



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Intercepción de precipitación en dos especies de ambiente
semidesértico: *Acacia farnesiana* y *Prosopis laevigata*

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS
(Recursos Hídricos y Ambiental)

Presenta

CARLOS ALBERTO MASTACHI LOZA

Dirigida por:

Dr. Enrique González Sosa

Santiago de Querétaro, Qro. Agosto 2007



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Intercepción de precipitación en dos especies de ambiente
semidesértico: *Acacia farnesiana* y *Prosopis laevigata*

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener grado de:

Maestro en ciencias
(Recursos Hídricos y Ambiental)

Presenta:

Carlos Alberto Mastachi Loza

Dirigido por:

Dr. Enrique González Sosa

SINODALES

Dr. Enrique González Sosa
Presidente

Dr. Carlos Díaz Delgado
Secretario

Dr. Eusebio Ventura Ramos
Vocal

Dr. Aurelio Guevara Escobar
Suplente

Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortazar
Suplente

Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Director de la Facultad

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval
Director de Investigación y Posgrado

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Centro Universitario
Querétaro. Qro.
Agosto 2007
México

RESUMEN

Las regiones y ambientes semiáridos frecuentemente son consideradas como marginales y son poco estudiadas a nivel nacional, no obstante que representan el 50% del territorio y que la fisonomía y composición de las áreas con vegetación tiene una influencia fundamental sobre el comportamiento hidrológico de los ecosistemas, esto es, los árboles establecen una eficiente conexión entre el suelo y la atmósfera (Wattenbach *et al.*, 2005). En México existen pocos estudios del papel de la vegetación de ambientes semiáridos acerca de la regulación de los procesos hidrológicos, principalmente los procesos relacionados con las pérdidas por intercepción (*EI*). El presente estudio se llevó a cabo en 2006 para tres sitios de la región semiárida del centro de México: El Carmen en el estado de Guanajuato y Amazcala y Cadereyta en el estado de Querétaro. Fueron seleccionados 6 árboles de dos especies dominantes *Prosopis laevigata* y *Acacia farnesiana*, dos por cada sitio y se utilizó una modificación de la metodología desarrollada por Guevara Escobar *et al.* (2006) para medir las pérdidas por intercepción, así mismo, se simuló *EI* con los modelos de Rutter *et al.* (1971) y Gash (1979). Al mismo tiempo fueron emplazadas estaciones climatológicas en cada sitio para medir las variables climáticas e instalados diversos sensores para monitorear los perfiles de humedad y temperatura en el suelo, cada 20 min. La vegetación fue caracterizada con transectos tipo Gentry para evaluar la cobertura vegetal. Los resultados indicaron que El Carmen cuenta con una cobertura de 150.20m²/100m², Amazcala con 129.88m²/100m² y Cadereyta con 90.4m²/100m², en este contexto los sitios fueron clasificados como: conservado (El Carmen) ecológicamente modificado (Cadereyta) y medianamente modificado (Amazcala). La precipitación en 2006 en El Carmen y Cadereyta fue de 781 y 746 mm, en tanto en Amazcala alcanzó los 457 mm durante el periodo agosto-noviembre. La intercepción durante el periodo de estudio en *Acacia farnesiana* resultó de 15.01%, 20.11% y 30.64% y para *Prosopis laevigata* de 27.04%, 21.51% y 14.42% para Cadereyta, Dolores y Amazcala, respectivamente. La observación y modelación de *EI* coincidieron con los valores reportados por Navar *et al.* (1999) para la región semiárida del norte del México.

Palabras clave: Pérdidas por intercepción, balance hídrico, ambientes semiáridos

SUMMARY

Semi-arid regions and environments are widely considered as marginal, although, in Mexico these areas represent over the 50% of the national territory they are scarcely studied. The composition and physiognomy of the areas covered with vegetation have a primary influence on the ecosystem's hydrologic behaviour this means that the trees have the ability to establish a very efficient network between soil and atmosphere (Wattenbach *et al.*, 2005). In Mexico, there are a few studies regarding the semi-arid vegetation role on the regulation of the hydrologic processes mainly those related with the portion of rainfall interception loss controlling the rainfall that moistens the surface elements, mainly vegetation (Brutsaert, 2005). This study was carried out on 2006 in three localities within the semiarid central region of México: El Carmen in Guanajuato state, and Amazcala and Cadereyta in Queretaro State. In total six trees were selected, two per locality and one individual from each species (*Prosopis laevigata* and *Acacia farnesiana*). The methodology developed by Guevara-Escovar *et al.* (2006) was used to measure the rainfall interception loss. A climate station was placed on each site as well, in order to measure the climate variables, soil humidity and temperature profiles were taken every 20 minutes while the rainfall was recorded every 10 minutes and vegetation was typified using Gentry's transects. The most vegetation-covered site was El Carmen (150.20 m²/100m²); Amazcala had a cover of 129.88 m²/100m² while in Cadereyta the vegetation covered 90.4m²/100m² Based on this data the sites were characterized as follows: El Carmen can be considered a closed site while Amazcala is described as semi-closed and Cadereyta as open environments. During 2006 the rainfall levels were 781mm in El Carmen, 746mm in Cadereyta and 457mm for Amazcala. Rainfall interception during the study period for *Acacia farnesiana* was 15.01%, 20.11% and 30.64 while *Prosopis laevigata* results were 27.04%, 21.51% and 14.42% for Cadereyta, El Carmen and Amazcala respectively. In summary, the interception loss values found in this study reinforce those for the Mexican semi-arid regions reported previously.

Key words: interception loss, water balance and semi-desert

A mi amiga, compañera y esposa
Rocio y a mi hija Kumari que son
mi motivo de existir.

A mis padres Martha y Carlos y
mi hermano Salvador por sus
consejos y apoyo brindado a lo
largo de mi vida.

A mis suegros Lupe y Cruz por
su confianza y darme la
oportunidad de formar parte de
su familia.

AGRADECIMIENTOS

A CONACyT por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría.

Al proyecto FOMIX-QRO (QRO-2004-CO1-17). Importancia de la vegetación del semidesierto queretano en la preservación y gestión de los recursos hídricos.

Al Dr. Enrique González Sosa por su valioso tiempo y asesoría acertada en la realización de esta tesis y su guía durante la maestría.

Al la señora Reina y don Pedro por su apoyo en la medición de intercepción de los árboles instrumentados en su propiedad, muchas gracias ya que sin ellos no hubiera sido posible el trabajo en Cadereyta.

Así mismo agradezco a la señora Virginia y don Jaime por permitirnos instrumentar los árboles en su predio, y es de admirar la visión y conocimiento que tienen de sus recursos naturales.

A los revisores de la tesis por su tiempo y conocimiento brindado.

A mi Abuelita y tía Armin que durante toda mi vida me han brindado su apoyo.

A tos mis familiares y amigos que aunque lejos siempre me han hecho saber que están dispuestos a echarme una mano.

A todos los compañeros del laboratorio de hidráulica que de una u otra forma colaboraron o participaron en la realización de esta investigación, hago extensivo mi más sincero agradecimiento.

ÍNDICE

	Página
Resumen	i
Summary	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Índice	v
Índice de tablas	viii
Índice de figuras	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
2. INTERCEPCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN POR LA VEGETACIÓN	
2.1. Introducción	4
2.2. Mecanismos del proceso de intercepción	4
2.3. Factores que intervienen en la intercepción	7
2.4. Métodos de cuantificación de la intercepción	8
2.5. Intercepción en árboles aislados	9
2.6. Intercepción en ambientes semiáridos	10
3.-OBJETIVOS E HIPÓTESIS	
3.1. Objetivos	12
3.2. Hipótesis	12
4. MODELOS DE INTERCEPCIÓN	
4.1. Introducción	13
4.2. Modelo de Rutter <i>et al.</i> (1971)	14

	Página
4.3. Modelos de Gash	15
4.3.1 Modelo de Gash (1979)	15
4.3.2 Modelo de Gash <i>et al.</i> (1995)	17
5. PÉRDIDAS POR INTERCEPCIÓN DE DOS ESPECIES EN EL SEMIDESIERTO DEL CENTRO DE MÉXICO	
5.1. Introducción	19
5.2. Áreas de estudio	21
5.2.1 Amazcala	23
5.2.2 Cadereyta	23
5.2.3 El Carmen	24
5.3. Caracterización de la vegetación	24
5.4. Hidroclimatología	25
5.4.1. Precipitación	25
5.4.2. Evapotranspiración	26
5.4.3. Intercepción	26
5.4.4. Variables complementarias	30
5.5. Análisis y modelación	31
6. RESULTADOS	
6.1. Vegetación	33
6.2. Climatología de los sitios experimentales (2006)	39
6.2.1. Precipitación (P_G)	39
6.2.2. Humedad relativa (Hr)	42
6.2.3. Temperatura ambiental (Ta)	44

	Página
6.2.4. Radiación neta (R_n)	46
6.3. Evaporación (E) (2006)	48
6.4. Pérdidas por intercepción (EI) observadas (2006)	50
6.5. Modelación de las pérdidas por intercepción	56
6.5.1 Modelo de Rutter <i>et al.</i> (1971)	56
6.5.2 Modelo de Gash (1979)	58
6.5.3 Modelo Lineal múltiple	60
6.5.4 Comparación de las pérdidas por intercepción	61
7. DISCUSIÓN	
7.1 Pros y contras de la metodología utilizada para cuantificar EI	70
7.2 Eficiencia de los modelos en el cálculo de EI	73
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
8.1 Conclusiones	76
8.2 Recomendaciones	78
BIBLIOGRAFÍA	79
SIMBOLOGÍA	84
ANEXO I Temperatura en el suelo	85
ANEXO II Flujo de calor en el suelo Humedad en el suelo	91
ANEXO III Humedad en el suelo	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1	Porcentaje de pérdidas por intercepción para árboles individuales (1) y distintas coberturas vegetales (2) (el porcentaje faltante es lo que se atribuye a $P_n = Th + Fd + Sf$).	6
2	Resumen de algunos estudios realizados en ambientes semiáridos en México, metodología y resultados.	11
3	Ecuaciones de los modelos de Gash 1979 y Gash <i>et al.</i> , 1995.	18
4	Características de los árboles instrumentados y área de captación de $Th + Df$.	27
5	Especies de Valor de Importancia para los sitios de muestreo	35
6	Repartición de P_G por individuo y por evento en el proceso de intercepción.	52
7	Valores promedio de las condiciones climáticas; intensidades máximas por evento medidas durante el proceso de intercepción.	54
8	Parámetros para los modelos de Gash y Rutter aplicados para cada uno de los árboles en estudio.	56
9	Valores de EI observados y obtenidos mediante el modelo de Rutter para <i>Acacia farnesiana</i> y <i>Prosopis laevigata</i> en cada evento de precipitación registrado en los sitios instrumentados.	57
10	Valores de EI observados y obtenidos por el modelo de Gash para <i>A. farnesiana</i> y <i>P. laevigata</i> en cada evento registrado en los sitios instrumentados.	59
11	Ecuaciones del modelo lineal múltiple por árbol instrumentado y su coeficiente de correlación.	60
12	Valores de EI observados y obtenidos por el modelo lineal múltiple para <i>A. farnesiana</i> y <i>P. laevigata</i> por evento de precipitación.	61
13	Eficiencia (E), Sesgo (B) y Raíz del error cuadrático medio ($RMSE$) para los modelos de Rutter, Gash y Lineal múltiple.	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	El Ciclo hidrológico simplificado: precipitación (P_G), evaporación (E), transpiración (T), escurrimiento (R) intercepción (EI), infiltración (I) y almacenamiento (S) en donde la ecuación de balance de masa es: $dS/dt = (P_G) - (I/D + E + EI + T + R)$.	1
2	Proceso de intercepción: precipitación total (P_G), precipitación neta (P_n), percolación (Th o Thf), drenado foliar (Fd o Thr), flujo cortical (Sf), almacenamiento de la copa (S), transpiración (T), evaporación (E) y pérdidas por intercepción (EI).	5
3	Mapa de uso actual del suelo, resumido por Oropeza <i>et al.</i> (1992) modificado por Villers. R. y Trejo. V. (1997).	19
4	Mapa de localización de las 3 microcuencas seleccionadas para el estudio (Coordenadas en UTM).	22
5	Vista de: (a) Estación meteorológica Vaisala WXT510 y (b) Datalogger CR1000 de Campbell scientific.	26
6	Fotografía de ET gauge de Spectrum Technologies.	26
7	Vista en planta de la cobertura y áreas de captación para cada uno de los seis árboles instrumentados.	28
8	Recipiente de almacenamiento (a) de la lluvia captada por láminas de policarbonato(b) con pendientes para dirigir el flujo hacia una canaleta de PVC (derecha).	27
9	Estructura de madera donde se aprecian las láminas verticales para evitar entradas laterales y las horizontales para la captación de la precipitación neta.	29
10	Esquema (a) flujo cortical, (b) manguera y (c) garrafón.	29
11	Vista de: (a) EnviroSMART de Zen tek, (b) Termocople105T-L, (c) NR-LITE-L y (d) fluxómetro de calor tipo HFP01SC.	30
12	Cobertura vegetal (m^2) de los tres sitios de estudio.	36

Figura		Pagina
13	Esquema de distribución de la cobertura de <i>Prosopis laevigata</i> y <i>Acacia farnesiana</i> . a) El Carmen, b) Amazcala y c) Cadereyta.	37
14	Estratificación de la vegetación en los 3 sitios de estudio.	38
15	Pluviogramas para los tres sitios experimentales durante el 2006. En el recuadro se observa el período de estudio en que se midió la intercepción.	41
16	Comportamiento diario de la humedad durante el período de estudio de la intercepción, para los tres sitios experimentales (232, 233 y 234 DOY).	42
17	Humedad relativa para los tres sitios experimentales durante el 2006. En un recuadro se observa el período de estudio en que se midió la intercepción y los valores nulos en los que no se registro la humedad.	43
18	Comportamiento diario de la temperatura durante el período de estudio de la intercepción para los tres sitios experimentales (232, 233 y 234 DOY).	44
19	Temperatura para los tres sitios experimentales durante el 2006. El recuadro muestra el período de estudio en el que se midió la intercepcion y en ceros los períodos en los que no se registró la humedad.	45
20	Comportamiento diario de la radiación neta durante el período de estudio de la intercepción para los tres sitios experimentales (233 y 234 DOY).	46
21	Radiación neta para los tres sitios experimentales durante el 2006. En el recuadro negro se observa el período de estudio en que se midió la intercepción y en ceros los períodos en los que no se registro la radiación neta.	47
22	Evapotranspiración diaria para los tres sitios experimentales durante el 2006, calculada con la Ecuación de Penman-Monteith y la registrada con ET gauge.	49

Figura		Pagina
23	Porcentajes de <i>EI</i> , <i>Sf</i> y (<i>Th+Fd</i>) observados para <i>A. farnesiana</i> y <i>P. laevigata</i> durante los períodos de estudio en cada sitio experimental.	53
24	Regresión lineal entre <i>EI</i> y <i>P_G</i> para cada uno de los árboles instrumentados.	55
25	Comparación de <i>EI</i> entre lo observado y lo modelado en El Carmen, (a) <i>Prosopis laevigata</i> y (b) <i>Acacia farnesiana</i> .	62
26	Comparación de <i>EI</i> entre lo observado y lo modelado en Cadereyta, (a) <i>Prosopis laevigata</i> y (b) <i>Acacia farnesiana</i> .	63
27	Comparación de <i>EI</i> entre lo observado y lo modelado en Amazcala, (a) <i>Prosopis laevigata</i> y (b) <i>Acacia farnesiana</i> .	64
28	Comparación de los totales de <i>EI</i> observado y modelado para <i>A. farnesiana</i> de cada sitio experimental.	65
29	Comparación de los totales de <i>EI</i> observado y modelado para <i>P. laevigata</i> de cada sitio experimental.	65
30	Pérdidas por intercepción Observadas contra obtenidas por el modelo de Gash.	67
31	Pérdidas por intercepción Observadas contra obtenidas por el modelo de Rutter.	68
32	Pérdidas por intercepción Observadas contra obtenidas por el modelo Lineal.	69

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el Inventario Forestal Nacional México es un país con gran diversidad de paisajes y formas de vegetación donde los tipos dominantes son el matorral xerófilo, la selva caducifolia y subcaducifolia, el bosque de coníferas y latifoliadas, la selva perennifolia y subperennifolia, pastizal, mezquital y bosque mesófilo de montaña (IFN, 2000). Las regiones semiáridas y áridas cubren el 48.29% del territorio nacional, de las cuales el matorral cubre el 60 % de dichas regiones (COTECOCA, 1994).

Habitualmente a nivel nacional las comunidades vegetales de las regiones semiáridas son consideradas como marginales y en consecuencia poco estudiadas en términos hidrológicos. Actualmente en nuestro país existen pocas investigaciones que expliquen el papel de la vegetación, su importancia en la regulación de los procesos de superficie y su importancia en el ciclo hidrológico.

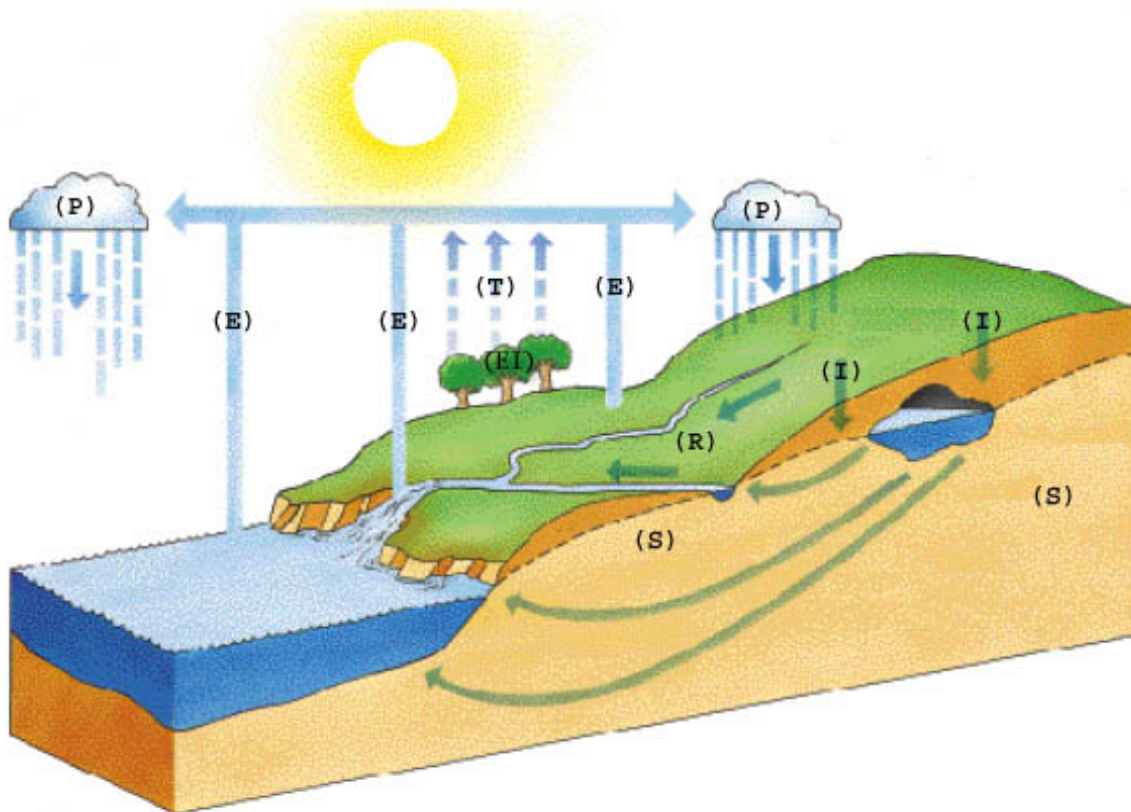


Figura 1. El Ciclo hidrológico simplificado: precipitación (P_G), evaporación (E), transpiración (T), escurrimiento (R) interceptación (EI), infiltración (I) y almacenamiento (S) en donde la ecuación de balance de masa es: $dS/dt = (P_G) - (I/D + E + EI + T + R)$.

El ciclo hidrológico es un fenómeno que relaciona la distribución de los componentes que intervienen en el balance hídrico de un ecosistema o bien de una cuenca hidrológica, tales como: *precipitación, evaporación total, escurrimiento superficial y subsuperficial y/o infiltración o precolación profunda*, (Figura 1) **(Brutsaert, 2005; Singh y Singh, 2001)**. La evaporación total en un ecosistema o cuenca la integran la evaporación del suelo, la evaporación de los cuerpos de agua, la evaporación por transpiración de la vegetación y la evaporación de la precipitación retenida por la cobertura vegetal, proceso ampliamente conocido como pérdidas por intercepción **(Groen y Hubert, 2006)**.

Las pérdidas por intercepción pueden definirse como el flujo de vapor que se retroalimenta de la humedad engendrada por las precipitaciones antes de que se origine escurrimiento superficial o infiltración. Esta definición incluye la evaporación conjunta de la precipitación que humedece todos los estratos vegetales de un ecosistema (arbóreo, arbustivo, herbáceo y hojarasca) incluyendo la capa superficial del suelo **(Groen y Hubert, 2006)**.

El proceso de intercepción ha sido ampliamente estudiado desde el punto de vista de su uniformidad horizontal en bosques abiertos y cerrados de climas templados y tropicales **(Price et al., 1997; Burghouts et al., 1998; Lin et al., 2000; Rodrigo y Àvila, 2001; Price y Carlyle-Moses, 2003; David et al., 2006)**. Sin embargo, poco conocimiento se tiene de las pérdidas por intercepción en sabanas, semidesiertos, ecotonos y árboles aislados, donde la interacción entre árboles difiere de la que representa en bosque y modifica la distribución espacial de la intercepción.

A partir de la cuantificación directa de la intercepción se han desarrollado diversos modelos de intercepción **(Horton, 1919; Rutter et al., 1971; Gash, 1979; Gash et al., 1995; Liu, 1997; Carlyle-Moses y Price, 1999; Hashino et al., 2002)**, sin embargo ninguno se ha desarrollado para ambientes semiáridos, solo algunos de los ya existentes han sido aplicados en este tipo de ambientes **(Navar y Bryan 1994; Navar et al., 1999a)**.

Es inminente la falta de estudios de intercepción en ambientes semiáridos en el mundo y por ende en México, ya que en el país estos representan una gran extensión del territorio nacional, siendo indispensable estudios para las especies dominantes y de forma aislada, debido a que es la forma en la cual se presenta la vegetación de dichos ambientes formando

por las “denominadas islas de fertilidad”, del mismo modo, es necesario determinar si los modelos de intercepción existentes son aplicables para ambientes semiáridos y si estos necesitan ser calibrados, o en dado caso desarrollar modelos específicos que expliquen el comportamiento de la intercepción de la precipitación para un mayor entendimiento del ciclo hidrológico en este tipo de ecosistemas.

2. INTERCEPCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN POR LA VEGETACIÓN

2.1. Introducción

La fisonomía y composición de especies en áreas con vegetación tiene una influencia fundamental sobre el comportamiento hidrológico de los ecosistemas, la principal razón de esto es que los árboles establecen una eficiente conexión entre el suelo y la atmósfera (**Wattenbach et al., 2005**). Uno de los principales procesos que se da en esta conexión es la intercepción, la cual se define como la parte de la precipitación que humedece diferentes elementos de superficie, principalmente la vegetación. (**Brutsaert, 2005**).

El entendimiento de los mecanismos y la magnitud de la intercepción es de gran importancia para el manejo de los recursos hídricos en los ecosistemas debido a que la lluvia no interceptada, es redistribuida por las plantas influyendo en diversos procesos tales como la infiltración (**Roberts, 1999; Abrahams et al., 2003**), erosión (**Bui y Box, 1992; González et al., 1997**), lixiviación de sustancias en las plantas (**Ellsbury et al., 1996**), balance de agua y energía (**Kahan et al., 2006**) y química del suelo (**Chang y Matzner, 2000; Moreno y Gallardo, 2002**).

2.2. Mecanismos del proceso de intercepción

Durante un evento de lluvia la precipitación puede caer directamente sobre el suelo sin tocar ningún tipo de vegetación llamándose precipitación total (P_G) o tocar la superficie vegetal y llegar al suelo como precipitación neta (P_n) (**Lankreijer et al., 1993**) Es en el momento en que la lluvia toca la vegetación e inicia el proceso de intercepción (**Horton, 1919**), cuando el agua se distribuye en formas diversas (Figura 2).

Una de estas formas es conocida como Percolación y se define como la parte de P_G que drena o pasa a través de la copa de la planta. **Chang (2003), Dunkerley (2000) y Abrahams et al. (2003)** refieren que hay dos formas de percolación: Libre (Thf), la cual pasa por la planta sin tocar ninguna parte de la superficie vegetal y Liberada (Thr), que toca ramas y hojas drenando a través de ellas; otros investigadores han denominado a estos mecanismos como Percolación (Th) y Drenaje Foliar (Fd) respectivamente (**Iida et al.,**

2005). Esta última definición será utilizada en este trabajo. Otra de las formas de distribución que toma el agua, es el Flujo Cortical (S_f), el cual se define como la porción de P_n drenada a través de las ramas y fuste hasta llegar al suelo (Chang, 2003).

Una vez iniciado el evento de lluvia, el agua vía S_f y F_d no cae inmediatamente, sino que se queda almacenada en las hojas y ramas que pueden retener el agua en contra de la gravedad, hasta saturarlas y comenzar a drenar, momento en que se alcanza la capacidad de almacenamiento de la copa S (Horton, 1919; Huang *et al.*, 2005). El cambio de almacenamiento respecto al tiempo puede ser dividido en tres fases: 1) Mojado, comprende desde el inicio de la tormenta hasta que se satura el dosel, 2) Saturación, momento en que la copa esta completamente mojada y 3) Secado, a partir de que termina la tormenta (Gash, 1979; Lankkreijer *et al.*, 1993; Zeng *et al.*, 2000).

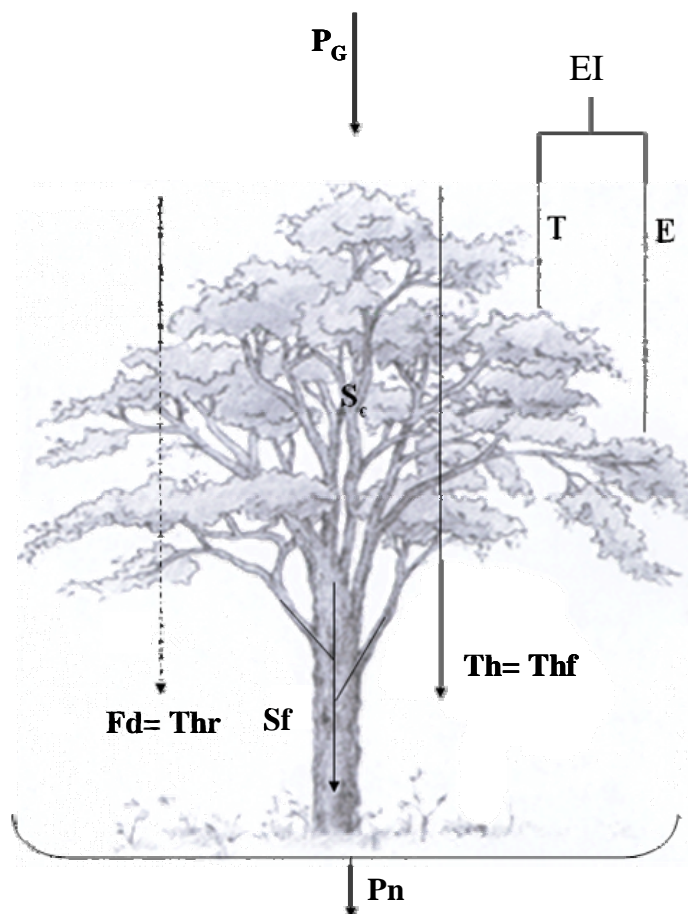


Figura 2. Proceso de interceptación: precipitación total (P_G), precipitación neta (P_n), percolación (Th o Thf), drenado foliar (F_d o Thr), flujo cortical (S_f), almacenamiento de la copa (S), transpiración (T), evaporación (E) y pérdidas por interceptación (EI).

La porción de P_G que nunca cae al suelo se reintegra a la atmósfera debido a la evaporación (E) del agua en la cubierta vegetal durante las tres fases indicadas anteriormente, a este proceso se le denomina Pérdidas por Intercepción (EI) (Horton, 1919; Rutter *et al.*, 1971).

En términos generales P_n representa del 70% al 90% de P_G , la parte restante del 10% y 30% se atribuye a EI (Freedman y Prager, 1986; Carlyle-Moses y Price, 1999; Xiao *et al.*, 2000; Muoghalu y Oakhumen, 2000; Kuraji *et al.*, 2001; Iroumé y Huber, 2002), sin embargo, existen investigaciones donde se reportan porcentajes de EI mucho mayores (Owens *et al.*, 2006; Guevara-Escobar *et al.*, 2007). Del total de P_G , S_f representa del 5 al 10% dependiendo de la especie. (Llorens *et al.*, 1997; Price *et al.*, 1997). Las variaciones de EI para diferentes especies de acuerdo al tipo de cobertura, se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Porcentaje de pérdidas por intercepción para árboles individuales (1) y distintas coberturas vegetales (2) (el porcentaje faltante es lo que se atribuye a $P_n = Th + Fd + Sf$).

Tipo de cobertura	Pérdidas por intercepción (%)	Referencia
(2) Bosque tropical perennifolio (África)	4	Chuyong <i>et al.</i> , 2004
(2) Matorral (México)	5-11	Carlyle-Moses, 2004
(2) Bosque tropical perennifolio (Japón)	7	Lin <i>et al.</i> , 2000
(1) <i>Grevillea robusta</i>	10.2	Jackson, 2000
(2) Bosque de <i>Picea mariana</i> (Canadá)	14	Price <i>et al.</i> , 1997
(1) <i>Pyrus calleryana</i> (USA)	15	Xiao <i>et al.</i> , 2000
(2) Bosque de encino (España)	15-18	Rodrigo y Àvila, 2001
(2) Plantación de <i>Pinus caribea</i>	15-25	Lilienfein y Wilcke, 2004
(2) Bosque tropical perennifolio (Borneo)	19	Burghouts <i>et al.</i> , 1998
(2) Arbustos del semidesierto (México)	22	Návar y Bryan, 1990
(1) <i>Quercus ilex</i> (Portugal)	22	David <i>et al.</i> , 2006
(2) Bosque tropical perennifolio (Ecuador)	22-52	Fleischbein <i>et al.</i> , 2004
(1) Bosque de pino encino (México)	23	Silva y Rodriguez, 2001
(2) Bosque tropical decíduo (Canadá)	23	Price y Carlyle-Moses, 2003
(1) <i>Quercus suber</i> (USA)	27	Xiao <i>et al.</i> , 2000
(2) Matorral (México)	28	Návar <i>et al.</i> , 1999
(1) <i>Juniperus ashei</i> (USA)	40	Owens <i>et al.</i> , 2006
(1) <i>Ficus benjamina</i> (México)	59.5	Guevara-Escobar <i>et al.</i> , 2007

2.3. Factores que intervienen en la interceptación

Existen factores que intervienen en las variaciones de la interceptación tanto temporales como espaciales de la interceptación, a continuación se describen algunos de los más significativos:

1) Cobertura Foliar: ésta puede variar temporalmente debido a cambios estacionales como observaron **Peterson y Rolfe en 1979**, donde encontraron que la percolación era más variable en verano en comparación con las otras estaciones, debido a que durante éste, el follaje provee puntos adicionales de drenado y áreas de retención en las copas de los árboles. Existen también variaciones espaciales ocasionadas por la vegetación debido a que no es uniforme en un mismo tiempo, originando cambios por unidad de área para un mismo evento (**Loescher et al., 2002; Raat et al., 2002**).

