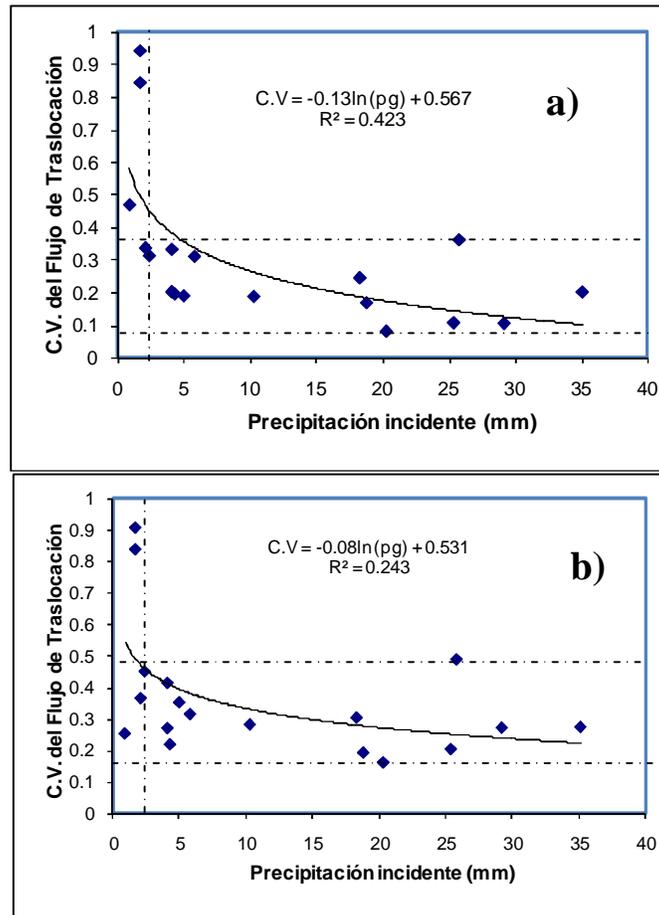


Figura 31. Relación entre el C.V del flujo de traslocación y la precipitación incidente en la parcela de la microcuenca La Barreta, ecosistemas con un estrato formado por *Quercus* sp. a) Con pluviómetros de botella colocados 1.9 m, b) Con pluviómetros de botella colocados a 3 m.

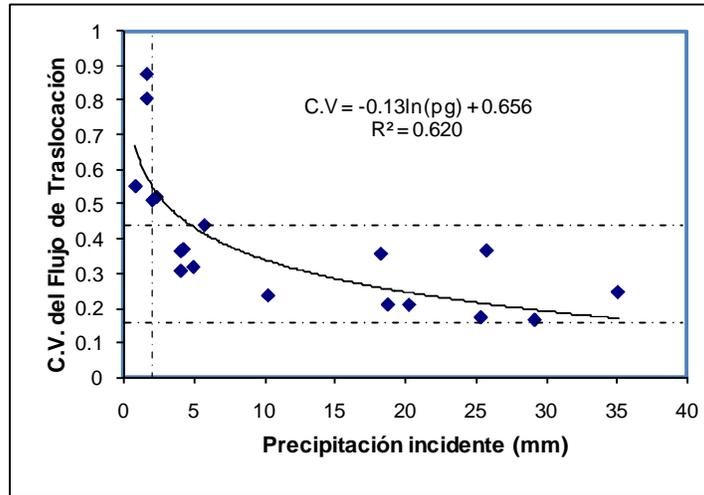


Figura 32. Relación entre el C.V del flujo de traslocación y la precipitación incidente en la parcela de la microcuenca La Barreta, ecosistema con dos estratos formado por *Ptela trifoliata* y *Quercus* sp. (Pluviómetros colocados a 1.9 m).

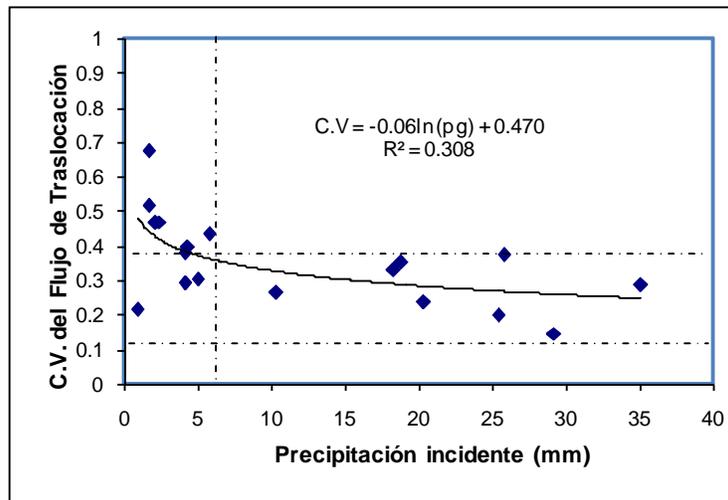


Figura 33. Relación entre el C.V del flujo de traslocación y la precipitación incidente en la parcela de la microcuenca La Barreta, ecosistema con tres estratos formado por *Eupatorium* sp., *Ptela trifoliata* y *Quercus* sp. (Pluviómetros colocados a 0.5 m)

Tabla 17. Coeficiente de variación entre el flujo de traslocación y la precipitación incidente para los 3 tipos de ecosistemas en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta.

Ecosistema	Especie de vegetación	Altura de los pluviómetros de botella (m)	Rango de precipitación para menores C.V (mm)	Rango C.V
Un estrato	<i>Eupatorium</i> sp.	0.5	>6.5	0.15 – 0.3
	<i>Quercus</i> sp.	1.9	>3.0	0.1 – 0.37
	<i>Quercus</i> sp.	3.0	>3.0	0.15 – 0.5
Dos estratos	<i>Ptelea trifoliata</i>	1.9	>2.5	0.18 – 0.45
	<i>Quercus</i> sp.			
Tres estratos	<i>Eupatorium</i> sp.	0.5	>6.5	0.15 – 0.36
	<i>Ptelea trifoliata</i>			
	<i>Quercus</i> sp.			

Rutter *et al.* 1971 y Gash *et al.* 1979 mencionan que el coeficiente libre de traslocación es el componente más importante para tormentas pequeñas. En nuestro estudio se tiene una mayor variabilidad espacial para este tipo de tormentas (Para precipitaciones menores a 6 y 3 mm de acuerdo a la cobertura de cada ecosistema evaluado) y si tomamos la definición se tiene que el flujo libre de traslocación es la cantidad de agua que llega al suelo sin tocar el dosel de la vegetación, por lo tanto la variabilidad espacial del flujo de traslocación debe ser relacionado a la variabilidad espacial del coeficiente libre de traslocación para tormentas pequeñas.

Cuando la precipitación incidente aumenta, el goteo de lluvia en el dosel incrementa de manera importante (Rutter *et al.* 1971; Gash, 1979; Calder y Wright, 1986) y por lo tanto la variabilidad espacial del flujo de traslocación vendría a ser más sensible a la variabilidad espacial de distribución del goteo puntual del dosel y la capacidad de almacenamiento. Para grandes tormentas, se alcanza la saturación del dosel, y cada punto de goteo alcanza una uniformidad espacial y su distribución de flujo de traslocación es el resultado de este goteo puntual (Loustau *et al.* 1992).

4.3. Flujo Cortical

Este componente sólo se midió para el estrato arbóreo (árboles de encino) y no para los estratos arbustivos ni herbáceos, debido a la dificultad que representa instrumentarlos.

Ecosistema de un estrato formado por *Quercus* sp.

El flujo cortical por los troncos de los árboles de encino fue estimado mediante la siguiente ecuación (Price y Carlyle Moses 2003):

$$St = \frac{n \cdot St(a)}{FA} \quad 28$$

donde St es el flujo cortical estimado en mm, FA es el área de bosque en m^2 , n es el número de árboles instrumentados y $St(a)$ es el volumen de agua promedio recolectados de los arboles medidos en ml. La precipitación y el flujo cortical acumulado de los 8 eventos medidos son 112.38 y 9.47 mm respectivamente, de modo que el flujo cortical representa un 8.4% de la precipitación incidente (ver tabla 18).

Ecosistema de tres estratos formado por *Eupatorium* sp., *Ptelea trifoliata* y *Quercus* sp.

Para el flujo cortical de los árboles encontrados en estos cuadrantes se utilizó la misma expresión 28; los datos medidos fueron igualmente de los mismos 8 eventos. La precipitación y flujo cortical acumulado fueron de 112.38 y 7.57 mm respectivamente, representando este último el 6.7% de la precipitación incidente (ver tabla 18).

Tabla 18. Flujo cortical para ecosistemas de dos y tres estratos

Precipitación incidente (mm)	Ecosistemas	
	Dos estratos	Tres estratos
	Ft (mm)	Ft (mm)
10.3	0.303	0.27
29.2	2.546	2.21
2.4	0.033	0.07
1.7	0.015	0.05
25.38	2.540	2.18
18.8	1.583	0.7
4.3	0.186	0.13
20.3	2.266	1.967

4.3.1 Determinación de la intercepción por ecosistemas

Antes de calcular la intercepción a través de la ecuación 2, con fines de análisis, se hizo una validación de los datos. Para el ecosistema con un estrato, el evento de 40.9 mm y 1.6 mm arrojarán valores negativos de intercepción debido a que el *flujo de traslocación* resulto ser mayor a la *precipitación incidente*. Así también para el ecosistema de tres estratos, el evento de 0.9 mm por la razón antes señalada.

La intercepción fue determinado mediante el balance de masa (ecuación 2), aplicado para cada evento de precipitación. En la tabla 19 se muestra el cálculo para todos los eventos instrumentados incluyéndose el flujo de traslocación (Th) y la intercepción resultante. El flujo cortical no fue incluido debido a que sólo en los últimos 8 eventos se midió este componente.

Las intercepciones negativas presentados con un evento de 40.9 mm, se le puede atribuir a la influencia del viento, duración del evento, presencia de lluvias horizontales o bien a que no existió el tiempo suficiente para que el dosel de la vegetación estuviera completamente seco al presentarse un consecutivo (ver tabla 19).

Para los eventos de 1.6 y 0.9 que presentan intercepciones negativas en los ecosistemas con uno y tres estratos respectivamente, se le atribuye que por ser laminas de lluvia muy pequeñas tendrían en este caso a ser el coeficiente libre de traslocación un factor importante para que se presentaran mayor flujo de traslocación (Rutter *et al.* 1971 y Gash *et al.* 1979) o en el mismo caso de presencia de lluvias horizontales en la parcela experimental.

Tabla 19. Cálculo de la intercepción y sus componentes para la parcela experimental de la microcuenca La Barreta.

Ecosistema Pg	Ecosistema con un estrato						Ecosistema con dos estratos		Ecosistema con tres estratos	
	<i>Eupatorium sp.</i>		<i>Quercus sp.</i>		<i>Quercus sp.</i>		<i>Ptelea trifoliata y Quercus sp.</i>		<i>Eupatorium sp., Ptelea trifoliata y Quercus sp.</i>	
	Th*	I	Th*	I	Th*	I	Th*	I	Th*	I
1.6	1.86	-0.26	0.71	0.88	0.81	0.78	0.82	0.77	0.91	0.68
35.1	27.98	7.11	31.96	3.13	28.35	6.74	31.90	3.19	33.73	1.36
5.8	4.286	1.51	3.76	2.03	3.53	2.26	3.49	2.30	3.34	2.45
0.9	0.64	0.25	0.52	0.37	0.67	0.22	0.78	0.11	1.02	-0.12
4.1	2.46	1.63	2.42	1.67	2.48	1.61	2.44	1.65	2.80	1.29
4.1	2.50	1.59	2.28	1.81	1.60	2.49	1.92	2.17	2.06	2.03
1.7	0.98	0.71	0.31	1.38	0.56	1.13	0.44	1.25	0.57	1.12
10.3	7.38	2.91	6.92	3.37	6.33	3.96	6.89	3.40	7.22	3.07
29.2	23.75	5.44	25.75	3.44	24.10	5.09	24.45	4.74	24.47	4.72
25.38	21.15	4.22	22.05	3.32	20.23	5.14	21.65	3.72	21.51	3.86
18.8	14.10	4.69	12.78	6.01	13.84	4.95	14.02	4.77	14.82	3.97
40.9	40.40	0.49	41.39	-0.49	38.11	2.78	39.79	1.10	39.00	1.79
20.3	16.43	3.86	17.54	2.75	15.97	4.32	16.6	3.63	16.73	3.56

*Son los valores promedio del flujo de traslocación de los tres cuadrantes que componen cada ecosistema.

La intercepción fue del 17.25%, 14.98% y 20.95% para los ecosistemas con un estrato formado por *Eupatorium* sp. y *Quercus* sp. con altura de los dispositivos de medición colocados a 0.5 , 1.9 m y a 3 m con referencia la superficie del suelo respectivamente. Los ecosistemas con dos y tres estratos representaron el 16.58% y 15.06% de retención de lluvia respectivamente (tabla 20).

Existe una homogeneidad en la retención de agua de lluvia en el dosel de los ecosistemas con uno (*Eupatorium* sp. y *Quercus* sp.), dos y tres estratos, siendo el ecosistema formado por dosel de encinos con dispositivos de medición a 3 m el que incrementa la intercepción de lluvia, esto debería de atribuirse a la presencia de epifitas que se encuentran en los arboles de encino ubicados en los cuadrantes 22, 36 y 36.

Los valores de intercepción determinados en este estudio caen dentro del rango de porcentaje calculados por Cantú y González, (2002) en la zona norte de México en una combinación de encino y pino – encino (13.6% - 23%). No así para la combinación de otros estratos como los son la especie *Ptelea trifoliata* y *Euparorium* sp, que en si no existen valores de intercepción reportados en México para estas especies, pero servirían para tener en cuenta de la capacidad de retención de agua de lluvia en su dosel.

Tabla 20. Intercepción total determinada en la parcela experimental de la microcuencia La Barreta

Ecosistema	Especie de vegetación	Altura dispositivos (m)	Pg acumulado (mm)	I / Pg (%)			Promedio Th (%)
				C - 13	C - 14	C - 47	
Un estrato	<i>Eupatorium</i> sp.	0.5	198.18	16.40	23.14	12.20	17.25
	<i>Quercus</i> sp.	1.9		C - 8	C - 39	C - 45	14.98
	<i>Quercus</i> sp.	3.0		C - 22	C - 34	C - 36	20.95
Dos estratos	<i>Ptelea trifoliata</i>	1.9	198.18	C - 22	C - 34	C - 36	16.58
	<i>Quercus</i> sp.			20.34	17.91	11.49	
Tres estratos	<i>Eupatorium</i> sp. <i>Ptelea trifoliata</i> <i>Quercus</i> sp.	0.5	198.18	C - 22	C - 34	C - 36	15.06
				14.54	16.52	14.12	

4.3.2 Relación de la Intercepción y la P_g por ecosistemas

El coeficiente de determinación r^2 para los tres tipos de ecosistemas oscilan en 0.2 - 0.7 y son presentados en las figuras 34, 35, 36 y 37. En las figuras se observa que r^2 es buena en el ecosistema con un estrato formado por dosel de encino y con dispositivos de medición colocado a 3 m. El ajuste logarítmico se debió a que la intercepción tiene un umbral en la que alcanza un valor límite o capacidad de retención de lluvia en su dosel, que al saturarse, el agua se convierte en *flujo de traslocación*.

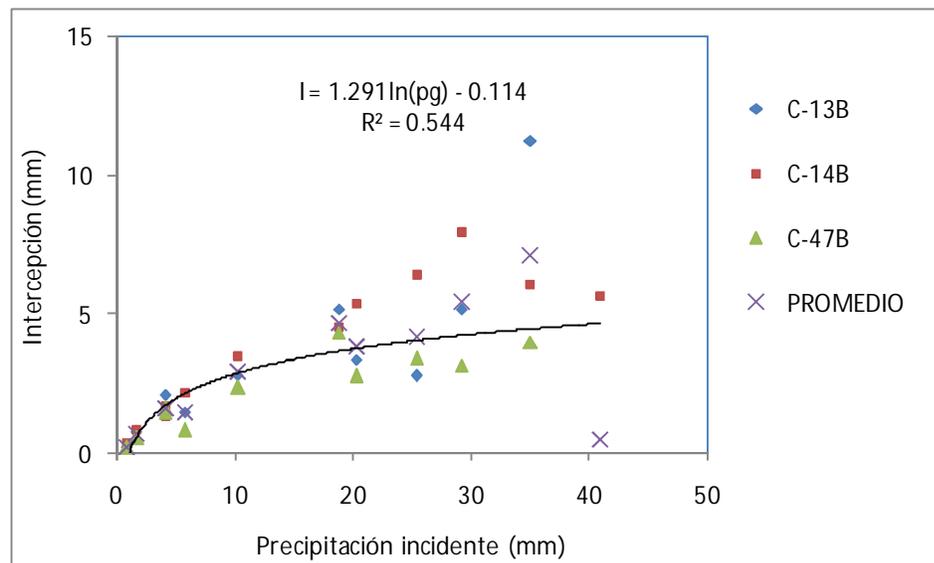


Figura 34. Relación de la $P_g - I$ para un ecosistema con un estrato formado por *Eupatorium* sp. en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta (Dispositivos de medición colocados a 0.5 m)

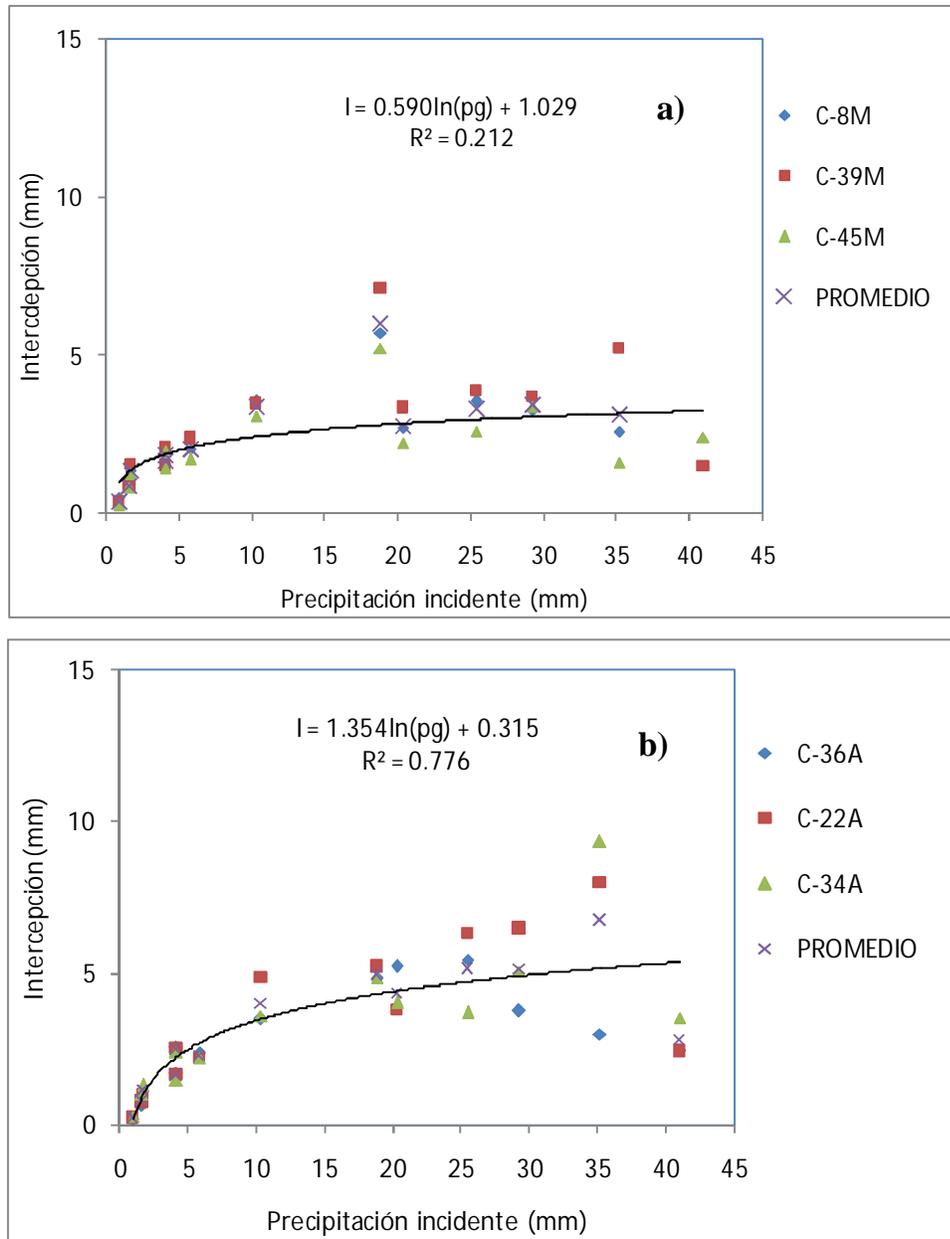


Figura 35. Relación de la Pg – I para un ecosistema con un estrato formado por *Quercus* sp. en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta. a) Dispositivos de medición colocados 1.9 m, b) Dispositivos de medición colocados a 3 m.