2) Duración e Intensidad de la lluvia: estos factores están muy ligados por la existencia de variaciones en la intensidad durante un evento de precipitación, ocasionando cambios temporales (**Loescher et al., 2002; Raat et al., 2002; Llorens et al., 2003**). De acuerdo con algunos estudios realizados se ha encontrado que el incremento en la intensidad puede aumentar (**Loescher et al., 2002**) o disminuir (**Raat et al., 2002**) la variación espacial de la interceptación dependiendo del tipo de cobertura vegetal, ya que la capacidad de almacenamiento no es uniforme.

3) Velocidad y Dirección del viento: estos factores ocasionan que la entrada de la lluvia por la copa de los árboles ocurra en distintos ángulos y al conjuntarse con la heterogeneidad de la vegetación ocasionan cambios en los caminos del agua (**Robson et al., 1994; Gómez et al., 2002 y David et al., 2006**).

4) Ecosistemas: la percolación y su contenido químico cambian dependiendo de su proximidad a ciudades, océanos o terrenos montañosos donde la pendiente, la elevación, las condiciones climatológicas y las actividades antropogénicas, juegan un papel importante (**Delphis y Frost, 2006**).

5) Arquitectura de la vegetación: las hojas y las ramas de la vegetación presentan variaciones morfológicas dependiendo de la especie (variación interespecífica), lo cual hace

que las capacidades de intercepción difieran entre especies (**Horton, 1919; Liu, 1998**). Los individuos de una misma especie también presentan diferencias (variación intraespecífica) debido a la edad o a que su crecimiento no sigue un patrón determinado, y se ven reflejadas en su capacidad de intercepción (**Návar *et al.*, 1999**).

2.4. Métodos de cuantificación de la intercepción

De acuerdo con la revisión de literatura realizada se pueden distinguir claramente dos enfoques para evaluar la intercepción. El primero, 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**).

Tradicionalmente la precipitación interceptada por las copas de los árboles ha sido determinada indirectamente por la diferencia entre la P_G y la P_n que alcanza el suelo en forma de flujo cortical, percolación y drenaje foliar, estos dos últimos se cuantifican en conjunto para después ser separados por métodos analíticos (**Gash *et al.*, 1995; Carlyle-Moses y Price, 1999; Dijk y Bruijnzeel, 2001**)

Las formas en que se cuantifican la percolación 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**).

El método para cuantificar EI depende del tipo de vegetación y el nivel en el cual se van a estudiar (comunidad o individual), también el método seleccionado esta en función de los factores que se pretenden evaluar e influyen en la intercepción, ya que hasta la fecha no se

ha desarrollado una metodología que tome en cuenta todos los factores que intervienen en el comportamiento de la intercepción.

2.5. Intercepción en árboles aislados

Los estudios de intercepción en árboles aislados han sido realizados por diversos autores en diferentes especies (Tabla 1). Los resultados de estos estudios han demostrado que la variación espacial de Th no es al azar cuando las precipitaciones son influenciadas por la velocidad del viento (**King y Harrison, 1998; Gómez et al., 2002**). Existen zonas de concentración de la precipitación en la parte de barlovento de los árboles ocasionadas por la lluvia directa sobre estas áreas y zonas de baja concentración de precipitación en la zona de sotavento ocasionadas por el efecto de sombra causado por el mismo árbol, dicho efecto incluso se extiende mas allá de la copa del árbol (**King y Harrison, 1998; David et al., 2006**).

Los estudios generalmente han sido realizadas con un pequeño número de observaciones (días, meses o estacionales), por lo que el monitoreo continuo durante estaciones o años nunca ha sido reportado. La estimación real de la EI sólo se ha procurado en algunos estudios de árboles aislados (**Calabuig, 1992; Xiao et al., 2000; Gómez et al., 2001; Samba et al., 2001**), en la mayoría de los casos EI es estimada como la diferencia entre P_G y P_n (**Jackson, 2000; Samba et al., 2001; Guevara-Escobar et al., 2007 Owens et al., 2006**). La metodología para estimar EI como la diferencia de $P_G - P_n$ en bosques horizontalmente uniformes puede ser una buena aproximación cuando al lluvia cae verticalmente, sin embargo, esto se ve afectado cuando existe una dominancia del viento, el cálculo de EI puede ser subestimado o sobrestimado dependiendo de la magnitud y dirección del viento (**David et al., 2006**).

En reconocimiento a algunos de estos problemas **Xiao et al. (2000)** propusieron un nuevo método para medir la intercepción de precipitación en árboles aislados, el cual se basa en la construcción de una estructura de captación debajo del árbol, con un área de colección extendida más allá de los bordes de la corona. Este método a pesar de ser pionero en su tipo no provee información de la distribución espacial de la lluvia a nivel del suelo (**David et**

al., 2006), tampoco toma en cuenta el efecto sombra del árbol ni las entradas laterales, de forma (David *et al.*, 2006 y Guevara-Escobar *et al.*, 2007).

2.6. Intercepción en ambientes semiáridos

Existen diversos estudios de intercepción en todo el mundo de los cuales la mayoría se enfocan a ecosistemas como bosques y selvas, sin embargo, pocos estudios se han realizado en ecosistemas semiáridos y aún menos en comunidades de matorral xerófilo (Tabla 1). En México son contados los trabajos que se han realizado en torno a esta línea de investigación. En la Tabla 2 se muestran algunos trabajos realizados para ambientes semiáridos en regiones del norte del país.

Tabla 2. Resumen de algunos estudios realizados en ambientes semiáridos en México, metodología y resultados.

Autor	Sitio	Tipo de cobertura	No. de eventos	Método de medición	Período de medición	Área o número de individuos muestreados	Th+Fd (%)	EI (%)	Sf (%)
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>	(70)	Canaletas (10 x 100 cm)	Febrero 1999- Julio 2001	1 Parcela de 10 x10 m para	82	18	/
		<i>Acacia rigidula</i>	(70)			cada especie con 4 canaletas	85	15	/
		<i>Diospyros texana</i>	(70)			cada una	78	22	/

3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

3.1. Objetivos

General

- Evaluar el proceso de intercepción durante eventos de precipitación en mezquite (*Prosopis laevigata*) y huizache (*Acacia farnesiana*) a fin de entender el papel que desempeña el matorral en el balance hídrico en ambiente semiárido.

Particulares

- Determinar la arquitectura y biodiversidad de la comunidad vegetal en cada sitio experimental.
- Cuantificar la percolación, el flujo cortical y las pérdidas por intercepción y modelar las pérdidas con los modelos de Rutter y Gash.
- Analizar las variables climáticas: radiación, temperatura atmosférica, humedad relativa, evapotranspiración y velocidad del viento para valorar su papel en el proceso de intercepción.

3.2. Hipótesis

La intercepción de agua de lluvia por Mezquite (*Prosopis laevigata*) y Huizache (*Acacia farnesiana*) regula el balance hídrico en matorral xerófito.

- Dentro de las especies con mayor valor de importancia en la composición de la vegetación de los sitios experimentales se encuentran el mezquite y el huizache.
- La percolación, el flujo cortical y las pérdidas por intercepción cuantificadas para huizache y mezquite ajustan al modelo de Gash y Rutter.
- Las variables climáticas influyen la percolación, el flujo cortical y las pérdidas por intercepción.

4. MODELOS DE INTERCEPCIÓN

4.1. Introducción

Los estudios del proceso de intercepción caen dentro de diversas categorías y la mayoría de los investigadores se han centrado en condiciones de campo. Los datos obtenidos gracias a estas observaciones han generado diferentes modelos de intercepción, en donde la mayoría de ellos se enfoca en simular la intercepción por evento de lluvia.

El primer modelo de intercepción fue semi-empírico desarrollado por **Horton en 1919**. También se han desarrollado múltiples modelos numéricos para calcular las pérdidas por intercepción, éstos incluyen los modelos analíticos (**Gash, 1979; Gash et al., 1995; Carlyle-Moses y Price, 1999**), de base física (**Rutter et al., 1971; Hashino et al., 2002 y Liu, 1997**).

Los parámetros y datos requeridos para los modelos de intercepción (**Liu, 2001**), incluyen la capacidad de almacenamiento de la copa (S), cobertura foliar, precipitación total (P_G), la intensidad de la precipitación (i) y evaporación (E) durante el ciclo de secado y mojado de la copa del árbol (**Zeng et al., 2000; Liu, 1997; Gash et al., 1995; Gash, 1979**). Los valores de dichos parámetros pueden variar dependiendo del criterio para su determinación.

El modelo de **Rutter et al. (1971)** ha servido de base para numerosos modelos analíticos o semianalíticos (**Zeng et al., 2000**). **Gash (1979)** encontró variaciones del modelo de Rutter que han demostrado que la evaporación de la precipitación interceptada por las copas de los árboles puede ser estimada a partir de la estructura de la vegetación. Ambos modelos de Gash y Rutter calculan la evaporación por unidad de área, como resultado, los modelos son extremadamente sensibles a la evaporación (**Lankreijer et al., 1993**) tendiendo a sobreestimar las pérdidas por intercepción (**Valente et al., 1997**).

En este proyecto los modelos que han sido empleados son los de Rutter y Gash, por tanto, en este capítulo se describirá cada uno de ellos.

4.2. Modelo de Rutter *et al.* (1971)

Rutter *et al.* (1971 y 1975) desarrollaron un modelo numérico para la interceptación de lluvia, basado en el balance de agua de la cobertura vegetal de un bosque de pino.

El modelo establece que la cantidad de agua almacenada en la copa determina la porción de lluvia que toca la copa, el drenaje y la evaporación del agua interceptada:

$$\frac{dC}{dt} = (1-p)R_i - E_p - D \quad \text{para } C > S \quad (1)$$

$$\frac{dC}{dt} = (1-p)R_i - (C/S)E_p - D \quad \text{para } C < S \quad (2)$$

Donde

C es la cantidad de agua interceptada en la copa, R_i la intensidad de la lluvia, S la capacidad de almacenamiento de la copa, D el drenaje de agua retenida en la copa, p la percolación libre y E_p la evaporación de la copa una vez que está es estimada por la ecuación de Penman-Monteith (**Monteith, 1965**).

$$E_p = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma} \quad (3)$$

Donde

R_n es la radiación neta, G el flujo de calor en el suelo, $(e_s - e_a)$ el déficit de presión de vapor, ρ_a la media de la densidad del aire a presión constante, C_p el calor específico del aire, Δ representa la pendiente de la relación entre la presión de vapor y la temperatura, γ es la constante psicométrica y r_a la resistencia aerodinámica que se calcula mediante la ecuación:

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{z_m - d}{z_{om}}\right] \ln\left[\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right]}{K^2 u_z} \quad (4)$$

Siendo

z_m es la altura en que se midió el viento, z_h la altura en que se midió la humedad, d la distancia de desplazamiento del plano cero, z_{om} tamaño de la rugosidad que gobierna el momentum. z_{oh} tamaño de la rugosidad que gobierna la transferencia de calor y vapor, K la constante de Von Karman (0.41) y u_z la velocidad del viento a la altura z .

El drenaje se calcula mediante una función exponencial:

$$D = D_0 e^{b(C-S)} \quad (5)$$

Donde

D_0 es el drenaje cuando $C=S$ para una copa saturada y b es un parámetro empírico.

4.3 Modelos de Gash

4.3.1 Modelo de Gash (1979)

El modelo que Gash, 1979 considera que la lluvia ocurre como una serie de eventos discretos donde se pueden distinguir tres fases:

1. Fase de mojado: en donde la precipitación neta es menor a la necesaria para saturar la copa.
2. Fase de saturación: en donde la intensidad de la lluvia excede la evaporación de la copa y comienza a escurrir.
3. Fase de secado: la cual ocurre después de que la lluvia ha terminado.

El modelo asume que la copa del árbol tiene suficiente tiempo para secarse entre eventos de lluvia, por lo que no es recomendable usar el modelo en lugares donde las copas de los árboles se mantengan húmedas durante períodos prolongados.

La estructura de la vegetación se considera en términos de la capacidad de almacenamiento de la copa (S), la cual se define como el volumen de agua que queda retenida en la copa, bajo condiciones de cero evaporación una vez concluida la lluvia y el drenaje, (**Gash y Morton, 1978**); y el coeficiente de percolación libre (p), el cual es la fracción de la precipitación que pasa a través de la copa sin tocarla. Existe una fracción de la precipitación incidente que es captada por las ramas (p_i) y representa una capacidad de almacenamiento (S_i), a menudo se asume que p es complementario a la fracción de la cobertura de la copa (c). Finalmente el modelo requiere la media de la evaporación (\bar{E}) y la intensidad (\bar{R}) para cada evento de precipitación (Tabla 3).

El modelo de 1979 también asume:

- i. La lluvia debe ser presentada en series de eventos de precipitación, separados por períodos en que la copa se seca completamente. Por lo tanto, las mediciones totales de la P_n , Th y S_f pueden ser usadas para modelar la intercepción.
- ii. La evaporación promedio (\bar{E}) representa adecuadamente la evaporación de la copa durante una lluvia. Implícitamente, asume que la relación de la evaporación entre la media de la intensidad de la lluvia (\bar{E}/\bar{R}) es igual para todas las precipitaciones.
- iii. No existe drenaje hasta que S es completamente llenada.
- iv. La evaporación de las ramas solo ocurre después de que la lluvia ha terminado.

Las simplificaciones de las suposiciones ii y iii hasta la fecha han producido buenos resultados. Sin embargo, ii produce serias sobreestimaciones de p cuando es derivado de la regresión entre la precolación y lluvias menores que P_G (**Schellekens et al., 1999**).

Finalmente la suposición iv conceptualmente no es del todo valido (**Rutter y Morton, 1977**), debido a que ocasiona evaporación del agua dentro del proceso de intercepción.

4.3.2 Modelo de Gash *et al.* (1995)

Debido a las limitaciones de algunas apreciaciones conceptuales, como se vio en la sección anterior, este modelo introduce un parámetro adicional, la fracción de cobertura de la copa (c), el cual hace que la capacidad de la copa S y la evaporación de la copa dependan de la uniformidad de la vegetación. Esta condición intenta corregir el concepto de que el índice de evaporación relativo \bar{E}/\bar{R} , es dependiente de $(1-p-p_l)$, porque puede resultar en un logaritmo negativo cuando se calcula P'_G en una situación donde $(1-p-p_l) \cdot \bar{R} < \bar{E}$.

Otras mejoras corresponden al flujo cortical y el almacenamiento de las ramas, las cuales también fueron reformulados y de acuerdo con estas formulaciones la precipitación no es drenada antes de que la copa esté completamente saturada (Tabla 3).

Tabla 3. Ecuaciones de los modelos de Gash 1979 y Gash *et al.*, 1995.

	Gash 1979	Gash <i>et al.</i> 1995
Componentes de las pérdidas por interceptación		
Para m tormentas insuficientes para saturar la copa ($P_G \leq P'_G$)	$(1 - p - p_t) \sum_{j=1}^m P_{Gj}$	$c \sum_{j=1}^m P_{Gj}$
Para n tormentas suficientes para saturar la copa ($P_G > P'_G$)		
Mojado de la copa	$n \{ (1 - p - p_t) P'_G - S \}$	$n \{ c P'_G - S \}$
Evaporación de la copa durante las tormentas	$\frac{\bar{E}}{\bar{R}} \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_G)$	$\frac{\bar{E}}{\bar{R}} \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_G)$
Evaporación después de la lluvia	nS	nS
Evaporación de los tallos para q tormentas $> S_t/p_t$, las cuales saturan los tallos para $n+m-q$ en el	$qS_t + p_t \sum_{j=1}^{m+n-q} P_{Gj}$	$qS_t + p_t \sum_{j=1}^{n-q} P_{Gj}$
Parámetros		
Lluvia necesaria para saturar la copa	$P'_G = -\frac{\bar{R}S}{\bar{E}} \ln \left[1 - \frac{\bar{E}}{(1 - p - p_t)\bar{R}} \right]$	$P'_G = -\frac{\bar{R}S}{\bar{E}} \ln \left[1 - \frac{\bar{E}}{c\bar{R}} \right]$
Rango de evaporación media de la copa	$\bar{E} = \bar{E}_p$	$\bar{E} = c\bar{E}$
Capacidad de la copa	S	$S = cS$
Fracción de cobertura de la copa	$1 - p$	c

5. PÉRDIDAS POR INTERCEPCIÓN DE DOS ESPECIES EN EL SEMIDESIERTO DEL CENTRO DE MÉXICO

5.1. Introducción

La región semiárida de México abarca las entidades de Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Querétaro, Hidalgo, Guanajuato, Puebla y Guerrero. La Comisión Nacional de las Zonas Áridas (**Conaza, 1994**) indica que en éstas partes la temperatura media anual varía entre 15 y los 25°C, con grandes oscilaciones entre los valores medios mensuales. En cuanto a la precipitación el Atlas Nacional de México (**UNAM, 1990**) indica que son sitios donde la precipitación oscila entre 400 a 600 mm anuales. Las comunidades vegetales que se desarrollan bajo estos climas incluyen pastizales, matorrales e inclusive, bosques bajos, principalmente espinosos como los mezquiales (Figura 3).

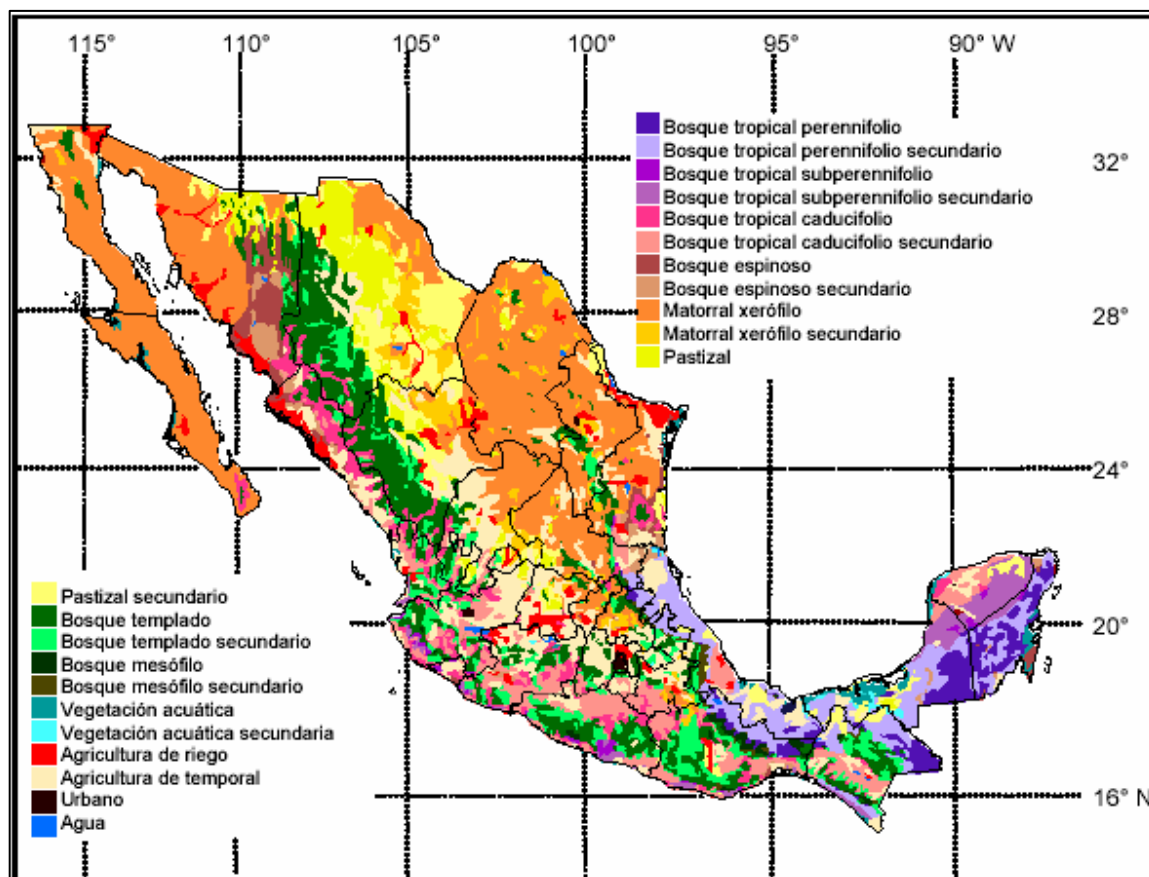


Figura 3. Mapa de uso actual del suelo, resumido por **Oropeza et al. (1992)** modificado por **Villers. R. y Trejo. V. (1997)**.

La cubierta vegetal de la región del semiárido de México es tan variada desde el punto de vista fisonómico, que el tratar de separar las diversas comunidades vegetales, para muchos investigadores resulta difícil hacerlo a nivel nacional. De acuerdo con **CONAFOR (2007)** estas comunidades vegetales ocupan aproximadamente el 40% de la superficie del país y por consiguiente es el más vasto de todos los tipos de vegetación de México.

La vegetación del semidesierto por lo general esta conformada por arbustos, sin embargo las hay también arbóreas, por lo regular de poca densidad. La diversidad biológica es relativamente baja por unidad de superficie, aunque, por su extensión territorial en su conjunto, puede considerarse que la biodiversidad de estos ecosistemas es alta (**CONAFOR, 2007**). Las comunidades del semiárido suelen ser una mezcla de diversas especies vegetales como huizache (*Acacia spp.*), Mezquite (*Prosopis spp.*), nopales (*Opuntia spp.*), uña de gato (*Mimosa spp.*), entre las más conocidas.

Los mezquites son árboles o arbustos espinosos de 1 a 15 m de altura, tallo grueso por lo general monopódico de color café-negruzco, fisurado, con copa más ancha que alta, ramas glabras, con espinas, hojas pecioladas, pinas con foliolos sésiles, flores dispuestas en espigas densas de color blanco-amarillentas y con legumbre linear comprimida (**Ocampo, 1997**).

Sus características morfológicas indican que estas especies no pueden considerarse como verdaderas xerófilas (**Gilbert, 1991**), ya que sus hojas no presentan cubiertas cerosas o pilosas que eviten una transpiración excesiva, o atenúen el efecto de la radiación solar. Posee características fisiológicas que le permiten tolerar la desecación, es decir, pueden comportarse como xerófilas. Presentan raíces pivotantes de hasta 50 m de profundidad, tal característica les permite aprovechar los mantos freáticos y la exploración de considerables volúmenes de suelo. Son organismos que tienen la posibilidad de extraer agua del suelo en potenciales hídricos bajos (-3.0 megapascales) y llevar a cabo la fotosíntesis (**Sosebee y Wan, 1987**). *Prosopis spp.* es una planta nodriza por excelencia, bajo su dosel se puede presentar una cantidad de especies 4 o 5 veces más alta que en las zonas abiertas (**Mares et al., 1997**).

Por otra parte, los huizaches son plantas arbustivas de 1 a 3 m de alto, pertenecen a la familia de las leguminosas, muy común en condiciones secundarias. En su descripción

figura como una planta arbustiva; tronco grueso, corteza fisurada de color café-negrusco, hojas en pinas y foliolos oblongo-lineares, con flores reunidas en cabezuelas con pedúnculos, cáliz campanulado amarillento y algo pubescente, legumbre linear café-rojiza (**Ocampo, 1997**). Se desarrolla en diversos tipos de suelo y en diferentes condiciones climáticas. Los huizaches tienen gran utilidad como forraje para el ganado caprino ya que ramonean sus hojas y se comen las vainas, las ramas secas son utilizadas para uso doméstico.

En la presente sección se abordará la localización y se dará una breve descripción de los puntos seleccionados para el monitoreo en las zona del semidesierto del centro de México, así como la manera en que se caracterizó la vegetación. También se aborda la descripción de los instrumentos para la medición de las variables hidroclimatológicas; al procedimiento de medición, la precisión de los aparatos y los intervalos de tiempo de observación. Finalmente se describe el análisis de los datos y la forma en que se utilizaron para la modelación de la intercepción.

5.2. Áreas de estudio

Se seleccionaron tres sitios de monitoreo en la zona centro de México que tuvieran vegetaciones características del semidesierto como lo es el matorral xerófilo. Para la elección de los sitios se tomó en cuenta que tuvieran vegetación representativa del semidesierto y por ende que contaran con individuos de *Prosopis laevigata* y *Acacia farnesiana*, así mismo se tomó en cuenta que fueran accesibles, poco perturbados y seguros para evitar daños al equipo de observación, de tal manera que se seleccionaron las microcuencas de El Carmen, Amazcala y Cadereyta, las dos primeras correspondientes a la cuenca del río Laja, estados de Guanajuato, Querétaro y la última a la cuenca del río Moctezuma (Figura 4) en Querétaro.

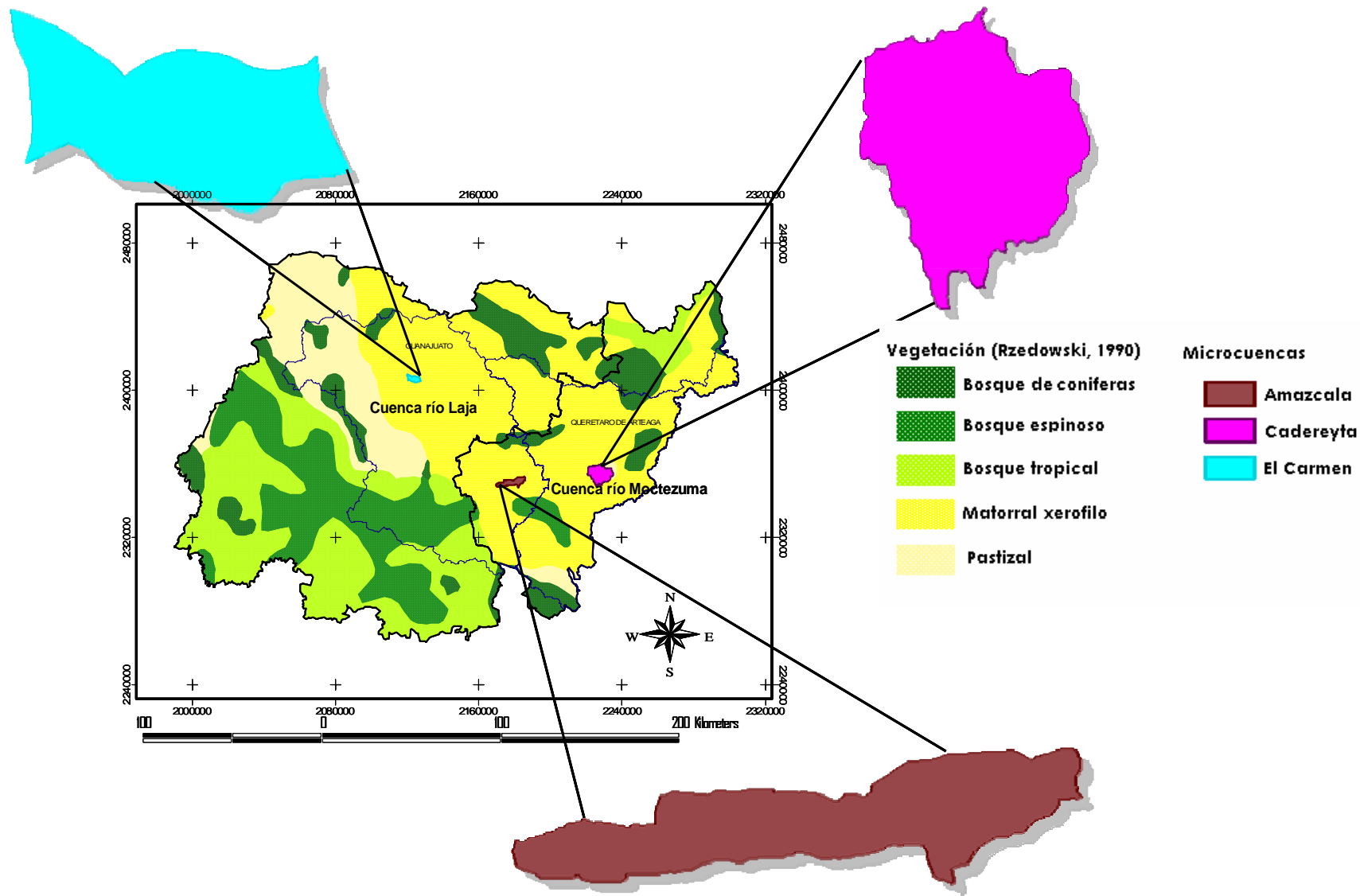


Figura 4. Mapa de localización de las 3 microcuencas seleccionadas para el estudio (Coordenadas en UTM).

5.2.1 Amazcala

Microcuenca perteneciente al municipio de El Marqués, Estado de Querétaro, se localiza al Noroeste del estado de Querétaro, entre los 20° 31' y 20° 58' de latitud Norte. Su longitud se encuentra entre los 100° 09' y los 100° 24' del Oeste, a una altitud de 1,850 msnm. Situado en la zona correspondiente a la región hidrológica Lerma-Chapala-Santiago, tiene pocas corrientes acuíferas y niveles de precipitación bajos, ya que durante el verano la precipitación pluvial registra aproximadamente 547.2 mm. El río Querétaro es la principal corriente superficial, aunque sólo lleva un buen caudal cuando la precipitación se incrementa; de menor importancia se considera a los ríos Chichimequillas y Pinal, así como los arroyos El Durazno, El Roble, Tepozanes, Piedras Lisas, Frijolillo, El Laurel, La Pila, La Angostura, La Gotera y Las Tinajas. El clima predominante es el subtropical de altura, templado-semiseco en el 80% del municipio y el 20% restante presenta un clima templado-húmedo. La temperatura media anual está comprendida entre los 18 y los 24°C, mientras que para el clima templado-subhúmedo oscila de los 14 a los 16°C. En cuanto a la vegetación podemos apreciar los mezquites (*Prosopis spp.*), huizaches (*Acacia spp.*), pirules (*Schinus molle*), palo bobo (*Ipomoea spp.*) nopales (*Opuntia spp.*). En las zonas donde escasea el agua se encuentra gran diversidad de cactáceas. La región cuenta en su mayoría con suelos de tipo vertisol pélico, estos presentan como característica común un gran contenido en materia orgánica, debiéndose a ello su gran fertilidad (**Centro Nacional de Desarrollo Municipal, Gobierno del Estado de Querétaro, 1999**).

5.2.2 Cadereyta

Microcuenca perteneciente al Municipio de Cadereyta de Montes, Estado de Querétaro, se localiza entre los 20° 34' y 21° 03' de latitud Norte y entre los 99° 23' y 99° 53' de longitud Oeste, con una altitud de 2,040 msnm. Sus climas son el seco y el estepario; que de acuerdo al grado de humedad y temperatura, son de dos tipos: el semicálido y semidesértico que se caracterizan por un invierno seco, temperatura media anual de 16.7°C y máxima de 38°C. Presenta una precipitación pluvial de 480 mm. La vegetación se encuentra compuesta por diversas especies entre las que sobresalen las cactáceas y pequeñas partes boscosas de pinos y encinos en lo que corresponde a la Sierra Gorda. La

flora característica de la región semidesértica, es el matorral, donde se observan individuos arbóreos como capulín (*Prunus serotina*), mezquite (*Prosopis spp.*), pirúl (*Schinus molle*) y algunos arbustos como huizache (*Acacia spp.*), tullidora (*Karwinskia humboldtiana*), además de granjeno (*Celtis pallida*) (**Centro Nacional de Desarrollo Municipal, Gobierno del Estado de Querétaro, 1999**).

5.2.3 El Carmen

Microcuenca perteneciente al Municipio de Dolores Hidalgo, Estado de Guanajuato, tiene como límites las coordenadas geográficas 100°37'18" y 101°11'03" de longitud oeste y 20°50'12" y 21°21'54" de latitud norte. Las corrientes hidrológicas son el Río Laja, que cruza de Noroeste a Sureste por este Municipio, y el Río Batán o de Trancas, afluente del primero. Otros arroyos de menor importancia son El Saucito, El Durazno, El Chicolote, Las Monjas, el Plan de Peña y San Pedro, todos ellos afluentes del Laja. En el sur del territorio se localizan los Ríos Santa Bárbara, Cañada del Laurel, Charco Azul y Santa Rosa. El clima alcanza una temperatura máxima de 36.5°C en el verano y una mínima de 3.8°C en el invierno, siendo la temperatura media anual de 17.4°C. Este clima se clasifica como semiárido o semicálido. A su vez, la precipitación media anual es de 564.1 mm. El suelo obedece a las siguientes clasificaciones edafológicas: en la parte norte, en los terrenos planos y ligeramente ondulados, hay phaeozem háplico y regosol éutrico; existe también phaeozem lúvico y litosol de textura media; en la zona centro los suelos son de tipo phaeozem lúvico, castañozem lúvico, regosol éutrico con phaeozem lúvico y chernozem cálcico. La flora está compuesta por especies forrajeras como: pingüica (*Arctostaphylos pungens*), nopal (*Opuntia spp.*), mezquite (*Prosopis spp.*), maguey (*Agave spp.*), huizache (*Acacia spp.*) y cardenche (*Opuntia imbricata*) entre otras (**Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, Gobierno del Estado de Guanajuato, 2002**).

5.3. Caracterización de la vegetación

Para evaluar la vegetación en los tres sitios de estudio se realizó un transecto tipo Gentry (**Gentry, 1982**), el cual cubre un área de 100 m² (50m x 2m). Se consideraron 3 estratos; arbóreo, arbusto y herbáceo. A cada organismo se tomaron medidas alométricas,

como altura total, DAP y radio. Esto se realizó con el objetivo de describir la vegetación de cada sitio desde un punto de vista fisonómico y estructural, destacando las formas de vida.

Con los los datos obtenidos se determinó la cobertura vegetal la cual se define como la superficie del suelo cubierta por los individuos de una especie, o de todas las especies para cada estrato, además se obtuvo la dominancia, frecuencia, valor de importancia e índices de diversidad (Shannon (H) y Simpson (D), dado que la diversidad en un contexto ecológico, engloba dos componentes: variedad y abundancia relativa de especies (**Magurran, 1988**).

El Índice de Simpson (**Simpson, 1949**) es una medida de dominancia y se expresa como:

$$l = \sum pi^2 \quad (6)$$

En donde $pi = ni / N$, ni es el número de individuos de la especie ' i ' y N es la abundancia total de las especies. En si, pi es la abundancia proporcional de la especie ' i '.

y el Índice de Shannon-Wiener procede de la Teoría de la Información (**Shannon y Wiener, 1972**) y se expresa como:

$$H' = - \sum pi \ln (pi) \quad (7)$$

Siendo pi la proporción de individuos de la especie ' i ', es decir, $pi=ni/N$. Este índice es muy susceptible a la abundancia.

5.4. Hidroclimatología

5.4.1. Precipitación

Para la medición de lluvia se utilizaron estaciones meteorológicas marca Vaisala modelo WXT510 colocadas en los sitios de estudio. Estas estaciones están conectadas a un datalogger CR1000 de Campbell scientific (Figura 5) programado para registrar el acumulado de la lluvia cada 5 minutos en forma continua. El registro de datos permitió calcular la lámina total, la duración, la intensidad media y la variación de las intensidades durante el evento.

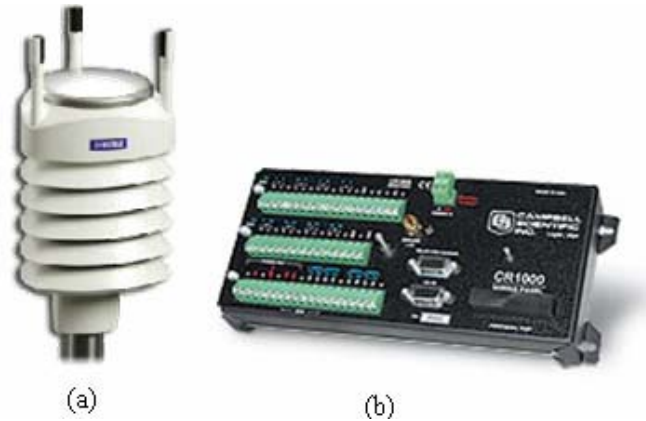


Figura 5. Vista de: (a) Estación meteorológica Vaisala WXT510 y (b) Datalogger CR1000 de Campbell scientific.

5.4.2. Evapotranspiración

Se colocó un medidor de evapotranspiración ET gauge de Spectrum Technologies (Figura 6) a una altura de 1.3 m del suelo en cada sitio experimental a los cuales se les colocaron

unas capuchas de tipo G2 que simulan la evapotranspiración de la copa de un árbol. Los ET gauge se conectaron a un datalogger CR 1000 programado para registrar el acumulado de la evapotranspiración cada 20 minutos. El ET gauge cuenta con una precisión de 0.254 mm



También se calculó cada 20 minutos mediante la formula de Penman-Monteith la evapotranspiración de cada uno de los sitios, para ello se tomaron las variables que requiere la formula de las registradas en el sitio de monitoreo y que se describen en el apartado **4.4.4.**

Figura 6. Fotografía de ET gauge de Spectrum Technologies.

5.4.3. Intercepción

Se instrumentó *in situ* un individuo de *Prosopis laevigata* y *Acacia farneciana* por área de estudio y a fin de evitar el efecto pantalla, se intrumentaron tres individuos de cada especie en forma aislada; las variables dasométricas de cada individuo instrumentado se muestran

en la Tabla 4. La instrumentación consistió en colocar debajo de cada árbol, láminas de policarbonato transparente tratando de cubrir la mayor área posible, procurando que éstas no excedieran la cobertura de la copa (Figura 7), esto último fue complicado debido a la irregularidad en la forma de las copas de los árboles. En la Tabla 4 se muestran los porcentajes del área de captación que se cubrieron con respecto al área de la copa.

Tabla 4. Características de los árboles instrumentados y área de captación de $Th + Df$.

Sitio	Árbol	Altura (m)	Alt. fuste (m)	Alt. copa (m)	Cobertura (m ²)	Área de captación (m ²)	Área de Captación (%)
El Carmen	<i>A. farnesiana</i>	2.2	1.2	1.0	14.3	8.4	59
	<i>P. laevigata</i>	2.4	0.9	1.5	9.7	6.5	67
Cadereyta	<i>A. farnesiana</i>	1.9	0.6	1.3	5.0	2.2	44
	<i>P. laevigata</i>	3.0	1.6	1.4	14.3	6.9	48
Amazcala	<i>A. farnesiana</i>	3.2	1.7	1.5	9.9	6.6	67
	<i>P. laevigata</i>	2.8	0.8	2.0	15.2	6.6	43

Las láminas colectoras se colocaron con una pendiente hacia el centro para drenar el agua que pasará a través de la copa durante un evento de lluvia, descargara a un tubo de PVC de 10.16 cm de diámetro partido a la mitad, el cual también presento una pendiente para que descargara mediante un codo de PVC hacia un tambo de plástico con una capacidad de 250 litros (Figura 8).



Figura 8. Recipiente de almacenamiento (a) de la lluvia captada por láminas de policarbonato(b) con pendientes para dirigir el flujo hacia una canaleta de PVC (derecha).

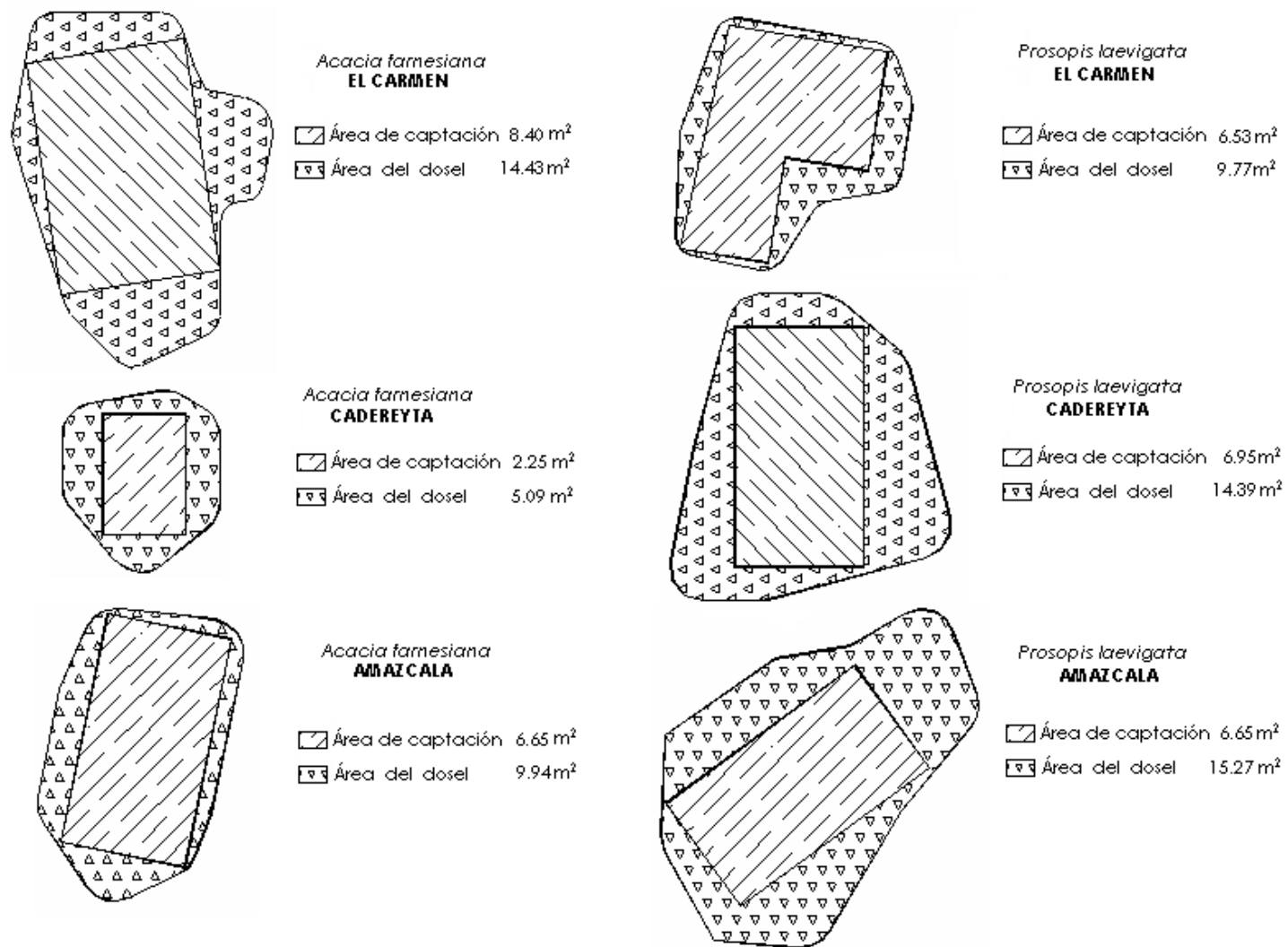


Figura 7. Vista en planta de la cobertura y áreas de captación para cada uno de los seis árboles instrumentados.

Para sostener el sistema de captación, se elaboró una estructura de madera con un grosor de 5 x 5cm la cual se armó en el sitio de manera especial para cada uno de los árboles. También se colocaron láminas de policarbonato en forma vertical y circundante, a fin de evitar algún tipo de entradas laterales, con el objetivo de asegurarse de que toda la lluvia que captaran las láminas drenara o percolara por la copa del árbol (Figura 9).



Figura 9. Estructura de madera donde se aprecian las láminas verticales para evitar entradas laterales y las horizontales para la captación de la precipitación neta.

El agua colectada por cada tambo se midió después de cada evento de lluvia, obteniendo en su conjunto Th y Df la intercepción se obtuvo mediante de la diferencia entre lo captado por el tambo y lo que se hubiera captado durante el mismo evento si no existiera el árbol.

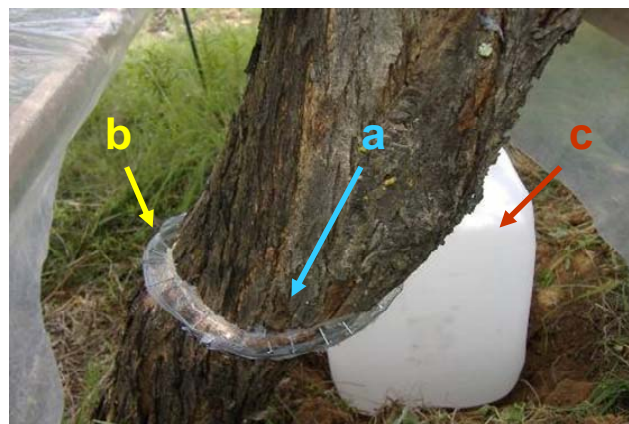


Figura 10. Esquema (a) flujo cortical, (b) manguera y (c) garrafón.

El flujo cortical de cada árbol se colectó con una manguera abierta a la mitad alrededor del fuste, la cual desembocó a un garrafón de 25 litros previamente graduado con el objetivo de facilitar las mediciones después de cada evento pluvial. (Figura 10).

5.4.4. Variables complementarias

Mediante las estaciones meteorológicas Vaisala (sección 4.4.1) se registraron cada 20 minutos las variables climáticas: velocidad del viento con una exactitud de ± 0.3 m/s, dirección del viento con una exactitud de ± 2 grados, presión atmosférica con una exactitud de ± 0.5 hPa, temperatura del aire con una exactitud de ± 0.3 °C y la humedad relativa con precisión de ± 3 % RH (Figura 11).

En los sitios correspondientes a Cadereyta y El Carmen, se instaló una sonda tipo EnviroSMART de Zentek para medir la humedad del suelo con una precisión de ± 0.1 mm de humedad de suelo. Para Cadereyta los sensores de la sonda se colocaron a 10, 30, 50, 70, 100, 130 y 170 cm de profundidad y para El Carmen a 10, 50, 70, 100, 130, 160 y 190 cm. Aunado a esto se instalaron 4 termopares en el suelo modelo 105T-L en El Carmen y Cadereyta a profundidades de 5, 20, 50 y 100 cm., los cuales trabajan a temperaturas que van de -73 a 60 °C con una exactitud de ± 0.25 °C, además se midió el flujo de calor en el suelo en los tres sitios mediante la colocación a 10 cm de profundidad de un fluxómetro de calor tipo HFP01SC, con un rango de temperaturas de -30 a 70 °C con una precisión de ± 0.25 °C. Por último se midió la R_n con un sensor NR-LITE-L de Kipp & Zonen con una precisión de ± 1 Wm^{-1} .



Figura 11. Vista de: (a) EnviroSMART de Zen tek, (b) Termocople105T-L, (c) NR-LITE-L y (d) fluxómetro de calor tipo HFP01SC.

Para cada una de estas variables se registró su promedio cada 20 minutos de manera continua durante el período de estudio.

5.5. Análisis y modelación

Para calcular EI para cada árbol se utilizó la siguiente fórmula:

$$EI = P_G - \frac{Th + Sf}{A_c} \quad (8)$$

Donde Th y Sf son los volúmenes de percolación y flujo cortical que se colectaron en el tambo y el garrafón respectivamente en litros y A_c es el área de captación para cada uno de los árboles que se muestra en la Tabla 4.

Una vez obtenida EI se realizó una corrección por evento para extrapolar los valores a la cobertura total del árbol, ya que como se observa en la Figura 7 esta no se cuantificó en su totalidad para ello se utilizó la fórmula:

$$EI_c = \left((P_G - Th - Sf) * \frac{A_d}{A_c} \right) + Th \quad (9)$$

Donde A_d es el área proyectada del dosel sobre la superficie del suelo. Una vez hecho esto se calcularon los parámetros de entrada que requieren los modelos de Gash y Rutter.

La capacidad de almacenamiento (S) para cada árbol se calculó por el método de **Leyton et al., 1967**. El coeficiente de percolación libre (p) se determina generalmente por la pendiente de la regresión de EI entre P_G para lluvias menores a un milímetro (**Rutter et al., 1975; Gash y Morton, 1978**). Sin embargo, en este estudio y por ausencia de registros menores a un milímetro, el cálculo de p se obtuvo con la pendiente de la regresión de EI y P_G usando todos los datos. En el caso de los parámetros de St y pt se siguió la misma metodología que con S y p pero con la regresión de Sf y P_G .

Para el caso de los parámetros Do y b requeridos por el modelo de Rutter, se obtuvieron basándose en la metodología planteada por **Schellekens et al. (1999)** quienes dicen que:

“El valor de D_o obtenido originalmente por el modelo de Rutter es $0.0019 \text{ mm min}^{-1}$, por lo que para copas con un índice de área foliar (LAI) diferente, se espera que $D_o = 0.0019LAI/LAI_c$, donde LAI_c es el índice de área foliar para el bosque de pino donde Rutter realizó su estudio. Si se asume que S es directamente proporcional al LAI , D_o puede ser igual a $0.0019S/S_c$ donde S_c es el valor de la capacidad de almacenamiento obtenido por Rutter *et al.* (1975) (1.05mm). Este mismo razonamiento puede ser utilizado para obtener el valor de b ”.

Una vez obtenidos estos parámetros se modeló EI , usando en el caso de Rutter las Ecu. 1, 2 y 5 y en el caso de Gash (1979) las mostradas en la Tabla 3 para el modelo de Gash de 1979. Para el cálculo de la evaporación se utilizó en ambos casos las ecuaciones 3 y 4. (ver Capítulo 3).

Como complemento al estudio se construyó un modelo de regresión lineal múltiple para cada árbol, utilizando por evento, las medias de las tres variables complementarias (precipitación total, humedad relativa, temperatura ambiental, radiación neta, velocidad del viento, dirección del viento, intensidad e intensidad máxima) que tuvieran el mayor grado de correlación con EI , sin que éstas tuvieran una diferencia entre ellas.

Finalmente se realizó un análisis para calcular la bondad de ajuste de cada uno de los tres modelos utilizando los indicadores estadísticos:

Eficiencia

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (y_i^{model} - y_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^{i=n} (\bar{y}^{obs} - y_i^{model})^2} \quad (10)$$

Sesgo

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (y_i^{model} - y_i^{obs}) \quad (11)$$

Raíz cuadrada del error cuadrático medio

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (y_i^{model} - y_i^{obs})^2} \quad (12)$$

6. RESULTADOS

6.1. Vegetación

Las comunidades vegetales de los tres sitios de estudio fueron caracterizadas con base a la densidad, dominancia y frecuencia por unidad de superficie, estimando su valor de importancia mediante las Ecuaciones 6 y 7. Los resultados de los muestreos efectuados entre julio y septiembre del 2006 revelaron que El Carmen cuenta con 11 especies dominantes, Amazcala 10 y Cadereyta 6, y sólo 4 de ellas fueron frecuentes en los tres sitios: *Acacia farnesiana* (Huisache), *Prosopis laevigata* (Mezquite), *Opuntia imbricata* (Cardenche) y *Opuntia spp.* (Nopal) (Tabla 5).

Por orden de magnitud del valor de importancia (V.I.) de las especies comunes entre sitios, el pasto fue la especie dominante absoluta con un valor V.I >100 , tanto en Amazcala como en El Carmen, seguida por la *Acacia farnesiana* con un V.I de 49 y 69 en Cadereyta y El Carmen, respectivamente. En tanto la *Prosopis laevigata* tuvo los valores más bajos en comparación de las otras dos especies, de 44, 41 y 18 para el Carmen, Amazcala y Cadereyta, correspondientemente.

En Amazcala y El Carmen fueron reveladas 9 especies en común, de las cuales sólo tres de ellas reflejaron dominancia en ambos sitios: pastos, *Acacia farnesiana* y *Prosopis laevigata*. Así mismo, fueron detectadas tres especies con baja representación, la *Mimosa biuncifera* en Amazcala y la *Verbesina virgata* y *Zaluzania augusta* en el Carmen.

En Cadereyta de las 11 especies existentes, las tres especies de valor de importancia resultaron *Acacia farnesiana*, Compositae (herbácea) y *Opuntia spp.* La alta frecuencia de vegetación herbácea es la manifestación de un sitio altamente perturbado, posiblemente ocasionado por la deforestación del lugar, encaminada al cambio de uso del suelo para agricultura o bien a un alto grado de presión antropogénico originado por el desarrollo rural-urbano (Tabla 5).

Como se muestra en la Figura 12 la vegetación con mayor cobertura fue localizada en El Carmen, donde la densidad de vegetación por cada 100 m² resultó de 150.20 m², en segundo término Amazcala con 129.88 m² y Cadereyta con tan solo 90.4 m². En este

contexto de cobertura vegetal es pertinente señalar que “El Carmen” puede exhibirse como un sitio con un buen grado de conservación o bien considerarse como un sitio cerrado, Amazcala como un sitio en desequilibrio o bien semiabierto y Cadereyta como altamente perturbado o abierto.

A saber, los Mezquites y Huizaches son individuos claves en los ecosistemas localizados en las zonas de Amazcala y El Carmen debido a que son especies generadoras de microclima favorable para la conservación de la humedad del suelo y crean condiciones ambientales que soportan el desarrollo de las denominadas “islas de fertilidad”. Por su parte los pastos que son comunidades de mayor dominancia por unidad de superficie, no sólo participan como especies anuales sino también tienen una contribución en los procesos de superficie aún cuando se secan, permanecen en el suelo en su papel de residuos vegetales formando lechos que reducen la erosión hídrica y eólica, retardando la pérdida de humedad del suelo por evaporación y favoreciendo la infiltración en la zona de raíces, es decir, si los pastos se extraen del sistema, la estructura, cobertura y función de las islas de fertilidad se verían seriamente afectadas.

En la Figura 13 se representa la distribución espacial y proyección horizontal del área de la copa de los Mezquites y Huizaches muestreados en los tres sitios. Puede observarse una mayor presencia de *Prosopis laevigata* y cierta uniformidad del tamaño del área de la copa en El Carmen en comparación de Amazcala y Cadereyta. En cambio, en Cadereyta la *Acacia farnesiana* es prácticamente dominante, además puede observarse que la distribución de ambas especies tiende a ser uniforme tanto en individuos como en tamaño del área de copa.

En la Figura 14 se muestra la composición de la estratificación vertical de la vegetación para los tres sitios de estudio, observándose tres estratos principales. En El Carmen y en Amazcala destacan el estrato inferior con alturas <1 m y el estrato superior con árboles entre 3-4 m. En Cadereyta dominan los estrato medio e inferior, el primero con vegetación con alturas entre 1-2.5 m y el segundo, conformado por pastos, herbáceas y algunos arbustos, con alturas < 0.5 m.

Tabla 5. Especies de Valor de Importancia para los sitios de muestreo

Sitio	Especie	Den. Relativa	Dom. Relativa	Frec. Relativa	V.I
El Carmen	<i>pasto</i>	51.88	1.31	51.69	104.88
	<i>Acacia farnesiana</i>	0.89	47.56	1.12	49.57
	<i>Prosopis laevigata</i>	5.1	34.53	4.49	44.12
	<i>Bahia absinthifolia</i>	9.76	0.36	8.99	19.1
	<i>Biznaga</i>	8.65	0.41	7.87	16.92
	<i>Aloysia lycioides</i>	6.43	1.52	6.74	14.69
	<i>Opuntia imbricata</i>	4.88	4.6	4.49	13.97
	<i>Haplopappus spinolossus</i>	5.76	0.63	5.62	12.01
	<i>Verbesina virgata</i>	3.55	2.43	5.62	11.6
	<i>Zaluzania augusta</i>	0.44	5.22	1.12	6.79
	<i>Opuntia spp.</i>	2.66	1.44	2.25	6.34
Amazcala	<i>pasto</i>	65.81	0.58	58.06	124.5
	<i>Prosopis laevigata</i>	5.98	46.41	6.45	58.85
	<i>Acacia farnesiana</i>	6.83	28.45	6.45	41.74
	<i>Opuntia spp</i>	3.41	13.22	3.22	19.87
	<i>Mimosa biuncifera</i>	5.12	8.8	3.22	17.16
	<i>Aloysia lyciodes</i>	1.7	1.85	3.22	6.79
	<i>Bahia absinthifolia</i>	3.41	0.08	3.22	6.73
	<i>Haplopappus spinosus</i>	2.56	0.1	3.22	5.89
	<i>Biznaga</i>	1.7	0.03	3.22	4.96
		<i>Opuntia imbricata</i>	0.85	0.05	3.22
Cadereyta	<i>Acacia farnesiana</i>	15.38	38.78	15.38	69.55
	<i>Compositae</i>	19.23	11.21	15.38	45.82
	<i>Opuntia spp.</i>	11.53	25.5	7.69	44.73
	<i>jara</i>	3.84	9.78	7.69	21.32
	<i>Opuntia imbricata</i>	9.61	3.5	7.69	20.8
	<i>Prosopis laevigata</i>	3.84	7.35	7.69	18.89

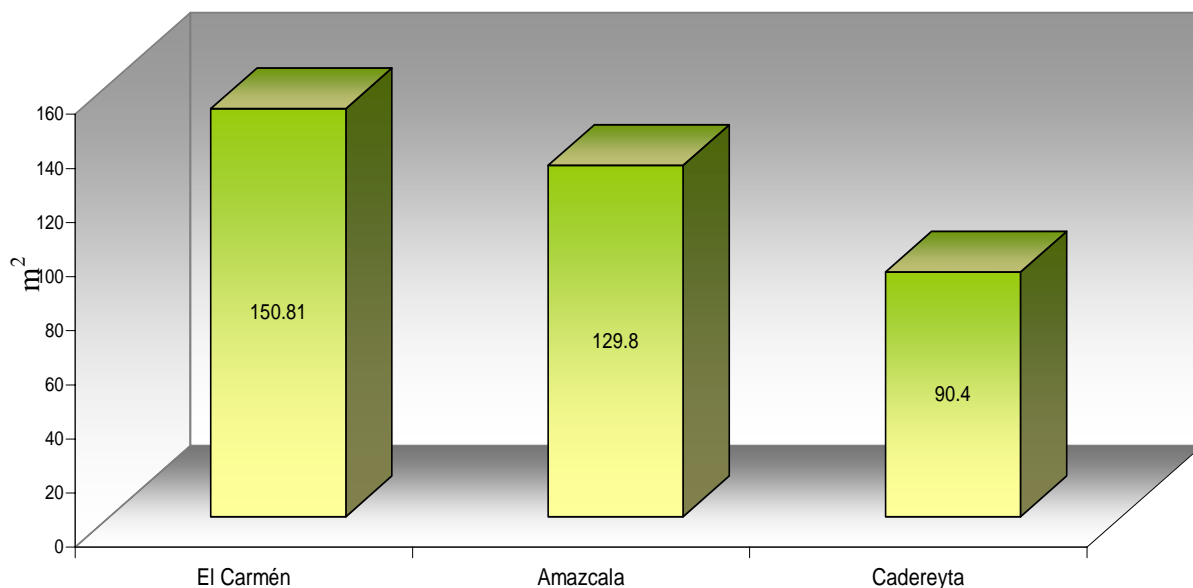
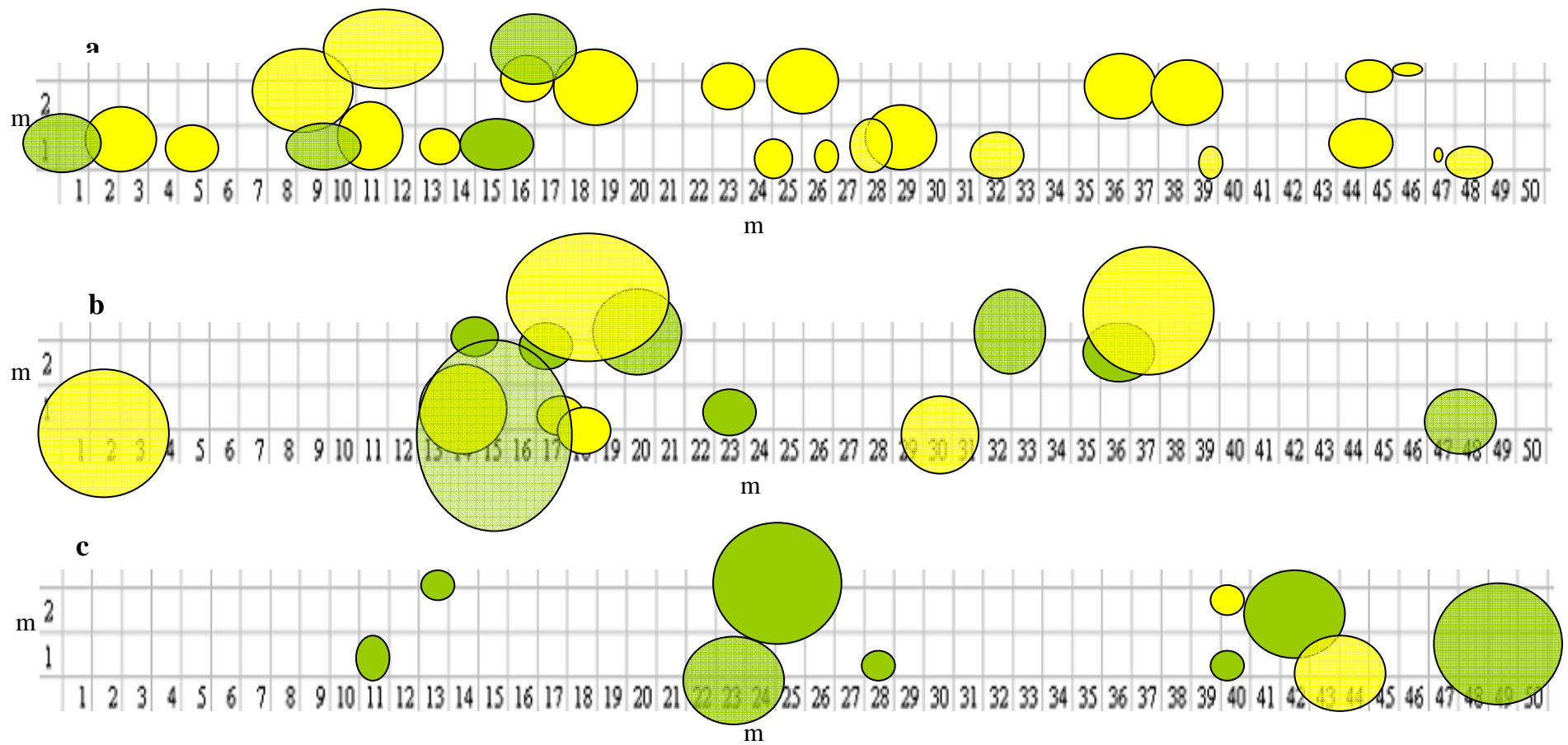


Figura 12. Cobertura vegetal (m²) de los tres sitios de estudio.