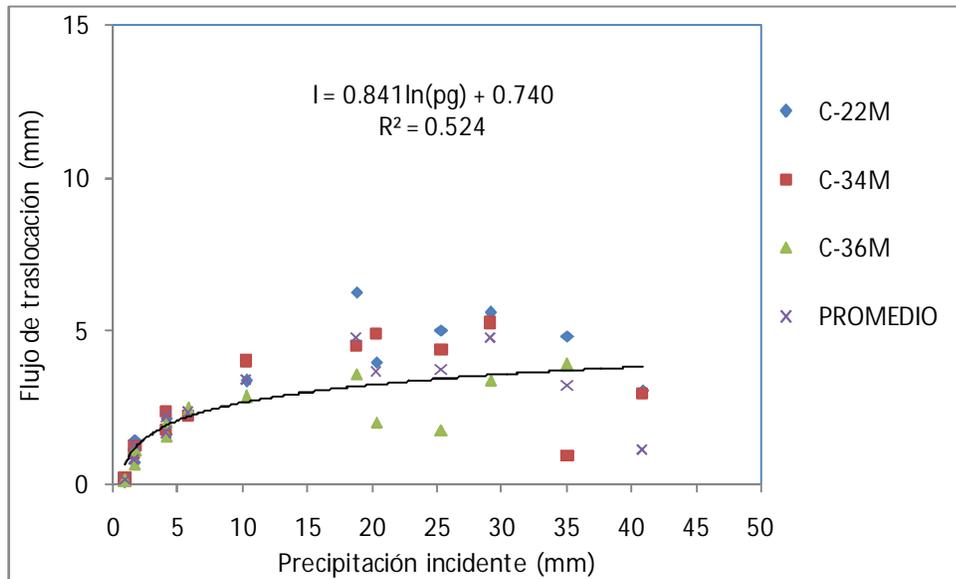


Figura 36. Relación de la Pg – I para un ecosistema con dos estratos formado por *Ptelea trifoliata* y *Quercus* sp. en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta (Dispositivos de medición colocados 1.9 m)

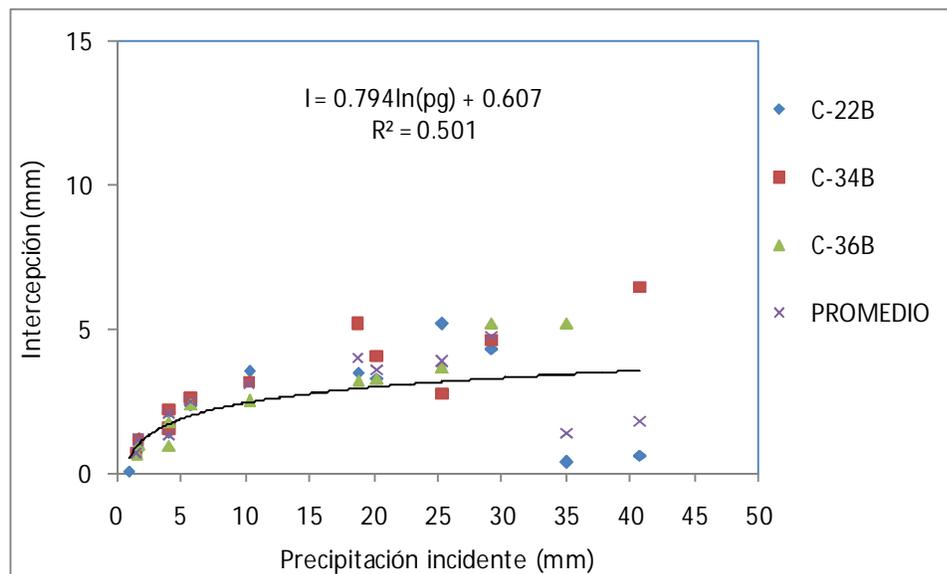
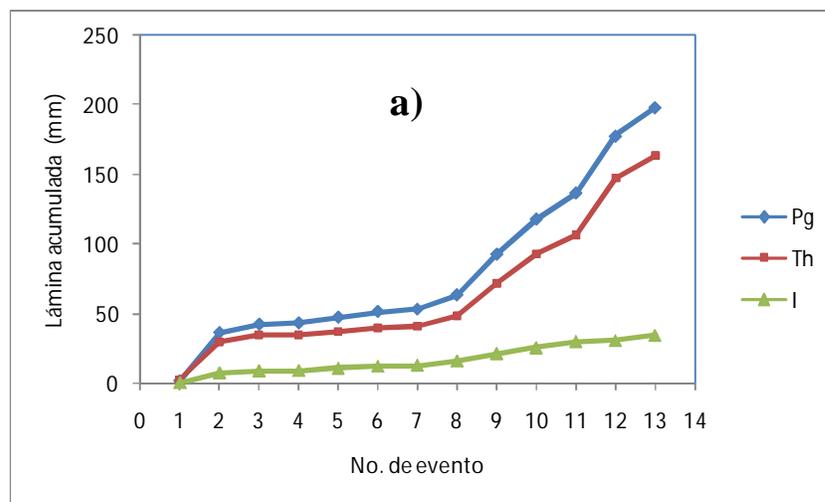


Figura 37. Relación de la Pg – I para un ecosistema con tres estratos formado por *Eupatorium* sp. *Ptelea trifoliata* y *Quercus* sp. en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta (Dispositivos de medición colocados 0.5 m)

4.4 Determinación de la capacidad de almacenamiento (s) y el coeficiente libre del Th

La intercepción fue determinada por la diferencia de la precipitación incidente sobre la vegetación (P_g) y el flujo de traslocación (Th). La capacidad almacenamiento (S) se determinó por el método de Leyton *et al.* (1967) mediante el gráfico de precipitación incidente y Th para eventos individuales (figuras 38b, 39(b)(d), 40b y 41b). Se busco el punto de inflexión dado por los eventos en los cuales la precipitación es suficiente para saturar el dosel, y por encima de estos eventos se eligen los registros de lluvias para su análisis. Posteriormente se traza por encima de todos los puntos elegidos una línea recta de pendiente la unitaria ($1 - p$) tal como lo propone Gash y Morton (1978) y Lloyd *et al.* (1988).

De acuerdo con Leyton *et al.* (1967) el esparcimiento vertical de los puntos a la derecha de la inflexión son debidos a la variación de evaporación del dosel, en tanto que la parte superior del grafico representa una condición mínima de evaporación. La capacidad S , precisamente se obtiene de la intercepción negativa con el eje de las ordenadas (Th) figuras 38b, 39(b)(d), 40b y 41b).



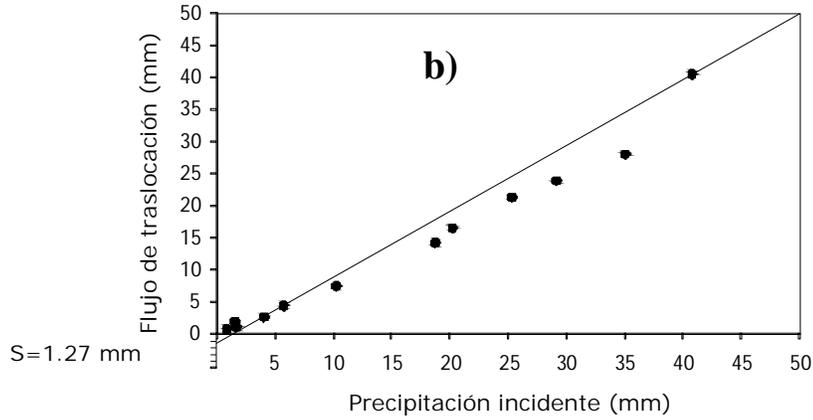
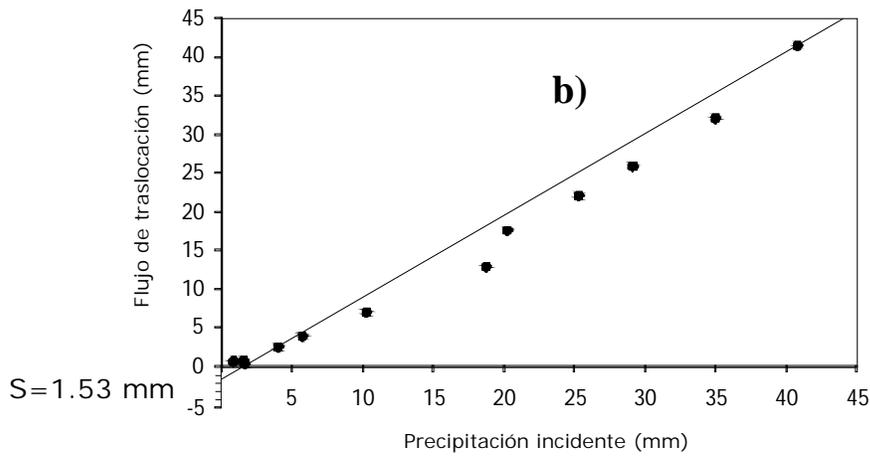
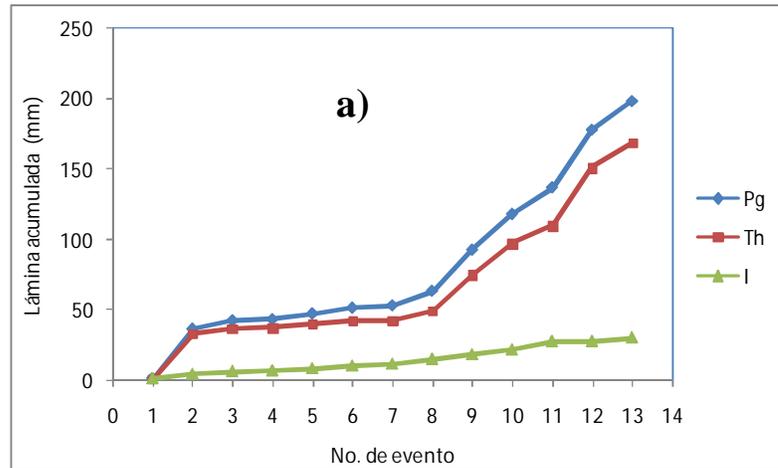


Figura 38. Ecosistema con un estrato formado por *Eupatorium* sp., a) Lámina acumulada de la precipitación incidente (Pg), intercepción (I) y flujo de traslación (Th); b) Capacidad de almacenamiento.



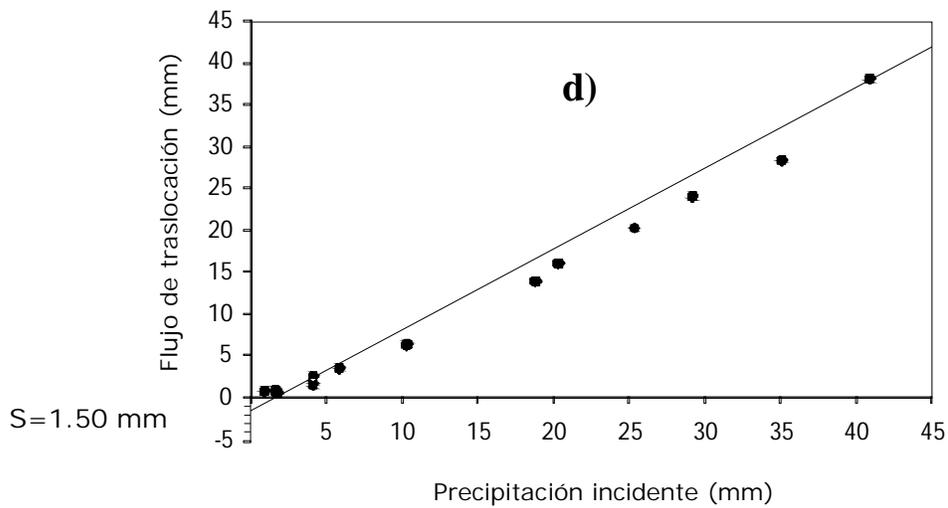
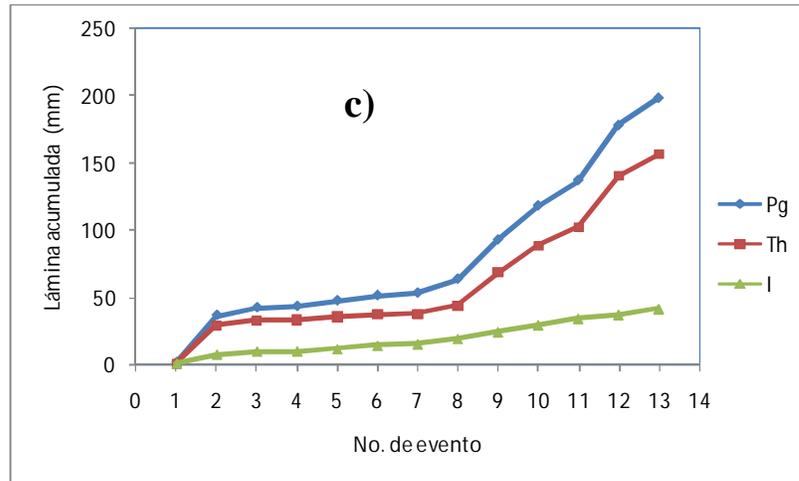


Figura 39. Ecosistema con un estrato formado por *Quercus* sp., a,b) Lámina acumulada de la precipitación incidente (Pg), intercepción (I) y flujo de traslación (Th); b,d) Capacidad de almacenamiento.

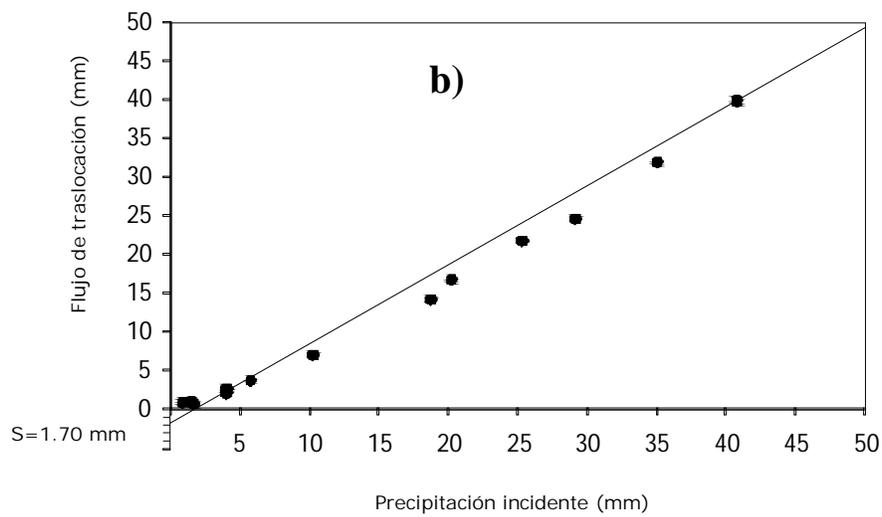
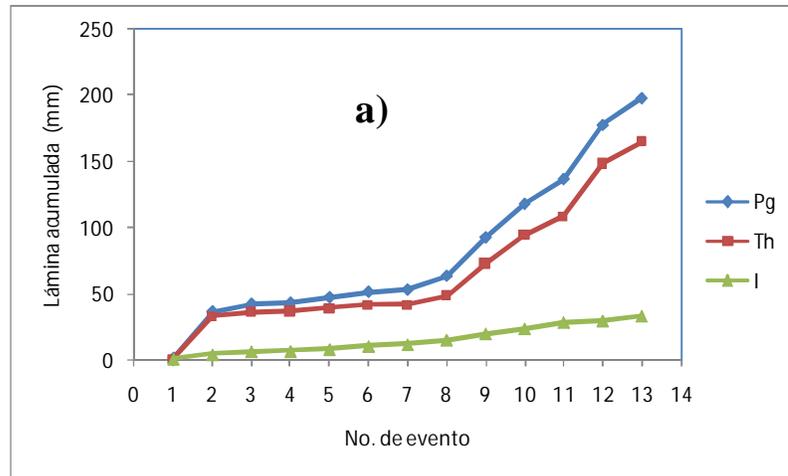
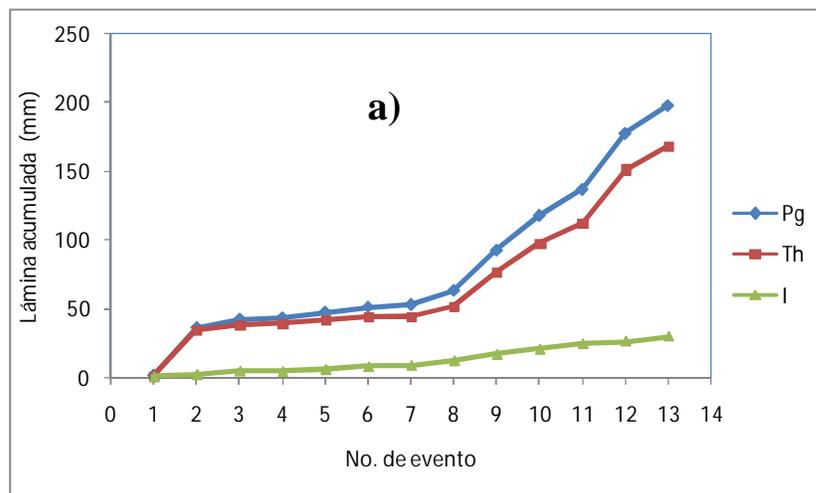


Figura 40. Ecosistema con dos estratos formado por *Ptelea trifoliata* y *Quercus* sp., a) Lámina acumulada de la precipitación incidente (Pg), intercepción (I) y flujo de traslación (Th); b) Capacidad de almacenamiento.



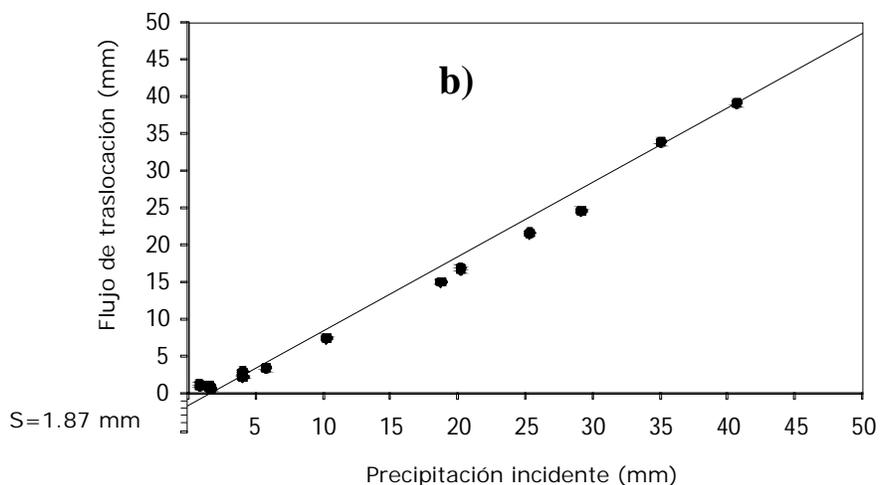


Figura 41. Ecosistema con tres estratos formado por *Eupatorium* sp., *Ptelea trifoliata* y *Quercus* sp., a) Lámina acumulada de la precipitación incidente (P_g), intercepción (I) y flujo de traslocación (Th); b) Capacidad de almacenamiento.

El coeficiente libre de traslocación (p), es la proporción de lluvia que cae directamente a través del dosel. Y determinado según Leyton *et al.* (1967) mediante un método gráfico. En este, la precipitación neta es representada frente a la precipitación incidente para eventos suficientemente pequeños que no saturan el dosel, ya sean los puntos a la izquierda de la inflexión mencionada anteriormente o de acuerdo con diferentes autores (Rutter *et al.* 1975; Gash y Morton 1978; Samasiva Rao, 1987).

Los ecosistemas presentan diferentes capacidades de almacenamiento (S), teniendo un aumento según al número de estratos que la conforman. No ocurre lo mismo en el caso del llamado coeficiente libre, p que es variable (Tabla 21).

Tabla 21. Capacidad de almacenamiento y coeficiente libre del Th en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta.

Estratos	Especie de vegetación	Altura dispositivos e medición del Th (m)	Capacidad de almacenamiento (S en mm)	Coficiente libre (p)
1 Estrato	<i>Eupatorium</i> sp.	0.5	1.06	0.72
	<i>Quercus</i> sp.	1.9	1.53	0.58
	<i>Quercus</i> sp.	3.0	1.50	0.41
2 Estratos	<i>Quercus</i> sp.	1.9	1.70	0.55
	<i>Ptelea trifoliata</i> sp.			
3 Estratos	<i>Quercus</i> sp.	0.5	1.87	0.45
	<i>Ptelea trifoliata</i>			
	<i>Eupatorium</i> sp.			

La capacidades de almacenamiento está relacionada directamente con el valor del LAI (Índice de área foliar) así como lo mencionan Gash *et al*, 1995., Bruijnzeel, 2001. G. Pypker et al. 2005, el dosel de un bosque joven es uniforme, cerrado, y la variabilidad espacial del la capacidad de almacenamiento (S) es baja a comparación con un bosque viejo que arroja valores mayores en la capacidad de almacenamiento, el cual puede ser debido a la presencia de epifitas, diferencia en especies de doseles e incremento de áreas de las ramas y troncos. Así también una vegetación puede tener diferentes capacidades de almacenamiento debido al índice de área foliar el cual cambia con los estaciones del año (Herwitz 1985 y Ashton, 1979).

La diferencia de intercepción en los ecosistemas pudiera ser por la presencia de epifitas que se presentan en los árboles donde estas estarían restando de manera importante en la retención de la precipitación neta. En cuanto al coeficiente libre de traslocación (p) estos fueron determinados por un solo evento de precipitación el cual podría generar error, así también del método utilizado (Leyton, 1971), el cual es un método de determinación aproximado (Lankreijer *et al.* 1992).

De la tabla 21 tenemos diferentes capacidades de almacenamiento de los ecosistemas analizados, el valor de S determinado por Cantú S. y González R. (2002) en el norte de México en encino y una combinación de pino – encino es de 0.25 y 0.17 mm el cual varía considerablemente con los valores obtenidos en este estudio, teniendo valores de $S = 1.5$ en promedio para encino.

Van Dijk y Bruijnzeel (2001) hizo una revisión de literatura y señala que las capacidades de almacenamiento (S) generalmente están entre 0.5 mm y 2.5 mm para doseles caducos, y para doseles de coníferas entre 0.3 mm y 2.4 mm (Bruijnzeel y Wiersum, 1987; Klaassen et al., 1998; Waterloo et al., 1999), quedando los valores de S determinados en este estudio en el rango señalado anteriormente.

4.6 Parámetros y modelación de la intercepción

Para la aplicación de los modelos de Gash (1979, 1995) y, Gash y Valente (1997) se tomó en cuenta las dos hipótesis principales (Limousin, 2006):

- § Los eventos son independientes, existiendo un periodo seco entre ellos.
- § La intensidad de la lluvia y la evaporación son constantes durante cada evento

Para considerar la independencia entre eventos se tomó de separación de al menos 24 horas (tabla 9).

En la tabla 22 se presenta los parámetros de los modelos de intercepción utilizados para la modelación. Para la modelación se utilizaron 12 eventos de precipitación en el ecosistema con un estrato formado por *Eupatorium* sp., *Quercus* sp. (Dispositivos a 1.9 m) y en el ecosistema con tres estratos debido a valores negativos de la intercepción medida, y 13 eventos para los ecosistemas restantes en los periodos de lluvia del año 2006 y 2007.

Tabla 22. Parámetros derivados de los diferentes ecosistemas analizados para el modelo de Gash et al. (1979, 1995) y Gash-Valente (1997).

	Un estrato								
	<i>Eupatorium</i> sp. (Dispositivos a 0.5 m)			<i>Quercus</i> sp. (Dispositivos a 1.9 m)			<i>Quercus</i> sp. (Dispositivos a 3 m)		
	Gash et al. 1979	Gash et al. 1995	Gash y Valente 1997	Gash et al. 1979	Gash et al. 1995	Gash y Valente 1997	Gash et al. 1979	Gash et al. 1995	Gash y Valente 1997
Datos									
Precipitación incidente, P_g (mm)	198.18	198.18	198.18	198.18	198.18	198.18	198.18	198.18	198.18
Precipitación necesaria para saturar el dosel, P'_g (mm)	5.61	1.535	1.533	3.75	2.317	2.318	2.80	3.16	3.21
Evaporación media, (mm/hr)	0.611	0.611	0.611	0.14	0.14	0.14	0.65	0.65	0.65
Intensidad media de la precipitación, R (mm/hr)	6.11	6.11	6.11	6.11	6.11	6.11	6.11	6.11	6.11
Numero de lluvias suficientes para saturar el dosel, n	8	11	11	7	9	9	10	10	10
Numero de lluvias insuficientes para saturar el dosel, m	4	1	1	5	3	3	3	3	3
Parámetros									
Coefficiente libre de traslocación, p	0.72	0.72	0.72	0.58	0.58	0.58	0.41	0.41	0.41
Capacidad de almacenamiento, S	1.27	1.27	1.27	1.53	1.53	1.53	1.50	1.50	1.50
Cobertura del dosel, c	-	0.878	0.878	-	0.672	0.672	-	0.530	0.530
Capacidad de almacenamiento por cobertura del dosel, S_c (mm)	-	1.45	1.45	-	2.28	2.28	-	2.89	2.89
Constante, ϵ	-	-	0.023	-	-	0.023	-	-	0.023

	Dos estratos			Tres estratos		
	<i>Ptelea trifoliata</i> + <i>Quercus</i> sp.			<i>Eupatorium</i> sp. + <i>Ptelea trifoliata</i> + <i>Quercus</i> sp.		
	Gash et al. 1979	Gash et al. 1995	Gash y Valente 1997	Gash et al. 1979	Gash et al. 1995	Gash y Valente 1997
	Datos					
Precipitación incidente, P_g (mm)	198.18	198.18	198.18	198.18	198.18	198.18
Precipitación necesaria para saturar el dosel, P'_g (mm)	4.00	2.95	2.95	3.55	2.31	2.31
Evaporación media, (mm/hr)	0.311	0.311	0.311	0.293	0.293	0.293
Intensidad media de la precipitación, R (mm/hr)	6.11	6.11	6.11	6.11	6.11	6.11
Numero de lluvias suficientes para saturar el dosel, n	10	10	10	10	10	10
Numero de lluvias insuficientes para saturar el dosel, m	3	3	3	3	3	3
	Parámetros					
Coefficiente libre de traslocación, p	0.55	0.55	0.55	0.45	0.45	0.45
Capacidad de almacenamiento, S	1.7	1.7	1.7	1.87	1.87	1.87
Cobertura del dosel, c	-	0.601	0.601	-	0.832	0.832
Capacidad de almacenamiento por cobertura del dosel, Sc (mm)	-	2.83	2.83	-	2.25	2.25
Constante, ϵ	-	-	0.023	-	-	0.023

P'_g es la lluvia necesaria para aturar completamente el dosel de la vegetación y se determina con la expresión 13 del capítulo 2
 p se obtuvo de la relación entre la lluvia menor a la capacidad de almacenamiento entre S , debido a la falta de lluvias menores a S .
 S se obtiene de las gráficas 27b, 28b y 29b
 c es la cobertura de la vegetación (ver tabla 16)
 Sc se obtiene al dividir la capacidad de almacenamiento S entre la cobertura de la vegetación c .