Es importante destacar que la información de la cobertura vegetal permite valorar la importancia de la estructura vertical o estratificación de la vegetación en el papel que desempeña la vegetación en el proceso de interceptación, la evaporación por transpiración y en la protección del suelo contra la erosión hídrica, así como en la regulación del escurrimiento superficial e infiltración o recarga de los acuíferos, a diferencia de la estructura horizontal de la vegetación, en su función como filtros de agua y luz. Condiciones que son discutidas con más amplitud en los capítulos siguientes.



Amarillo: representa *Prosopis laevigata*
 Verde: representa *Acacia farnesiana*

Figura 13. Esquema de distribución de la cobertura de *Prosopis laevigata* y *Acacia farnesiana*. a) El Carmen, b) Amazcala y c) Cadereyta.

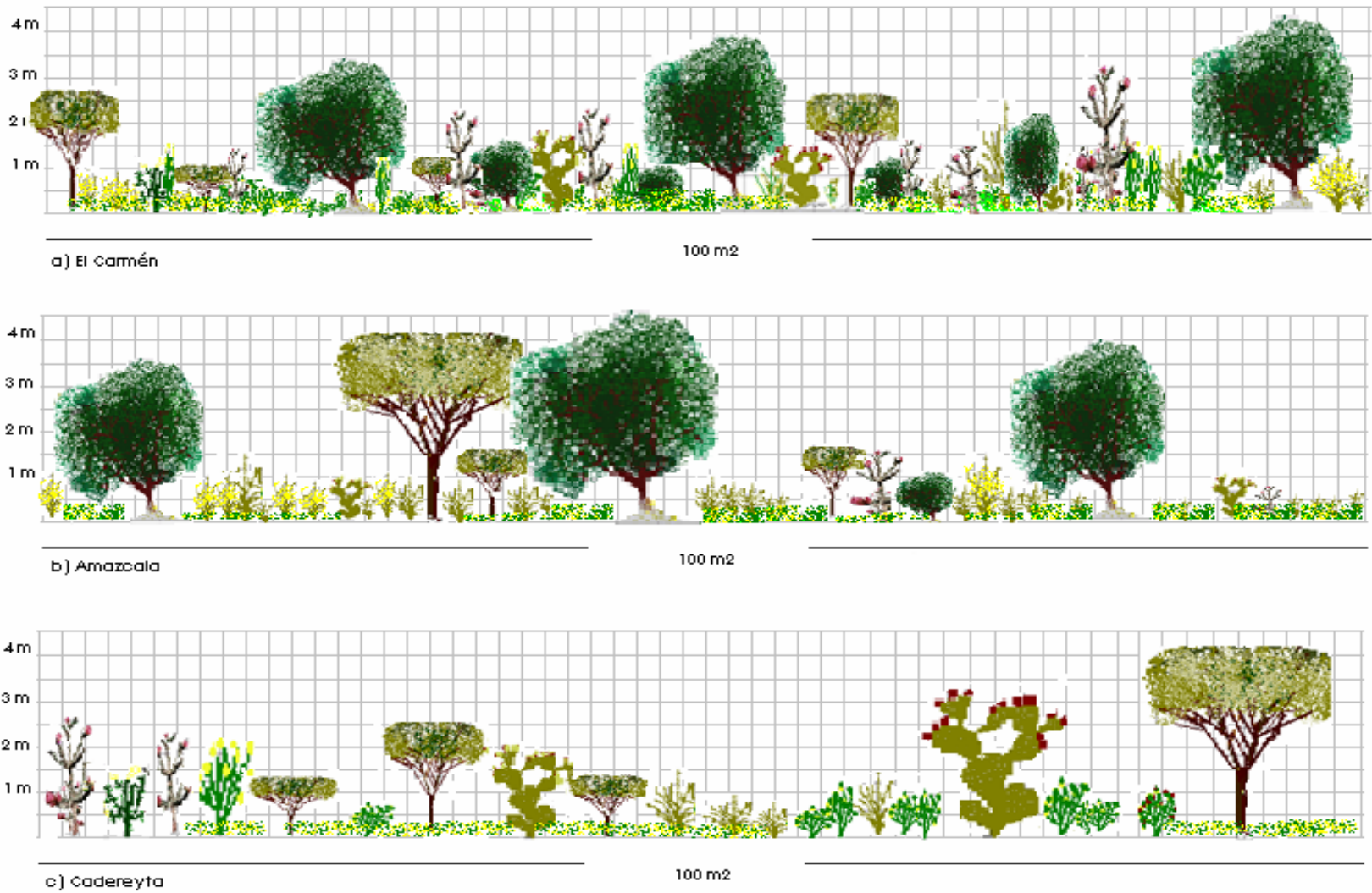


Figura 14. Estratificación de la vegetación en los 3 sitios de estudio.

6.2. Climatología de los sitios experimentales (2006)

6.2.1. Precipitación (P_G)

La **Comisión Nacional del Agua (CNA)** y el **Centro Nacional de Desarrollo Municipal, Gobierno del Estado de Querétaro** (1999) reportan que la precipitación media anual en la región semidesértica del altiplano mexicano fluctúa entre los 500 a los 600 mm, sin embargo, como el ciclo anual del agua tiene una dinámica particular año con año, en este estudio fue analizado el ciclo del año 2006 a fin de referenciar el año de estudio respecto a la precipitación media histórica.

En el 2006 la precipitación anual para El Carmen alcanzó 781 mm, de los cuales 504 mm fueron registrados durante el período de estudio de la intercepción DOY 173-DOY 285 (22 de junio-12 de octubre). Durante este período se presentaron 15 eventos o tormentas produciendo una precipitación de 352 mm, precipitación equivalente al 45% de la precipitación anual del 2006 y el 64% de precipitación media anual histórica. De esta forma puede considerarse un año húmedo, en otras palabras en 2006 la precipitación anual fue 1.4 veces mayor en comparación de la media histórica.

En Cadereyta la precipitación anual resultó de 746 mm, tan solo 6% (35 mm) menos que en El Carmen. Durante el periodo DOY 147-DOY 288 (27 de mayo-15 de octubre) la estación climatológica ubicada en el sitio experimental registró 460 mm, representando el 61% de la precipitación anual. Debido a problemas técnicos la estación no operó adecuadamente en los períodos del 6-9 de junio y del 5-19 de julio. Al igual como ocurrió en el sitio del Carmen, 2006 también fue un año húmedo en Cadereyta, 1.36 más que la media anual histórica.

La precipitación registrada en estación de Amazcala abarcó el período comprendido entre DOY 229-DOY 365 (16 de agosto-31 diciembre) y fue de 457 mm. En comparación con la precipitación media anual corresponde al 83%, sin embargo, podría esperarse un comportamiento semejante a los otros dos sitios, por una lado porque Amazcala se encuentra ente los dos sitios, y por otro, porque el comportamiento regional también así lo

deja ver, aunado a que solamente fue registrado un tercio del año, en otras palabras, también puede considerarse como un año húmedo.

En general el ciclo anual del agua en los tres sitios experimentales muestra un comportamiento regional por lo cual podríamos establecer que 2006 es un año húmedo. En la Figura 15 se muestra la precipitación acumulada a lo largo del año y destaca en un recuadro el período de medición de las pérdidas por intercepción, las cuales se detallan en el capítulo 5.4.

La Figura 15 muestra la lluvia acumulada durante 2006. En la Figura 15a puede verse la evolución de la precipitación en el sitio El Carmen, y en el recuadro la lluvia considerada para evaluar las pérdidas. Del mismo se muestran los resultados en las Figuras 15b y 15c para Amazcala y Cadereyta, respectivamente.

La caracterización de la precipitación en los tres se puede consultar en el trabajo realizado por **Lambraño (2007)**. En las Tablas 7 pueden observarse los valores promedios de la intensidad media, máxima, y precipitación.

Lambraño (2007), estudió el comportamiento de la precipitación en las estaciones climatológicas de Cadereyta y El Carmen, caracterizando la precipitación mediante la precipitación media, intensidad media, intensidad máxima y duración de los eventos. Encontró un comportamiento muy similar en la precipitación media mensual, Cadereyta con 6.90 mm y El Carmen 6.14mm. Para los valores de intensidad media resultaron de 2.31mmh^{-1} y 2.88mmh^{-1} para Cadereyta y Carmen, correspondientemente. En ese mismo orden la intensidad media máxima fue de 13.31mmh^{-1} y 13.22mmh^{-1} . Con respecto a la duración halló que el 80% de los eventos tiene como máximo una duración de 4 horas, en ambas estaciones.

A partir de las caracterizaciones de la precipitación por evento, puede establecerse que el tipo de precipitación predominante en la zona del corredor continental donde se sitúan los sitios Cadereyta y El Carmen es de tipo frontal o colectivo, presentándose en algunos casos las precipitaciones de frente frío y en otros de frente caliente.

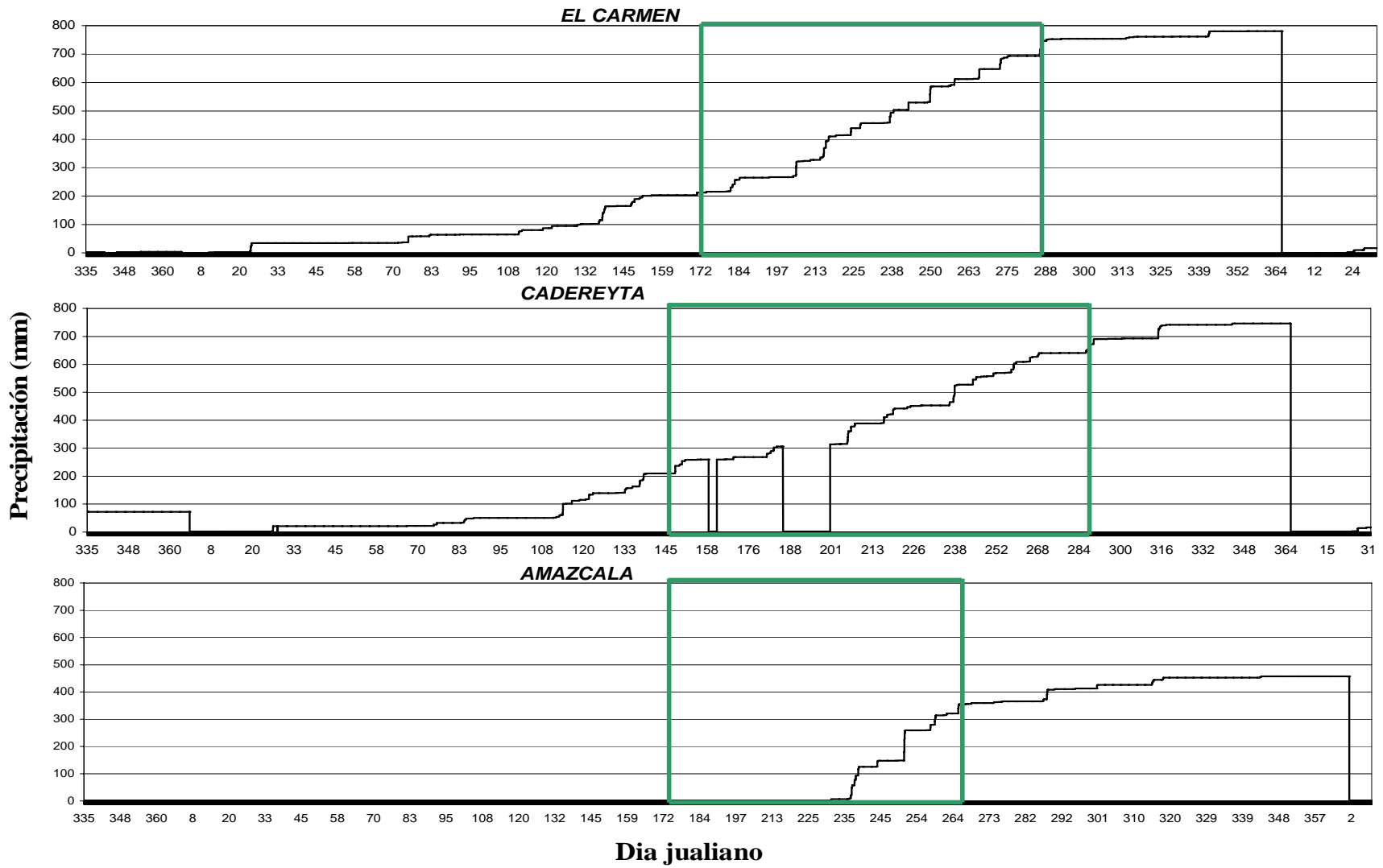


Figura 15. Pluviogramas para los tres sitios experimentales durante el 2006. En el recuadro se observa el período de estudio en que se midió la intercepción.

6.2.2. Humedad relativa (*Hr*)

El análisis de los registros de la humedad relativa (*Hr*) durante 2006 revelaron para los tres sitios experimentales un comportamiento distintivo de región semidesértica. Durante la primera parte de año en el Carmen, el 58 % del tiempo la humedad mostró un amplitud importante en los gradientes diurnos, entre las 12:00-16:00 valores cercanos al 5% *Hr* y durante el atardecer hasta la primeras horas del día (19:00-9:00) valores por arriba del 50% de *Hr*. En Cadereyta durante el 57% del tiempo de la primera parte del año fue observado un comportamiento parecido al señalado para El Carmen. En cuanto al sitio de Amazcala, el cual se localiza al sur y entre Cadereyta y El Carmen, manifestó un comportamiento análogo a ambos sitios.

En la Figura 16 puede apreciarse la evolución a cada 20 minutos durante los días DOY 232, DOY 233 y DOY 234 correspondientes al periodo de lluvias y contenidos dentro del período de estudio de la intercepción. No obstante a ser el período húmedo del año, el comportamiento de la amplitud de la humedad es muy parecido entre los tres sitios, como también ocurre en la época de estiaje, sin embargo, los mínimos adquieren valores del 40 % de *Hr*, entre las 18:00 y 19:00 horas y del 94 % de 05:00 y 06:00 de la madrugada, manteniendo una media de 70%.

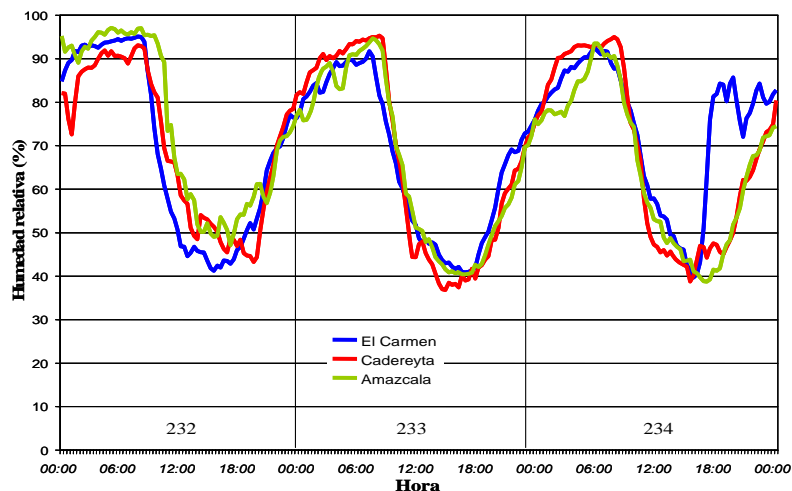


Figura 16. Comportamiento diario de la humedad durante el período de estudio de la intercepción, para los tres sitios experimentales (232, 233 y 234 DOY).

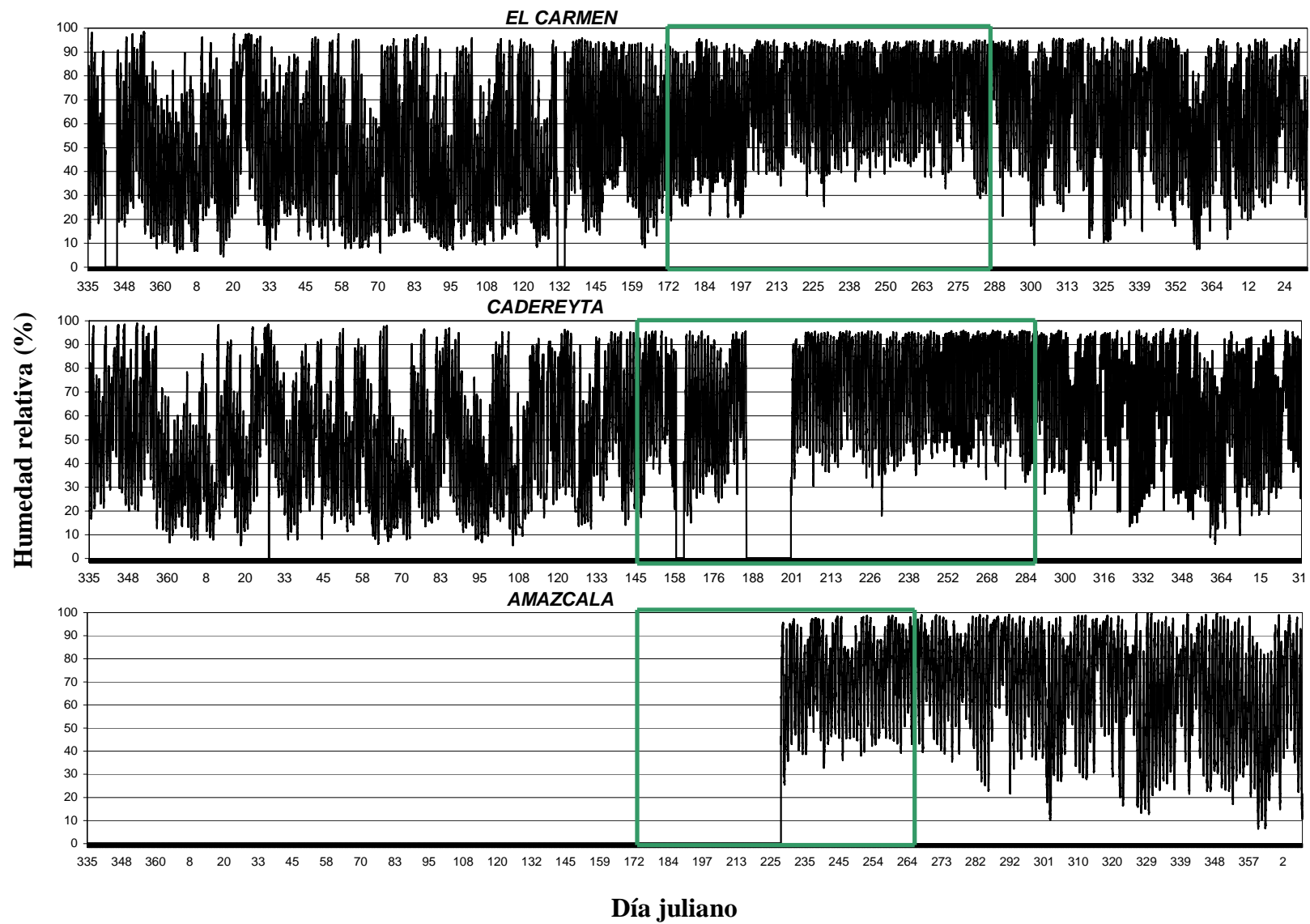


Figura 17. Humedad relativa para los tres sitios experimentales durante el 2006. En un recuadro se observa el período de estudio en que se midió la intercepción y los valores nulos en los que no se registro la humedad.

5.2.3. Temperatura ambiental (T_a)

En El Carmen la temperatura media anual para el 2006 resultó de 15.7°C , dos grados por debajo de la media anual reportada, la temperatura máxima llegó a los 32°C y la mínima fue de -9°C . Durante el período de estudio de la interceptación la temperatura osciló entre los 10°C en la noche y 25°C en el día. Para Cadereyta la temperatura media anual fue semejante a la registrada en El Carmen, 2°C por debajo de los 16.7°C reportados para la zona, la temperatura máxima alcanzó los 32°C y la mínima -5°C . En el caso de Amazcala no fue posible determinar el comportamiento anual debido a que faltaron registros durante el año incluso durante el período de estudio de la interceptación. Sin embargo, con los datos del último tercio de año se efectuó una comparación del comportamiento diario de la temperatura con El Carmen y Cadereyta. Como puede observarse en la Figura 18, la temperatura diaria en Amazcala muestra un comportamiento similar en los otros dos sitios, lo que hace pensar que los registros faltantes y el valor de la temperatura media anual también pueden ser semejantes.

En términos generales la oscilación de térmica en los tres sitios, entre día y noche muestran un comportamiento regular con períodos bien definidos para las diversas estaciones del año (Figura 19), condición que permite corroborar que los sitios seleccionados para este estudio se localizan dentro de la misma región semidesértica del altiplano mexicano.

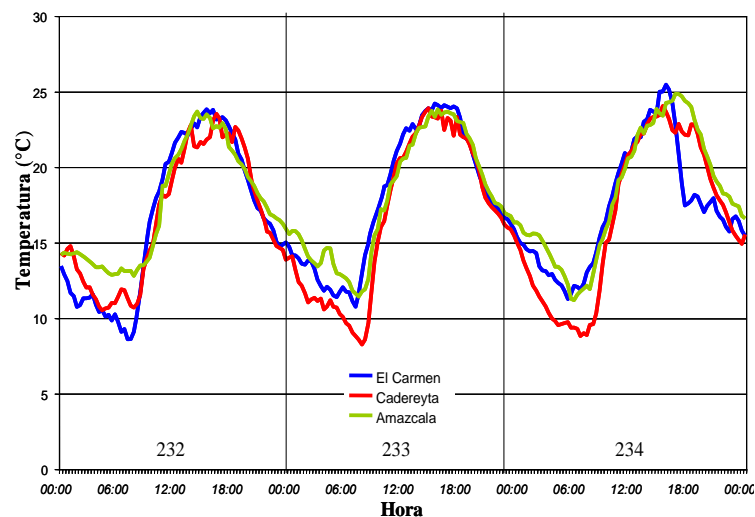


Figura 18. Comportamiento diario de la temperatura durante el período de estudio de la interceptación para los tres sitios experimentales (232, 233 y 234 DOY).

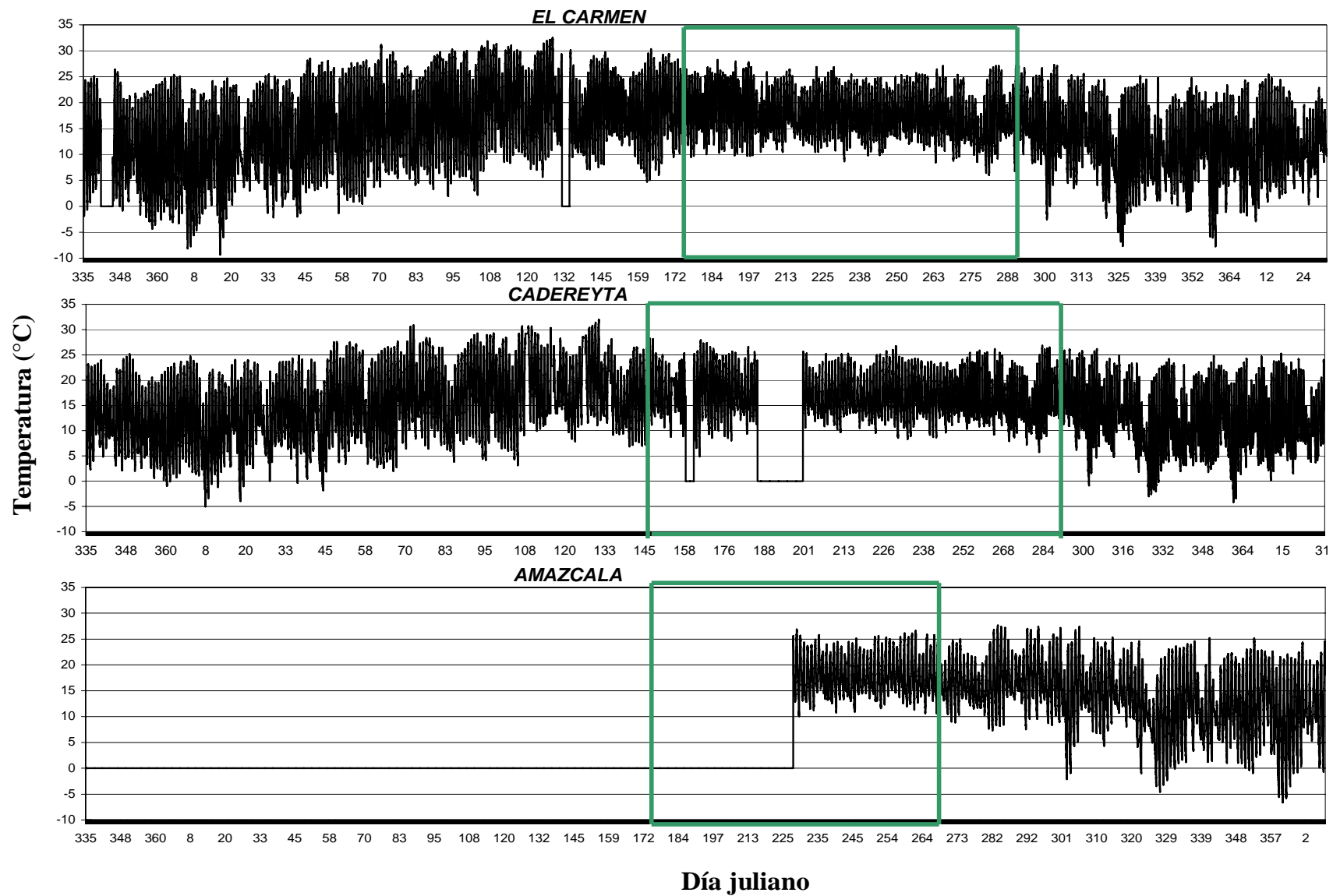


Figura 19. Temperatura para los tres sitios experimentales durante el 2006. El recuadro muestra el período de estudio en el que se midió la intercepción y en ceros los períodos en los que no se registró la humedad.

6.2.4. Radiación neta (R_n)

En primer termino es pertinente señalar que en el sitio de El Carmen se presentaron algunos problemas técnicos que impidieron registrar la R_n en forma continua al largo del año, por ello, se dispuso de mediciones en ciertos períodos, 12 días en enero, 15 en febrero y 30 entre abril, mayo y junio. Los datos disponibles para este sitio muestran que durante la noche y a lo largo del año la radiación se mantiene con una amplitud de -80 y -100 W/m^2 , en cambio Cadereyta y Amazcala registran valores ligeramente inferiores a El Carmen. Del mismo modo se observa un desfase de horario (Figura 20) respecto a los otros 2 sitios, el cual puede atribuirse a la altitud del sitio y libre de vegetación que provoque un efecto de pantalla de forma que permite mayor iluminación durante la alborada, situación contraria durante el crepúsculo del día.

En términos globales la R_n en los tres sitios muestra un comportamiento semejante, puede observarse que durante el día y lo largo del año una alta disposición energía para la evaporación y proceso de fotosíntesis, con valores máximos entre 500 - 700 W/m^2 , y algunos días cercana a los 800 W/m^2 (Figura 21).

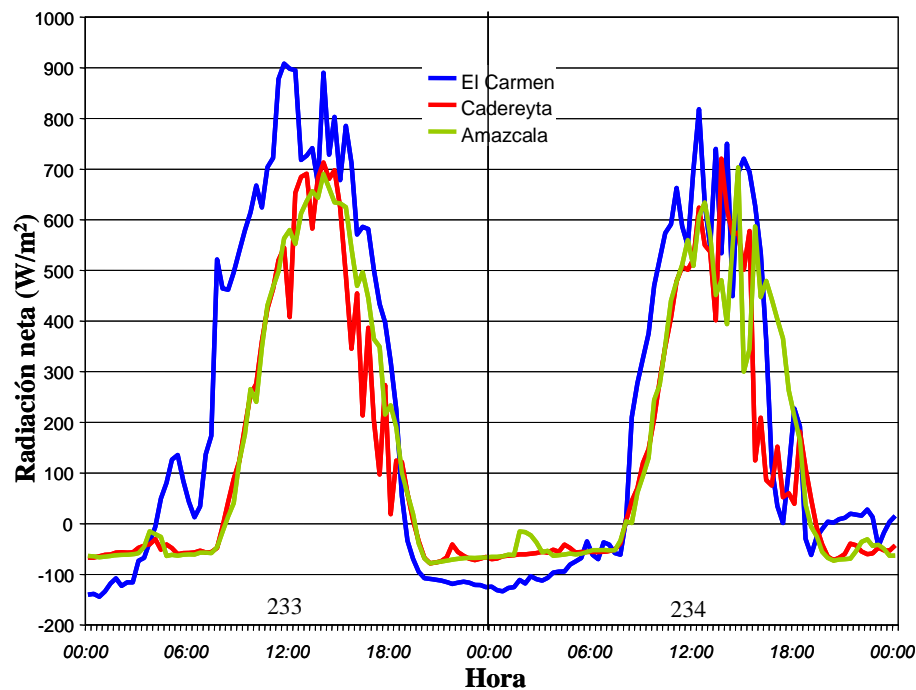


Figura 20. Comportamiento diario de la radiación neta durante el período de estudio de la intercepción para los tres sitios experimentales (233 y 234 DOY).

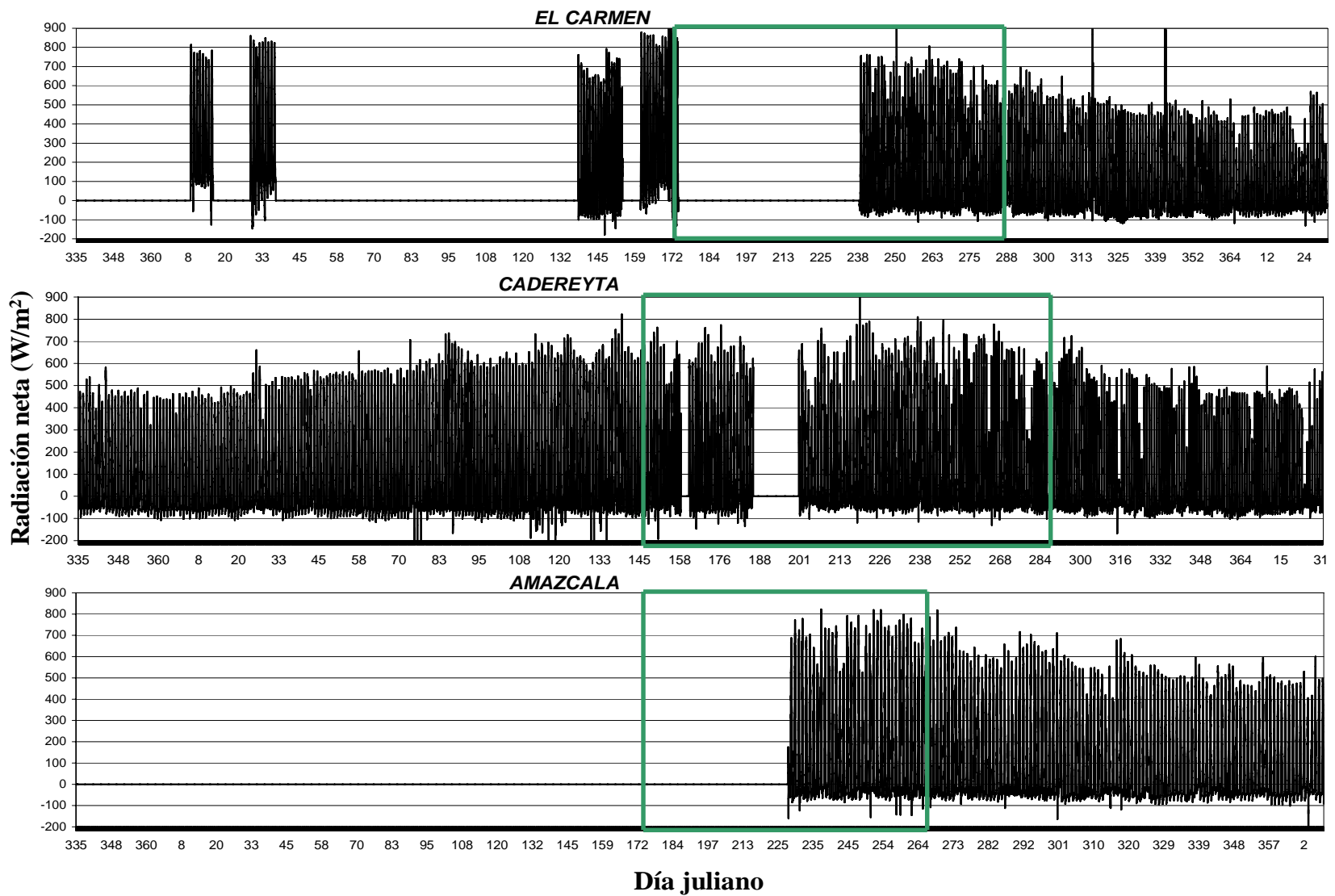


Figura 21. Radiación neta para los tres sitios experimentales durante el 2006. En el recuadro negro se observa el período de estudio en que se midió la intercepción y en ceros los períodos en los que no se registro la radiación neta.

6.3. Evaporación (*E*) (2006)

Debido a que la evapotranspiración para El Carmen se midió con el ET gauge durante 5 períodos en el 2006 durante los días julianos 100 a 138, 157 a 161, 172 a 176, 229 a 233 y 289 a 301, se requirió hacer el cálculo de dicha evapotranspiración con la ecuación de Penman-Monteith, para los días en que se contó con datos de la radiación neta.

Para que la evapotranspiración diaria calculada con la ecuación de Penman-Monteith se ajustara a la calculada con el ET gauge, se probaron distintos valores de resistencia superficial hasta que ambos valores de evapotranspiración no presentaran diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$), el valor arrojado de resistencia superficial fue de 75 m/s, mismo que es planteado por la FAO para el cálculo de la evapotranspiración de referencia, de este modo la evaporación en el año para El Carmen fue de 803 mm, sin embargo, la ausencia de registros de radiación para el cálculo de la evapotranspiración durante los días más calurosos, los cuales fueron en total 166, que multiplicados por la media diaria de 5.9 mm registrada para los días cercanos a este período, resultaron 979 mm, lo que nos estaría arrojando un total de 1782 mm de evaporación (Figura 22).

El mismo procedimiento para el cálculo se siguió en Cadereyta donde el valor obtenido para la resistencia superficial también fue de 75 m/s ($p > 0.05$), en este sitio sólo faltan registros para 13 días en el año, en los que de acuerdo a los datos cercanos la media diaria de la evaporación para estos días es de 4.5 mm dando como resultando 58 mm., que sumados a los 973 mm calculados por la ecuación de Penman-Monteith hacen un total de 1,031 mm de evaporación para este sitio en el 2006.

En el caso de Amazcala no se pudo hacer funcionar el Et gauge, por lo que sólo se cuenta con los registros de la estación obtenidos al final del 2006, para el cálculo de la evaporación mediante el método de Penman-Monteith usando la resistencia superficial de 75 m/s. El total de evaporación para el período mencionado anteriormente fue de 576 mm. Debido a que el comportamiento de Amazcala es muy parecido al de Cadereyta, se supone que ambos evaporaron la misma cantidad.

Considerando que las tierras áridas se definen por la relación de la precipitación con la evapotranspiración potencial (FAO, 2002), se encontró que para el 2006, El Carmen fue el único sitio que se comportó como una zona semiárida y Cadereyta y Amazcala se comportaron como sitios húmedos de acuerdo a los datos reportados por la FAO, esto solamente para el año mencionado, ya que al hacerlo con las medias anuales estos tres sitios caen dentro de los rangos de las zonas semiáridas.

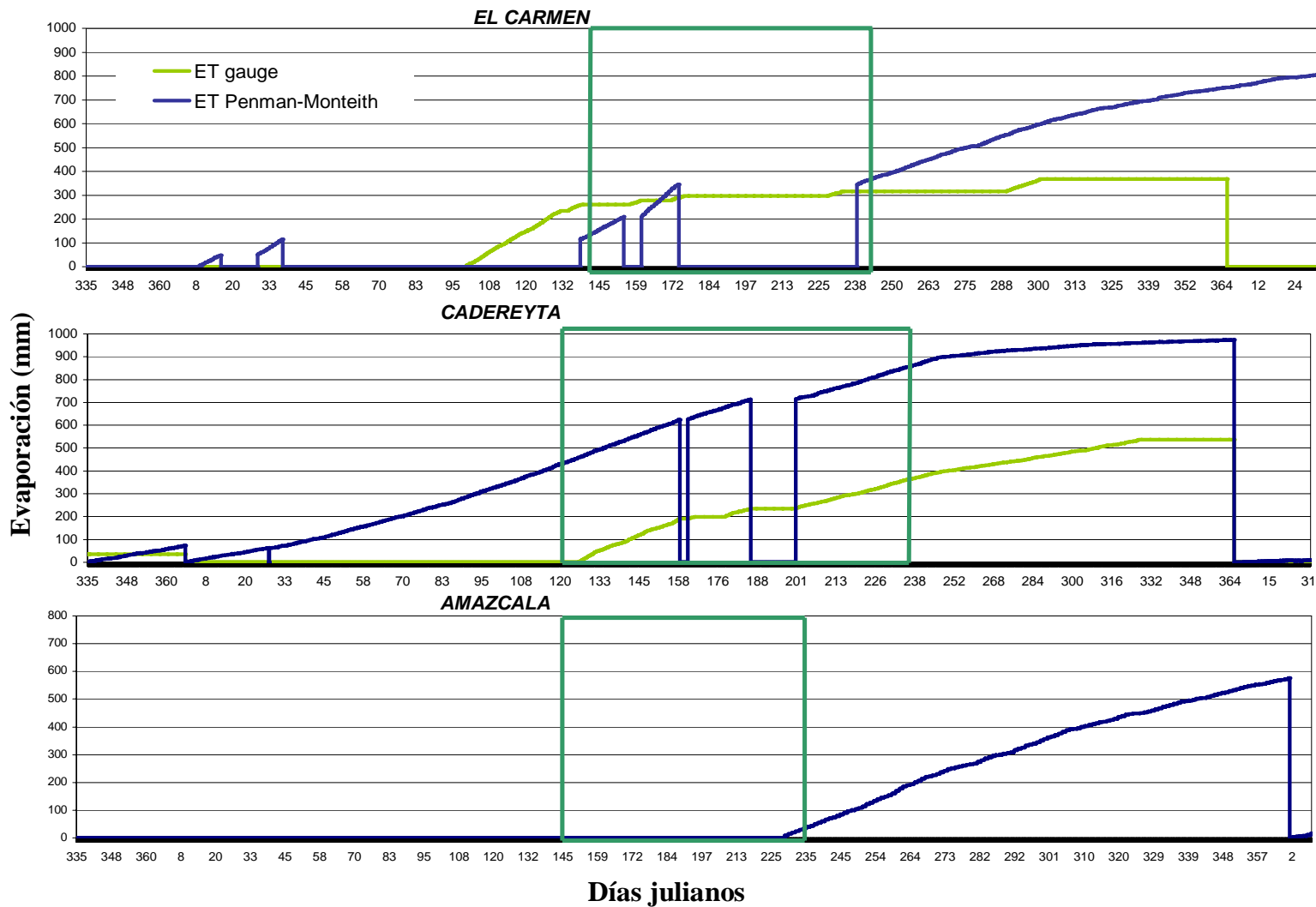


Figura 22. Evapotranspiración diaria para los tres sitios experimentales durante el 2006, calculada con la Ecuación de Penman-Monteith y la registrada con ET gauge.

6.4 Pérdidas por intercepción (*EI*) observadas (2006)

Con base en la metodología descrita en el capítulo 4.5 y la ecuación de balance de masa indicada en la Figura 2 fueron estimadas las pérdidas por intercepción por evento o tormenta de las especies *Acacia farnesiana* y *Prosopis laevigata* en los tres sitios experimentales. En todos los casos fueron medidos el flujo cortical S_f y la percolación T_h particularmente en El Carmen el flujo cortical S_f mostró valores errados por lo que no se consideraron en la estimación de las pérdidas, entre otras razones porque representa un porcentaje poco significativo.

En cada sitio fue diferente la amplitud del período de medición: El Carmen DOY 173-DOY 285, Amazcala DOY 147-DOY 268 y Cadereyta DOY 170-DOY 265, a pesar de ello los tres periodos coinciden con el período de lluvias de los meses de junio-septiembre 2006. En ese mismo orden se registraron 15, 10 y 13 eventos, respectivamente. La precipitación en El Carmen durante período de estudio, registros de dos meses fue de 352.3 mm, equivalentes al 45% de la lluvia registrada en 2006. Los 13 eventos que se presentaron en Cadereyta, produjeron 236 mm equivalente al 32% de la precipitación anual. En cambio en Amazcala en el periodo de medición de la precipitación de 237 mm, equivalente al 50% de la media histórica de la región.

En la Figura 23 se muestra la comparación la precipitación y la intercepción durante los periodos de observación. *Prosopis laevigata* interceptó el 21.51% (75.77mm), 63.9% (100.5 mm) y 34.17% (36.2 mm) de la precipitación registrada en El Carmen, Cadereyta y Amazcala, respectivamente. En ese mismo orden, en el caso de *Acacia farnesiana* la intercepción fue de 20.11% (70.84 mm), 15% (35.47 mm) y 30.64% (36.6 mm). Cabe destacar que los porcentajes son semejantes entre las dos especies del sitio de El Carmen, y diferentes entre en Cadereyta y Amazcala. En contraste, los porcentajes entre las especies de los tres sitios produjeron valores de magnitud similar a los reportados en otros estudios (Návar y R. Bryan, 1990; Navar, 1993) para *Prosopis laevigata* 14% < *EI* < 42% y para *Acacia farnesiana* 14% < *EI* < 35%. Independientemente de las características de la precipitación, las diferencias entre especies pueden atribuirse a arquitectura particular de cada árbol, como puede observarse en la Tabla 4.

El análisis de las pérdidas por evento permitió establecer una correlación entre los flujos de percolación, (T_h), cortical (S_f) y en consecuencia las pérdidas por intercepción por especie y por sitio. Las pérdidas por evento se muestran en la Tabla 6. En el caso particular de Amazcala sólo fueron considerados 6 de los 10 eventos registrados, los tres faltantes fueron excluidos porque la estación no registro la dinámica de la lluvia y sólo se dispuso de los totales de la precipitación registrados por la estación más cercana administrada por la CEA-Querétaro.

Sin embargo, con los datos obtenidos de S_f por cada individuo de las dos especies en Amazcala y Cadereyta se realizó una correlación para poder determinar los valores faltantes. Para *Acacia farnesiana* se obtuvo que $S_f = 0.0502 P_G - 0.1693$ con una $R^2 = 0.6618$ y para *Prosopis laevigata* $S_f = 0.0477 P_G - 0.3454$ con una $R^2 = 0.8282$ (Figura 25 y Tabla 6).

Se encontró que no existen diferencias significativas para EI entre los tres individuos de *A. farnesiana* ($p > .05$), ni para los individuos de *P. laevigata* ($p > .05$), lo cual se mantuvo incluso al hacer la comparación entre especies para cada uno de los sitios ($p > .05$). Probablemente estos resultados se deben a que éstas no presentan grandes diferencias morfológicas entre ellas, lo que hace que el comportamiento de la intercepción durante un evento de lluvia sea similar.

En la Figura 23 se aprecia que las similitudes de EI son muy marcadas entre *A. farnesiana* y *P. laevigata* para cada sitio, sin embargo, entre sitios esta tendencia disminuye debido a que las características de las precipitaciones y las condiciones climáticas en que se dieron fueron diferentes como se muestra en la Tabla 7, donde además se muestran los valores promedio velocidad y dirección del viento, la radiación neta y la intensidad máxima por considerar que inciden en el proceso de intercepción, sobre todo porque muestran una variación significativas entre sí.

En la Figura 24 se muestran las regresiones entre EI y P_G las cuales son muy altas en general para los tres sitios considerando que existen otras variables que explican el comportamiento de EI .

Tabla 6. Repartición de P_G por individuo y por evento en el proceso de intercepción.

Sitio	DOY	P_G (mm)	<i>Sf</i>				<i>Th</i>				<i>Pn (Sf+Th)</i>				<i>EI</i>			
			<i>A. farnesiana</i>		<i>P. laevigata</i>		<i>A. farnesiana</i>		<i>P. laevigata</i>		<i>A. farnesiana</i>		<i>P. laevigata</i>		<i>A. farnesiana</i>		<i>P. laevigata</i>	
			mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
El Carmen	173	3.8	0.0	0.1	0.0	0.0	3.6	94.4	3.1	81.4	3.6	94.4	3.1	81.4	0.2	5.6	0.7	18.6
El Carmen	181	24.8	1.1	4.3	0.8	3.4	17.7	71.1	16.7	67.1	18.7	75.4	17.5	70.5	6.1	24.6	7.3	29.5
El Carmen	184	23.7	1.0	4.2	0.8	3.3	18.1	76.6	16.6	70.2	19.1	80.9	17.4	73.5	4.5	19.1	6.3	26.5
El Carmen	219	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	87.8	3.3	89.0	3.2	87.8	3.3	89.0	0.5	12.2	0.4	11.0
El Carmen	224	24.7	1.1	4.3	0.8	3.4	18.1	73.2	18.0	72.8	19.1	77.5	18.8	76.2	5.6	22.5	5.9	23.8
El Carmen	228	17.2	0.7	3.9	0.5	2.8	12.4	72.2	15.1	88.1	13.1	76.1	15.6	90.8	4.1	23.9	1.6	9.2
El Carmen	238	44.3	2.0	4.6	1.8	4.0	34.5	77.9	34.4	77.7	36.6	82.5	36.2	81.7	7.7	17.5	8.1	18.3
El Carmen	242	26.6	1.1	4.3	0.9	3.5	21.8	82.1	21.1	79.1	23.0	86.4	22.0	82.6	3.6	13.6	4.6	17.4
El Carmen	250	54.4	2.5	4.7	2.2	4.1	39.3	72.2	43.0	79.1	41.8	76.9	45.3	83.2	12.6	23.1	9.1	16.8
El Carmen	256	5.5	0.1	1.6	0.0	0.0	3.5	63.3	3.3	59.8	3.6	64.9	3.3	59.8	1.9	35.1	2.2	40.2
El Carmen	257	20.3	0.8	4.1	0.6	3.1	17.2	84.9	14.5	71.4	18.1	89.0	15.1	74.5	2.2	11.0	5.2	25.5
El Carmen	265	34.3	1.5	4.5	1.3	3.8	26.6	77.5	24.0	69.9	28.1	82.0	25.3	73.6	6.2	18.0	9.0	26.4
El Carmen	273	40.5	1.8	4.6	1.6	3.9	32.7	80.7	34.7	85.8	34.5	85.2	36.3	89.7	6.0	14.8	4.2	10.3
El Carmen	275	5.8	0.1	1.8	0.0	0.0	4.7	81.8	4.6	79.2	4.8	83.6	4.6	79.2	1.0	16.4	1.2	20.8
El Carmen	285	22.7	1.0	4.2	0.7	3.2	13.1	57.9	12.1	53.1	14.1	62.1	12.8	56.4	8.6	37.9	9.9	43.6
Cadereyta	147	26.8	1.6	5.9	0.8	3.2	21.8	81.5	19.7	73.4	23.4	87.4	20.5	76.6	3.4	12.6	6.3	23.4
Cadereyta	149	17.3	0.4	2.0	0.1	0.6	12.8	74.1	11.6	67.0	13.2	76.1	11.7	67.6	4.1	23.9	5.6	32.4
Cadereyta	183	21.5	0.7	3.3	0.1	0.5	16.0	74.3	15.7	73.1	16.7	77.5	15.8	73.5	4.8	22.5	5.7	26.5
Cadereyta	205	44.8	1.8	3.9	1.6	3.6	38.9	86.9	32.9	73.5	40.7	90.8	34.5	77.1	4.1	9.2	10.3	22.9
Cadereyta	206	17.5	0.5	3.0	0.3	1.8	10.5	60.2	11.3	64.4	11.1	63.3	11.6	66.3	6.4	36.7	5.9	33.7
Cadereyta	207	10.7	0.4	3.3	0.3	3.0	10.2	94.9	6.9	64.8	10.5	98.2	7.3	67.8	0.2	1.8	3.4	32.2
Cadereyta	216	21.1	0.5	2.5	0.4	2.0	17.8	84.4	15.3	72.5	18.3	87.0	15.7	74.5	2.8	13.0	5.4	25.5
Cadereyta	217	8.7	0.2	2.0	0.2	2.4	7.4	85.2	6.5	74.9	7.6	87.3	6.7	77.4	1.1	12.7	2.0	22.6
Cadereyta	219	19.6	0.4	1.8	0.2	1.1	17.0	86.6	15.6	79.7	17.3	88.4	15.8	80.8	2.3	11.6	3.8	19.2
Cadereyta	250	10.7	0.4	3.3	0.1	1.0	9.0	84.3	7.3	68.7	9.4	87.6	7.5	69.6	1.3	12.4	3.2	30.4
Cadereyta	257	10.6	0.2	1.7	0.1	1.0	8.6	82.0	6.2	59.2	8.8	83.7	6.4	60.2	1.7	16.3	4.2	39.8
Cadereyta	264	14.3	0.7	5.0	0.2	1.5	12.7	89.5	9.2	64.4	13.5	94.4	9.4	65.9	0.8	5.6	4.9	34.1
Cadereyta	268	12.7	0.5	4.2	0.4	3.3	9.7	76.6	9.0	70.8	10.3	80.8	9.4	74.2	2.4	19.2	3.3	25.8
Amazcala	170	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	42.6	2.1	68.9	1.3	42.6	2.1	68.9	1.7	57.4	0.9	31.1
Amazcala	185	30.0	2.2	7.5	1.2	4.0	21.3	70.9	26.4	87.9	23.5	78.3	27.6	92.0	6.5	21.7	2.4	8.0
Amazcala	200	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	62.0	4.5	90.6	3.1	62.0	4.5	90.6	1.9	38.0	0.5	9.4
Amazcala	238	51.0	2.2	4.4	2.0	4.0	27.5	54.0	44.5	87.3	29.8	58.4	46.6	91.3	21.2	41.6	4.4	8.7
Amazcala	239	31.9	2.2	7.0	2.0	6.4	19.8	62.2	25.1	78.9	22.1	69.3	27.2	85.3	9.8	30.7	4.7	14.7
Amazcala	244	21.7	1.2	5.7	1.4	6.4	15.1	69.8	17.6	81.3	16.4	75.5	19.0	87.8	5.3	24.5	2.6	12.2
Amazcala	258	20.5	1.7	8.4	1.4	6.8	17.8	86.6	18.7	91.3	19.5	95.0	20.1	98.1	1.0	5.0	0.4	1.9
Amazcala	259	34.2	1.0	3.0	1.7	4.9	22.6	66.3	23.8	69.8	23.7	69.3	25.5	74.7	10.5	30.7	8.7	25.3
Amazcala	262	6.8	0.1	1.5	0.1	1.4	4.6	67.1	4.4	64.6	4.7	68.6	4.5	66.0	2.1	31.4	2.3	34.0
Amazcala	265	32.9	2.6	7.8	1.3	4.0	17.9	54.3	24.4	74.2	20.4	62.1	25.7	78.1	12.5	37.9	7.2	21.9

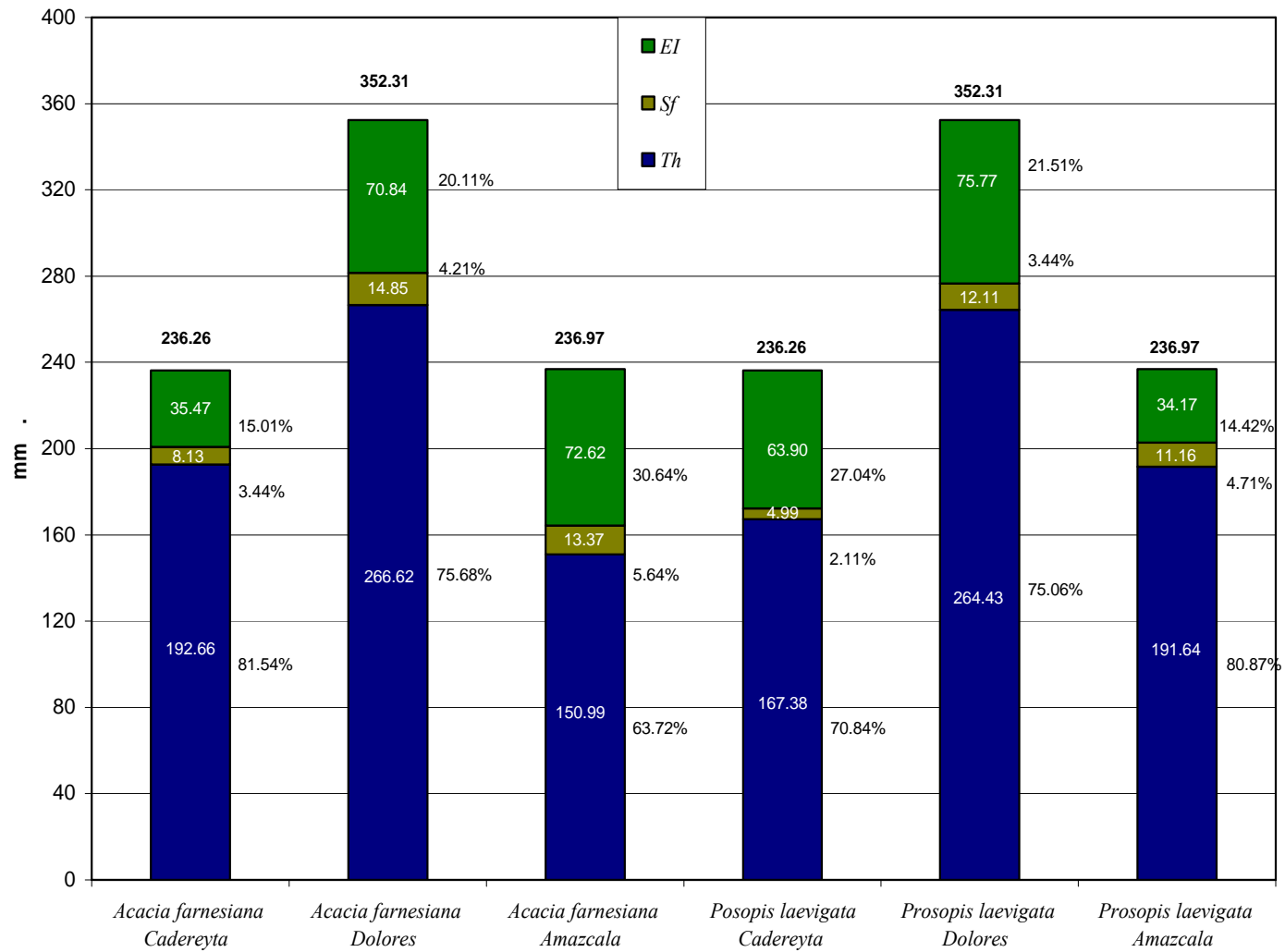


Figura 23. Porcentajes de EI, Sf y (Th+Fd) observados para *A. farnesiana* y *P. laevigata* durante los períodos de estudio en cada sitio experimental.

Tabla 7. Valores promedio de las condiciones climáticas; intensidades máximas por evento medidas durante el proceso de intercepción.

Sitio	DOY	Dirección del viento (°)	Humedad (%)	Presión (mbares)	Temperatura (°C)	Velocidad del viento (m/s)	Radiación neta (w/m ²)	Flujo de calor en el suelo (w/m ²)	Intensidad máxima (mm/h)	Intensidad promedio (mm/h)
El Carmen	173	135.85	56.12	810.86	19.26	2.77	159.51	0.08	5.97	1.03
El Carmen	181	140.87	66.83	810.95	18.31	2.22	221.10	0.02	30.66	6.10
El Carmen	184	123.47	64.41	813.25	19.60	2.26	227.93	0.03	36.48	8.87
El Carmen	219	98.06	88.34	812.56	14.62	4.29	410.76	-0.04	3.60	1.11
El Carmen	224	149.76	84.70	810.18	15.16	2.21	46.25	0.04	11.40	3.90
El Carmen	228	176.15	90.71	813.04	14.47	1.05	-5.72	-0.11	13.20	2.87
El Carmen	238	140.55	83.55	808.83	16.36	1.67	72.69	-0.07	47.10	6.04
El Carmen	242	217.43	87.87	811.75	14.98	2.31	-17.18	0.09	57.60	26.60
El Carmen	250	142.78	91.47	810.50	13.95	0.90	-18.55	-0.12	42.30	6.04
El Carmen	256	137.29	77.30	808.63	18.31	2.90	108.51	0.03	9.30	2.06
El Carmen	257	176.35	86.00	811.06	15.70	2.47	-42.93	0.04	23.10	4.35
El Carmen	265	144.23	78.63	808.52	17.86	2.82	-24.76	0.23	40.50	12.86
El Carmen	273	116.46	85.62	811.80	15.02	2.43	58.18	-0.11	25.80	3.47
El Carmen	275	98.87	92.94	812.92	12.10	1.77	-18.84	-0.36	3.30	1.58
El Carmen	285	216.35	89.68	808.00	16.28	1.17	-18.78	0.26	9.30	4.01
Cadereyta	147	175.83	78.22	795.68	16.55	1.18	-63.65	-0.14	21.90	6.70
Cadereyta	149	234.82	71.93	797.13	18.37	1.15	140.62	-0.07	21.30	3.99
Cadereyta	183	225.69	75.84	798.77	16.79	1.00	84.61	-0.01	18.18	3.08
Cadereyta	205	173.26	92.15	797.48	14.70	1.05	-16.64	-0.08	13.59	5.84
Cadereyta	206	186.26	88.43	798.68	14.34	0.78	-30.52	-0.23	13.20	3.28
Cadereyta	207	206.10	90.41	799.80	14.31	1.13	-22.26	-0.14	7.20	4.59
Cadereyta	216	126.85	89.28	798.16	14.57	0.92	-28.22	0.17	21.90	9.09
Cadereyta	217	181.06	80.94	797.15	17.10	0.76	87.17	-0.02	12.60	2.37
Cadereyta	219	182.29	69.68	798.49	18.94	1.84	269.90	0.24	41.10	9.80
Cadereyta	250	218.36	82.69	797.18	16.65	0.96	-1.86	0.10	5.61	1.16
Cadereyta	257	229.36	77.80	795.62	17.64	1.20	-58.75	0.30	26.25	7.91
Cadereyta	264	181.46	90.42	797.24	15.33	0.67	-26.06	-0.10	12.36	2.69
Cadereyta	268	175.46	89.89	799.23	13.87	1.25	-16.20	-0.31	12.06	2.01
Amazcala	239	87.68	78.97	809.02	17.20	1.98	40.32	-0.70	39.87	3.30
Amazcala	244	153.42	79.29	810.60	17.74	1.73	-12.00	-0.43	21.09	5.42
Amazcala	258	130.21	74.79	807.64	19.72	1.89	63.45	0.33	30.45	7.70
Amazcala	259	184.98	89.27	810.48	16.03	1.59	-41.79	-1.11	18.27	3.10
Amazcala	262	139.75	78.25	810.04	17.72	2.22	-49.23	-0.89	3.99	1.03
Amazcala	265	198.41	83.88	808.13	17.57	1.45	-24.18	-0.64	28.20	4.94
Desviación estándar		±39.80	±8.82	±6.45	±1.88	±0.80	±108.46	±0.33	±14.01	±4.70

Nota: Los valores negativos de *Rn* corresponde a registros nocturnos.