4.6.1 Gash et al. 1979

El modelo de Gash et al. 1979 (Tabla 23) subestima las pérdidas por intercepción para los ecosistemas analizados.

Tabla 23. Valores de Intercepción observados y calculados por el modelo de Gash et al. 1979

Pg (mm)	Ecosistema con un estrato						Ecosistema con dos estratos			Ecosistema con tres estratos					
	<i>Eupatorium</i> sp. (Dispositivos a 0.5 m)			<i>Quercus</i> sp. (Dispositivos a 1.9 m)			<i>Quercus</i> sp. (Dispositivos a 3 m)			<i>Ptelea trifoliata</i> + <i>Quercus</i> sp. (Dispositivos a 1.9 m)			<i>Eupatorium</i> sp. + <i>Ptelea trifoliata</i> + <i>Quercus</i> sp. (Dispositivos a 0.5 m)		
	$I_{\text{observada}}$ (mm)	Evaporación de la copa durante la lluvia (mm) ($I_w + I_s$)	$I_{\text{calculada}}$ (mm)	$I_{\text{observada}}$ (mm)	Evaporación de la copa durante la lluvia (mm) ($I_w + I_s$)	$I_{\text{calculada}}$ (mm)	$I_{\text{observada}}$ (mm)	Evaporación de la copa durante la lluvia (mm) ($I_w + I_s$)	$I_{\text{calculada}}$ (mm)	$I_{\text{observada}}$ (mm)	Evaporación de la copa durante la lluvia (mm) ($I_w + I_s$)	$I_{\text{calculada}}$ (mm)	$I_{\text{observada}}$ (mm)	Evaporación de la copa durante la lluvia (mm) ($I_w + I_s$)	$I_{\text{calculada}}$ (mm)
1.6	-0.26	-	-	0.88	0.67	0.672	0.78	0.94	0.94	0.77	0.72	0.72	0.68	0.88	0.88
35.1	7.11	3.25	4.52	3.13	0.79	2.32	6.74	3.64	5.14	3.19	1.68	3.38	1.36	1.60	3.47
5.8	1.51	0.32	1.59	2.03	0.09	1.62	2.26	0.47	1.97	2.30	0.19	1.89	2.45	0.19	2.06
0.9	0.25	0.25	0.25	0.37	0.37	0.37	0.22	0.53	0.53	0.11	0.40	0.40	-0.12	-	-
4.1	1.63	1.14	1.14	1.67	1.72	1.72	1.61	0.29	1.79	1.65	0.10	1.80	1.29	0.11	1.98
4.1	1.59	1.14	1.14	1.81	1.72	1.72	2.49	0.29	1.79	2.17	0.10	1.80	2.03	0.11	1.98
1.7	0.71	0.47	0.47	1.38	0.71	0.71	1.13	1.00	1.00	1.25	0.76	0.76	1.12	0.93	0.93
10.3	2.91	0.77	2.04	3.37	0.20	1.73	3.96	0.96	2.46	3.40	0.42	2.12	3.07	0.41	2.28
29.2	5.44	2.66	3.93	3.44	0.65	2.18	5.09	3.00	4.50	4.74	1.38	3.089	4.72	1.31	3.18
25.38	4.22	2.27	3.54	3.32	0.56	2.09	5.14	2.59	4.09	3.72	1.19	2.89	3.86	1.13	3.00
18.8	4.69	1.62	2.89	6.01	0.40	1.93	4.95	1.88	3.38	4.77	0.85	2.55	3.97	0.81	2.68
40.9	0.49	3.83	5.10	-0.49	-	-	2.78	4.27	5.77	1.10	1.98	3.68	1.79	1.87	3.74
20.3*	<u>3.86</u>	<u>1.77</u>	<u>3.04</u>	2.75	0.44	1.97	4.32	2.04	3.54	3.63	0.93	2.63	3.56	0.89	2.76

*Ejemplo: Determinación de la intercepción calculada para el ecosistema con un estrato formado por *Eupatorium* sp. con el modelo de Gash *et al.* 1979

Datos

$$Pg = 20.3 \text{ mm}$$

$$I_{\text{observada}} = 3.86 \text{ mm}$$

$$E = 0.611 \text{ mm/h}$$

$$p = 0.72$$

$$P^{\wedge}g = 5.61 \text{ mm}$$

$$S = 1.27 \text{ mm}$$

$$R = 6.11 \text{ mm/h}$$

Aplicando la fórmula 14, 15, 16 y 17.

$$I_w = P^{\wedge}g(1 - p) - S = 0.301 \text{ mm (Fase de mojado)}$$

$$I_s = \frac{\bar{E}}{R}(Pg - P^{\wedge}g) = 1.46 \text{ mm (Fase de saturación)}$$

$$I_d = S = 1.27 \text{ mm (Fase de secado)}$$

$$I = I_w + I_s + I_d = 3.04 \text{ mm}$$

4.6.2 Gash et al. (1995)

El modelo de Gash et al. 1995 (Tabla 24) en la mayoría de los ecosistemas analizados subestima la intercepción.

Tabla 24. Valores de Intercepción observados y calculados por el modelo de Gash et al. 1995

Pg (mm)	Ecosistema con un estrato									Ecosistema con dos estratos			Ecosistema con tres estratos		
	<i>Eupatorium</i> sp. (Dispositivos a 0.5 m)			<i>Quercus</i> sp. (Dispositivos a 1.9 m)			<i>Quercus</i> sp. (Dispositivos a 3 m)			<i>Ptelea trifoliata</i> + <i>Quercus</i> sp. (Dispositivos a 1.9 m)			<i>Eupatorium</i> sp. + <i>Ptelea trifoliata</i> + <i>Quercus</i> sp. (Dispositivos a 0.5 m)		
	$I_{\text{observada}}$ (mm)	Evaporación de la copa durante la lluvia (mm) ($I_w + I_s$)	$I_{\text{calculada}}$ (mm)	$I_{\text{observada}}$ (mm)	Evaporación de la copa durante la lluvia (mm) ($I_w + I_s$)	$I_{\text{calculada}}$ (mm)	$I_{\text{observada}}$ (mm)	Evaporación de la copa durante la lluvia (mm) ($I_w + I_s$)	$I_{\text{calculada}}$ (mm)	$I_{\text{observada}}$ (mm)	Evaporación de la copa durante la lluvia (mm) ($I_w + I_s$)	$I_{\text{calculada}}$ (mm)	$I_{\text{observada}}$ (mm)	Evaporación de la copa durante la lluvia (mm) ($I_w + I_s$)	$I_{\text{calculada}}$ (mm)
1.6	-0.26	-	-	0.88	1.07	1.07	0.78	0.84	0.84	0.77	0.96	0.96	0.68	1.33	1.32
35.1	7.11	5.27	6.54	3.13	0.81	2.34	6.74	3.62	5.12	3.19	1.71	3.41	1.36	1.62	3.49
5.8	1.51	2.34	3.61	2.03	0.11	1.64	2.26	0.46	1.96	2.30	0.22	1.92	2.45	0.22	2.09
0.9	0.25	0.79	0.79	0.37	0.60	0.60	0.22	0.47	0.47	0.11	0.54	0.54	-0.12	-	-
4.1	1.63	2.17	3.44	1.67	0.07	1.60	1.61	0.27	1.77	1.65	0.13	1.83	1.29	0.14	2.01
4.1	1.59	2.17	3.44	1.81	0.07	1.60	2.49	0.27	1.77	2.17	0.13	1.83	2.03	0.14	2.01
1.7	0.71	1.93	3.20	1.38	1.14	1.14	1.13	0.90	0.90	1.25	1.02	1.02	1.12	1.41	1.41
10.3	2.91	2.793	4.06	3.37	0.21	1.74	3.96	0.94	2.44	3.40	0.45	2.15	3.07	0.43	2.30
29.2	5.44	4.68	5.95	3.44	0.67	2.20	5.09	2.98	4.48	4.74	1.41	3.11	4.72	1.34	3.21
25.38	4.22	4.30	5.57	3.32	0.58	2.11	5.14	2.57	4.07	3.72	1.22	2.92	3.86	1.16	3.03
18.8	4.69	3.64	4.91	6.01	0.42	1.95	4.95	1.86	3.36	4.77	0.88	2.58	3.97	0.84	2.71
40.9	0.49	5.85	7.12	-0.49	-	-	2.78	4.25	5.75	1.10	2.01	3.71	1.79	1.90	3.77
20.3*	<u>3.86</u>	<u>3.79</u>	<u>5.06</u>	2.75	0.45	1.98	4.32	2.02	3.52	3.63	0.96	2.66	3.56	0.91	2.78

*Ejemplo: Determinación de la intercepción calculada para el ecosistema con un estrato formado por *Eupatorium* sp. con el modelo de Gash *et al.* 1995.

Datos

$$Pg = 20.3 \text{ mm}$$

$$I_{\text{observada}} = 3.86 \text{ mm}$$

$$Ec = 0.695 \text{ mm/h}$$

$$p = 0.72$$

$$P^{\wedge}g = 1.53 \text{ mm}$$

$$Sc = 1.45 \text{ mm}$$

$$R = 6.11 \text{ mm/h}$$

$$c = 0.878$$

Aplicando la fórmula 14, 15, 16 y 17.

$$I_w = c * P^{\wedge}g - c * S_c = 1.91 \text{ mm (Fase de mojado)}$$

$$I_s = \frac{c * \overline{E}_c}{R} (Pg - P^{\wedge}g) = 1.87 \text{ mm (Fase de saturación)}$$

$$I_d = c * S_c = 1.27 \text{ mm (Fase de secado)}$$

$$I = I_w + I_s + I_d = 5.06 \text{ mm}$$

4.6.3 Gash y Valente 1997.

El modelo de Gash y Valente 1997 (Tabla 25) subestima la intercepción en la mayoría de los ecosistemas analizados.

Tabla 25. Valores de Intercepción observados y calculados por el modelo de Valente 1997

Pg (mm)	Ecosistema con un estrato									Ecosistema con dos estratos			Ecosistema con tres estratos		
	<i>Eupatorium</i> sp. (Dispositivos a 0.5 m)			<i>Quercus</i> sp. (Dispositivos a 1.9 m)			<i>Quercus</i> sp. (Dispositivos a 3 m)			<i>Ptelea trifoliata</i> + <i>Quercus</i> sp. (Dispositivos a 1.9 m)			<i>Eupatorium</i> sp. + <i>Ptelea trifoliata</i> + <i>Quercus</i> sp. (Dispositivos a 0.5 m)		
	$I_{\text{observada}}$ (mm)	Evaporación de la copa durante la lluvia (mm) ($I_w + I_s$)	$I_{\text{calculada}}$ (mm)	$I_{\text{observada}}$ (mm)	Evaporación de la copa durante la lluvia (mm) ($I_w + I_s$)	$I_{\text{calculada}}$ (mm)	$I_{\text{observada}}$ (mm)	Evaporación de la copa durante la lluvia (mm) ($I_w + I_s$)	$I_{\text{calculada}}$ (mm)	$I_{\text{observada}}$ (mm)	Evaporación de la copa durante la lluvia (mm) ($I_w + I_s$)	$I_{\text{calculada}}$ (mm)	$I_{\text{observada}}$ (mm)	Evaporación de la copa durante la lluvia (mm) ($I_w + I_s$)	$I_{\text{calculada}}$ (mm)
1.6	-0.26	-	-	0.88	1.07	1.07	0.78	0.84	0.84	0.77	0.96	0.96	0.68	1.33	1.33
35.1	7.11	3.35	4.62	3.13	0.79	2.32	6.74	3.54	5.07	3.19	1.67	3.37	1.36	1.59	3.46
5.8	1.51	0.49	1.76	2.03	0.10	1.63	2.26	0.44	1.97	2.30	0.21	1.91	2.45	0.21	2.08
0.9	0.25	0.79	0.79	0.37	0.60	0.60	0.22	0.47	0.47	0.11	0.54	0.54	-0.12	-	-
4.1	1.63	0.32	1.59	1.67	0.06	1.59	1.61	0.26	1.79	1.65	0.13	1.83	1.29	0.13	2.00
4.1	1.59	0.32	1.59	1.81	0.06	1.59	2.49	0.26	1.79	2.17	0.13	1.83	2.03	0.13	2.00
1.7	0.71	0.09	1.36	1.38	1.14	1.14	1.13	0.90	0.90	1.25	1.02	1.02	1.12	1.41	1.41
10.3	2.91	0.93	2.20	3.37	0.21	1.74	3.96	0.92	2.45	3.40	0.44	2.14	3.07	0.42	2.29
29.2	5.44	2.77	4.04	3.44	0.65	2.18	5.09	2.91	4.44	4.74	1.38	3.08	4.72	1.31	3.18
25.38	4.22	2.40	3.67	3.32	0.56	2.09	5.14	2.51	4.04	3.72	1.19	2.89	3.86	1.13	3.00
18.8	4.69	1.76	3.03	6.01	0.41	1.94	4.95	1.82	3.35	4.77	0.86	2.56	3.97	0.82	2.69
40.9	0.49	3.92	5.19	-0.49	-	-	2.78	4.15	5.68	1.10	1.96	3.66	1.79	1.86	3.734
20.3*	<u>3.86</u>	<u>1.90</u>	<u>3.17</u>	2.75	0.44	1.977	4.32	1.97	3.50	3.63	0.93	2.63	3.56	0.89	2.76

*Ejemplo: Determinación de la intercepción calculada para el ecosistema con un estrato formado por *Eupatorium* sp. con el modelo de Valente *et al.* 1997.

Datos

$P_g = 20.3 \text{ mm}$	$I_{\text{observada}} = 3.86 \text{ mm}$	$E_c = 0.695 \text{ mm/h}$	$p = 0.72$	$S = 1.27$
$P^g = 1.53 \text{ mm}$	$e = 0.0023 \text{ mm}$	$R = 6.11 \text{ mm/h}$	$c = 0.878$	

Aplicando la fórmula 14, 15, 16 y 17.

$$I_w = c * P^g - S = 0.076 \text{ mm (Fase de mojado)}$$

$$I_s = \frac{c(1-\varepsilon)\overline{E}_c}{R} (P_g - P^g) = 1.83 \text{ mm (Fase de saturación)}$$

$$I_d = S = 1.27 \text{ mm (Fase de secado)}$$

$$I = I_w + I_s + I_d = 3.17 \text{ mm}$$

En las figuras 42, 43, 44 y 45 se presentan las relaciones de la intercepción medida y calculada por los modelos.

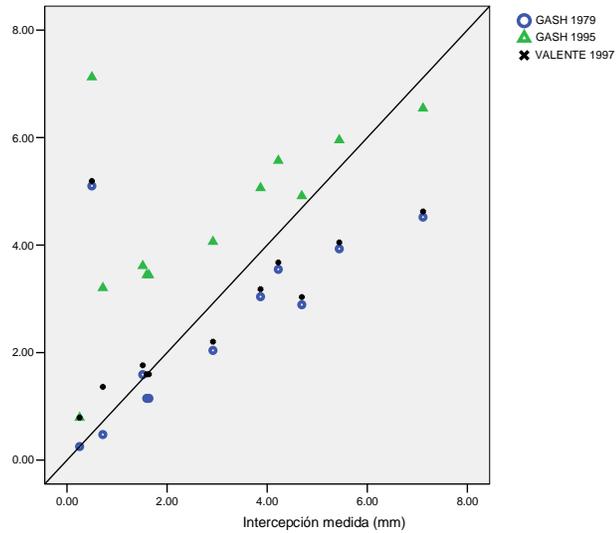
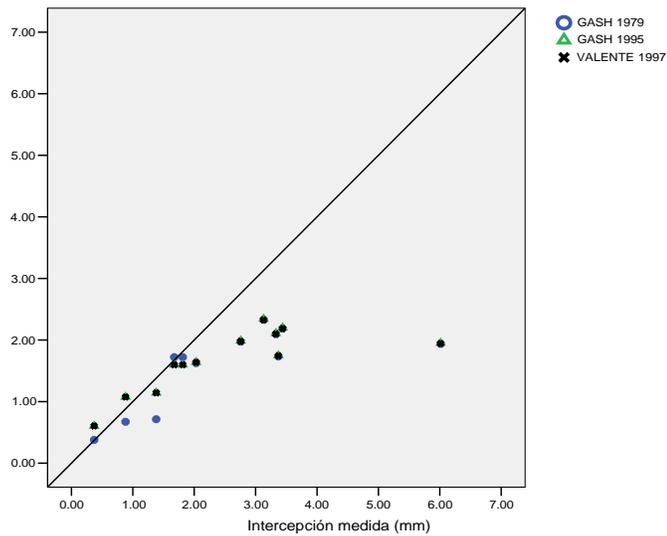


Figura 42. Intercepción observada contra calculada con los modelos de Gash 1979, 1995 y Valente 1997 en ecosistemas con un estrato compuesto por *Eupatorium* sp. en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta.

a)



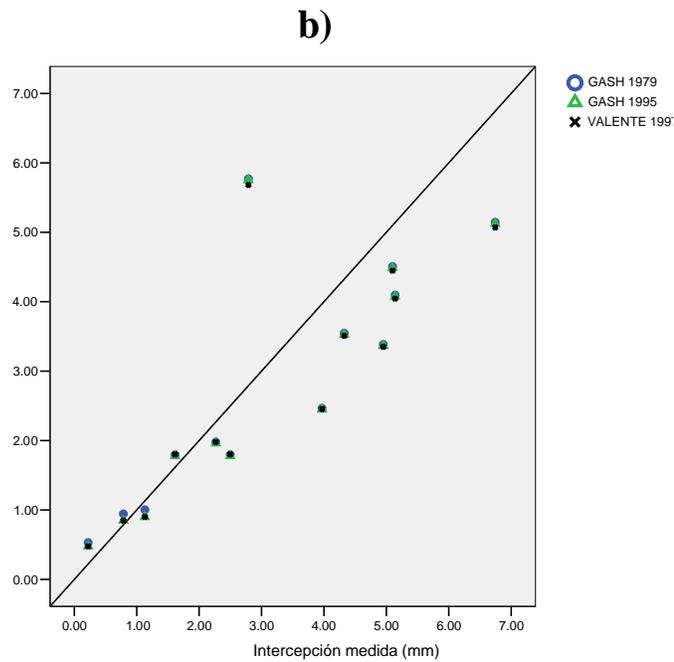


Figura 43. Intercepción observada contra calculada con los modelos de Gash 1979, 1995 y Valente 1997 en ecosistemas con un estrato compuesto por *Quercus* sp. en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta. A) Intercepción determinada con pluviómetros de botella colocadas a 1.9 m, b) Intercepción determinada con pluviómetros de botella colocadas a 3 m.

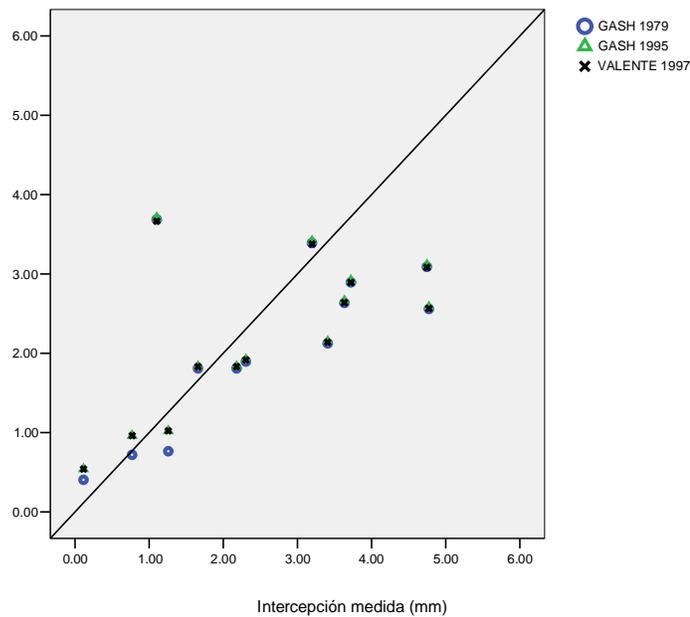


Figura 44. Intercepción observada contra calculada con los modelos de Gash 1979, 1995 y Valente 1997 en ecosistemas con dos estratos compuesto por *Ptelea trifoliata* y *Quercus* sp. en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta.

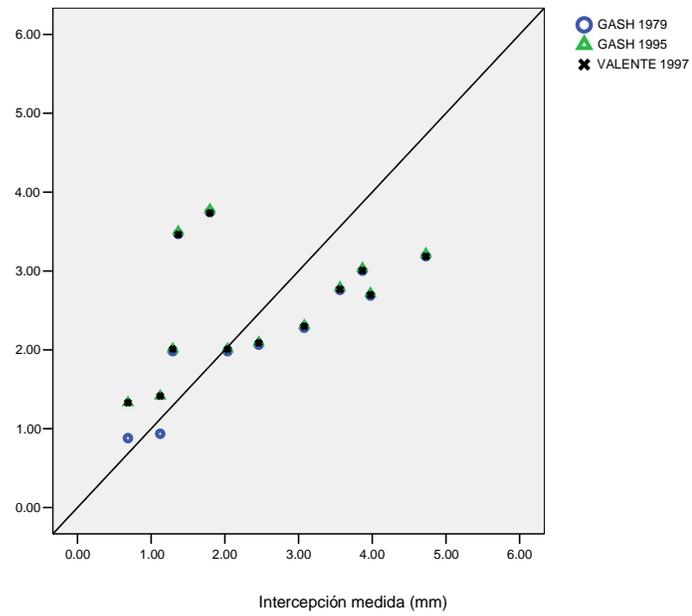


Figura 45. Intercepción observada contra calculada con los modelos de Gash 1979, 1995 y Valente 1997 en ecosistemas con tres estratos compuesto por *Eupatorium* sp., *Ptelea trifoliata* y *Quercus* sp. en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta.

Tabla 26. Eficiencia (*E*), Sesgo (*B*) y Raíz del error cuadrático medio (*RMSE*) para los modelos Gash 1979, Gash 1995 y Valente (1997).

Ecosistema	Especie	Gash et al. 1979			Gash et al. 1995			Gash y Valente 1997		
		E	B	RMSE	E	B	RMSE	E	B	RMSE
Un estrato	<i>Eupatorium</i> sp.	32.1	-0.39	1.54	1.6	1.5	1.86	33.8	-0.11	1.52
	<i>Quercus</i> sp. (1.9 m)	2.37	-0.93	1.36	4.9	-0.85	1.34	4.08	-0.85	1.35
	<i>Quercus</i> sp. (3 m)	60.4	-0.35	1.10	60.1	-0.39	1.11	60.3	-0.40	1.11
Dos estratos	<i>Pteleatrifoliata</i> <i>Quercus</i> sp.	36.38	-0.39	1.10	37.42	-0.32	1.09	37.21	-0.33	1.09
	Tres estratos	<i>Eupatorium</i> sp. <i>Pteleatrifoliata</i> <i>Quercus</i> sp.	27.86	-0.07	0.99	26.03	0.01	1.01	26.48	0.00

El modelo de Gash *et al.* (1979, 1995) en teoría sobrestima las pérdidas por intercepción para bosques esparcidos porque este asume que el área de evaporación (dosel y troncos) se extiende al área total de la parcela, considerando que la evaporación del área actual (dosel y troncos) es mucho más reducido en este tipo de bosques (Zhang, 2005). La sobre y sub – estimación de las pérdidas por intercepción de los modelos de Gash *et al.* (1979, 1995) y Valente (1997) en nuestro estudio son atribuidas a los coeficientes de flujo de traslocación (*p*) y la cobertura del dosel (*c*). Como lo menciona Leyton *et al.* (1917), Rutter *et al.*, (1971) y Gash (1979), el coeficiente *p* se deriva de las observaciones del flujo de traslocación que corresponden a lluvias insuficientes para saturar el dosel de la vegetación, teniendo en nuestro estudio un evento de precipitación que cumplía con el requisito anteriormente señalado, por otro lado la cobertura de la vegetación (*c*) que fue determinado a través de la relación cobertura – LAI podría generar error debido a que los transectos fueron hechos en el 2005 y los registros del LAI en el 2007, es decir que debido al desarrollo de la vegetación se presentan cambios en sus atributos (Van Dijk y Bruijnzel, 2001).

Relación de la intercepción contra LAI y el contenido volumétrico de humedad en el suelo

Se presentan como ejemplo la figura 46 de las cartas resultantes del análisis para diferentes eventos. Estos mapas fueron construidos a partir de la interpolación de los valores porcentuales de intercepción y de LAI. Los mapas obtenidos pueden ser observados en el ANEXO I, II y III que presentan cartas de distribución espacial de la intercepción como porcentaje de la precipitación incidente y el LAI para eventos de diferente magnitud en los diferentes ecosistemas analizados, así como de diferente intensidad.

En tales cartas se realizó una interpolación espacial utilizando el programa ArcView 3.2[®]. Los resultados muestran que la intercepción no es uniforme sobre los cuadrantes analizados. Para corroborar lo anterior se realizó correlación entre estas dos variables (intercepción contra LAI) para los ecosistemas de uno, dos y tres estratos (tabla 27).

A manera de ejemplo se muestra las relaciones hechas de la intercepción contra LAI, contenido volumétrico de humedad y, LAI contra el contenido volumétrico de humedad en la figura 48, y que también puede ser observado en el ANEXO IV y V.

Los resultados de la tabla 27, muestra una relación directa de la intercepción con respecto al LAI para la mayoría de los eventos medidos en los ecosistemas con uno y dos estratos, no así para el ecosistema de tres estratos que presenta una relación contraria en la mayoría de los eventos analizados. Las relaciones inversas pueden ser debidas a que los estratos bajos que conforman a los ecosistemas con uno y dos estratos reciben aportaciones de los estratos superiores por la presencia de viento.

Tabla 27. Coeficiente de correlación entre el LAI y % de intercepción en los ecosistemas de la microcuenca La Barreta.

Evento	Ecosistema con u estrato formado por <i>Eupatorium</i> sp. (C-14)	Ecosistema con un estrato formado por <i>Quercus</i> sp. (C-8)	Ecosistema con tres estratos formado por <i>Eupatorium</i> sp., <i>Ptelea trifoliata</i> y <i>Quercus</i> sp. (C-22)
1	-0.364	0.489	-0.238
2	0.147	0.290	-0.330
3	-0.089	0.310	0.261
4	0.238	0.330	-0.447
5	0.307	0.150	-0.084
6	0.146	0.217	-0.170
7	0.214	0.253	-0.093
8	0.295	0.132	-0.353
9	-0.201	0.190	-0.347
10	-0.363	0.170	-0.164
11	0.206	0.347	-0.140
12	0.142	0.433	-0.636
13	0.451	0.328	0.131

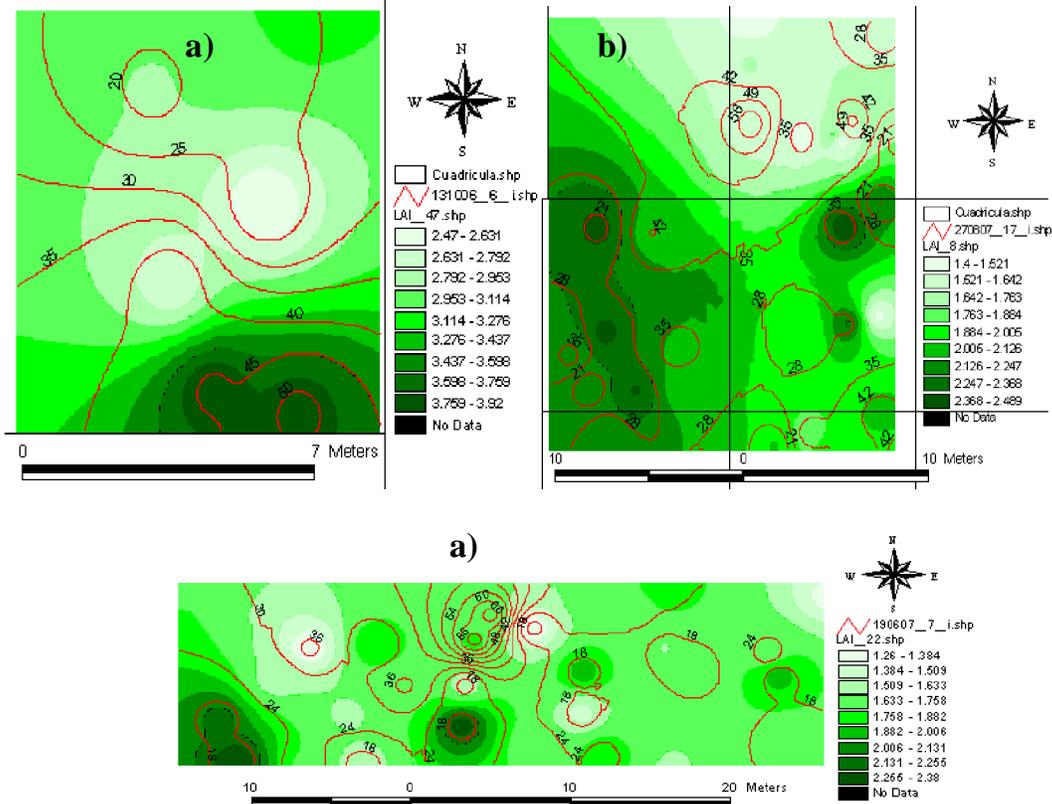


Figura 46. Distribución espacial de la intercepción y el LAI en el ecosistema con uno (figura 40a), dos (figura 40b) y tres (figura 40c) estratos en la parcela experimental de la microcuenca La Barreta.

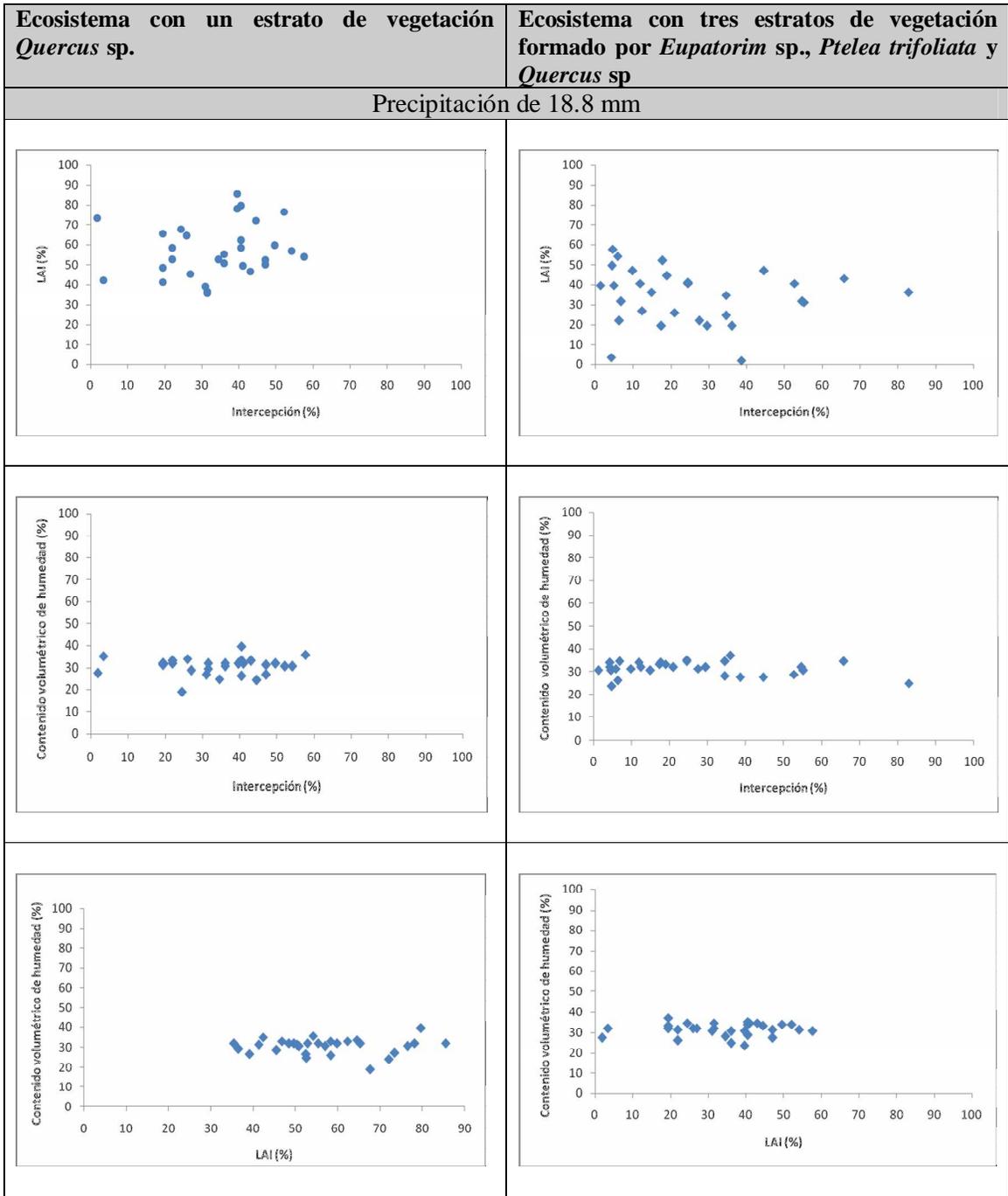


Figura 47. Relación de la intercepción con respecto al LAI, contenido volumétrico de humedad y, LAI contra contenido volumétrico de humedad en los ecosistemas con uno y dos estratos de vegetación en un evento de 18.8 mm.

Los porcentajes del contenido volumétrico de humedad y su comportamiento de acuerdo a los valores registrados por los sensores Water Mark son presentados en la figura 48 y que se obtuvieron del ANEXO VII.

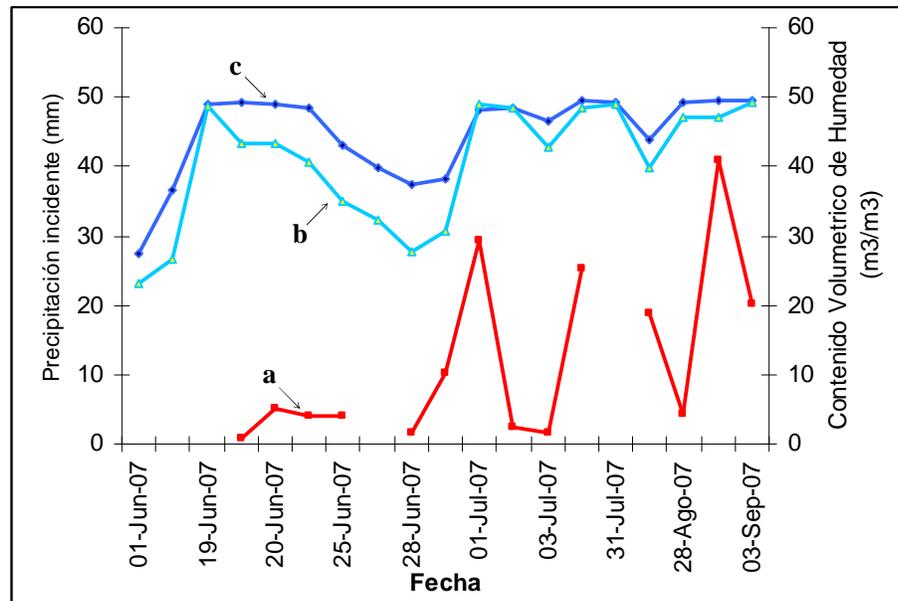


Figura 48. Comportamiento de la humedad del suelo con respecto a la P_g , **a)** Eventos individuales de P_g , **b)** Contenido de humedad Volumétrica en el ecosistema de 2 estratos, **c)** Contenido de Humedad Volumétrica en el ecosistema de 3 estratos

De manera similar al caso previo se realizaron cartas de distribución espacial de la precipitación neta con respecto a la humedad del suelo las cuales, de entrada, no reflejan de manera visual una clara relación (ANEXO IV y V). Ahora bien tomando como referencia las mediciones hechas con los sensores de humedad Water Mark se tiene que el suelo forestal del ecosistema con dos estratos retuvo un promedio del 4.61% de humedad volumétrica, con un mínimo y máximo de 0.2375% y 10.11%, respectivamente. Para el suelo forestal del ecosistema con tres estratos, con los sensores Water Mark se determinó una humedad volumétrica promedio retenida de 7.24%, con un mínimo y máximo del 0.028% y 18.35%, respectivamente. La humedad retenida por el suelo forestal es mayor en el ecosistema con tres estratos de vegetación, ahora relacionándolo con la figura 42 se observa una mayor entrada de agua al suelo forestal el cual incrementa el nivel de agua en el suelo, entendiendo que la abundancia vegetal hace que la intercepción sea mínima debido al retardo de la evaporación en el dosel vegetal; no así en el ecosistema con dos estratos vegetativos el cual la intercepción en el estrato bajo influye en la intercepción el cual resta a la precipitación neta reflejándolo en la humedad del suelo forestal.

5. CONCLUSIONES

- Las especies con mayor valor de importancia (*V.I*) en los cuadrantes instrumentados en la microcuenca la Barreta son *Eupatorium sp.*, *Quercus s.*, y *Ptelea trifoliata*.
- El dosel de los tres ecosistemas ubicadas dentro la microcuenca la Barreta promedian el 25.2% de retención del agua de lluvia.
- El ecosistema de un estrato formado por la especie *Eupatorium sp.* siendo un estrato herbáceo tiende a retener en su dosel una magnitud similar de agua de lluvia al igual que los ecosistemas con dos y tres estratos.
- La variación espacial del *Th* en los tres ecosistemas es mayor para lluvias menores a 5 mm de precipitación y menor para precipitaciones mayores a 5 mm.
- La variabilidad espacial del *Th* es mayor para ecosistemas de tres estratos y menor en los ecosistemas de uno y dos estratos teniendo el dosel de los estratos de vegetación a aumentar la variación espacial del *Th*.
- Existe una relación inversa entre el LAI y el Flujo de traslocación y una relación directa entre el LAI y la Intercepción en los ecosistemas con uno y dos estratos, y de manera inversa para el ecosistema con tres estratos.
- No existen estudios sobre intercepción en México para ecosistemas con diferentes estratos y por consecuencia los valores de la capacidad de almacenamiento (*S*) y de Intercepción servirían para estudios posteriores.
- Los modelos de Gash et al. (1979, 1995) y Valente (1997) sub – estiman las perdidas por intercepción en los tres tipos de ecosistemas encontrados en la zona experimental, así también a medida aumenta el numero de estratos en los ecosistemas los modelos de Gash bajan su eficiencia.

- Existe mayor disponibilidad de precipitación neta en el ecosistema de tres estratos de vegetación reflejándolo en un promedio del 7.24% de humedad (14.48 mm de agua), no así en el ecosistema de dos estratos que tiene una humedad promedio del 4.61% (9.2 mm de agua).
- Se propone el balance General de masa para el sitio experimental:

$$\Delta S = P_g - 0.261P_{g_i} - 0.315P_{g_h} - 0.42P_{g_r}$$

En donde la P_g es el agua de lluvia que cae sobre el dosel arbóreo, P_{g_i} es el % de agua interceptada promedio de la P_g en el dosel de la vegetación, P_{g_h} es el % de la P_g promedio retenida en el suelo forestal en un espesor de 200 mm, y finalmente P_{g_r} es el % de la P_g que se incorpora al escurrimiento.

6. RECOMENDACIONES

- Es necesario seguir monitoreando los componentes de la intercepción en el sitio experimental para obtener suficientes datos para la determinación del coeficiente libre de traslocación, así también para tener una mejor aproximación de los parámetros de entrada a los modelos de intercepción.
- Monitorear el índice de área foliar (LAI) para determinar las correlaciones de las capacidades de almacenamiento del bosque de *Quercus* en las diferentes estaciones de año.
- Para efectos de comparación de los resultados de la modelación de las pérdidas por intercepción es necesario instrumentar dispositivos para medir variables climáticas y determinar la evaporación con las expresiones de penman (). Así también utilizar el modelo de Rutter et al (1971), y modelar la intercepción del sub – dosel.
- Instrumentar un árbol del género *Quercus* para esta misma microcuenca y evaluar la intercepción no como comunidad si no como individuo y establecer correlaciones entre estas.
- Monitorear la evapotranspiración con el ET gauge para tener registros completos de las diferentes estaciones del año y compararlos con expresiones como las de penman – motheit.

7. REFERENCIAS

- Amador A., 2005, “Documento de examen pre-doctoral”, Universidad Autónoma de Querétaro.
- Bruijnzeel, L. A. 1989a. “Forestation and dry season flow in the tropics: A closer look”. *J. Trop. For. Sci.*, 1, 229–243.
- Bruijnzeel, L. A. 1988. “Estimates of evaporation in plantations of *Agathis dammara* Warb. in South-Central Java, Indonesia”. *J. Trop. For. Sci.*, 1, 145–161.
- Bruijnzeel, L. A., and K. F. Wiersum. 1987. “Rainfall interception by a young *Acacia auriculiformis* plantation forest in West Java, Indonesia”: Application of Gash’s analytical model, *Hydrol. Proc.*, 1, 309–319.
- Bruijnzeel, L. A. 1983a. “Evaluation of runoff sources in a forested basin in a wet monsoonal environment: a combines hydrological and hydrochemical approach”. pp. 165–174, IAHS Publ. no. 140.
- Bruijnzeel, L. A. 1983b. “Hydrological and biochemical aspects of man-made forests in South-Central Java, Indonesia”. Ph.D. thesis, Faculty of Earth Sciences, Vrije Universiteit, Amsterdam.
- Calder, I. R., 1986. “A stochastic model of rainfall interception”. *J. Hydrol.*, 89, 65–71.
- Cantu Silva I, Okumura T., 1996 “Rainfall partitioning in a mixed white oak forest with dwarf bamboo undergrowth”, *The Electronic Journal of the International Association for Environmental Hydrology*, Vol. 4.
- Carlyle-Moses, D.E., Price, A.G. 1999. “An evaluation of the Gash interception model in a northern hardwood stand. *Journal Hidrologyc.* 103.
- Domínguez Cortázar M. A. 2005. “Proyecto de Investigación: Medición de la interceptación de lluvia en encinos y su valoración como indicador de servicios ambientales en cuencas hidrográficas”. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Gash J., Lloyd C., Lachaud G., 1995, “Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model” *Journal of Hydrology.*, 170.
- Gash, J. H. C. 1979. “An analytical model of rainfall interception by forests”. *Quart. J. Roy. Meteo. Soc.*, 105, 43–55.
- Gash J., Morton A., 1978, “An application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from the Thetford forest”. *Journal Hydrology.* 38.

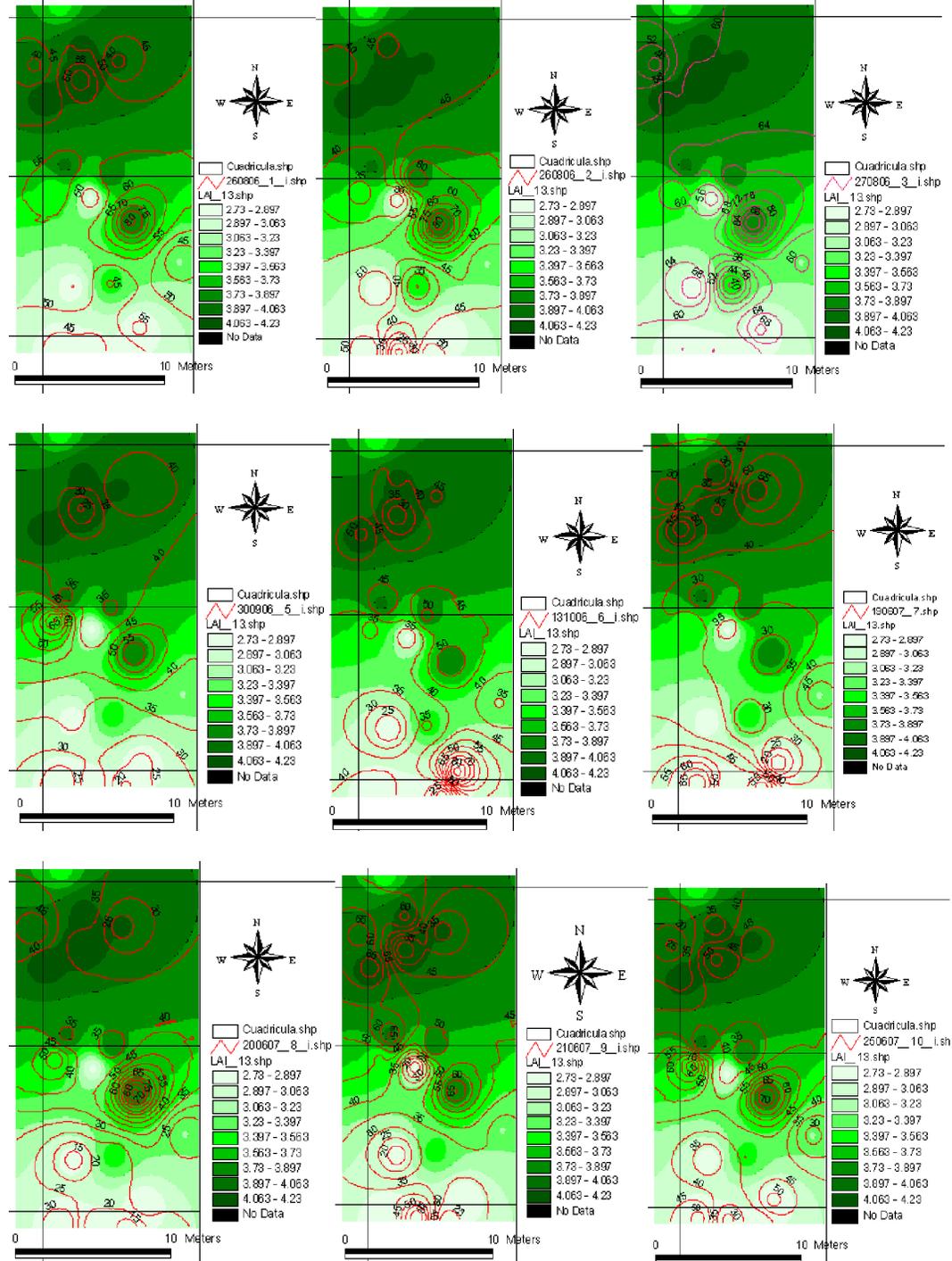
- Gash, J. H. C., and J. B. Stewart. 1977. "The evaporation from Thetford Forest during 1975". *J. Hydrol.*, 35, 385–396.
- Gerrits, A. M. J. et al. 2006. "Measuring forest floor interception in a beech forest in Luxembuourg". *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 3, 2323 – 2341.
- G. Pypker T. J. Bond B., E. Link T., Marks D., H. Unsworth M. (2005). "The importance of canopy structure in controlling the interception loss of rainfall: Examples from a young and an old – growth Douglas – fir forest". *Agricultural and forest Meteorology*. Pag. 113 – 129.
- Hashino, M., Yao, H., Yoshida, H. 2002." Studies and evaluations on interception processes during rainfall based on a tank model". *Journal Hydrology*. 255.
- Herwitz, S. R., Slye R. E., 1995. "Three-dimensional modeling of canopy tree interception of wind-driven rainfall". *J. Hydrol.* 168, 205–226.
- Horton R., 1919. "Rainfall interception", *Monthly Weather Rev.*, 47. (citado por Mateos Rodríguez y Scnabel S).
- Huang Y. S., Chen S. S., Lin T. P., 2004. "Continuous monitoring of water loading of trees and canopy rainfall interception using the strain gauge method". *J. Hydrology*. 311, 1 – 7.
- J. Martin y Stephens W. (2005). "Willow growth in response to nutrients and moisture on a clay landfill cap soil. II: Water use". *Bioresource Technology*. Page. 449 – 458.
- Keith J. Wrage, F. Robert Gartener & Jack L. Butler. 1994. "Inexpensive rain gauges constructed from recyclable 2-liter plastic soft drink bottles". *Journal of Range Management*. 47(3).
- Lankreijer, H.J.M., Hendriks, M.J., Klaassen, W., 1993. "A comparison of models simulating rainfall interception of forests. *Agricultural Forest Meteorology*. 187.
- Llorens, P. & Gallart, F. 2000. "A simplified method for forest water storage capacity measurement". *J. Hydrol.*, 240, 131 – 144.
- Llorens, P., Poch, R., Latron, J., Gallart, F., 1997. "Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area 1. Monitoring design and results down to the event scale". *J. Hydrol.*, 199, 331–345.
- Lloyd, C. R., and A. Marques-Filho. 1988. "Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rain forest". *Agric. For. Meteo.*, 42, 63–73.
- Lloyd, C. R., J. H. C. Gash, W. J. Shuttleworth, and A. Marques-Filho. 1988. "The measurement and modelling of rainfall interception by Amazonian rain forests". *Agric. For. Meteo.*, 43, 277–294.