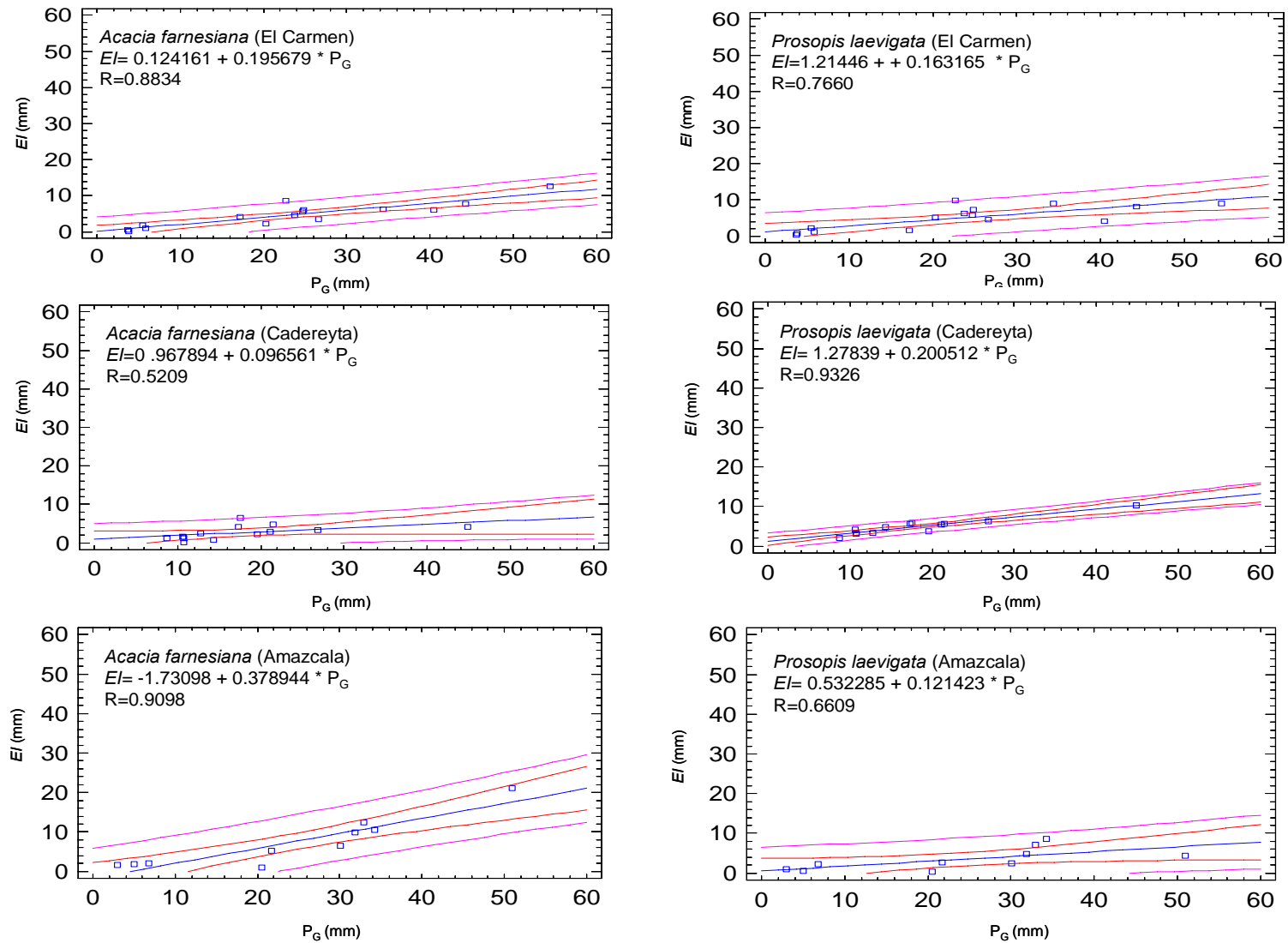


Figura 24. - Regresión lineal entre EI y P_G para cada uno de los árboles instrumentados.

6.5. Modelación de las pérdidas por intercepción

A pesar de las similitudes entre los árboles y que no presentan diferencias estadísticas entre ellos se optó por tratarlos individualmente a cada uno en la modelación. Los valores de los parámetros de entrada que se obtuvieron para el modelo de Gash y Rutter aplicados a cada uno de los árboles instrumentados se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Parámetros para los modelos de Gash y Rutter aplicados a cada uno de los árboles en estudio.

Sitio	Especie	Gash y Rutter		Rutter		Gash				
		S (mm)	P (mm)	b	Do (mm/s)	P _G (mm)	evaporación de tallos (mm)	mojado de la copa (mm)	St (mm)	pt (mm)
El Carmen	<i>P. laevigata</i>	0.96	0.79	4.05	0.001737	3.34	0.34	0.42	0.34	0.03
	<i>A. farnesiana</i>	0.60	0.75	6.48	0.001085	2.24	0.16	0.34	0.16	0.04
Cadereyta	<i>P. laevigata</i>	0.98	0.76	3.96	0.001773	5.76	0.20	0.31	0.30	0.02
	<i>A. farnesiana</i>	0.78	0.85	4.98	0.001411	3.45	0.30	1.05	0.20	0.03
Amazcala	<i>P. laevigata</i>	0.53	0.83	7.33	0.000959	1.14	0.11	0.07	0.11	0.05
	<i>A. farnesiana</i>	1.70	0.56	2.29	0.003076	2.08	0.07	0.08	0.07	0.06

Para la modelación se tomaron en cuenta los 15 eventos de El Carmen y los 13 de Cadereyta, sin embargo, para Amazcala se excluyeron los eventos del DOY 170, 185, 200 y 238 debido a que no se contaba con los registros de las variables climáticas para el cálculo de la evapotranspiración.

6.5.1 Modelo de Rutter *et al.* (1971)

Los valores estimados por evento con el modelo de Rutter en general, promedian una desviación estándar de ± 2 mm para los árboles instrumentados excepto para la *A. farnesiana* de Amazcala, la cual fue de ± 5.83 mm, así los valores de *EI* modelados con Rutter sobreestiman por 0.91% y 5.09% lo observado durante el período de estudio en El Carmen para *A. farnesiana* y *P. laevigata* respectivamente. En el caso de Amazcala el modelo también sobreestima *EI* un 33.43% en *A. farnesiana* y 13.12% *P. laevigata*. La sobrestimación de *A. farnesiana* concuerda con la alta desviación estándar por evento para este sitio y probablemente ocasionada por una mala estimación de los parámetros de entrada al modelo debido a la falta de observaciones para este sitio. Por último, en Cadereyta el modelo de Rutter sobreestima por 6.92% y 2.41% los totales para *A. farnesiana* y *P. laevigata* respectivamente (Tabla 9, Figura 25, 26, 27, 28 y 29).

Tabla 9. Valores de EI observados y obtenidos mediante el modelo de Rutter para *Acacia farnesiana* y *Prosopis laevigata* en cada evento de precipitación registrado en los sitios instrumentados.

Sitio	DOY	P _G (mm)	Sf				Th				Pn (Sf+Th)				EI			
			<i>A. farnesiana</i>		<i>P. laevigata</i>		<i>A. farnesiana</i>		<i>P. laevigata</i>		<i>A. farnesiana</i>		<i>P. laevigata</i>		<i>A. farnesiana</i>		<i>P. laevigata</i>	
			mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
El Carmen	275	3.8	0.0	0.1	0.0	0.0	3.6	94.4	3.1	81.4	3.6	94.4	3.1	81.4	0.2	5.6	0.7	18.6
El Carmen	285	24.8	1.1	4.3	0.8	3.4	17.7	71.1	16.7	67.1	18.7	75.4	17.5	70.5	6.1	24.6	7.3	29.5
El Carmen	147	23.7	1.0	4.2	0.8	3.3	18.1	76.6	16.6	70.2	19.1	80.9	17.4	73.5	4.5	19.1	6.3	26.5
El Carmen	149	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	87.8	3.3	89.0	3.2	87.8	3.3	89.0	0.5	12.2	0.4	11.0
El Carmen	183	24.7	1.1	4.3	0.8	3.4	18.1	73.2	18.0	72.8	19.1	77.5	18.8	76.2	5.6	22.5	5.9	23.8
El Carmen	205	17.2	0.7	3.9	0.5	2.8	12.4	72.2	15.1	88.1	13.1	76.1	15.6	90.8	4.1	23.9	1.6	9.2
El Carmen	206	44.3	2.0	4.6	1.8	4.0	34.5	77.9	34.4	77.7	36.6	82.5	36.2	81.7	7.7	17.5	8.1	18.3
El Carmen	207	26.6	1.1	4.3	0.9	3.5	21.8	82.1	21.1	79.1	23.0	86.4	22.0	82.6	3.6	13.6	4.6	17.4
El Carmen	216	54.4	2.5	4.7	2.2	4.1	39.3	72.2	43.0	79.1	41.8	76.9	45.3	83.2	12.6	23.1	9.1	16.8
El Carmen	217	5.5	0.1	1.6	0.0	0.0	3.5	63.3	3.3	59.8	3.6	64.9	3.3	59.8	1.9	35.1	2.2	40.2
El Carmen	219	20.3	0.8	4.1	0.6	3.1	17.2	84.9	14.5	71.4	18.1	89.0	15.1	74.5	2.2	11.0	5.2	25.5
El Carmen	250	34.3	1.5	4.5	1.3	3.8	26.6	77.5	24.0	69.9	28.1	82.0	25.3	73.6	6.2	18.0	9.0	26.4
El Carmen	257	40.5	1.8	4.6	1.6	3.9	32.7	80.7	34.7	85.8	34.5	85.2	36.3	89.7	6.0	14.8	4.2	10.3
El Carmen	264	5.8	0.1	1.8	0.0	0.0	4.7	81.8	4.6	79.2	4.8	83.6	4.6	79.2	1.0	16.4	1.2	20.8
El Carmen	268	22.7	1.0	4.2	0.7	3.2	13.1	57.9	12.1	53.1	14.1	62.1	12.8	56.4	8.6	37.9	9.9	43.6
Cadereyta	173	26.8	1.6	5.9	0.8	3.2	21.8	81.5	19.7	73.4	23.4	87.4	20.5	76.6	3.4	12.6	6.3	23.4
Cadereyta	181	17.3	0.4	2.0	0.1	0.6	12.8	74.1	11.6	67.0	13.2	76.1	11.7	67.6	4.1	23.9	5.6	32.4
Cadereyta	184	21.5	0.7	3.3	0.1	0.5	16.0	74.3	15.7	73.1	16.7	77.5	15.8	73.5	4.8	22.5	5.7	26.5
Cadereyta	219	44.8	1.8	3.9	1.6	3.6	38.9	86.9	32.9	73.5	40.7	90.8	34.5	77.1	4.1	9.2	10.3	22.9
Cadereyta	224	17.5	0.5	3.0	0.3	1.8	10.5	60.2	11.3	64.4	11.1	63.3	11.6	66.3	6.4	36.7	5.9	33.7
Cadereyta	228	10.7	0.4	3.3	0.3	3.0	10.2	94.9	6.9	64.8	10.5	98.2	7.3	67.8	0.2	1.8	3.4	32.2
Cadereyta	238	21.1	0.5	2.5	0.4	2.0	17.8	84.4	15.3	72.5	18.3	87.0	15.7	74.5	2.8	13.0	5.4	25.5
Cadereyta	242	8.7	0.2	2.0	0.2	2.4	7.4	85.2	6.5	74.9	7.6	87.3	6.7	77.4	1.1	12.7	2.0	22.6
Cadereyta	250	19.6	0.4	1.8	0.2	1.1	17.0	86.6	15.6	79.7	17.3	88.4	15.8	80.8	2.3	11.6	3.8	19.2
Cadereyta	256	10.7	0.4	3.3	0.1	1.0	9.0	84.3	7.3	68.7	9.4	87.6	7.5	69.6	1.3	12.4	3.2	30.4
Cadereyta	257	10.6	0.2	1.7	0.1	1.0	8.6	82.0	6.2	59.2	8.8	83.7	6.4	60.2	1.7	16.3	4.2	39.8
Cadereyta	265	14.3	0.7	5.0	0.2	1.5	12.7	89.5	9.2	64.4	13.5	94.4	9.4	65.9	0.8	5.6	4.9	34.1
Cadereyta	273	12.7	0.5	4.2	0.4	3.3	9.7	76.6	9.0	70.8	10.3	80.8	9.4	74.2	2.4	19.2	3.3	25.8
Amazcala	170	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	42.6	2.1	68.9	1.3	42.6	2.1	68.9	1.7	57.4	0.9	31.1
Amazcala	185	30.0	2.2	7.5	1.2	4.0	21.3	70.9	26.4	87.9	23.5	78.3	27.6	92.0	6.5	21.7	2.4	8.0
Amazcala	200	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	62.0	4.5	90.6	3.1	62.0	4.5	90.6	1.9	38.0	0.5	9.4
Amazcala	238	51.0	2.2	4.4	2.0	4.0	27.5	54.0	44.5	87.3	29.8	58.4	46.6	91.3	21.2	41.6	4.4	8.7
Amazcala	239	31.9	2.2	7.0	2.0	6.4	19.8	62.2	25.1	78.9	22.1	69.3	27.2	85.3	9.8	30.7	4.7	14.7
Amazcala	244	21.7	1.2	5.7	1.4	6.4	15.1	69.8	17.6	81.3	16.4	75.5	19.0	87.8	5.3	24.5	2.6	12.2
Amazcala	258	20.5	1.7	8.4	1.4	6.8	17.8	86.6	18.7	91.3	19.5	95.0	20.1	98.1	1.0	5.0	0.4	1.9
Amazcala	259	34.2	1.0	3.0	1.7	4.9	22.6	66.3	23.8	69.8	23.7	69.3	25.5	74.7	10.5	30.7	8.7	25.3
Amazcala	262	6.8	0.1	1.5	0.1	1.4	4.6	67.1	4.4	64.6	4.7	68.6	4.5	66.0	2.1	31.4	2.3	34.0
Amazcala	265	32.9	2.6	7.8	1.3	4.0	17.9	54.3	24.4	74.2	20.4	62.1	25.7	78.1	12.5	37.9	7.2	21.9

6.5.2 Modelo de Gash (1979)

Los valores estimados por evento para el modelo de Gash promedian una desviación estándar de ± 1.5 mm para los seis árboles instrumentados. Esta variación es mucho menor que el producido con el modelo de Rutter, lo cual es destacable ya que el modelo de Gash, a diferencia de el de Rutter, se emplea para obtener los totales de *EI* y no la *EI* por evento, lo que nos estaría indicando que en este caso el modelo de Gash produce *EI* apropiadamente en comparación del modelado de evento que el de Rutter, lo que es contrario a lo esperado. En cuanto a los totales el modelo de Gash sobreestima *EI* en todos los casos, siendo en El Carmen 6.46% y 7.34%, en Cadereyta 12.78% y 2.62% y en Amazcala 5.41% y 9.82%, esto para *A. farnesiana* y *P. laevigata* respectivamente.

El modelo de Gash es efectivo para El Carmen, Amazcala y Cadereyta en ese orden, los parámetros requeridos en el modelo fueron estimados correctamente porque un disparo de lluvias pequeñas y de baja intensidad y duración. Por ejemplo para El Carmen se contó con 4 eventos pequeños, 3 para Amazcala y como se menciona anteriormente en Cadereyta no se registraron eventos pequeños que permitieron puntualizar el modelo de Gash, como requiere el modelo. Probablemente esto ocasionó una mala estimación en los parámetros que origina esta variación en los resultados obtenidos (Tabla 10, Figura 25, 26, 27, 28 y 29).

Tabla 10. Valores de *EI* observados y obtenidos por el modelo de Gash para *A. farnesiana* y *P. laevigata* en cada evento registrado en los sitios instrumentados.

Sitio	Fecha	<i>Prosopis laevigata</i> y <i>Acacia farnesiana</i>			<i>Prosopis laevigata</i>					<i>Acacia farnesiana</i>				
		E	R	P _G	Evaporación de la copa durante la tormenta	Modelados (Gash, 1979)	%	Observados	%	Evaporación de la copa durante la tormenta	Modelados (Gash, 1979)	%	Observados	%
El Carmen	173	7.78	0.13	3.10	1.39	1.39	1.39	1.09	28.61	1.39	1.39	1.39	0.47	12.37
El Carmen	181	8.83	1.02	24.41	7.27	9.86	11.24	11.51	46.36	7.60	10.17	11.56	11.58	46.62
El Carmen	184	8.32	0.99	23.66	6.80	9.39	20.63	9.90	41.84	7.12	9.69	21.24	8.88	37.52
El Carmen	219	6.63	0.15	3.70	1.66	1.66	22.29	0.64	17.32	1.66	1.66	22.90	0.86	23.25
El Carmen	224	10.43	1.03	24.70	8.61	11.19	33.48	9.38	37.97	8.99	11.56	34.46	10.66	43.17
El Carmen	228	6.85	0.72	17.20	5.13	7.72	41.20	2.74	15.94	5.49	8.06	42.52	7.78	45.22
El Carmen	238	8.21	1.85	44.30	7.41	10.00	51.20	13.35	30.14	7.58	10.15	52.68	15.51	35.02
El Carmen	242	5.35	1.11	26.60	4.48	7.07	58.27	7.57	28.46	4.66	7.23	59.91	7.56	28.42
El Carmen	250	8.16	2.27	54.40	7.51	10.10	68.37	15.16	27.87	7.65	10.22	70.13	18.40	33.83
El Carmen	256	6.85	0.23	5.50	2.46	5.05	73.42	3.33	60.50	2.46	5.03	75.16	3.42	62.23
El Carmen	257	7.47	0.85	20.30	5.88	8.47	81.89	8.19	40.32	6.22	8.79	83.95	4.88	24.05
El Carmen	265	7.88	1.43	34.30	6.88	9.47	91.37	14.38	41.91	7.09	9.66	93.61	12.31	35.88
El Carmen	273	4.65	1.69	40.50	4.16	6.75	98.11	7.38	18.23	4.26	6.83	100.45	12.37	30.54
El Carmen	275	6.11	0.24	5.80	2.60	5.19	103	1.84	31.80	2.60	5.17	105.61	1.82	31.44
El Carmen	285	6.24	0.95	22.70	5.05	7.64	110	15.26	67.22	5.31	7.88	113.49	15.57	68.60
Cadereyta	147	6.49	1.12	26.80	5.58	7.75	7.75	13.27	49.51	6.39	6.95	6.95	14.39	53.70
Cadereyta	149	7.67	0.72	17.30	6.02	8.19	15.94	11.42	65.99	7.50	8.06	15.01	11.97	69.21
Cadereyta	183	4.12	0.90	21.54	3.41	5.57	21.52	11.41	52.95	4.04	4.61	19.62	14.58	67.70
Cadereyta	205	4.36	1.87	44.80	3.99	6.16	27.68	22.44	50.08	4.32	4.88	24.50	21.16	47.22
Cadereyta	206	5.69	0.73	17.50	4.48	6.64	34.32	12.32	70.40	5.56	6.12	30.62	15.75	89.97
Cadereyta	207	6.90	0.45	10.70	4.49	6.66	40.98	7.32	68.44	6.64	7.20	37.83	3.78	35.29
Cadereyta	216	6.74	0.88	21.20	5.55	7.72	48.70	11.13	52.75	6.61	7.17	45.00	11.07	52.48
Cadereyta	217	4.90	0.36	8.70	2.80	4.97	53.67	4.08	46.90	4.67	5.24	50.24	4.50	51.70
Cadereyta	219	6.42	0.82	19.60	5.20	7.36	61.03	7.40	37.77	6.29	6.85	57.08	9.75	49.75
Cadereyta	250	2.49	0.42	10.07	1.56	3.73	64.77	6.64	62.04	2.39	2.95	60.03	3.45	32.28
Cadereyta	257	2.06	0.44	10.55	1.33	3.50	68.26	8.71	82.57	1.98	2.54	62.58	6.03	57.18
Cadereyta	264	3.14	0.60	14.33	2.32	4.49	72.75	10.08	70.75	3.05	3.61	66.19	6.00	42.14
Cadereyta	268	1.54	0.53	12.72	1.09	3.26	76.01	4.89	38.44	1.50	2.06	68.25	3.35	26.33
Amazcala	239	7.51	1.33	31.87	6.67	8.78	8.78	13.28	41.68	6.54	9.44	9.44	15.64	49.08
Amazcala	244	6.22	0.90	21.67	5.21	7.32	16.10	7.79	35.97	5.05	8.04	17.48	8.46	39.05
Amazcala	258	7.80	0.86	20.53	6.45	8.57	24.67	2.59	12.64	6.25	9.39	26.88	2.26	10.99
Amazcala	259	7.89	1.42	34.13	7.08	9.19	33.86	21.96	64.31	6.95	9.84	36.72	16.07	47.06
Amazcala	262	5.95	0.29	6.84	2.35	2.35	36.20	5.45	79.69	2.40	6.38	43.10	3.23	47.25
Amazcala	265	7.45	1.37	32.91	6.65	8.76	44.96	18.13	55.09	6.52	9.41	52.51	19.85	60.30

6.5.3 Modelo Lineal múltiple

Como se observa en la Figura 26 la correlación lineal entre EI y P_G es alta, sin embargo existen otros factores que intervienen en el comportamiento de EI por lo que se optó por hacer un análisis de correlaciones con los datos climáticos monitoreados que se dieron durante cada evento de lluvia en los tres sitios (Tabla 7). Se encontró que las variables significativas que más influyen en el comportamiento de EI son: la velocidad y dirección del viento, la intensidad máxima de precipitación, la temperatura ambiente, la radiación y la humedad relativa, en ese orden.

Para la construcción del modelo sólo se escogieron la precipitación total P_G , la velocidad del viento u_z y la intensidad máxima i_{\max} ; esto debido a que un modelo lineal múltiple es estadísticamente eficiente si el número de observaciones es el doble que la cantidad de variables y en el caso de Amazcala sólo se tienen seis observaciones por lo que el número de variables que se pueden escoger para el modelo son tres, por tanto se mantuvo el mismo criterio para Cadereyta y El Carmen a pesar de que en estos sitios el modelo permitía más variables por el número de observaciones con que se contó.

Las ecuaciones que se obtuvieron para cada árbol presentan coeficientes de correlación altos a excepción de *P. laevigata* en El Carmen y *A. farnesiana*, sin embargo, aun así aumentaron su correlación (Tabla 11) en comparación con el modelo lineal.

Tabla 11. Ecuaciones del modelo lineal múltiple por árbol instrumentado y su coeficiente de correlación.

Sitio	Especie	Ecuación	R
Cadereyta	<i>Prosopis laevigata</i>	$EI = 2.68477 + 0.203812 * P_G - 1.60512 * u_z + 0.014224 * i_{\max}$	0.9512
	<i>Acacia farnesiana</i>	$EI = 2.14255 + 0.0937687 * P_G - 2.07228 * u_z + 0.0623687 * i_{\max}$	0.5770
El Carmen	<i>Prosopis laevigata</i>	$EI = 2.53999 + 0.137706 * P_G - 0.480637 * u_z + 0.0140777 * i_{\max}$	0.7737
	<i>Acacia farnesiana</i>	$EI = 3.00075 + 0.209954 * P_G - 0.943568 * u_z - 0.0467553 * i_{\max}$	0.9306
Amazcala	<i>Prosopis laevigata</i>	$EI = -7.15944 + 0.468236 * P_G + 2.99973 * u_z - 0.252744 * i_{\max}$	0.9692
	<i>Acacia farnesiana</i>	$EI = -7.07683 + 0.557112 * P_G + 2.18465 * u_z - 0.158715 * i_{\max}$	0.9057

Las desviaciones estándar de los valores estimados por evento con respecto a los observados, fueron de ± 0.9 mm en promedio para los 6 árboles al igual que los valores de EI para cada evento con un error promedio de ± 0.9 mm (Tabla 12, Figura 25, 26, 27, 28 y 29).

Tabla 12. Valores de *EI* observados y obtenidos por el modelo lineal múltiple para *A. farnesiana* y *P. laevigata* por evento de precipitación.

Sitio	DOY	P _G (mm)	<i>Acacia farnesiana</i>				<i>Prosopis laevigata</i>			
			<i>EI</i> Modelados Lineal múltiple (mm)	<i>EI</i> Modelados Lineal múltiple (%)	<i>EI</i> Observados (mm)	<i>EI</i> Observados (%)	<i>EI</i> Modelados Lineal múltiple (mm)	<i>EI</i> Modelados Lineal múltiple (%)	<i>EI</i> Observados (mm)	<i>EI</i> Observados (%)
El Carmen	173	3.10	0.91	23.82	0.21	18.61	1.82	47.61	0.71	18.61
El Carmen	181	24.41	4.69	18.87	6.11	29.50	5.32	21.44	7.33	29.50
El Carmen	184	23.66	4.13	17.46	4.53	26.47	5.23	22.09	6.26	26.47
El Carmen	219	3.70	-0.44	-11.86	0.45	10.99	1.04	28.06	0.41	10.99
El Carmen	224	24.70	5.57	22.54	5.57	23.84	5.04	20.40	5.89	23.84
El Carmen	228	17.20	5.00	29.09	4.11	9.16	4.59	26.68	1.58	9.16
El Carmen	238	44.30	8.52	19.24	7.74	18.35	8.50	19.19	8.13	18.35
El Carmen	242	26.60	3.71	13.96	3.62	17.38	5.90	22.19	4.62	17.38
El Carmen	250	54.40	11.60	21.31	12.58	16.77	10.19	18.74	9.12	16.77
El Carmen	256	5.50	0.98	17.90	1.93	40.15	2.03	36.99	2.21	40.15
El Carmen	257	20.30	3.85	18.98	2.24	25.53	4.47	22.04	5.18	25.53
El Carmen	265	34.30	5.65	16.47	6.19	26.37	6.48	18.89	9.05	26.37
El Carmen	273	40.50	8.00	19.76	5.99	10.32	7.31	18.06	4.18	10.32
El Carmen	275	5.80	2.39	41.28	0.95	20.77	2.53	43.70	1.20	20.77
El Carmen	285	22.70	6.23	27.44	8.61	43.64	5.23	23.06	9.91	43.64
Cadereyta	147	26.80	3.58	13.34	3.37	23.42	6.56	24.49	6.28	23.42
Cadereyta	149	17.30	2.71	15.67	4.13	32.37	4.67	26.98	5.60	32.37
Cadereyta	183	21.54	3.22	14.97	4.84	26.45	5.73	26.59	5.70	26.45
Cadereyta	205	44.80	5.02	11.19	4.11	22.93	10.32	23.04	10.27	22.93
Cadereyta	206	17.50	2.99	17.09	6.43	33.74	5.19	29.64	5.90	33.74
Cadereyta	207	10.70	1.46	13.65	0.19	32.21	3.31	30.98	3.45	32.21
Cadereyta	216	21.20	3.58	16.97	2.75	25.54	5.82	27.58	5.39	25.54
Cadereyta	217	8.70	2.17	24.93	1.11	22.62	3.42	39.28	1.97	22.62
Cadereyta	219	19.60	2.73	13.93	2.27	19.17	4.31	21.99	3.76	19.17
Cadereyta	250	10.07	1.51	14.08	1.33	30.35	3.40	31.82	3.25	30.35
Cadereyta	257	10.55	2.28	21.63	1.72	39.76	3.28	31.11	4.19	39.76
Cadereyta	264	14.33	2.86	20.08	0.79	34.08	4.69	32.91	4.86	34.08
Cadereyta	268	12.72	1.50	11.77	2.44	25.85	3.44	27.06	3.29	25.85
Amazcala	239	31.87	8.68	27.22	9.79	14.70	3.63	11.38	4.68	14.70
Amazcala	244	21.67	5.43	25.05	5.32	12.22	2.85	13.14	2.65	12.22
Amazcala	258	20.53	3.66	17.81	1.02	1.93	0.43	2.08	0.40	1.93
Amazcala	259	34.13	12.52	36.67	10.50	25.34	8.98	26.30	8.65	25.34
Amazcala	262	6.84	0.95	13.90	2.15	34.00	1.69	24.77	2.33	34.00
Amazcala	265	32.91	9.95	30.23	12.49	21.89	5.47	16.63	7.20	21.89

6.5.4 Comparación de las pérdidas por interceptación

Al hacer la comparación de los modelos, se encontró que no existen diferencias estadísticamente significativas entre lo observado y lo estimado con el modelo de Rutter, Gash y el lineal múltiple para *A. farnesiana* y *P. laevigata* en todos los sitios ($p < .05$).

La causa de que el modelo de Rutter produjera algunas deficiencias respecto a lo observado de *EI* por evento, probablemente se deba a que los valores de b y D_o obtenidos mediante el criterio de Rutter no son los apropiados para la vegetación de estudio. Por otro lado los parámetros de los modelos de Gash obtenidos para este experimento se calcularon a partir de las observaciones que se realizaron para este estudio y no con otras como se realizó para el modelo de Rutter (Tabla 12, Figura 25, 26, 27, 28 y 29).