- Mastachi Loza C. 2007. “Intercepción de precipitación en dos especies de ambiente semidesértico: *Acacia farnesiana* y *prosopis laevigata*”. Tesis Maestría. UAQ, México.
- Mateos Rodríguez, A. B. (2003). “Intercepción de la lluvia por la encina en espacios adhesados”. Univ. Extremadura. Cáceres 152 pp.
- Monteith, J. L. 1965. “Evaporation and the environment”. In Symposium of the Society of Experimental Biology no. 19, pp. 245–269.
- Nizinski, J. y Saugier, B. (1989). “Dynamique de l’eau dans une chênaie (*Quercus petraea*) en forest de Fontainebleau”. Ann. Sci. Forest. 46: 173-186.
- Ohta, T., Toba, T. 2005. “An observational study of the factors that influence interception loss in boreal and temperate forests”. J. Hydrology 313, 208 – 220.
- Roberts, M. C. & Klingeman, P. C. 1970. “The influence of landform and precipitation parameters on flood hydrograph”. J. Hydrol. 11, 393 – 411.
- Rowe, L. K. 1983. “Rainfall interception by an evergreen beech forest, Nelson, New Zealand”. J. Hydrol., 66, 143–158.
- Rowe, L. K. 1979. “Rainfall interception by a beech-podocarp-hardwood forest near Reefton North, Westland, New Zealand”. J. Hydrol. 18, 63–72.
- Rutter, A. J., and A. J. Morton. 1977. “A predictive model of rainfall interception in forests”: III. Sensitivity of the model to stand parameters and meteorological variables, J. Appl. Ecol., 14, 567–588.
- Rutter, A. J., A. J. Morton, and P. C. Robins. 1975. “A predictive model of rainfall interception in forests”. II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands, J. Appl. Ecol., 12, 367– 380.
- Rutter, A. J., K. A. Kershaw, P. C. Robins, and A. J. Morton. 1971.”A predictive model of rainfall interception in forests”. I. A derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine, Agric. Meteo. 9, 367–384.
- Rutter, A. J. 1967. “An analysis of evaporation from a stand of Scots pine”, Forest Hydrology. 403–417.
- Rzedowski R. J., 1978. “La vegetación de México”. Limusa, México.
- Savenije, H. H. G. 2004. “The importance of interception and why we should delete the term evapotranspiration from our vocabulary”. Hydrol. Processes. 18, 1507 – 1511.

- Schellekens, J. .2000. “Hydrological processes in a humid tropical rain forest: a combined experimental and modeling approach”. Doctoral Thesis. Vrije University of Amsterdam.
- Spanner, M. A., L. Johnson, J. Miller, R. McCreight, J. Freemantle, J. Runyon, P. Gong (1994): “Remote sensing of seasonal leaf area index across the Oregon transect”. *Ecological Applications* 4 (2), 258-271.
- Staelens, J., De Schrijver, A., Kris, V. and E.C. Verhoest N. 2006. “Spatial variability and temporal stability of throughfall water under a dominant beech (*Fagus sylvatica* L.) tree in relationship to canopy cover”. *Journal Hydrology*.
- Sugastti A. 2005. “Manuales para educación Agropecuaria: Producción Forestal”. Editorial Trillas. Pag. Web <http://surconsult.com.py/ccu/2005/abril2005/bosque.htm>
- Toba and Ohta. 2005. “An observational study of the factors that influence interception loss in boreal and temperate forests”. *Journal of Hydrology*. Pag. 208 – 220.
- Tsukamoto, Y., Tange, I., Minemura, T., 1988. “Interception loss from forest canopies”. *Rolling Land Research*. 6, 60–82.
- Van Dijk, A. and Bruijnzeel L.A. 2001. “Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 2. Model validation for a tropical upland mixed cropping system”. *Journal Hydrology*. Pag. 239 – 262.
- Woodward J. 2005. “Atlas de biomas. Bosques templados”. México.
- Wulder, M. A. (1998): “Optical remote sensing techniques for the assessment of forest inventory and biophysical stand parameters”. *Progress in physical Geography* 22 (4), 449-476.
- Zavala C. F. 1990. “Los encinos mexicanos: un recurso desaprovechado”. *Ciencia y desarrollo* XVI. 43 – 51.
- Zavala C. F. 2000. “El fuego y la Presencia de Encinos”. *Ciencia Ergo Sum*. 269-276.

ANEXO I. Distribución espacial de la intercepción y el LAI para el ecosistema con un estrato.

Figura 1. Distribución espacial de la intercepción (%) y el LAI para el ecosistema con un estrato en los cuadrantes 14 y 14



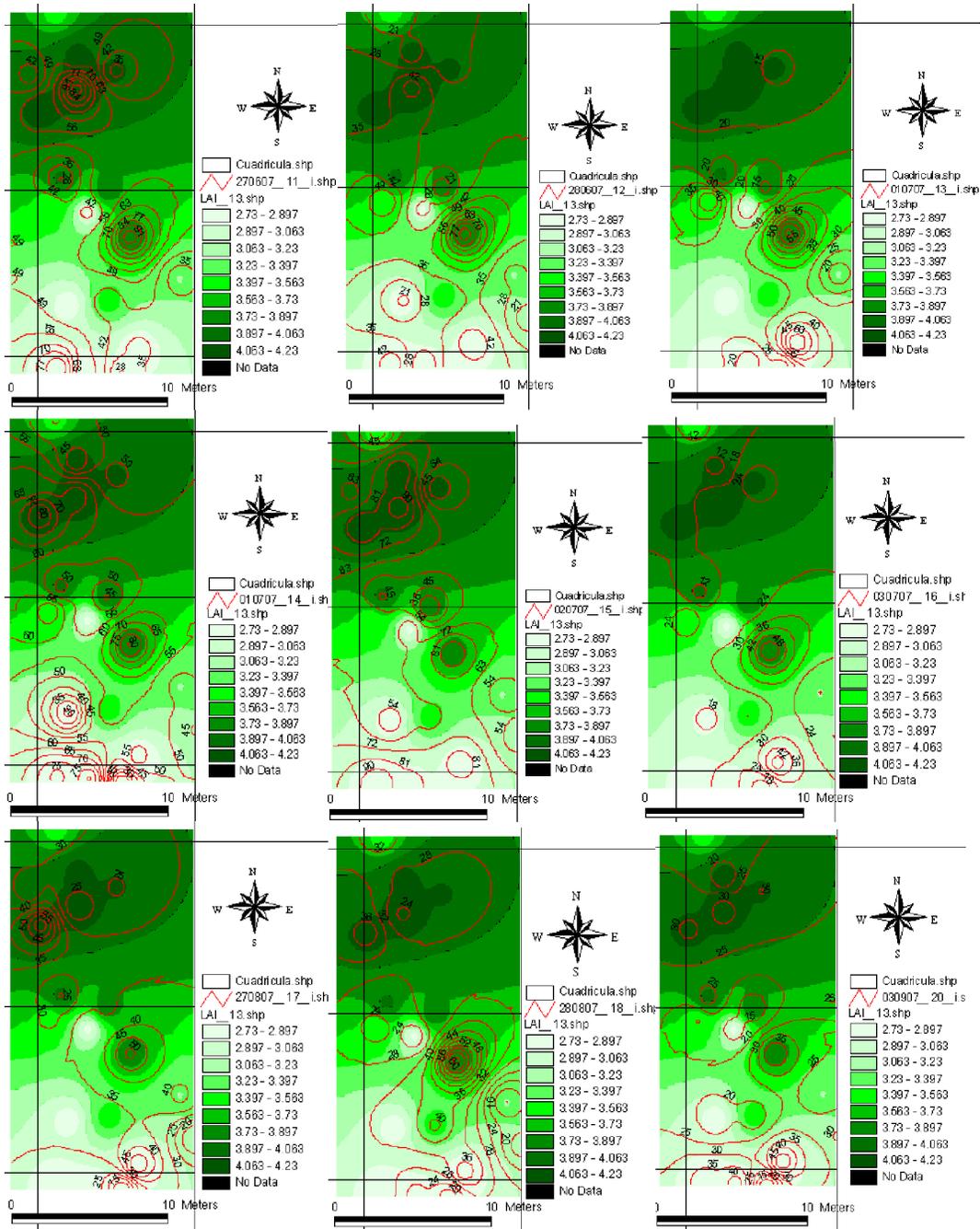
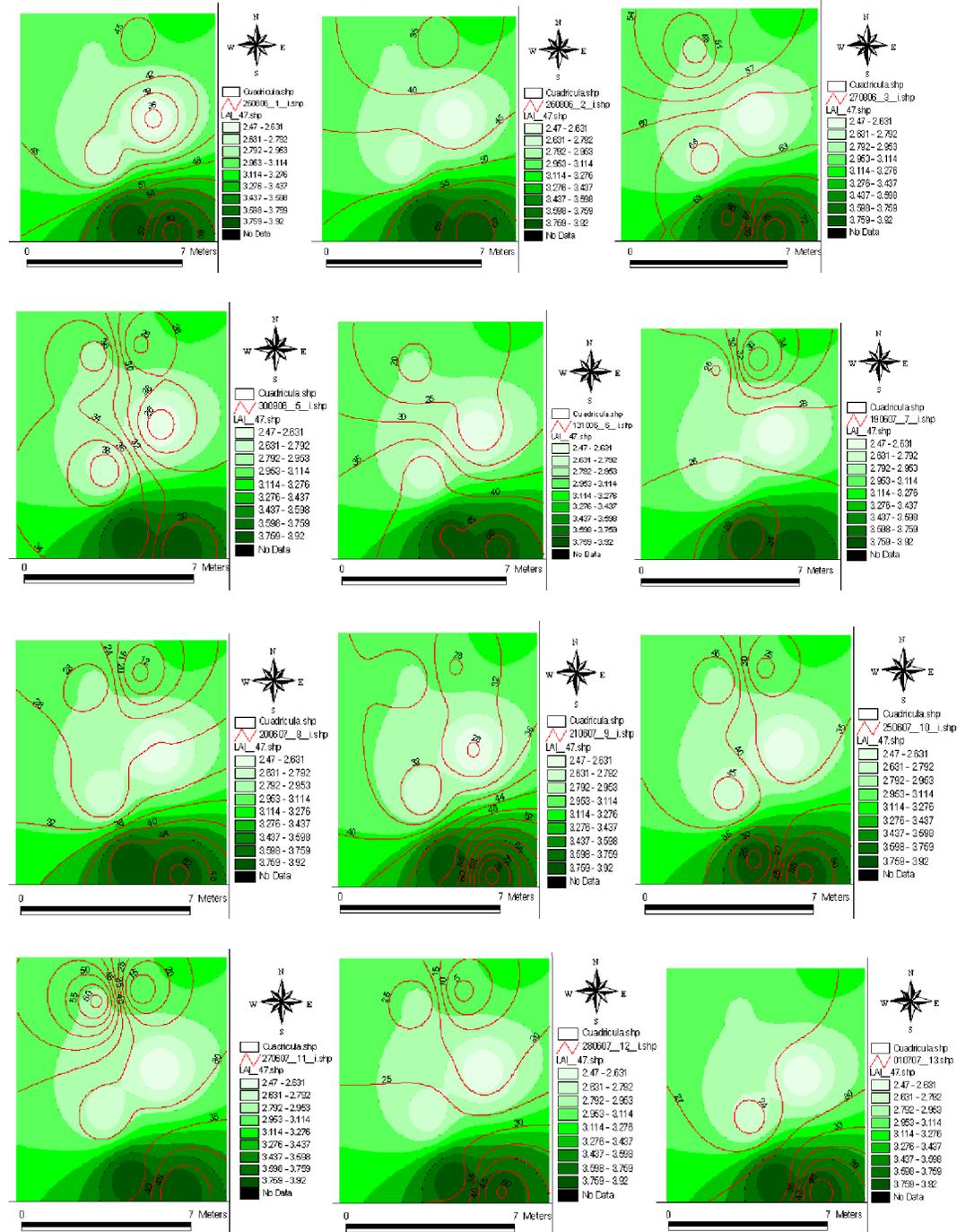
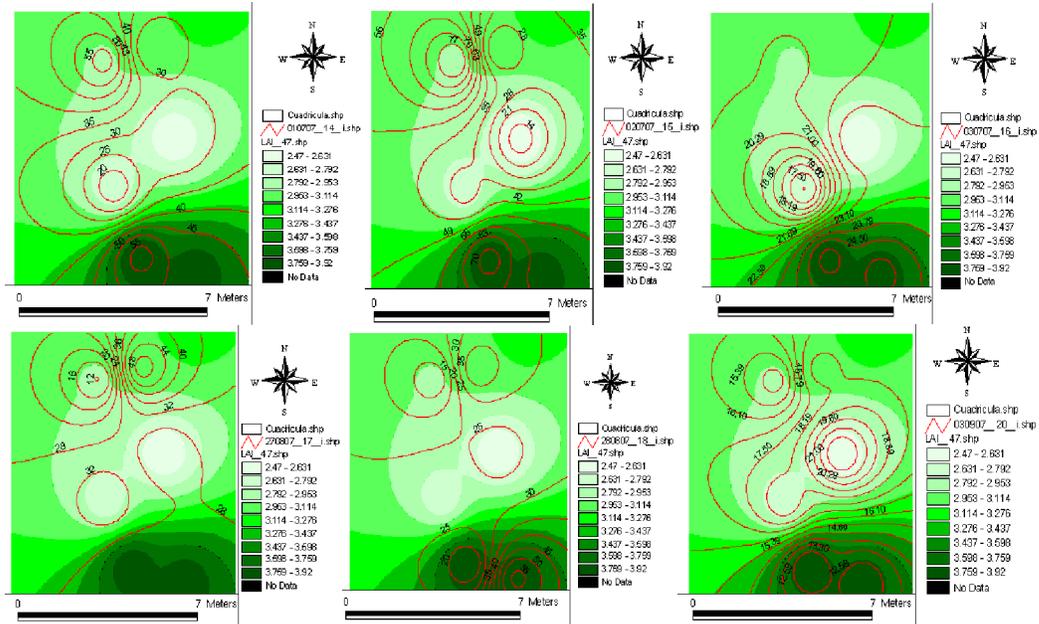


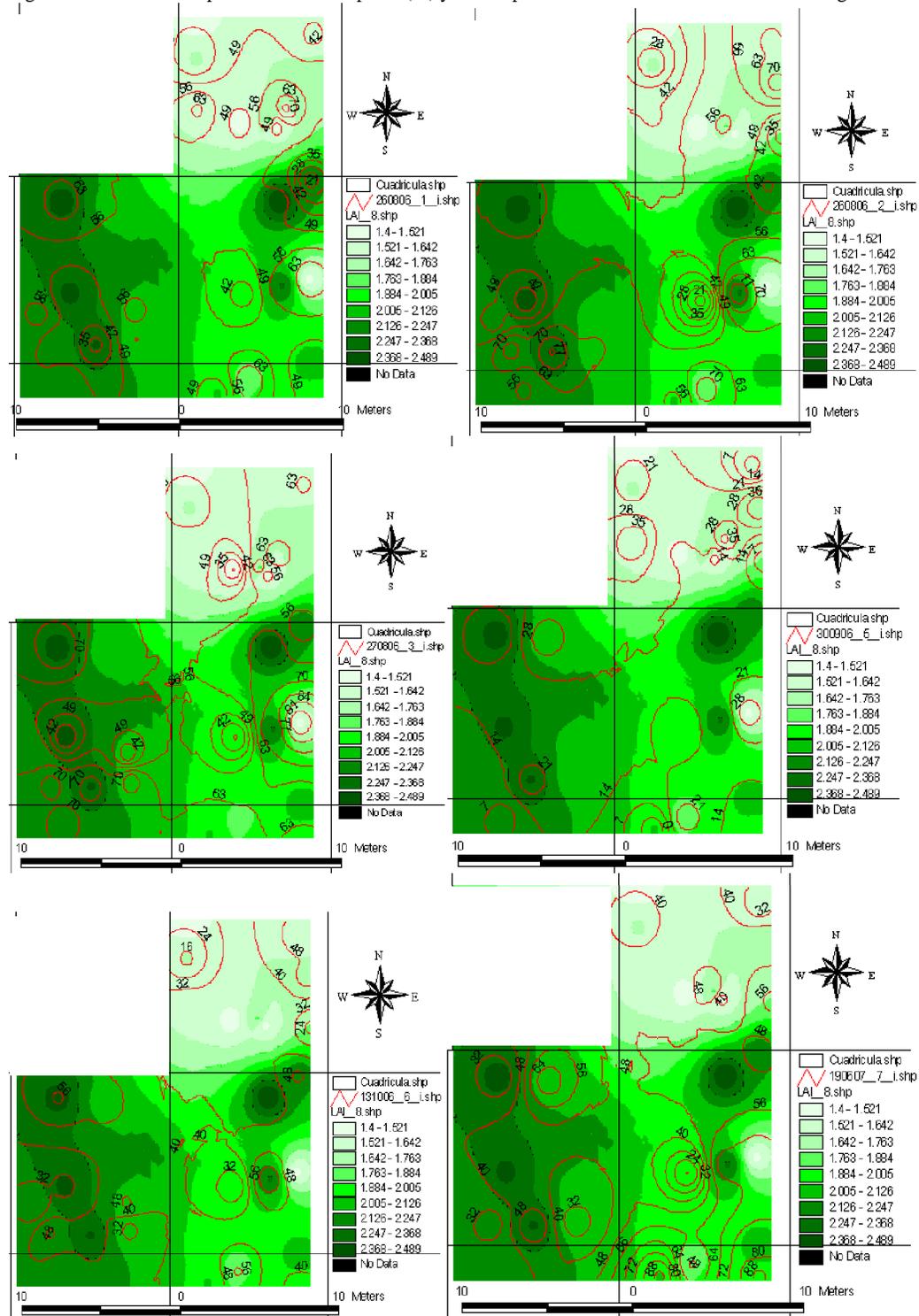
Figura 2. Distribución espacial de la intercepción (%) y LAI para el ecosistema con un estrato para el cuadrante 47

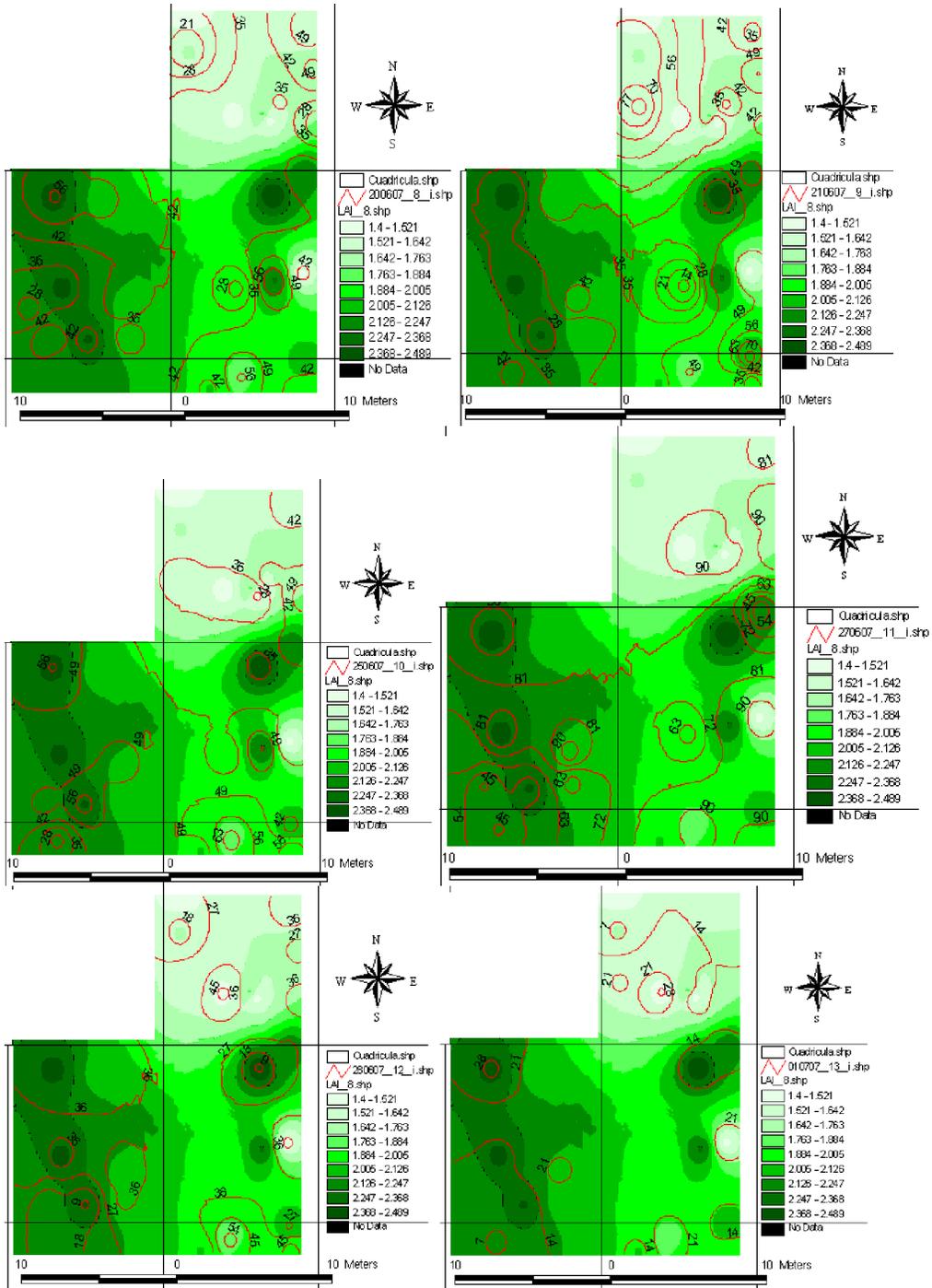


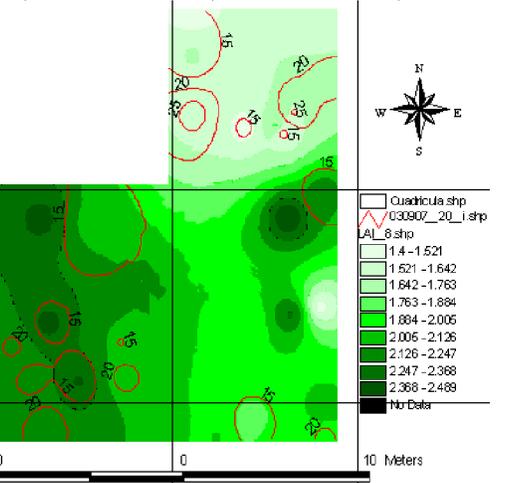
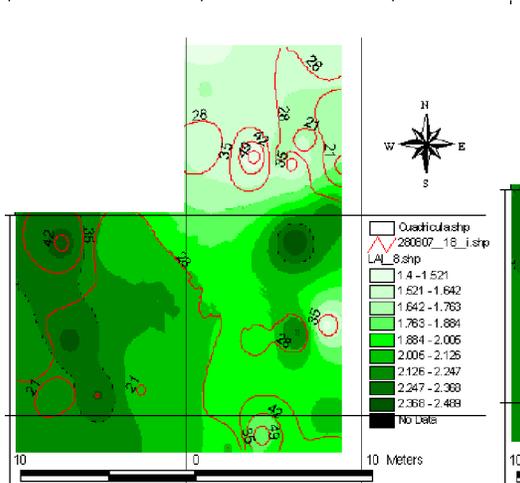
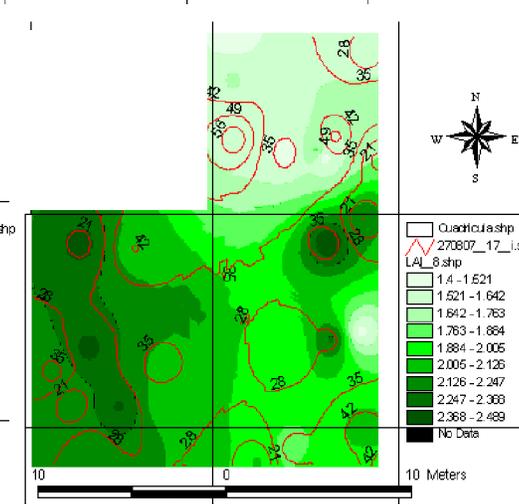
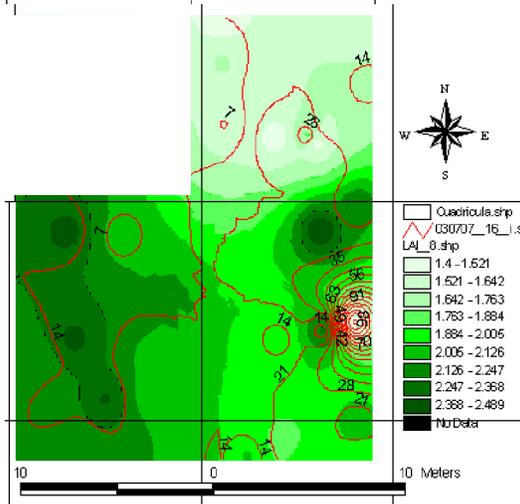
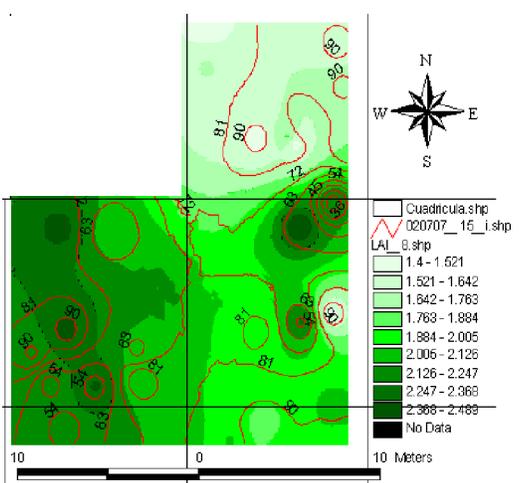
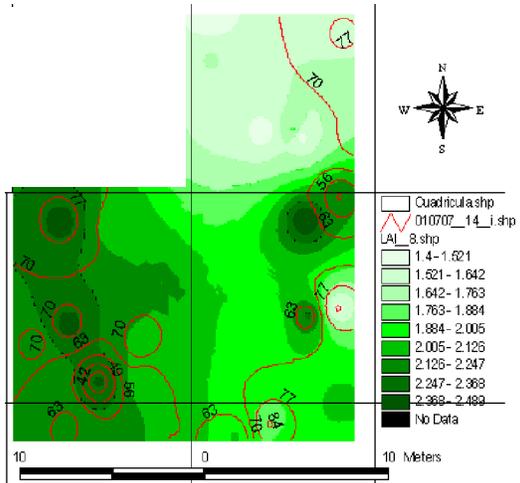


ANEXO II. Distribución espacial de la Intercepción y el LAI para el ecosistema con dos estratos de vegetación

Figura 1. Distribución espacial de la intercepción (%) y el LAI para el ecosistema con dos estratos de vegetación

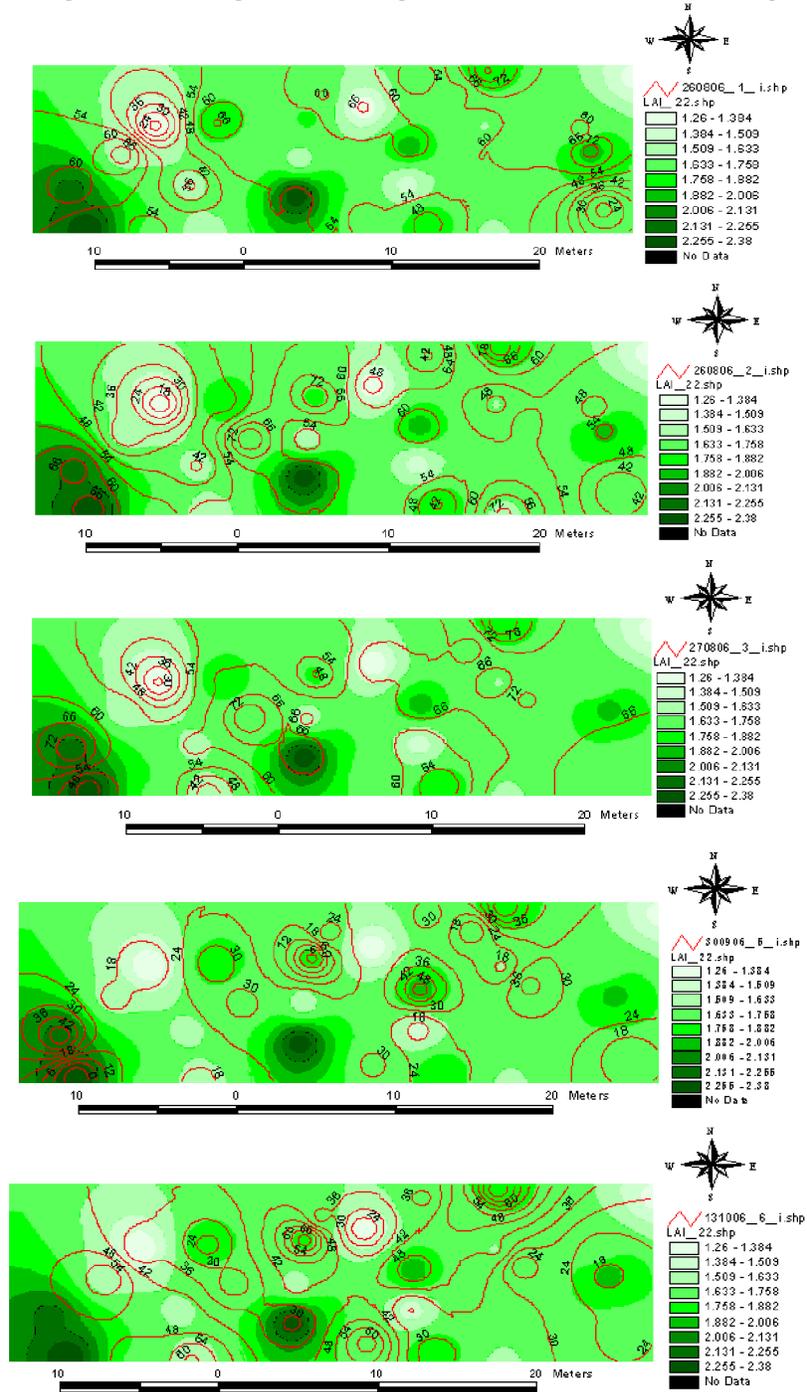


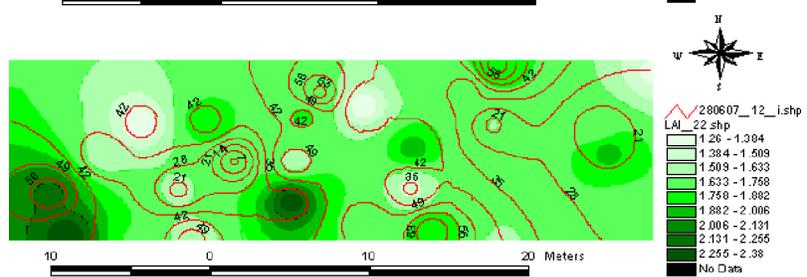
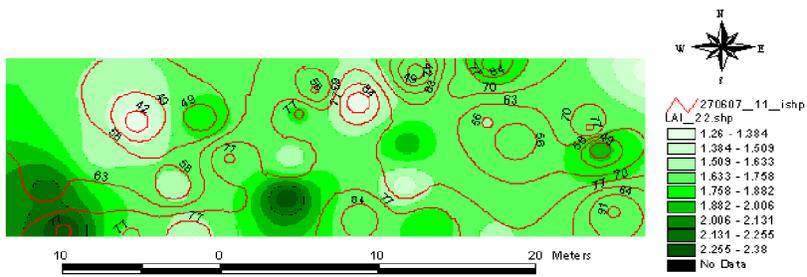
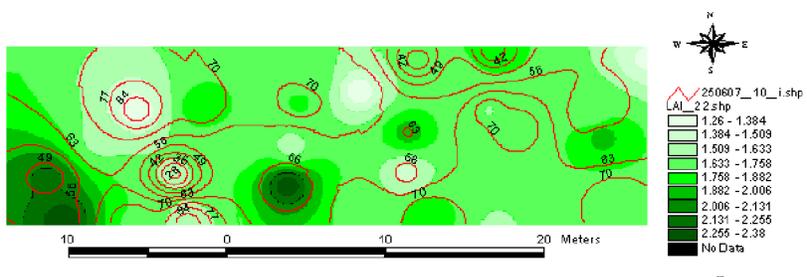
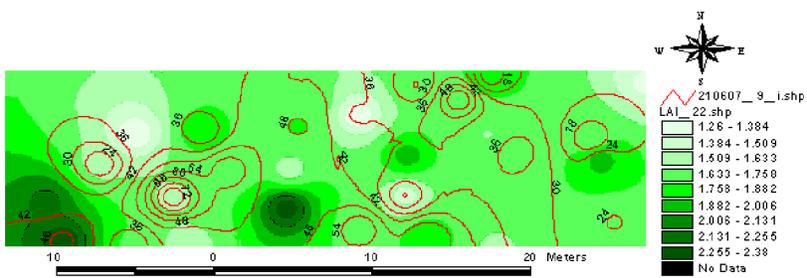
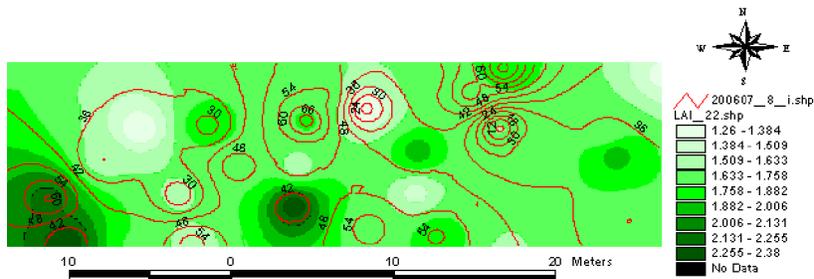
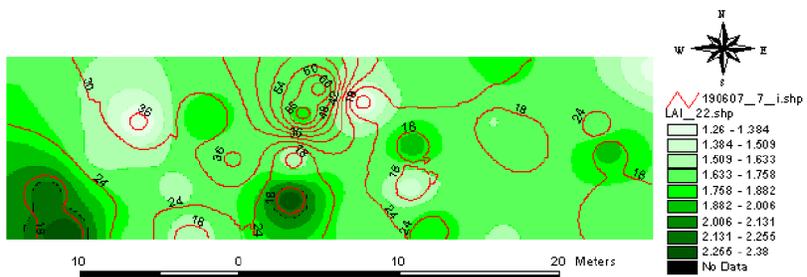


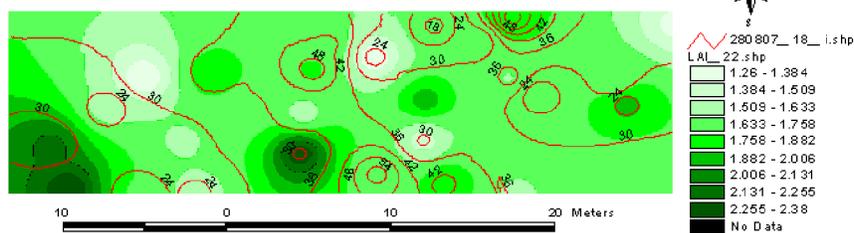
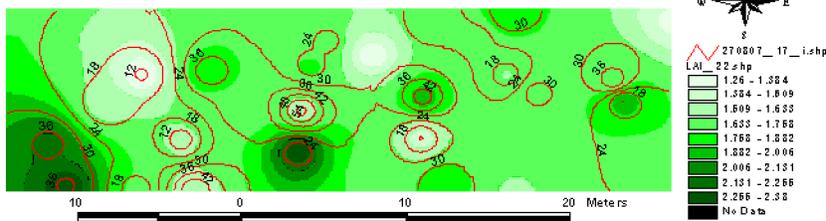
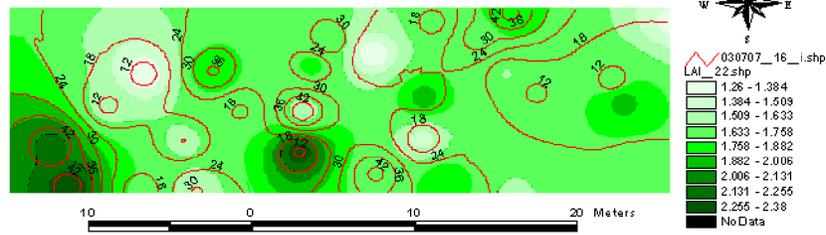
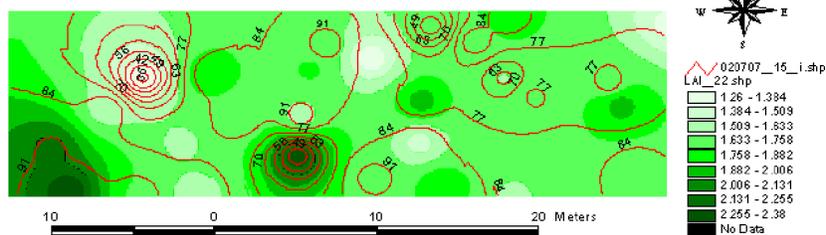
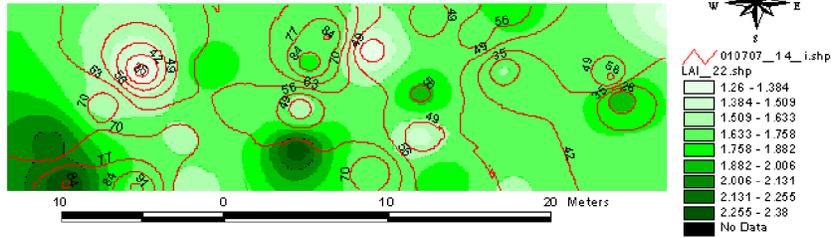
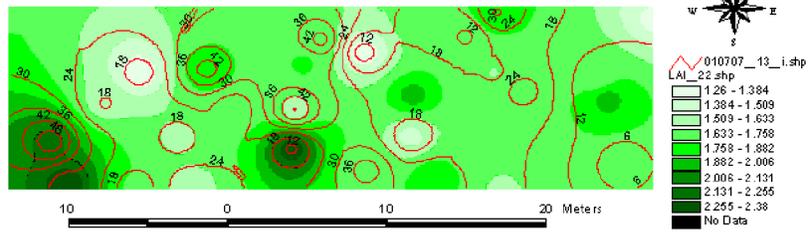


ANEXO III. Distribución espacial de la Intercepción y para el ecosistema con tres estratos de vegetación.

Figura 1. Distribución espacial de la intercepción (%) vs LAI para el ecosistema con tres estratos de vegetación

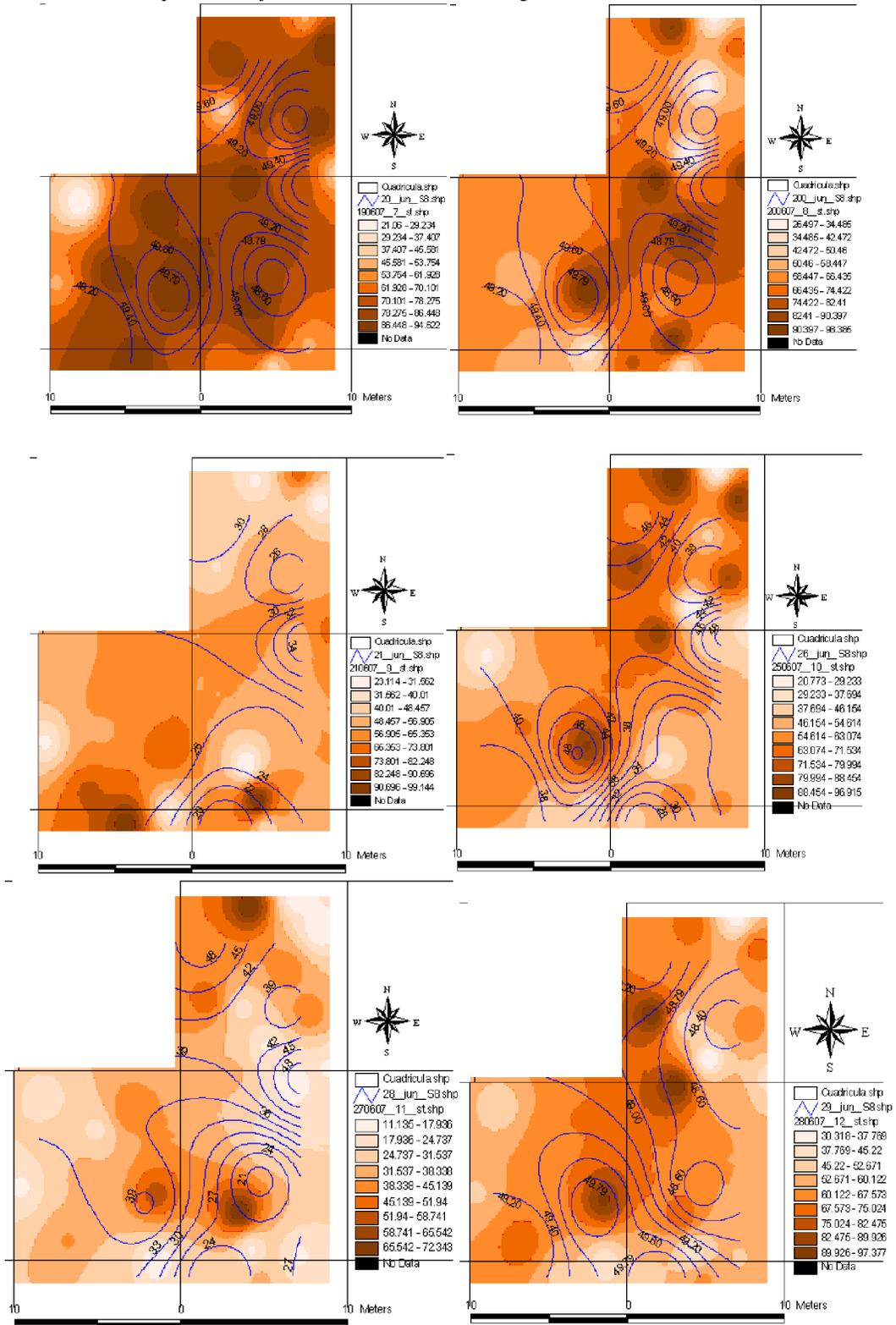


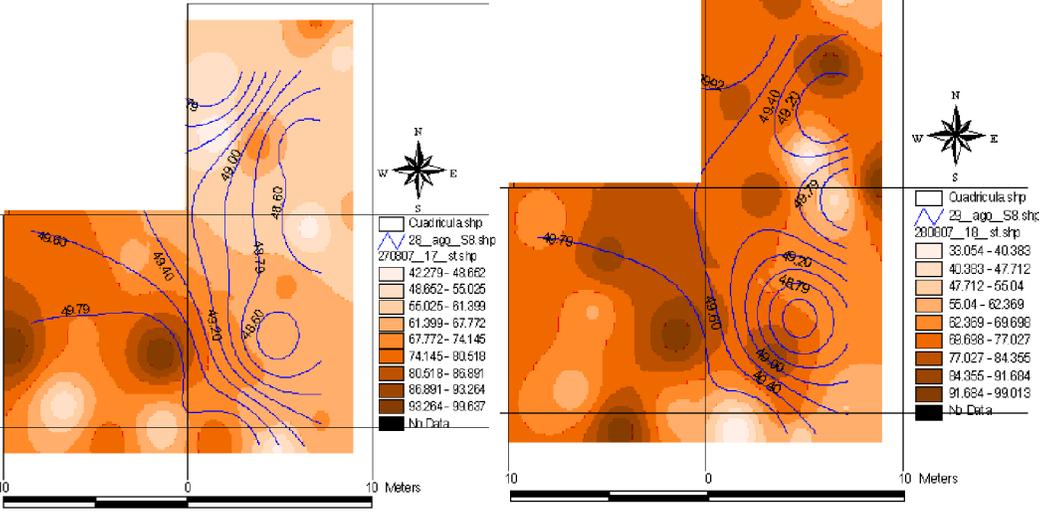
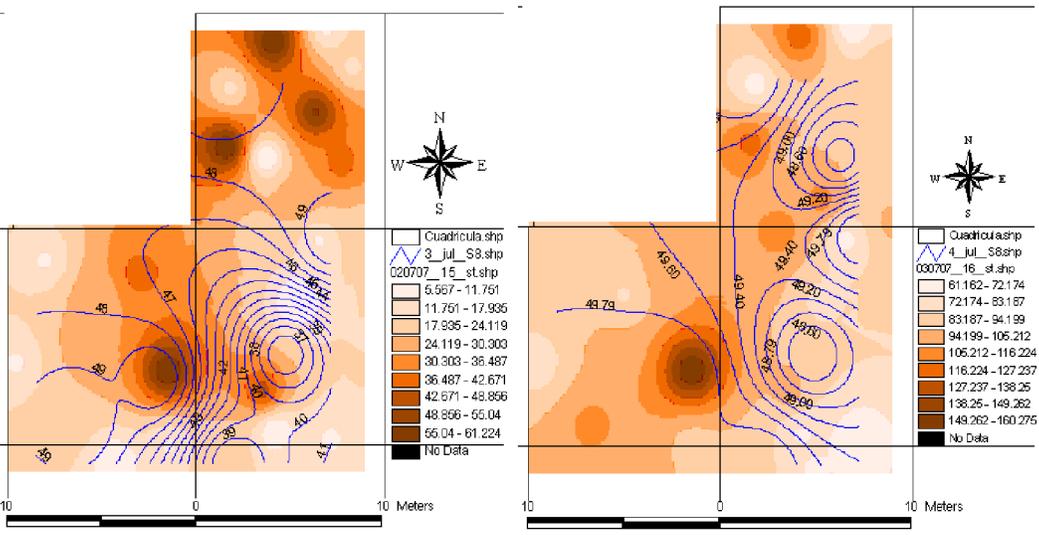
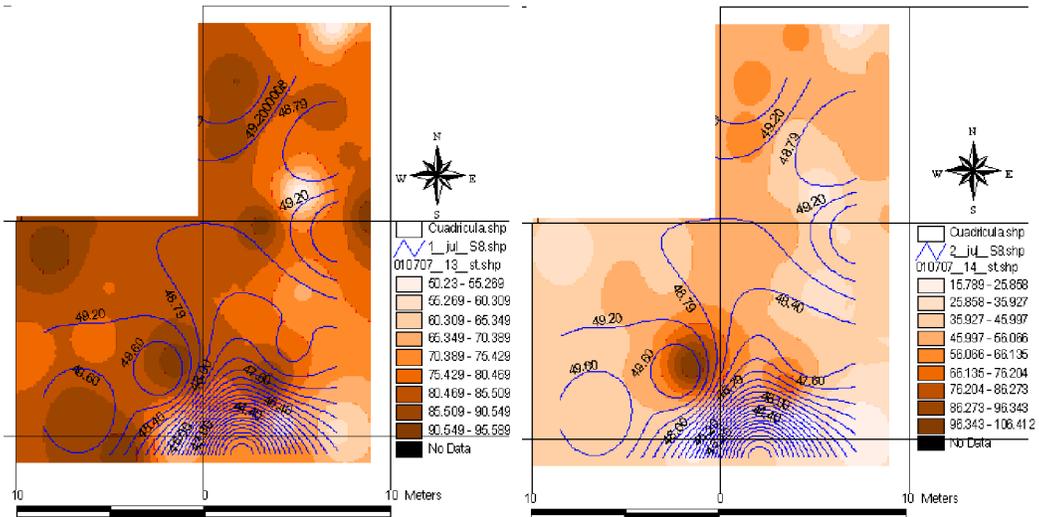