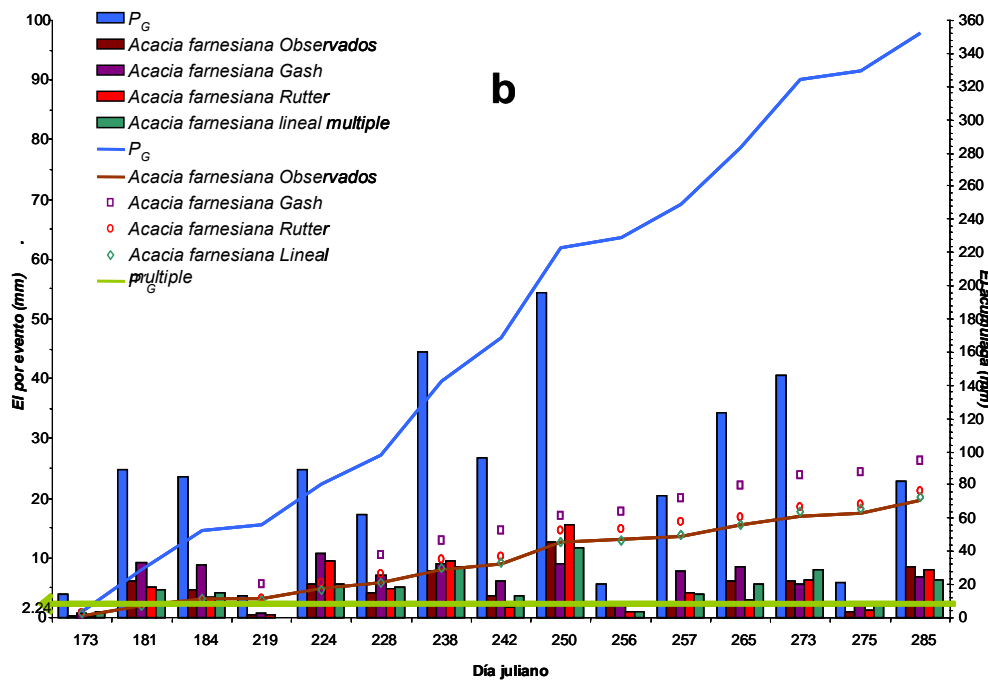
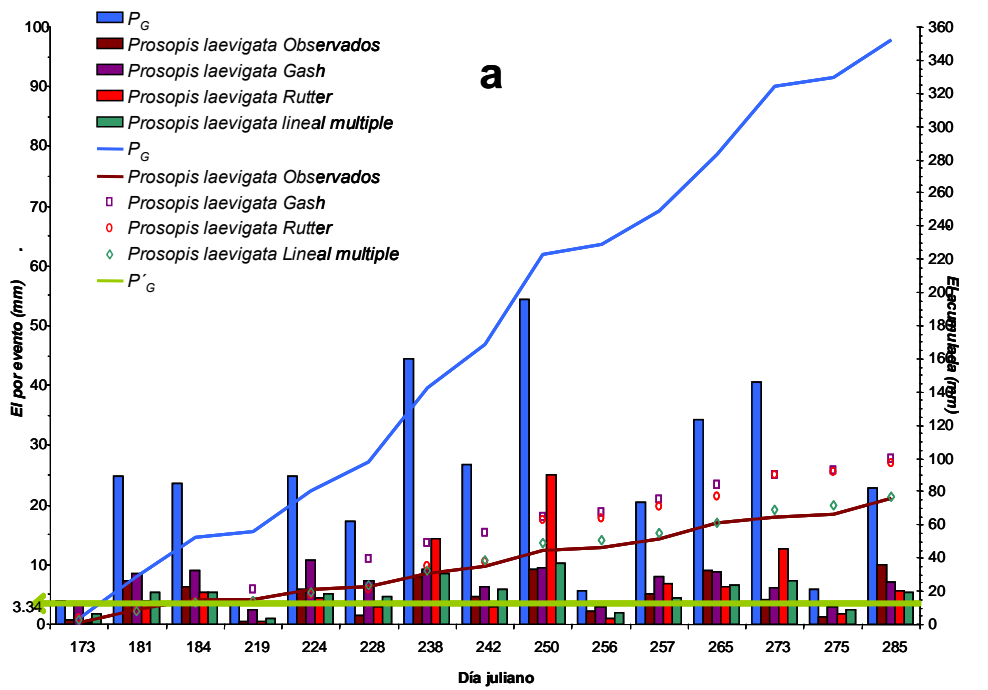


Figura 25.- Comparación de EI entre lo observado y lo modelado en El Carmen, (a) *Prosopis laevigata* y (b) *Acacia farnesiana*

Nota: P'_G es la lluvia necesaria para saturar la copa para el modelo de Gash

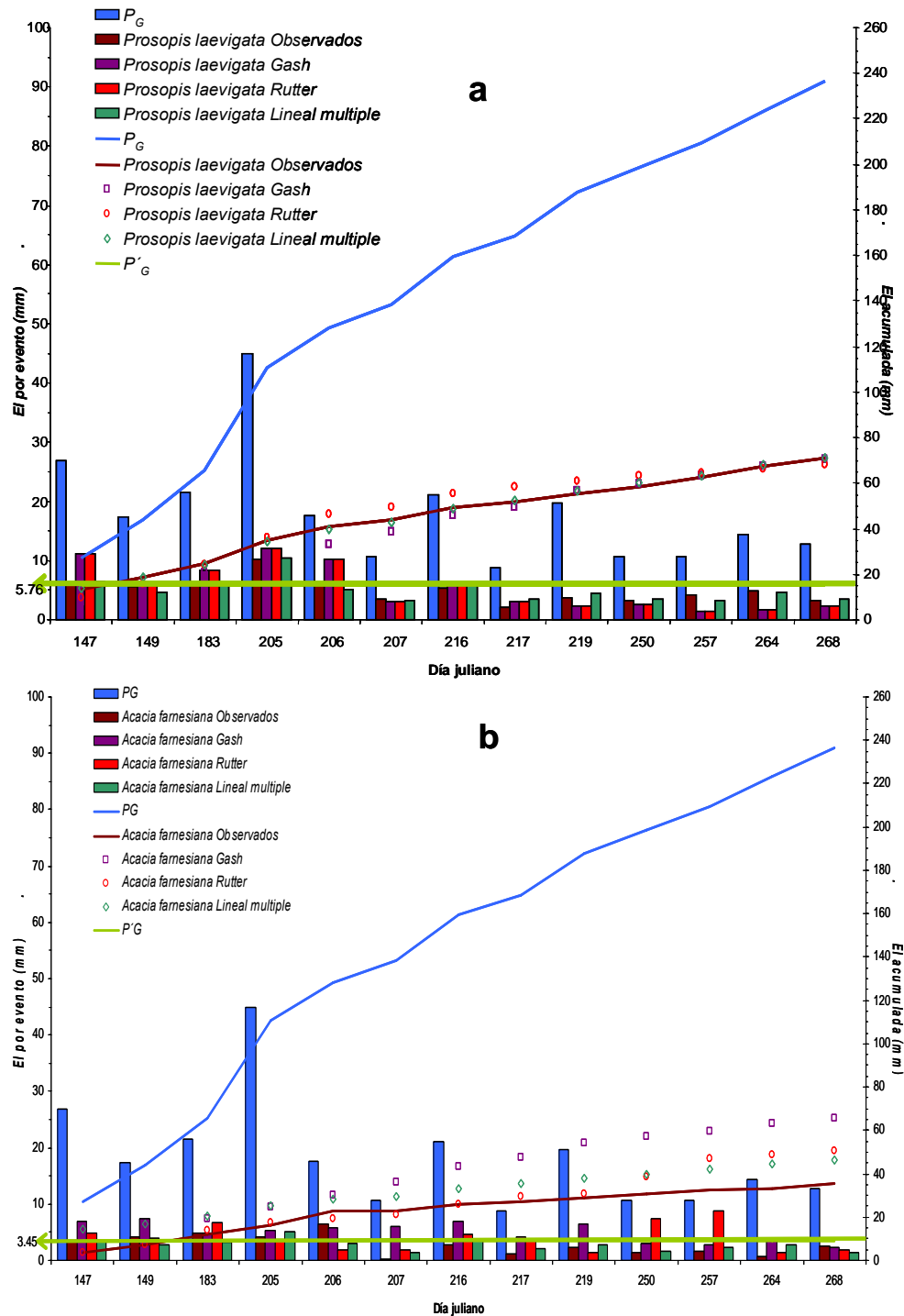


Figura 26.- Comparación de EI entre lo observado y lo modelado en Cadereyta, (a) *Prosopis laevigata* y (b) *Acacia farnesiana*.

Nota: P'_G es la lluvia necesaria para saturar la copa para el modelo de Gash

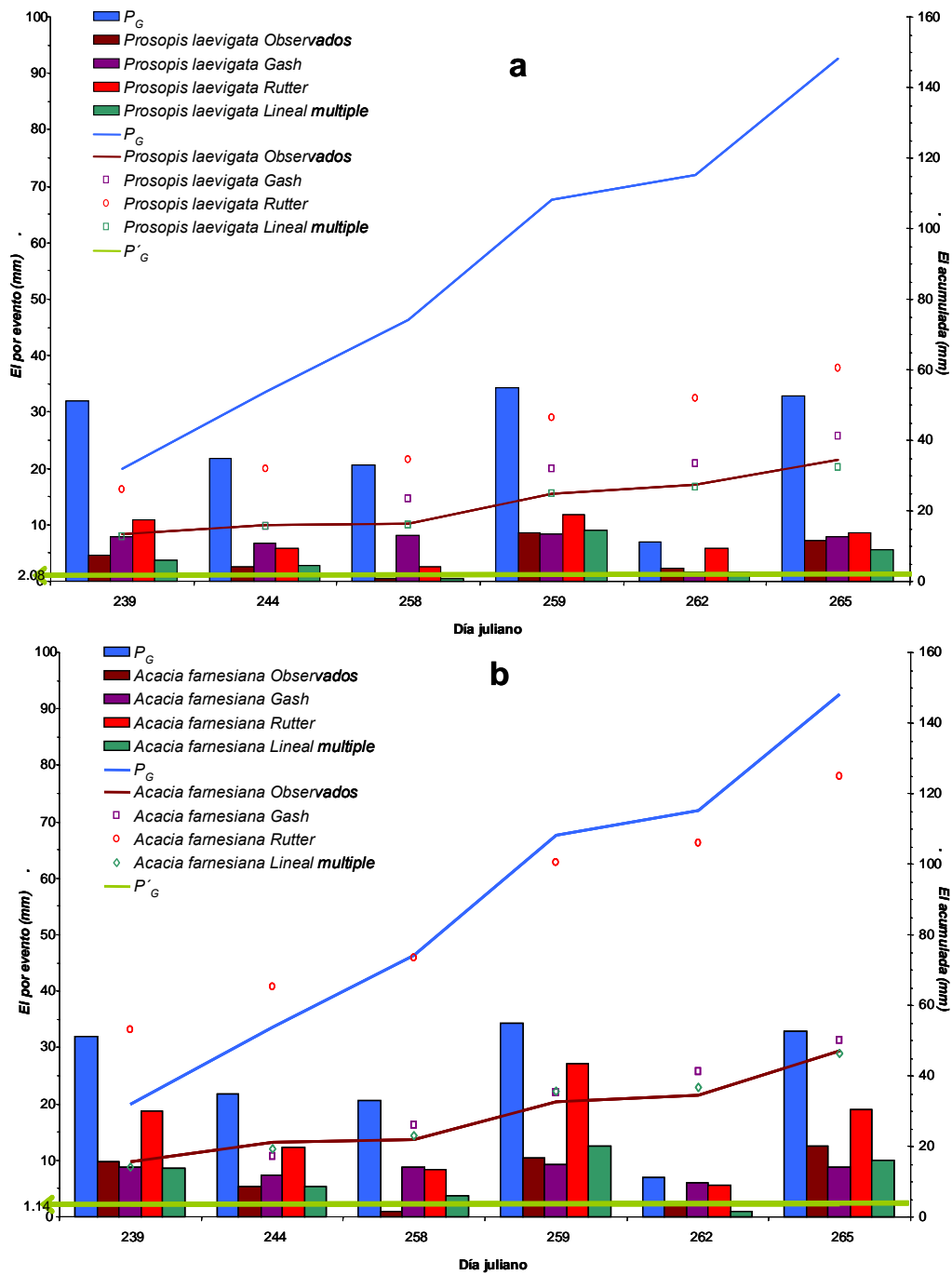


Figura 27. Comparación de EI entre lo observado y lo modelado en Amazcala, (a) *Prosopis laevigata* y (b) *Acacia farnesiana*

Nota: P'_G es la lluvia necesaria para saturar la copa para el modelo de Gash

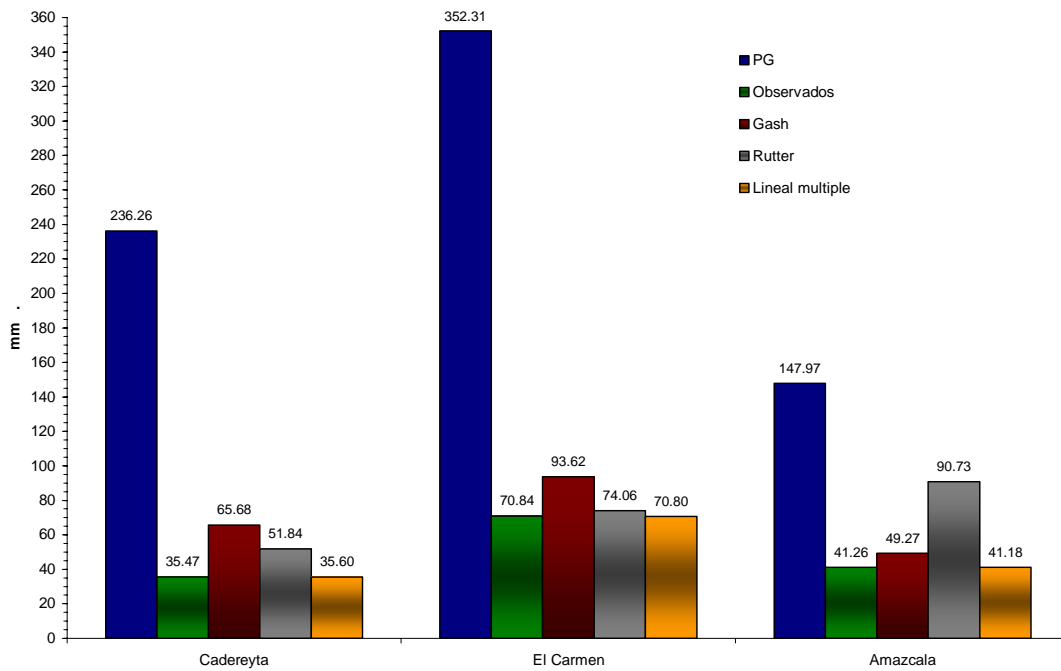


Figura 28.-Comparación de los totales de *EI* observado y modelado para *A. farnesiana* de cada sitio experimental.

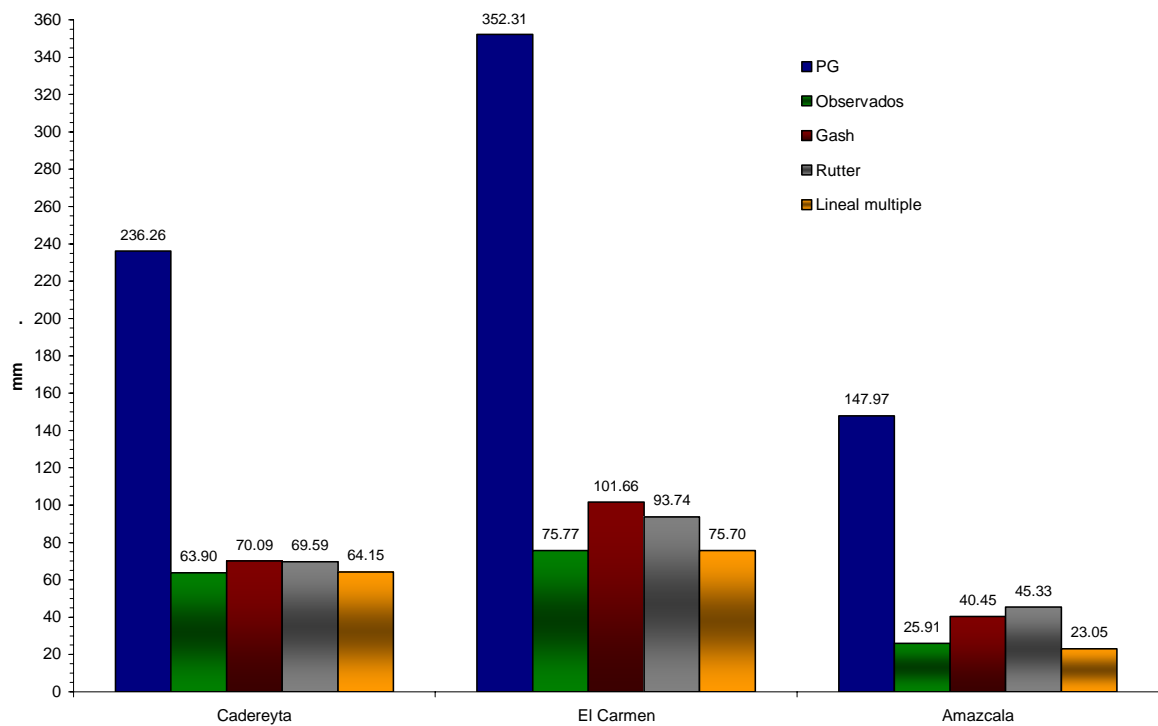


Figura 29.-Comparación de los totales de *EI* modelado y observado para *P. laevigata* de cada sitio experimental.

En la Tabla 13 se observan los valores de tres distintos indicadores de la precisión de los datos comparativos entre modelados y observados, para cada uno de los modelos utilizados. Puede apreciarse que el mejor modelo es el lineal múltiple seguido por el de Gash y Rutter. En las Figuras 30, 31, y 32 puede observarse la comparación de *EI* modelado contra observado.

Tabla 13. Eficiencia (*E*), Sesgo (*B*) y Raíz del error cuadrático medio (*RMSE*) para los modelos de Rutter, Gash y Lineal múltiple.

Sitio	Especie	Rutter			Gash			Lineal múltiple		
		<i>E</i>	<i>B</i>	<i>RMSE</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>RMSE</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>RMSE</i>
El Carmen	<i>A. farnesiana</i>	0.895	0.215	1.828	0.507	1.519	2.848	0.945	-0.002	1.197
	<i>P. laevigata</i>	0.372	1.198	5.238	0.230	-0.005	2.596	0.738	0.000	1.999
Cadereyta	<i>A. farnesiana</i>	0.734	1.259	3.134	0.619	2.324	2.992	0.958	0.010	1.426
	<i>P. laevigata</i>	0.830	0.438	2.463	0.855	0.020	1.856	0.987	0.000	0.619
Amazcala	<i>A. farnesiana</i>	-0.200	8.246	9.190	-0.890	1.336	4.014	0.894	-0.012	1.834
	<i>P. laevigata</i>	0.508	3.236	3.576	0.040	2.423	3.800	0.988	-0.477	0.882

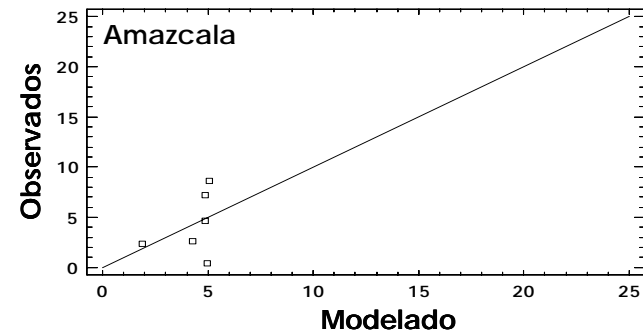
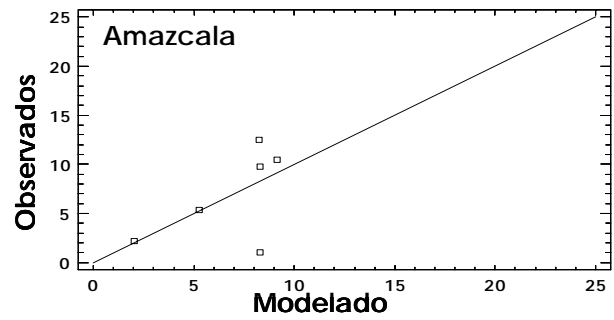
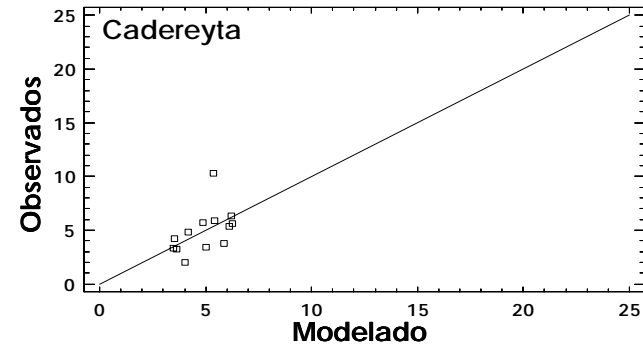
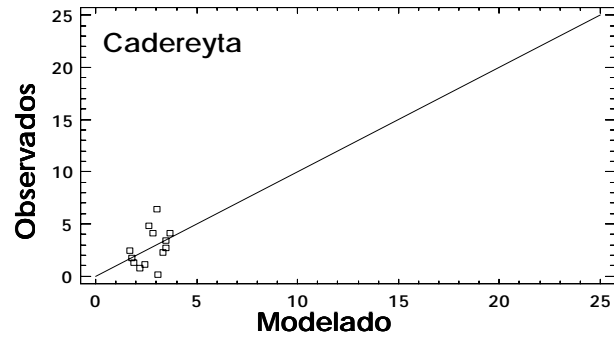
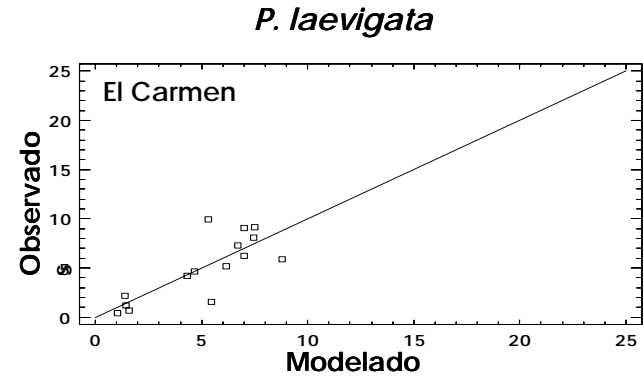
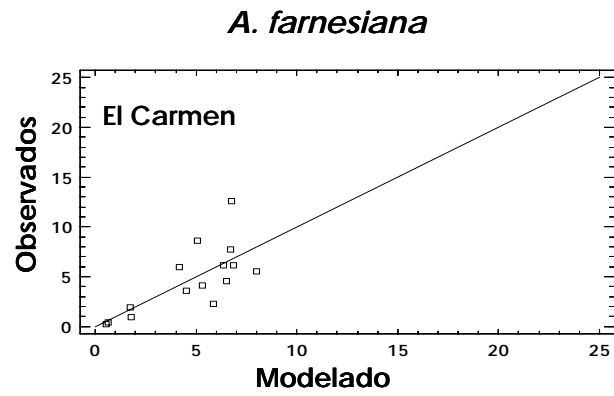


Figura 30.- Pérdidas por intercepción Observadas contra obtenidas por el modelo de Gash.

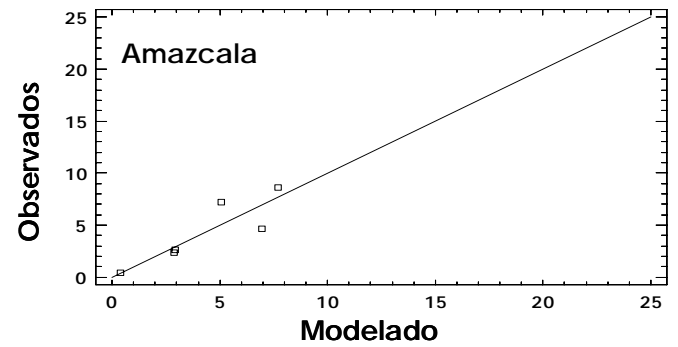
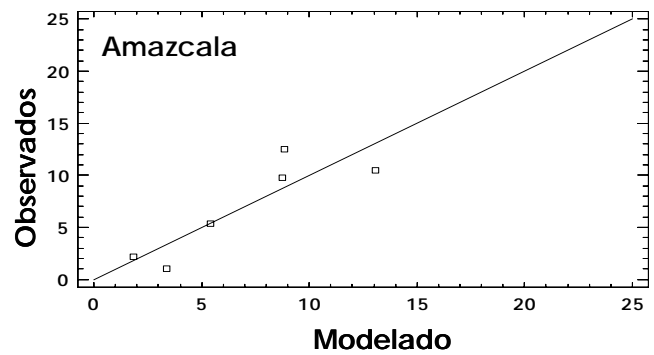
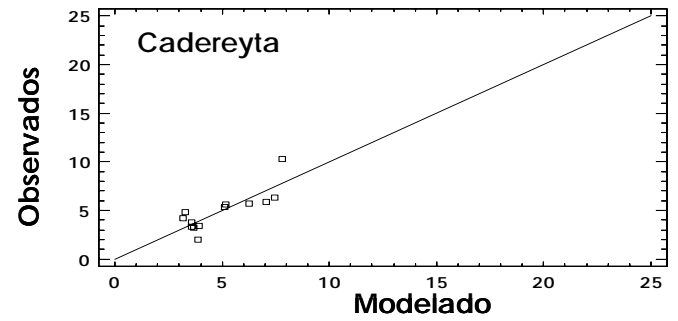
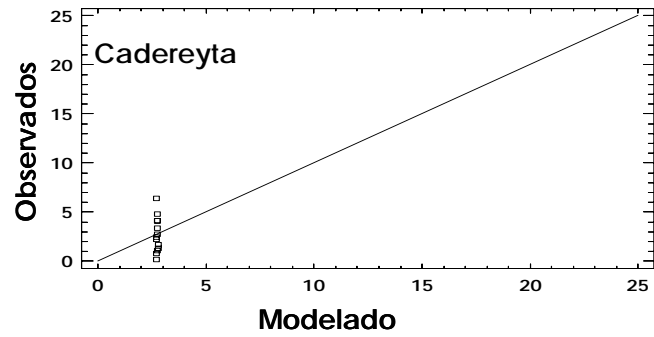
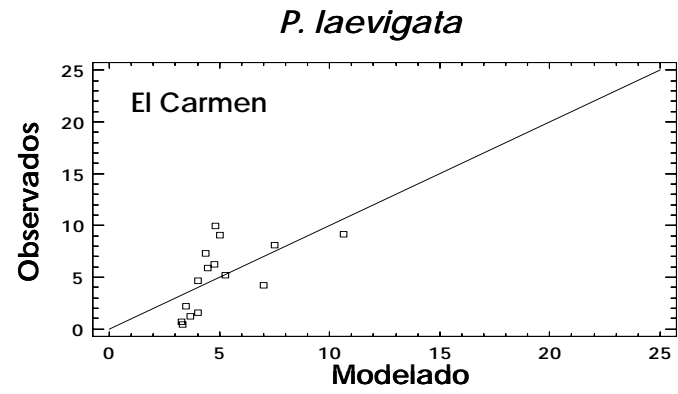
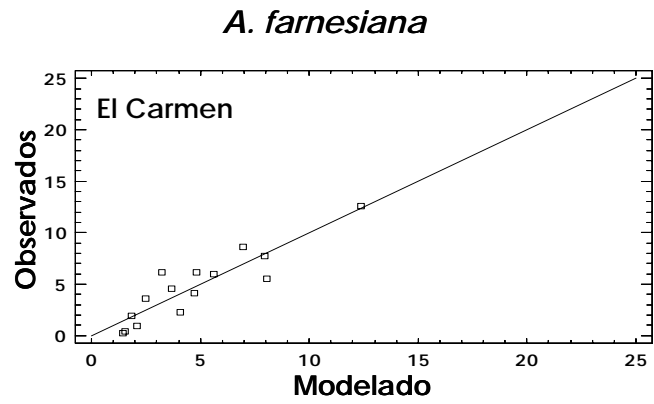


Figura 31.- Pérdidas por intercepción Observadas contra obtenidas por el modelo de Rutter.

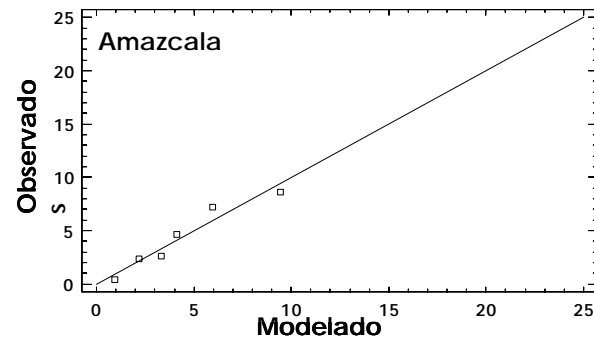
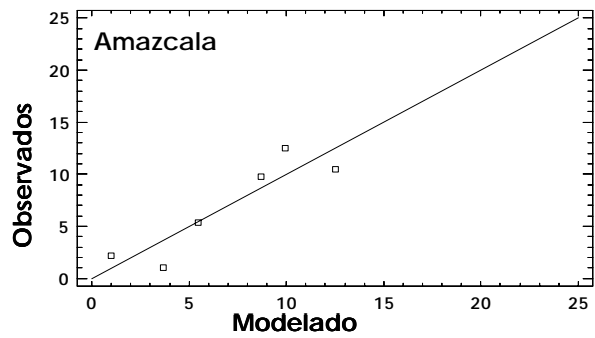
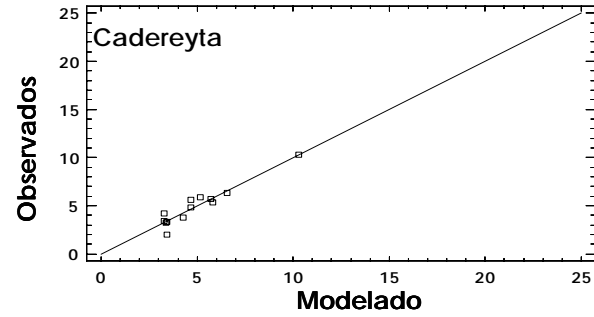
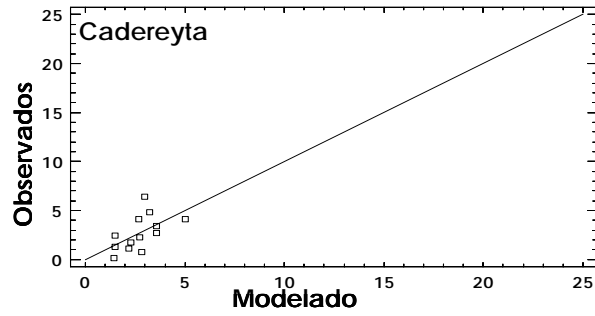
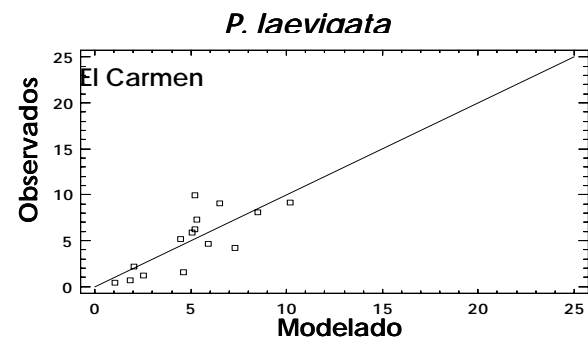
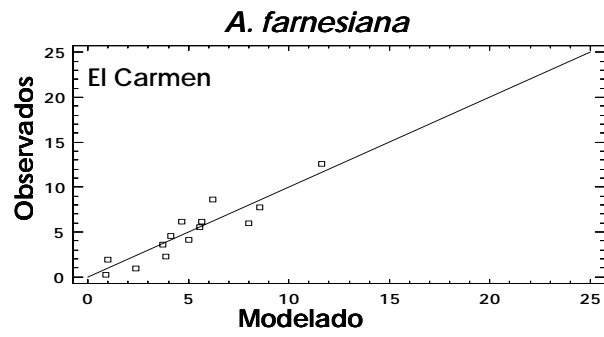


Figura 32.- Pérdidas por intercepción Observadas contra obtenidas por el modelo Lineal.

. DISCUSIÓN

7.1. Pros y contras de la metodología utilizada para cuantificar *EI*

Gran parte de los trabajos realizados hasta la fecha discuten la importancia que tiene las metodologías empleadas para estimar las pérdidas por intercepción, sin destacar los efectos intrínsecos del medio observado: bosques cerrados o abiertos, islas de vegetación y árboles aislados. En este trabajo la instrumentación desarrollada para árboles aislados trata de subsanar las limitantes planteadas en el trabajo de **David *et al.* (1996)**, además de la sobrestimación por las entradas laterales que pueden presentarse, tal como lo indican **Guevara-Escobar *et al.* (2006)**. Sin embargo, las condiciones de los sitios experimentales modifican las consideraciones de estos dos enfoques por las características de la vegetación, ya que es difícil encontrar árboles completamente aislados a fin de evitar la posible influencia de árboles aledaños en el proceso de intercepción. La limitación se acrecentó a medida que aumentó la cobertura de la vegetación y se reduce el grado de perturbación de los ecosistemas seleccionados, por ejemplo, en El Carmen la vegetación es más cerrada en comparación a los árboles instrumentados en Cadereyta, siendo Amazcala el sitio intermedio (Figura 12, 13 y 14).