ANEXO IV. Distribución espacial del flujo de traslocación y la humedad del suelo en el ecosistema con dos estratos de vegetación

Figura 1. Distribución espacial del flujo de traslocación como % de la Pg vs humedad del suelo en % (Sesnores Water Mark)





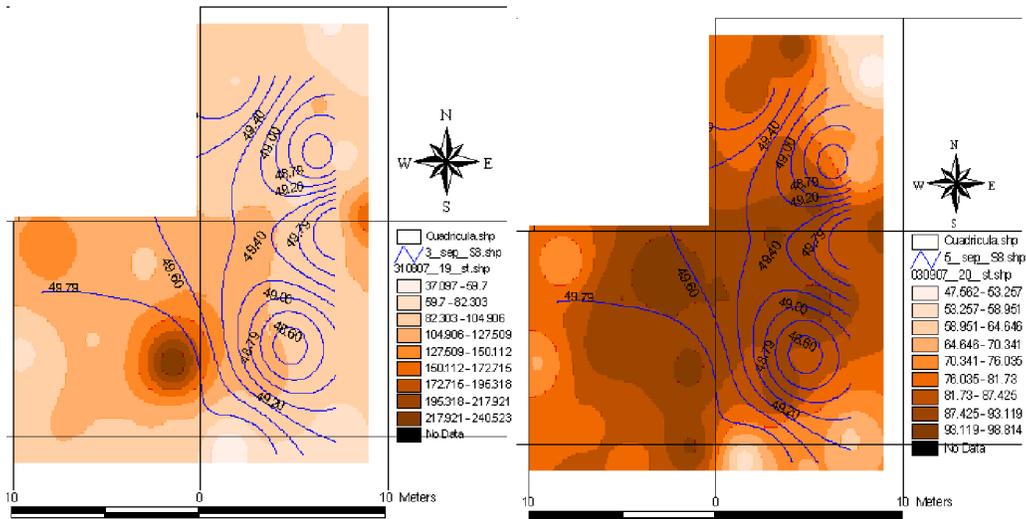
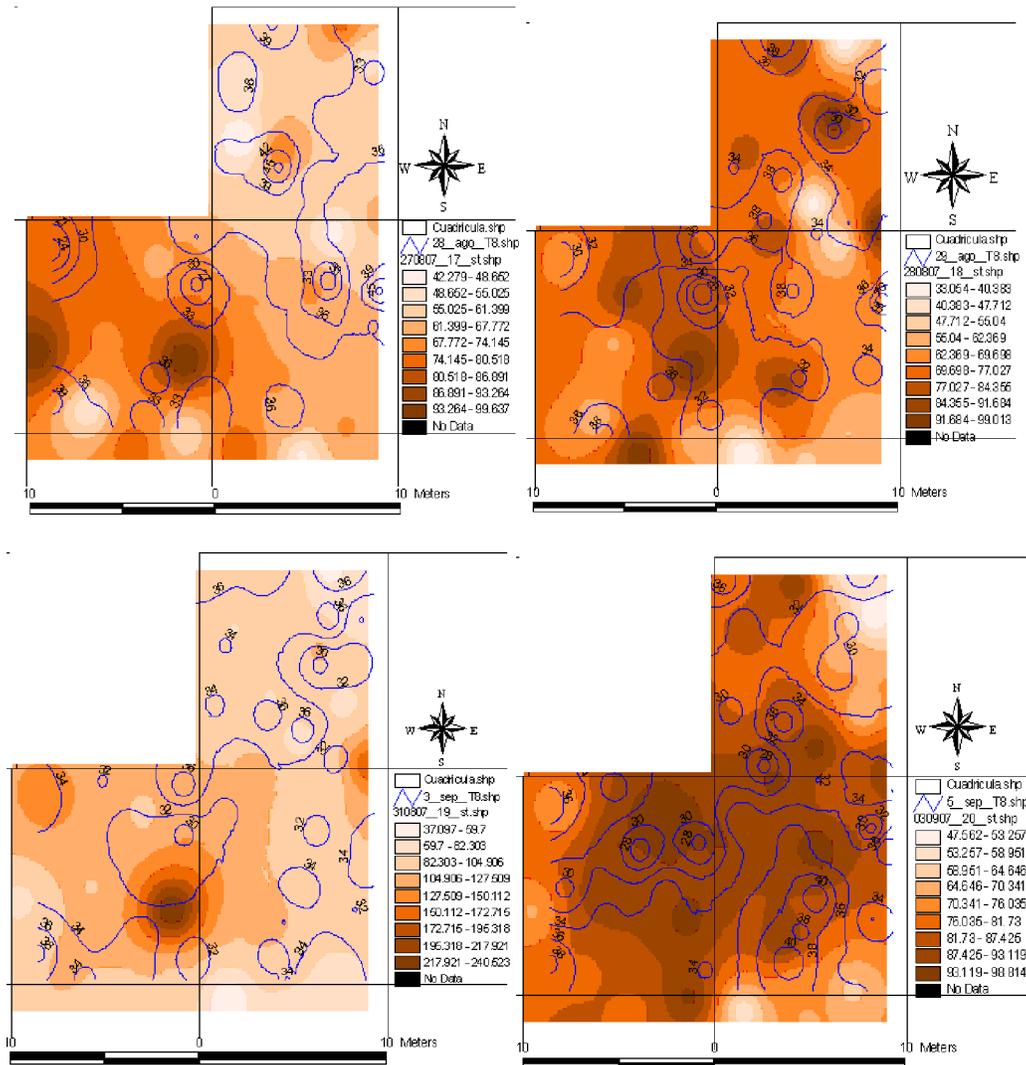
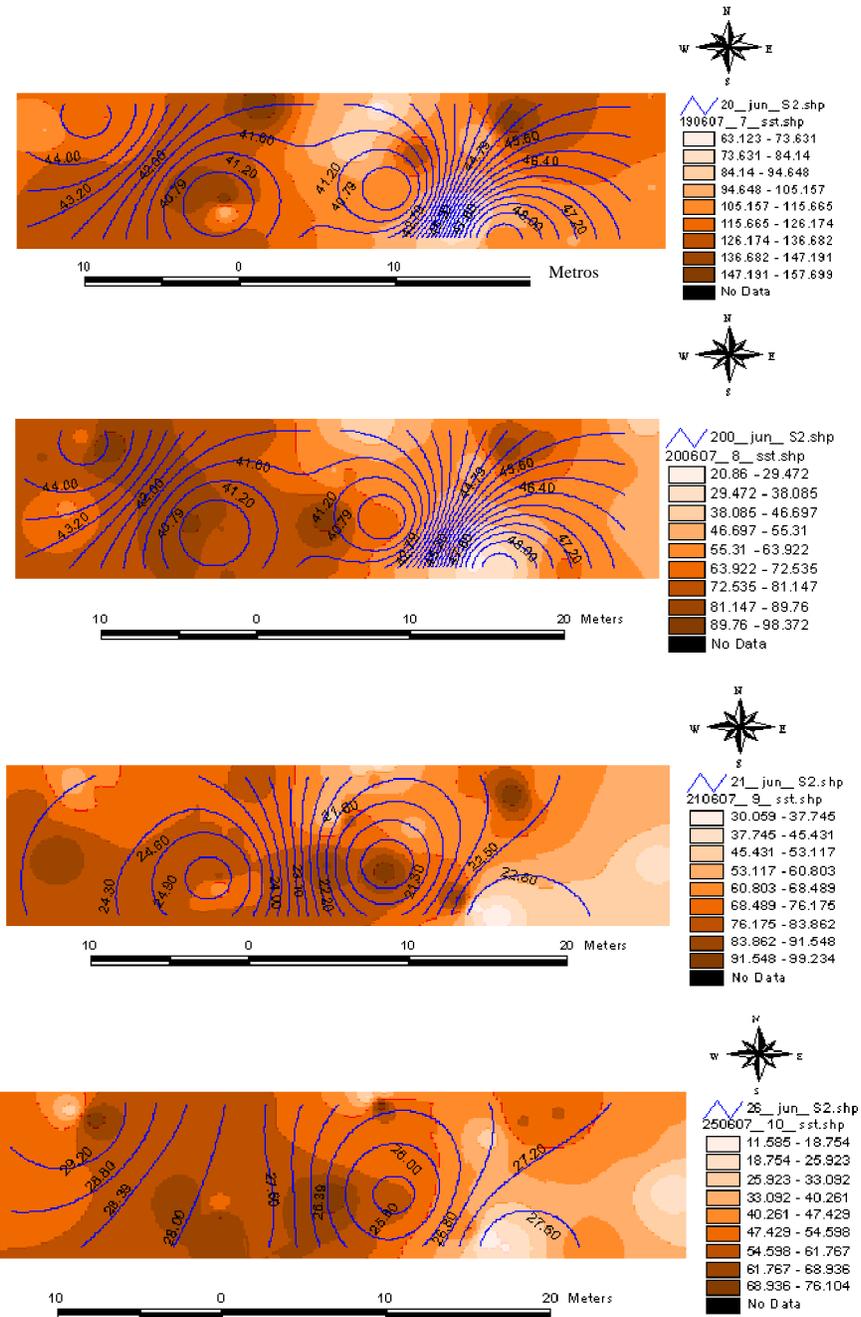


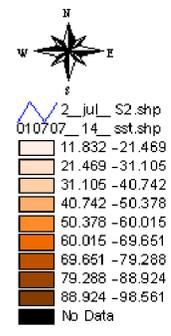
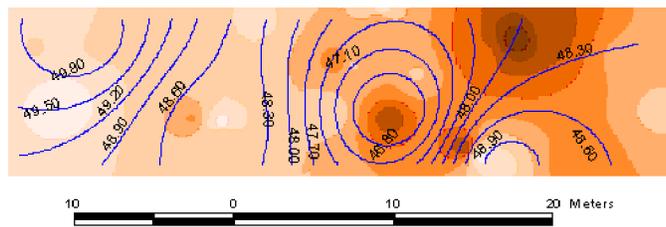
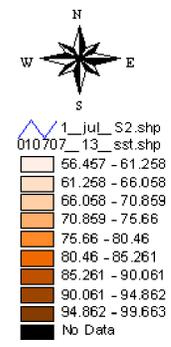
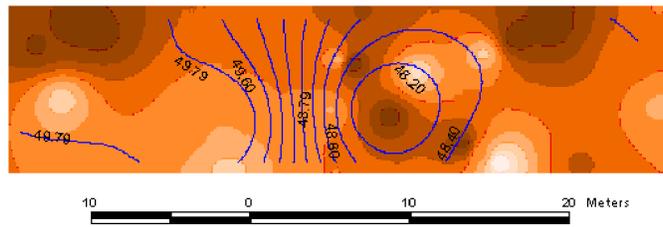
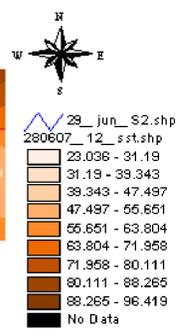
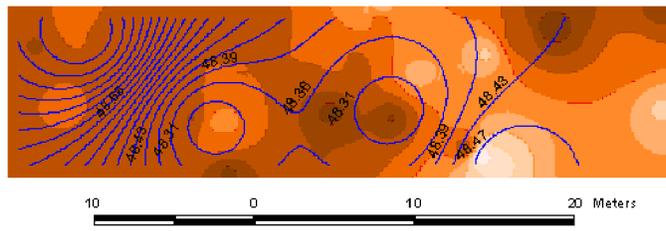
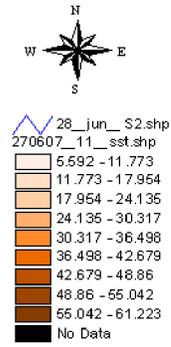
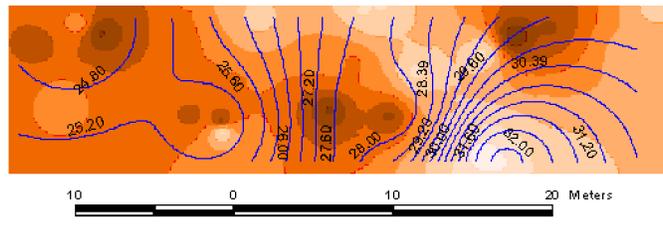
Figura 2. Distribución espacial del flujo de traslocación como % de la P_g y la humedad del suelo en % (TDR)

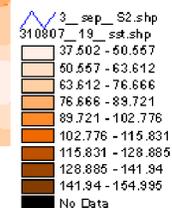
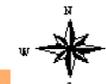
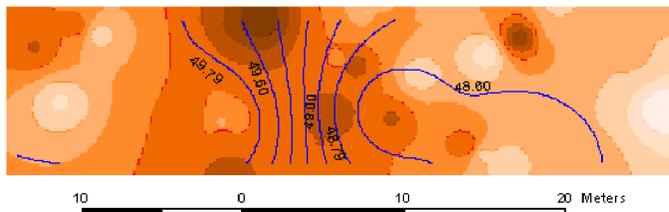
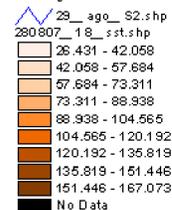
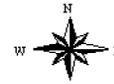
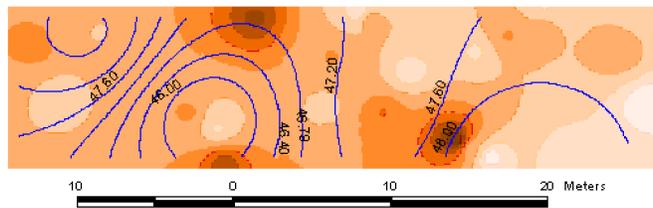
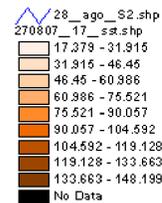
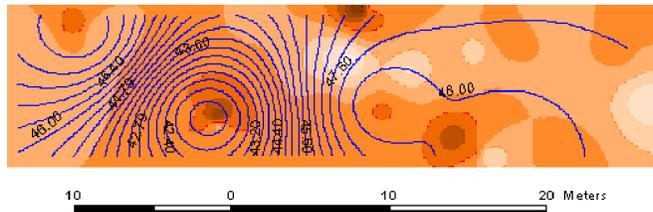
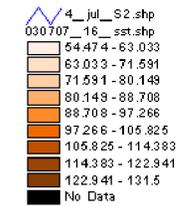
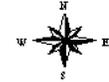
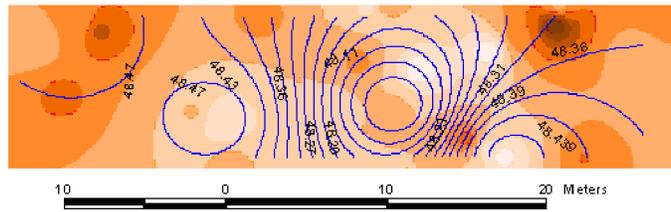
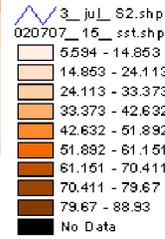
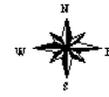
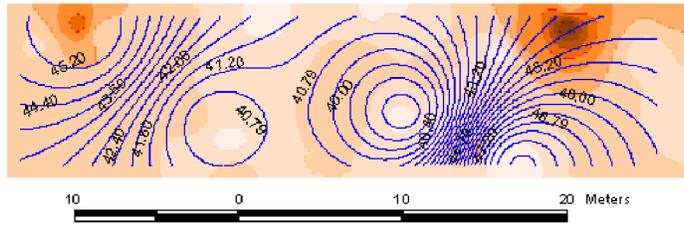


ANEXO V. Distribución espacial del flujo de traslocación y humedad del suelo en el ecosistema con tres estratos.

Figura 1. Distribución espacial del flujo de traslocación como % de la Pg y humedad del suelo en % (Sensores Water Mark)







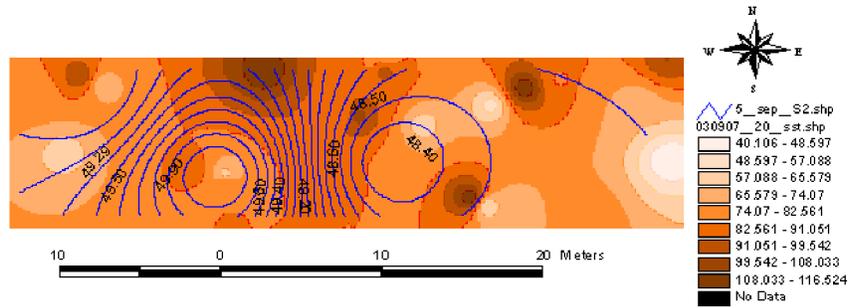
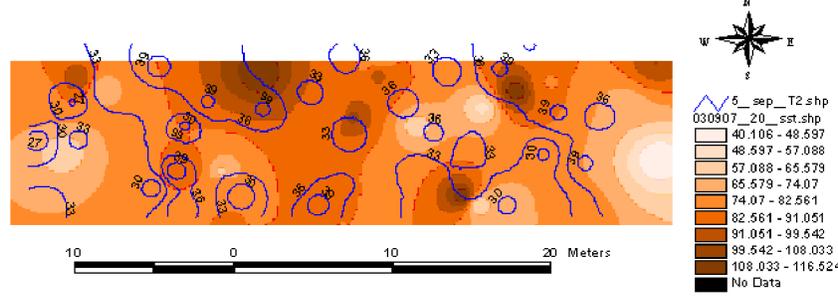
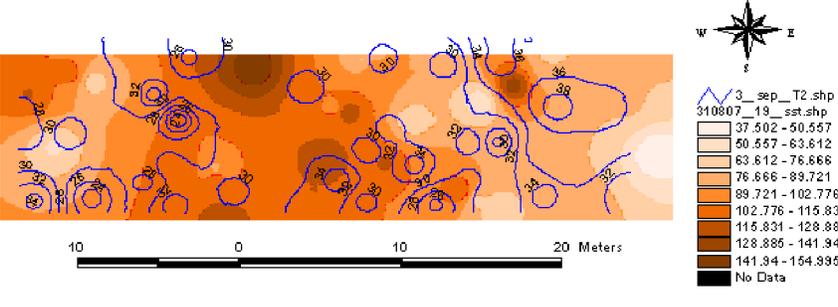
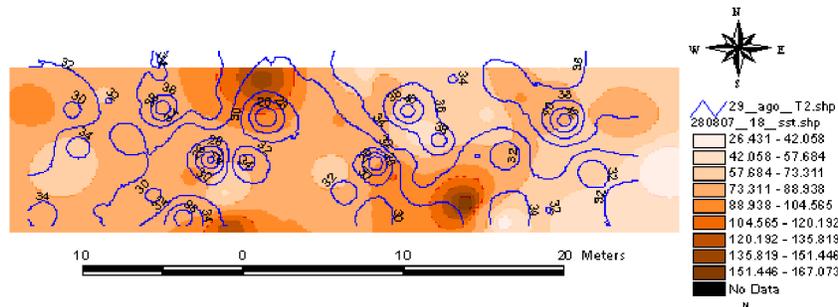
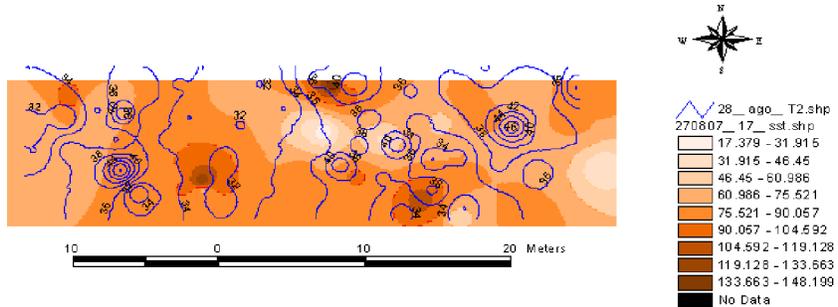


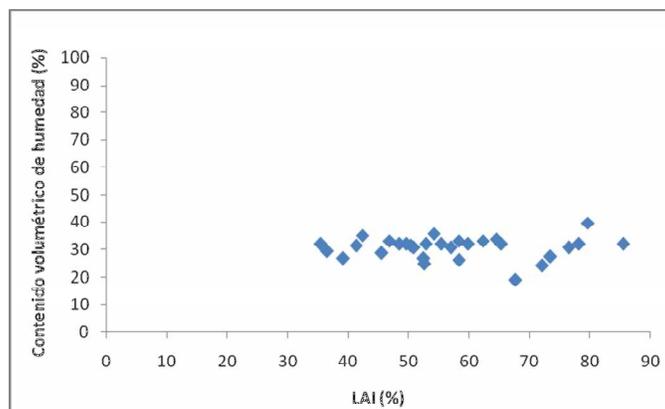
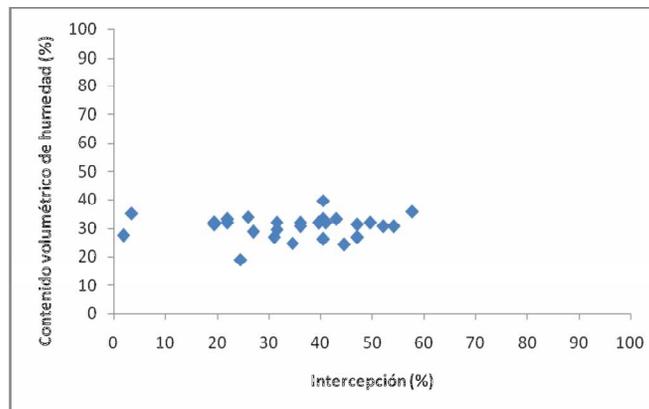
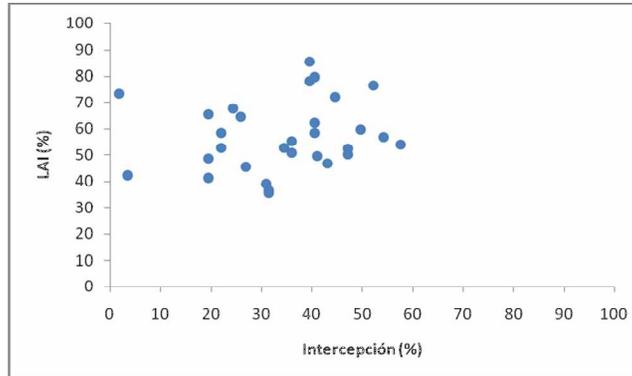
Figura 1. Distribución espacial del flujo de traslocación como % de la Pg y Humedad del suelo en % (TDR)



ANEXO VI. Relación de la intercepción contra LAI, contenido volumétrico de humedad y el contenido volumétrico de humedad en el suelo

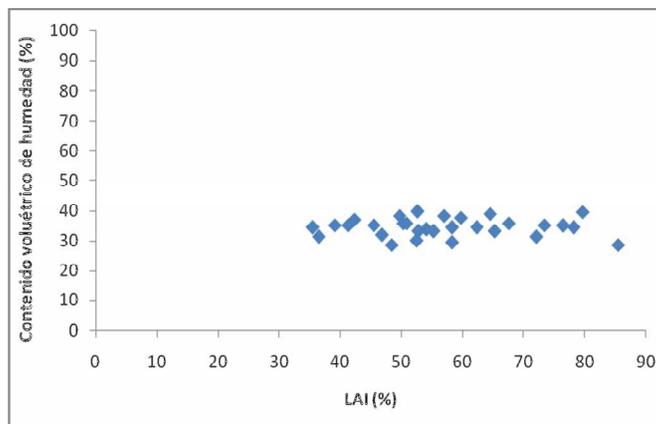
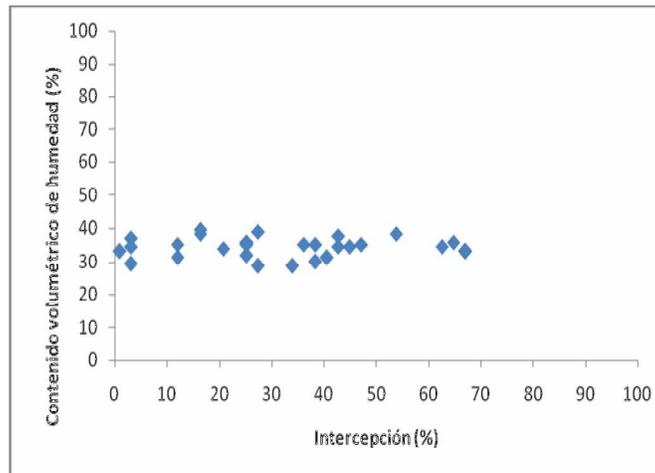
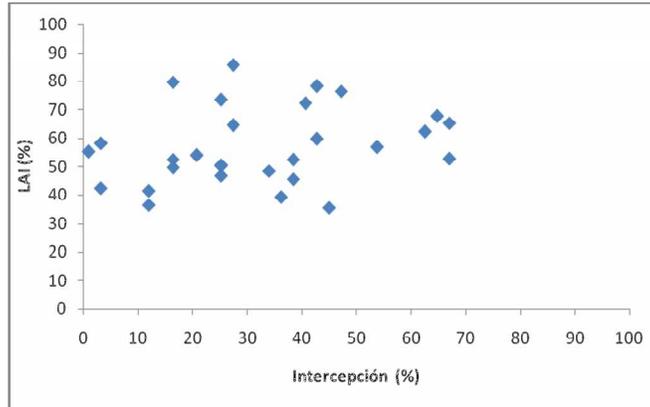
ANEXO 5. Ecosistema con dos estratos de vegetación

Precipitación de 18.8 mm



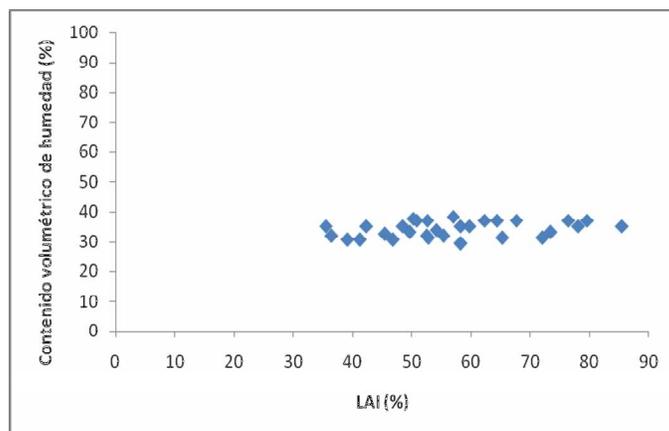
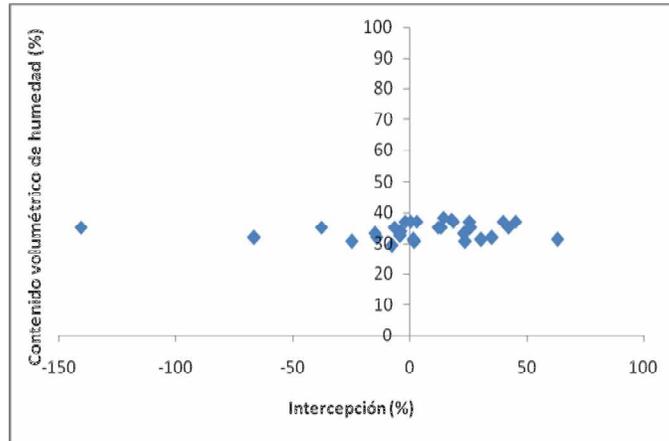
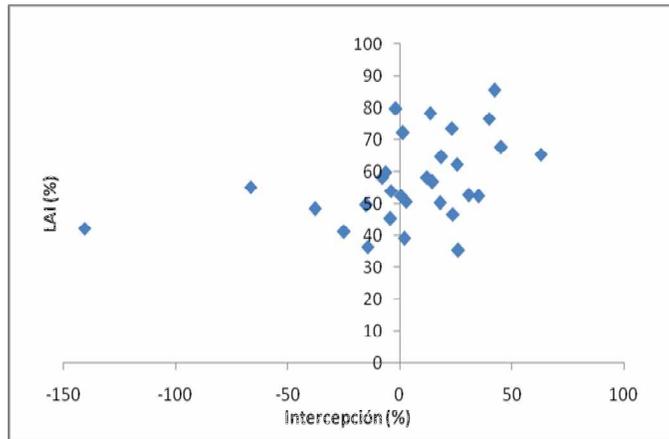
Ecosistema con dos estratos de vegetación

Precipitación de 4.3 mm



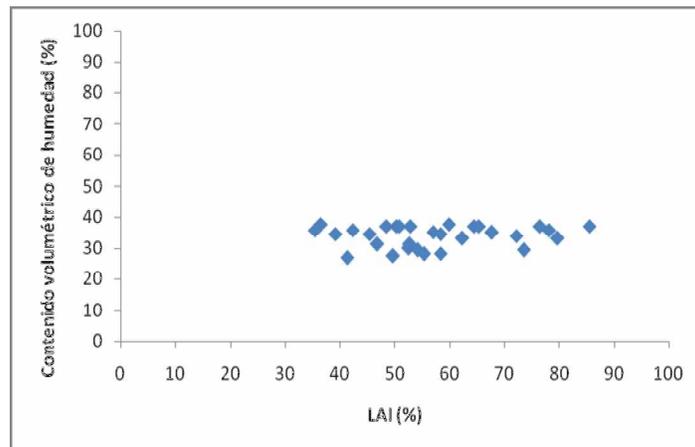
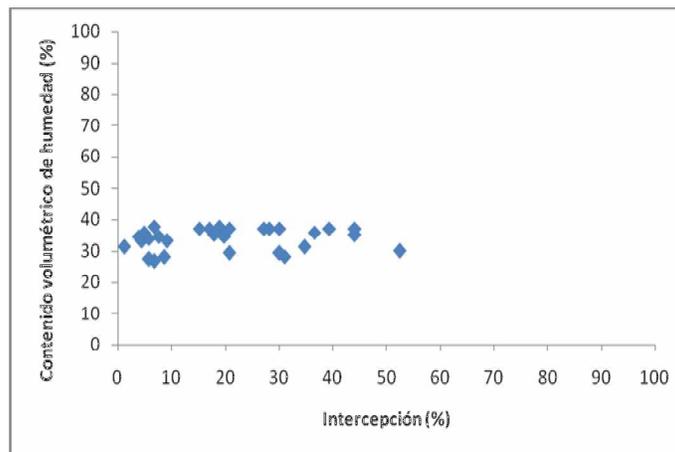
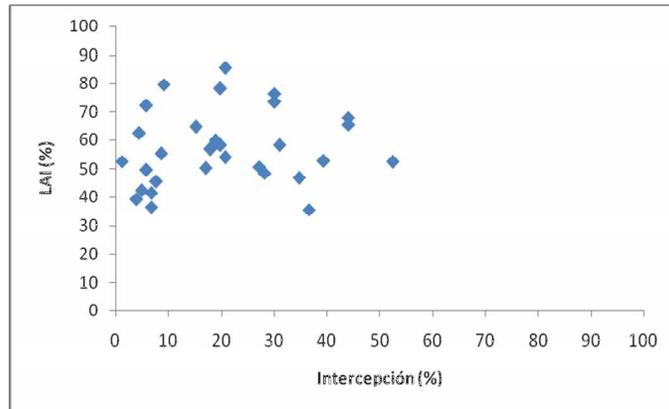
Ecosistema con dos estratos de vegetación

Precipitación de 40.9 mm



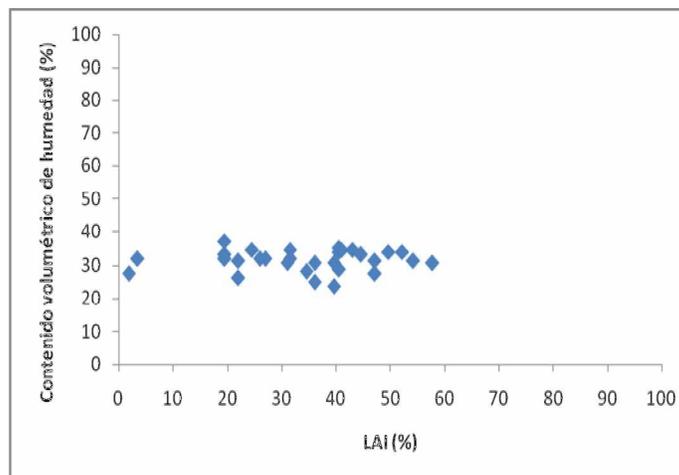
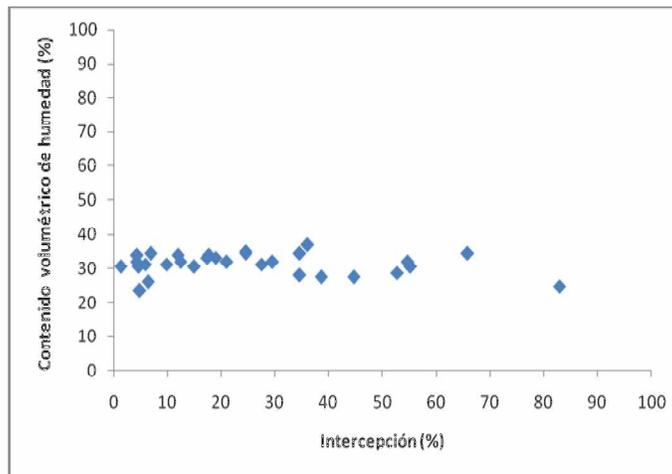
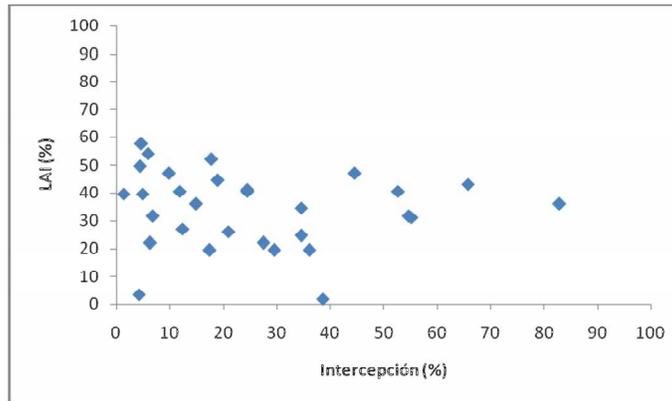
Ecosistema con dos estratos de vegetación

Precipitación de 20.3 mm



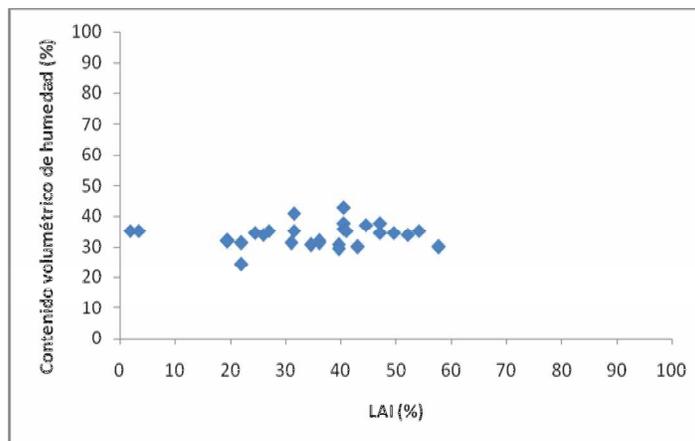
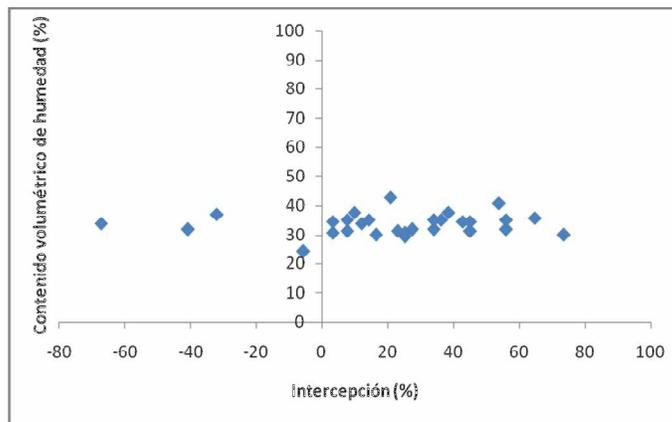
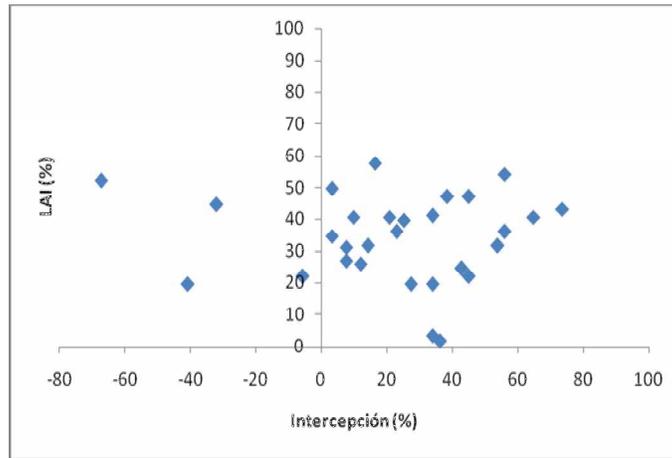
Ecosistema con tres estratos de vegetación

Precipitación de 18.8 mm



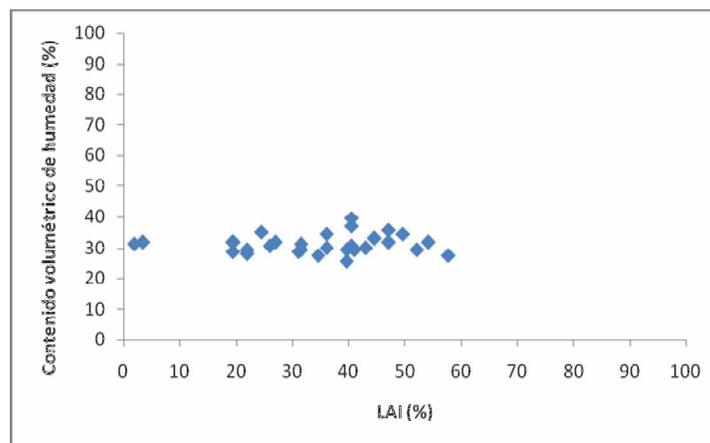
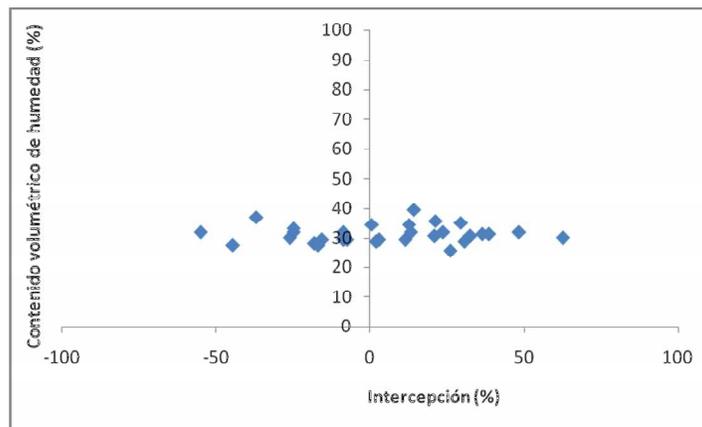
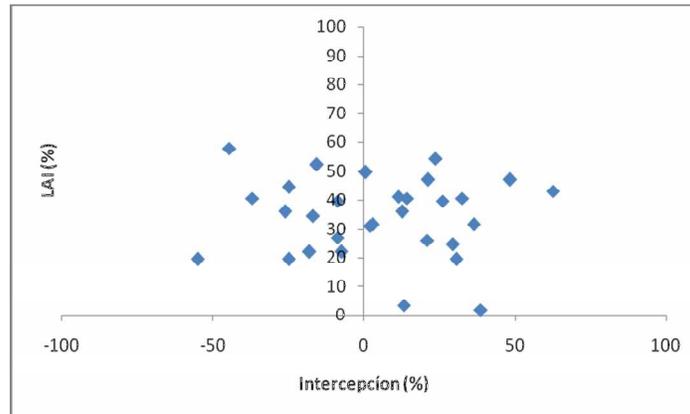
Ecosistema con tres estratos de vegetación

Precipitación de 4.3 mm



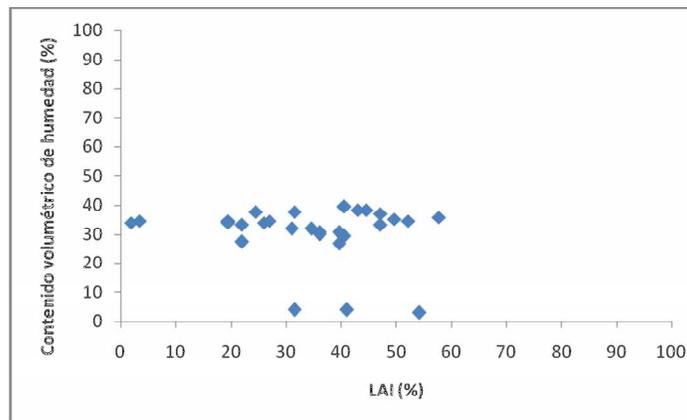
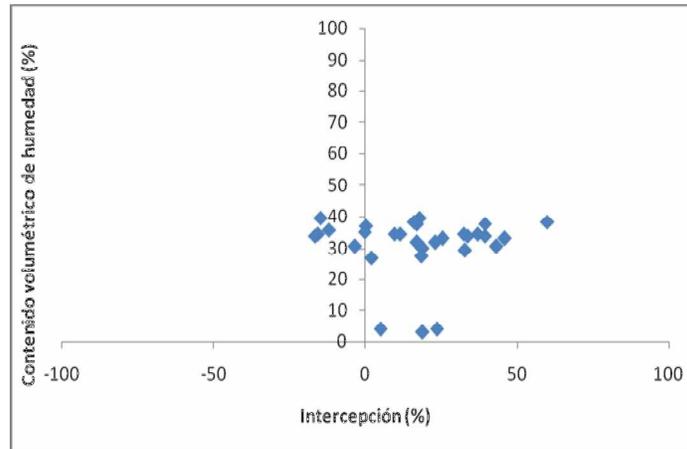
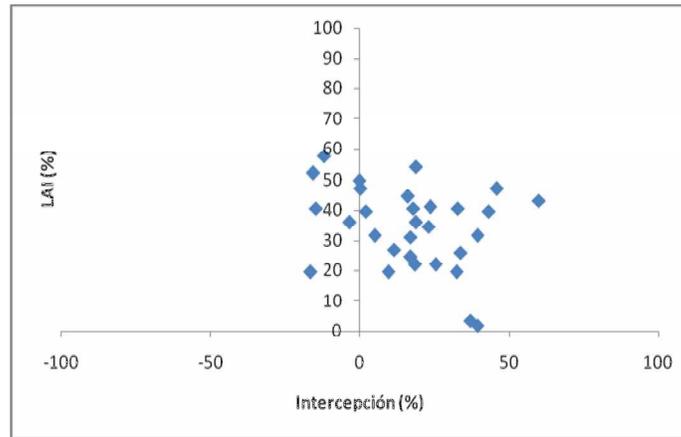
Ecosistema con tres estratos de vegetación

Precipitación de 40.9 mm



Ecosistema con tres estratos de vegetación

Precipitación de 20.3 mm



ANEXO VII. Calibración de los sensores Water Mark y el TDR (Reflectometría de Dominio Temporal).

Figura 1. Curva de Van Genuchten para los sensores de humedad Water Mark instrumentados en el suelo forestal del ecosistema con dos y tres estratos.

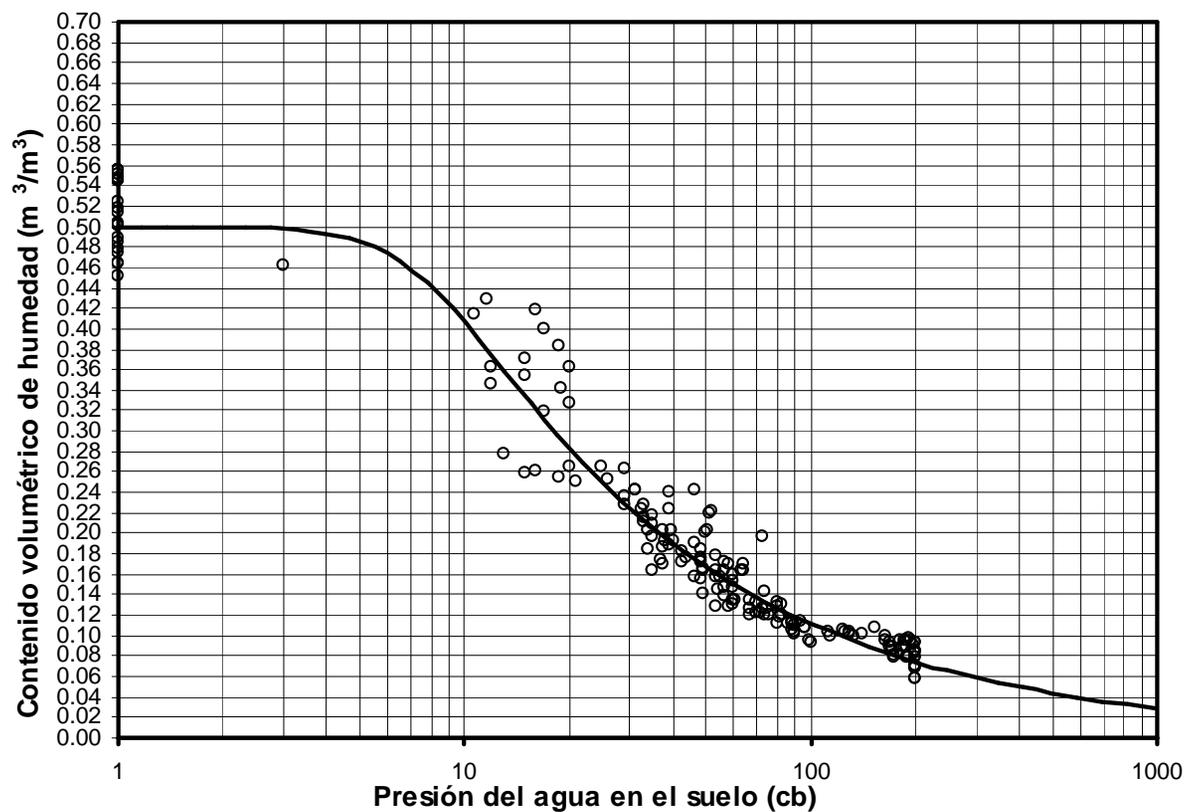


Figura 2. Calibración del TDR utilizado en la medición del contenido volumétrico de humedad en el suelo forestal del ecosistema con uno y dos estratos.