La elección de *P. laevigata* y *A. farnesiana* para el monitoreo de la intercepción fue muy acertada ya que en el análisis de la vegetación ambas especies resultaron con altos valores de importancia para los sitios de monitoreo (Tabla 5), no obstante el pasto presentó valores relevantes de importancia, por lo que éste también es determinante en el comportamiento de los procesos hidrológicos que se dan en las zonas semiáridas.

Los resultados encontrados en la medición indirecta de *EI* mostraron estadísticamente similitudes entre las especies *A. farnesiana* y *P. laevigata* tanto dentro del mismo sitio como entre sitios, siendo éstas más notables en el primer caso (Figura 23). En paralelo con los resultados reportados por otras investigaciones en individuos de la misma especie pero en condiciones de árboles contenidos en parches de vegetación, se observaron diferencias entre 10 y 30 % (**Navar y Bryan, 1994**). En comparación con otros estudios con cobertura vegetal donde dominan *A. farnesiana* y *P. laevigata*, los valores encontrados en este estudio de *EI* caen dentro de los rangos observados por: **Navar *et al.* (1999)**, **Carlyle-Moses (2004)**

y **Cantu y González (2006)**. En resumen los valores reportados en la literatura especializada para estas especies tanto individualmente como en comunidad no difieren estadísticamente con los encontrados en el presente trabajo, sin embargo, si existen pequeñas variaciones entre sí, tanto entre especies como entre individuos de la misma especie.

Entre las razones que pueden explicar las diferencias entre los resultados obtenidos para esta investigación y lo reportado por la literatura:

- Especies

En el estudio que realizaron **Navar y Bryan (1994)** se utilizaron seis colectores por individuo para cuantificar *Th* y en el estudio de **Carlyle-Moses (2004)** en que se analizó la cobertura vegetal se utilizaron canaletas, sin embargo, **Navar et al. (1999)** efectuó una comparación de ambas metodologías encontrando que no existían diferencias significativas entre lo cuantificado por ambos procedimientos, esto concuerda con lo reportado por otros autores al hacer la misma comparación para otros tipos de coberturas (**Delphis y Frost, 2006**), por lo que probablemente las diferencias entre estas cuantificaciones se deban a otros factores.

En cuanto a comparaciones entre los tipos de metodologías mencionadas anteriormente y la utilizada en este estudio, a la fecha no se han efectuado evaluaciones, no obstante que esta investigación y la realizada por **Guevara-Escobar et al. (2006)** en un *Ficus benjamina* de una zona urbana se basan en la misma metodología. En ésta última el dispositivo capta el total de la lluvia percolada en un solo colector de medición y evita la sobreestimación de las pérdidas por las entradas laterales de la precipitación, la cual llega a presentar ángulos de incidencia hasta de 60° respecto a la vertical, sin embargo, posiblemente la rigidez del dispositivo provoque una turbulencia adicional que modifique el valor de *EI*, a pesar que no obstruye en su totalidad las líneas de flujo, ni genera fuerzas adicionales que aceleren el proceso de percolación y al mismo tiempo un efecto convectivo en el fenómeno de evaporación. Así mismo, la suma de efectos de los árboles cercanos que no garantizan el *fetch* que demanda un árbol aislado, influye en la medición de los componentes de balance de masa del árbol.

- Condiciones climáticas

La temperatura (T_a): los estudios realizados en México para vegetaciones de este tipo se han llevado a cabo en Linares, Nuevo León, donde la media anual de la temperatura es más elevada (22 °C) (Navar y Bryan, 1994; Navar *et al.*, 1999; Carlyle-Moses, 2004; Cantu y Gonzalez, 2006) que en los sitios que se monitorearon (16 °C), diferencia que estaría indicando que en Linares la evaporación y las pérdidas por interceptación deben ser más altas que en los sitios instrumentados en la región semidesértica del centro del país, sin embargo, no ocurre de esa forma, lo cual lleva a pensar que las diferencias están dominadas por las características de la precipitación, la metodología empleada, la arquitectura de la vegetación y/o la altitud del sitio.

La velocidad del viento (U_z): en El Carmen las velocidades promedio del viento son mayores que en Amazcala y en Cadereyta, Robson *et al.* (1994) y Gómez *et al.* (2002) mencionan que las diferencias de EI en las velocidades del viento podrían estar ocasionando que la lluvia entre en distintos ángulos además de estar sacudiendo los árboles y generando un mayor flujo de percolación o bien acelerar el proceso de evaporación.

La intensidad de la lluvia (i): no obstante que la precipitación anual es semejante en los tres sitios las intensidades promedio y máximas de la lluvia son muy variables a pesar de que la precipitación anual es similar en los tres sitios, esto ocasiona que las tres etapas del proceso del cambio de almacenamiento del dosel no presenten patrones semejantes y en consecuencia la EI sea diferente incluso entre especies (Loescher *et al.*, 2002; Raat *et al.*, 2002) principalmente porque el llenado y saturación se pueden presentar en períodos muy cortos o casi instantáneamente.

La efectos combinados del viento y la intensidad de la precipitación ocasionan que la regresión entre EI y P_G no tenga un comportamiento lineal como se observa en la Figura 24, ya que si no existiera la influencia de variables como U_z o i esta correlación tendría un mejor comportamiento, sin embargo, estas diferencias originan que incluso para valores de P_G similares, EI sea diferente, incrementando la dispersión de las observaciones entre los sitios experimentales.

- Las precipitaciones

Es ampliamente conocido que la velocidad, dirección del viento e intensidad de la precipitación son factores que influyen en el comportamiento de *EI* (**Robson et al., 1994; Loescher et al., 2002; Gómez et al., 2002; Raat et al., 2002; Llorens et al., 2003**), ante ello, una posible explicación son las diferencias de estos factores en este trabajo y los efectuados en el Estado de Nuevo León. Respecto a las diferencias de interceptación presentadas entre los sitios de estudio considerados en este trabajo, las características de la precipitación y las condiciones climáticas durante los períodos de investigación no muestran diferencias y comportamientos significativos como se pudo observar en el capítulo 5.2 donde se indica un comportamiento similar para los tres sitios experimentales. En este sentido las precipitaciones no explican las diferencias entre sitios, mas bien pueden estar asociadas a la arquitectura particular de cada árbol, o bien a las condiciones puntuales que se dan durante las precipitaciones, ya que como se puede observar en la Tabla 7 existen diferencias en comportamiento de las variables asociadas durante los eventos de precipitación entre los sitios experimentales.

Por ultimo, los valores de Sf que se registraron en este estudio $5\% > Sf > 2\%$ de P_G muy superiores a los reportados por **Navar (1993) y Navar y Bryan (1994)** quienes reportan valores de Sf insignificantes para *A. farnesiana* y *P. laevigata*, ya que ellos reportan valores por debajo de 1% de P_G . Finalmente los valores de Sf al igual que *EI*, resultaron en general mayores a los reportados en otros estudios siendo sin duda, también, un reflejo de las diferencias entre los sitios en los que se realizaron los estudios anteriores y el presente.

7.2. Eficiencia de los modelos en el cálculo de *EI*

Como se mencionó anteriormente a pesar de las similitudes entre los árboles y que no presentan diferencias estadísticamente significativas entre ellos se optó por tratarlos individualmente a cada uno en la modelación.

Los parámetros de S requeridos para los modelos de Gash y Rutter para El Carmen, Cadereyta y Amazcala caen dentro de los rangos de los valores reportados por **Navar y Bryan (1994)** para *A. farnesiana* y *P. laevigata* (0.5 a 1.2 mm), Solo la *A. farnesiana* de Amazcala ($S=1.7$ mm) sobrepasa a los reportados. En cambio los valores de p encontrados

en este estudio (50 a 85 %) difieren de los encontrados por **Navar y Bryan (1994)** quienes encontraron un valor de 25%, el cual usaron para todos los individuos muestreados y no determinaron p individualmente para cada uno, además el valor que infirieron fue de solo una lluvia pequeña y no un conjunto como lo indica **Gash (1979)**.

Probablemente lo anterior se deba al método por el cual se calcula p , que derivan de las observaciones de Th correspondientes a lluvias de poca magnitud, en apego a los criterios establecidos por **Leyton et al. (1917)**, **Rutter et al., (1971)** y **Gash (1979)**, como en el caso de Cadereyta donde se tienen registros de este tipo, situación que no ocurre para El Carmen y Amazcala.

En la aplicación del modelo de Rutter los parámetros de drenaje D_o y b los cuales se calcularon como lo propone **Schellekens (2000)** estableciendo una relación lineal de S respecto a los parámetros de D_o y b encontrados por **Rutter et al. (1971)**. Si de entrada S es sobreestimada, D_o y b son muy sensibles a cambios en S como lo indica **Schellekens (2000)**, y sí a esto sumamos que en la simulación se utilizaron los parámetros para una vegetación diferente a la estudiada, muy probablemente provoque valores simulados inferiores a los observados.

Es importante señalar que el modelo propuesto por **Rutter et al. (1971)** fue obtenido midiendo la evolución de EI durante un evento de lluvia, y en este estudio no se contó con observaciones discretas respecto al tiempo que permitieran una mejor determinación de D_o y b como lo establece Rutter, solo se dispuso de los totales de EI para cada evento de precipitación.

Los resultados obtenidos con el modelo de Rutter, reflejan la validez absoluta del modelo y por otro las posibles fallas en el cálculo de los parámetros como anteriormente se mencionó. A diferencia del modelo de Rutter, el modelo propuesto por **Gash (1979)** es aplicable tanto para un conjunto de eventos de precipitación como individualmente. En este trabajo la simulación se efectuó por evento y se agruparon para efectuar una comparación con los totales observados, teniendo mejores resultados que los obtenidos por evento.

El modelo de Gash, aunque contienen más parámetros que el de Rutter, es menos complicado en la organización de las variables, particularmente pt , y St , las cuales son de fácil obtención a partir de los datos observados de Sf . Los resultados de la modelación

asemejan a los observados tanto por evento como en los totales y su efectividad respecto el orden siguiente: El Carmen, luego Amazcala y por último Cadereyta, en concordancia con el número de eventos de P_G pequeños disponibles en cada sitio, mostrando que el valor de S es apropiado conforme más eventos de este tipo se tengan.

Por último es importante destacar la bondad del modelo lineal múltiple donde se eligieron las variables independientes P_G , u_z e i , son las variables que tienen un papel relevante en el proceso de intercepción y tiene influencia significativa en los valores observados de EI , sin embargo para explicar el efecto de i se utilizó una i máxima. La regresión de las correlaciones en cada uno de los casos analizados aumentó en valores cercanos a la unidad, en comparación de las correlaciones que se obtuvieron al hacer una regresión simple entre P_G y EI , lo que nos indica que las variables u_z e i *max* explican en conjunto un 10% la variabilidad de EI .

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

- Históricamente los tres sitios experimentales están considerados como zonas semiáridas, sin embargo para el 2006 Cadereyta y Amazcala tuvieron un comportamiento característico de un año húmedo.
- Las especies con mayor valor de importancia en los tres sitios experimentales son *Acacia farnesiana* y *Prosopis laevigata*.
- Existe una notoria diferencia de coberturas de vegetación en los sitios experimentales que reflejan un deterioro en su conservación, siendo el más deteriorado Cadereyta, seguido de Amazcala y por último el de El Carmen.
- Entre los tres sitios no existen diferencias significativas de las variables: humedad relativa, temperatura del aire, flujo de calor en el suelo y radiación neta, tanto en el período anual como en el de estudio.
- En los tres sitios se observó que la humedad relativa tiene un comportamiento semejante, tanto en el día como en la noche. Es importante destacar que la humedad aumenta de manera significativa entre las 4:00 y las 6:00 am, por efecto del rocío que se forma, lo cual incluso llegó a ser registrado por los pluviómetros.
- La evapotranspiración anual en El Carmen fue de 1,782 mm, en Cadereyta de 1,031 mm y en Amazcala de 1,031 mm. La resistencia estomática promedio para que la ecuación de Penman-Monteith se ajustara a los registrado por los ET gage fue de 75 m/s, misma que es reportada por la FAO para el calculo de la evapotranspiración potencial de referencia.
- Las *EI* encontradas en este estudio concuerdan con las reportadas en estudios efectuados en el norte del país donde $15\% < EI < 30\%$ de la precipitación total P_G , quedando la precipitación restante para escurrimiento e infiltración, sin tomar en cuenta la *EI* de los residuos vegetales.

- Los valores de *EI* observados puede que estén sobreestimados, debido a que la metodología utilizada posiblemente este generando condiciones microclimáticas que eleven la temperatura y modifiquen la turbulencia local.
- Los valores de flujo cortical encontrados en este estudio a diferencia de los reportados si son significativos ya que representan entre el 3 y 5 % de P_G .
- No existen diferencias estadísticas entre los valores de *EI* observados en un mismo sitio ni entre sitios para *A. farnesiana* y *P. laevigata*, es decir, que pueden ser extrapolables y representativos de las pérdidas por intercepción para balances hídricos en tipos de vegetación de la zona centro de México donde dominen estas dos especies.
- Los modelos de Rutter y Gash sobreestiman *EI*, sin embargo, en términos estadísticos no existen diferencias significativas entre los valores observados y los modelados.
- La precipitación total, la velocidad del viento y la intensidad máxima que se presentan durante cada evento de lluvia explican en gran parte el comportamiento de *EI*.
- El empleo de un modelo lineal múltiple que incluya las variables precipitación total, velocidad del viento e intensidad máxima es una buena aproximación para la estimación de *EI* resultando ser más eficiente que los modelos de Gash y Rutter.

En general *Prosopis laevigata* y *Acacia farnesiana* son especies de gran importancia para la regulación de los procesos hidrológicos, regulan los escurrimientos en términos de las pérdidas por intercepción, proveen sombra retardando la evaporación del suelo y permitiendo la infiltración, lo cual genera la formación de vegetación asociada a estas especies creando las condiciones para la formación de las denominadas “islas de fertilidad” que entre diversas funciones reducen la erosión y los escurrimientos. Por último, los modelos de Gash, Rutter y lineal múltiple son aplicables a estas especies y en ambientes semiáridos con una buena aproximación de *EI* en estos ecosistemas y para períodos anuales.

8.2 Recomendaciones

El estudio de vegetación que se realizó fue con el fin de caracterizar los principales componentes que integran el proceso de intercepción, por lo que sería pertinente la realización de un número mayor transectos con una metodología que facilite una caracterización regional.

El monitoreo de las condiciones climáticas, la evaporación y las pérdidas por intercepción requieren de un proyecto de al menos tres años en donde sea posible distinguir un año húmedo, un seco y un intermedio, que permitan conocer el comportamiento del balance hídrico para cada situación, esto también permitiría aumentar el número de eventos teniendo más detalle en el comportamiento de la intercepción para eventos extremos tanto máximos como mínimos.

Para una mejor estimación de EI mediante los modelos de Gash y Rutter es necesario contar con más eventos de baja precipitación que permitan un mejor cálculo de los valores de S y p , del mismo modo en el caso de el modelo de Rutter será recomendable apoyarse con una experimentación elaborada bajo condiciones controladas para obtener los valores de D_0 y b y con ello tener una referencia con mayor validez.

Es indispensable conocer la dinámica del proceso de intercepción durante un evento de lluvia, mediante el monitoreo de las tres fases establecidas por los modelos de Rutter y Gash, que permitirán obtener detalladamente el comportamiento de la intercepción en *Acacia farnesiana* y *Prosopis laevigata*.

La alta densidad de epifitas en *Acacia farnesiana* y *Prosopis laevigata* que se observo en los tres sitios hace suponer que estas tienen un impacto en la intercepción por lo que sería recomendable realizar estudios que permitan evaluar el papel que desempeñan estas plantas en ambientes semiáridos, ya que como se ha comprobado en otros ecosistemas estas tienen un efecto trascendental en el proceso de intercepción y por ende en el balance hídrico.

REFERENCIAS

- Abrahams, A.D., Parsons, A.J. y Wainwright, J. 2003. Disposition of rainwater under creosotebush. *Hydrological Processes*. 17:2555–2566.
- Brutsaert, W. 2005. *Hydrology*. Cambridge University press. New York. 605pp.
- Bui E. N. y Box J. E. Jr. 1992. Stemflow, rain throughfall, and erosion under canopies of corn and sorghum, *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 56:242–247.
- Burghouts T.B.A., M. N. Van Straalen y L. A. Bruijnzeel. 1998. Spatial heterogeneity of element and litter turnover in a Bornean rain forest. *Journal of Tropical Ecology*. 14:477-506.
- Carlyle-Moses, D.E. 2004. Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community. *Journal of Arid Environments* 58:180–201.
- Carlyle-Moses, D.E. y Price, A.G. 1999. An evaluation of the Gash interception model in a northern hardwood stand. *Journal of Hydrology*. 214:103–110.
- Chang, M. 2003. *Forest Hydrology*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Chang, S. C. y Matzner, E. 2000. The effect of beech stemflow on spatial patterns of soil solution chemistry and seepage fluxes in a mixed beech/oak stand. *Hydrological Processes*. 14:135–144.
- Chuyong, G.B., D.M. Newbery y N.C. Songwe. 2004. Rainfall input, throughfall and stemflow of nutrients in a central African rain forest dominated by ectomycorrhizal trees. *Biogeochemistry* 67:73–91.
- CONAZA. 1994. Plan de acción para combatir la desertificación en México. Saltillo, Coahuila, México.
- COTECOCA (Comisión Técnico Consultiva para la Definición de los Coeficientes de Agostadero). 1994. Vegetación y reforestación de las áreas ganaderas en las zonas áridas y semiáridas de México. 48 pp
- David T.S., J. H. C. Gash, F. Valente, S. Pereira y J.S. David. 2006. Rainfall interception by an isolated evergreen oak tree in a Mediterranean savannah. *Hydrological Processes*. 20:2713-3726.
- Delphis F. L. y Frost E. E. 2006. Variability of throughfall volume and solute inputs in wooded ecosystems. *Progress in Physical Geography* 30:605–632.
- Dunkerley, D. 2000. Measuring interception loss and canopy storage in dryland vegetation: a brief review and evaluation of available research strategies. *Hydrological Processes* 14:669–78.
- Ellsbury M.M., Jackson J.J., Woodson W.D., Beck D.L. y Stange K.A. 1996. Efficacy, application distribution, and concentration by stemflow of *Steinernema carpocapsae* (Rhabditida:Steinernematidae) suspensions applied with a lateralmoveirrigation system for corn rootworm (Coleoptera: Chrysomelidae) control in maize, *J. Econ. Entomol.* 89:74–81.
- Fleischbe K, W. Wilcke, R. Goller J. Boy, C. Valarezo, W. Zech y K. Knoblich. 2004. Rainfall interception in a lower montane forest in Ecuador: effects of canopy properties. *Hydrol. Process.*
- Freedman, B. y Prager, U. 1986. Ambient bulk deposition, throughfall, and stemflow in a variety of forest stands in Nova Scotia. *Canadian Journal of Forest Research* 16:854-860.
- Gash, J. H. C., Lloyd, C. R. y Lachaud, G. 1995. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*. 170:79-86.
- Gash, J.H. C. 1979. An analytical model of rainfall interception in forests. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 105:43-55.

- Gash, J.H.C. y Morton, A.J., 1978. An application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from Thetford forest. *J. Hydrol.* 38:49-58.
- Gentry, A.H. 1982. Pattern of Neotropical Plant Species Diversity. *Evolution Biology* 15: 1-84.
- Gómez, J.A., Vanderlinden, K., Giráldez, J.V. y Fereres, E. 2002. Rainfall concentration under olive trees. *Agricultural Water Management* 55:53-70.
- Gonzalez Hidalgo, J.C., Raventos, J. y Echevarria, M.T. 1997. Comparison of sediment ratio curves for plants with different architectures. *Catena* 29:333-340.
- Guevara-Escobar A., González-Sosa E., Véliz-Chavez C, Ventura-Ramos E. y Ramos-Salinas M. 2007. Rainfall interception and distribution patterns of gross precipitation around an isolated *Ficus benamina* tree in an urban area. *Journal of Hydrology*.333:532-541.
- Hashino, M., Yao, H. y Yoshida, H. 2002. Studies and evaluations on interception processes during rainfall based on a tank model. *Journal of Hydrology*. 255:1-11.
- Horton, R. E. 1919. Rainfall interception. *Monthly Weather Review*, 47: 603-623.
- Huang, Y. S, Chen S. S. y Lin T. P. 2005. Continuous monitoring of water loading of trees and canopy rainfall interception using the strain gauge method. *Journal of Hydrology* 311:1-7.
- Iida S., Tanaka T. y Sugita M. 2005. Change of interception process due to the secession from Japanese red pine to evergreen oak. *Journal of Hydrology*. 315:154-166.
- INF (Inventario Nacional Forestal). 2000. México. En línea: <http://www.ejournal.unam.mx/ciencias/No64/.pdf>
- Iroumé, A.y A. Huber. 2002. Comparison of interception losses in a broadleaved native forest and a *Pseudotsuga menziesii* (Douglas fir) plantation in the Andes Mountains of southern Chile. *Hydrol. Process.* 16:2347-2361.
- Jackson, N.A. 2000. Measured and modeled rainfall interception loss from an agroforestry system in Kenya. *Agric. Forest Meteorol.* 100:323-336.
- Kahan, D. S., Xue Y. K, y Allenc S. J. 2006. The impact of vegetation and soil parameters in simulations of surface energy and water balance in the semi-arid Sahel: A case study using SEBEX and HAPEX-Sahel data. *J. Hydrol.*, 320:238-259.
- Kuraji, K. Y. Tanaka, N. Tanaka y I. Karakama. 2001. Generation of stemflow volume and chemistry in a mature Japanese cypress forest. *Hydrol. Process.* 15:1967-1978.
- Lankreijer, H.J.M., Hendriks y M.J., Klaassen, W. 1993. A comparison of models simulating rainfall interception of forests. *Agric. Forest Meteorol.* 64:187-199.
- Leyton L., Reynolds R. C. y Thompson F. B. 1967. Rainfall interception in forest and moorland. *Forest Hydrology*. 163-179
- Lilienfein, J. y W., Wilcke. 2004. Water and element input into native, agri-, and silvicultural ecosystems of the Brazilian savanna. *Biogeochemistry* 67:183-212.
- Lin, T. C., S. P. Hamburg, H. B. King y Y. J. Hsia. 2000. Throughfall patterns in a subtropical rain forest of northeastern Taiwan. *Journal of environmental Quality*. 29:1186-1193.
- Liu, S. 1997. A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies. *Ecol. Model.* 99:151-159.
- Liu, S. 1998. Estimation of water storage capacity in the canopies of cypress wetlands and slash pine uplands in North-Central Florida. *Journal of Hydrology* 207:32-41.

- Llorens, P., Oliveras, I. y Poyatos, R. 2003. Temporal variability of water fluxes in a *Pinus sylvestris* forest patch in Mediterranean mountain conditions. In Servat, E., Najem, W., Leduc, C. and Shakeel, A., editors, *Hydrology in Mediterranean and semi-arid regions*, Wallingford: IAHS Publications no. 278:101–105.
- Llorens, P., Poch, R., Latron y 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. *Journal of Hydrology*. 199:331–345.
- Loescher, H. W., Powers, J.S. y Oberbauer, S.F. 2002. Spatial variation of throughfall volume in an old-growth tropical wet forest. *Journal of Tropical Ecology* 18:397–407.
- Monteith, J. L. 1965. Evaporation and the environment in Symposium of the Society of Experimental Biology. 19:245–269.
- Moreno G. y Gallardo J. F. 2002. Atmospheric deposition in oligotrophic *Quercus pyrenaica* forests: Implications for forest nutrition. *Forest Ecology and Management* 171:17-29.
- Moughalu, J. I. y A., Oakhumen. 2000. Nutrient content of incident rainfall, throughfall and stemflow in Nigerian secondary lowland forest. *Appl. Veg. Sci.* 3:181-188.
- Navar, J. 1993. The causes of stemflow variation in three semi-arid growing species of northeastern Mexico. *Journal of Hydrology* 145:175–190.
- Navar, J. y Bryan, R.B. 1994. Fitting the analytical model of rainfall interception of Gash to individual shrubs of semi-arid vegetation in northeastern México. *Agricultural and Forest Meteorology*. 68:133–143.
- Návar, J. y R. Bryan. 1990. Interception loss and rainfall redistribution by three semi-arid growing shrubs in northeastern Mexico. *Journal of Hydrology*. 115:51-63.
- Navar, J., Carlyle-Moses, D.E. y Martínez, M.A. 1999a. Interception loss from the Tamaulipan matorral thornscrub of north-eastern Mexico: an application of the gash analytical interception loss model. *Journal of Arid Environment*. 41:1–10.
- Navar, J., Charles, F. y Jurado, E. 1999b. Spatial variations of interception loss components by Tamaulipan thornscrub in northeastern Mexico. *Forest Ecology and Management* 124:231–239.
- Ocampo Velásquez R. V. 1997. Lista florística y plantas útiles del predio el cortijo, Dolores Hidalgo, Gto. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Naturales. UAQ. México. Querétaro.
- Oropeza, O., Palacio-Aponte, A.G. y D’Luna-Fuentes A. 1992. “Síntesis del medio ambiente”, Atlas Nacional de México, Sección Medio Ambiente, Tomo II, escala 1:4 000 000, México, Instituto de Geografía, UNAM.
- Owens M. K., R. K. Lyons y L. A. Chris. 2006. Rainfall partitioning within semiarid juniper communities: effects of event size and canopy cover *Hydrol. Process.* 20:3179-3189.
- Peterson, D.L. y Rolfe, G.L. 1979. Determining sample size in throughfall studies. *Forest Science*. 25:582–84.
- Price, A. G., K. Dunham, T. Carleton y L. Band. 1997. Variability of water fluxes through the black spruce (*Picea mariana*) canopy and feather moss (*Pleurozium schreberi*) carpet in the boreal of northern Manitoba. *Journal of hydrology*. 196:310-323.
- Price, A.G. y D.E. Carlyle-Moses. 2003. Measurement and modelling of growing-season canopy water fluxes in a mature mixed deciduous forest stand, southern Ontario, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*. 119:69–85.

- Pypker, T.G., Bond, B.J., Link, T.E., Marks, Danny y Usworth, M.H. 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* 130:113-129.
- Raat, K.J., Draaijers, G.P.J., Schaap, M.G., Tietema, A. y Verstraten, J.M. 2002. Spatial variability of throughfall water and chemistry and forest floor water content in a Douglas fir forest stand. *Hydrology and Earth System Sciences*. 6:363–74.
- Roberts, J. 1999. Plants and water in forests and woodlands. In: Baird, R.J., Wilby, R.L. (Eds.), *Eco-Hydrology*. Routledge, London. 181–236.
- Robson, A.J., Neal, C., Ryland, G.P. y Harrow, M. 1994. Spatial variations in throughfall chemistry at the small plot scale. *Journal of Hydrology*. 158:107–22.
- Rodrigo, A. y A. Avila. 2001. Influence of sample size in the estimation of mean throughfall in two Mediterranean holm oak forests. *Journal of Hydrology*. 243:216–27.
- Rutter, A.J., K.A. Kershaw, P.C. Robins y A.J. Morton. 1971. A predictive model of rainfall interception in forests: derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agric. Meteorol.* 9:367–384.
- Rutter, A.J., Morton, A.J. y Robins, P.C. 1975. A predictive model of interception loss in forest. II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *J. Appl. Ecol.* 12: 367-380 pp. reformulated Rutter and Gash analytical models. *J. Hydrol.* 190: 141– 162
- Silva I. C y H.G. Rodriguez. 2001. Interception loss, throughfall and stemflow chemistry in pine and oak forests in northeastern Mexico. *Tree Physiology*. 21:1009–1013.
- Singh, P. y V. P. Singh. 2001. *Snow and Glacier Hydrology*. Kluwer Academic Publishers. London. 742 pp.
- Shannon, C. E. & W. Weiner. 1949. *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press, Urbana. 125 pp.
- Staelens, J., De Schrijver, A., Verheyen, K., Verhoest, NEC. 2006. Spatial variability and temporal stability of throughfall water under a dominant beech (*Fagus sylvatica* L.) tree in relationship to canopy cover. *Journal of Hydrology*. 330:651– 662.
- Simpson, E. H. 1949. Measurement of diversity. *Nature* 163: 688.
- UNAM. 1990., *Atlas Nacional de México*. Instituto de Geografía vol. II. México.
- Valente, F., David, J.S., Gash, J.H.C. 1997. Modeling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. *Journal of Hydrology*. 190:141–162.
- Van Dijk, A.I.J.M. y Bruijnzeel, L.A. 2001. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. 1. Model description. *Journal of Hydrology*. 247:230-238.
- Villers, R. L. e I. Trejo-Vázquez. 1997. Assessment of the vulnerability of forest ecosystems to climate change in Mexico. *Climate Research*. 9: 87-93.
- Wattenbach M., F. Hattermann, R. Weng, F. Wechsung, V. Krysanova y F. Badeck. 2005. A simplified approach to implement forest eco-hydrological properties in regional hydrological modeling. *Ecological modeling*. 187:40-59.
- Xiao, Q., McPherson, E., Ustin, L., Grismer, M. y Simpson, J. 2000. Winter rainfall interception by two mature open-grown trees in Davis, California. *Hydrological Process*. 14:763-784.

Zeng, N., Shuttleworth, J. y Gash, J. 2000. Influence of temporal variability of rainfall on interception loss. Part I. Point Analysis. *Journal of Hydrology*. 228:228-241.

SIMBOLOGÍA

Símbolo	Variables	Unidades
A_c	Área de captación	m ²
A_d	Área de cobertura de la copa	m ²
b	Parámetro empírico	adimensional
C	Cantidad de agua interceptada por la copa	mm
c	Fracción de cobertura de la copa	m ²
C_p	Calor específico del aire	MJ/kg/°C
d	Distancia de desplazamiento del plano cero	m
D	Drenaje	mm
D_f	Drenado foliar	mm
D_o	Drenaje cuando C= S	mm/s
DOY	Día juliano	día
\bar{E}	Evaporación media	mm
E	Evaporación	mm
E_I	Pérdidas por interceptación	mm
E_p	Evaporación potencial	mm
$es-ea$	Déficit de vapor	KPa
F_d	Flujo cortical	mm
G	Flujo de calor en el suelo	W/m ²
H_r	Humedad relativa	%
I	Infiltración	mm
i	Intensidad de lluvia	mm/h, mm/s
i_{max}	Intensidad máxima	mm/h, mm/s
P	Precipitación	mm
p	Percolación libre	mm
P_G	Precipitación total	mm
P'_G	Lluvia necesaria para saturar la copa	mm
P_n	Precipitación neta	mm
pt	Porción de lluvia como flujo cortical	mm
\bar{R}	Precipitación media	mm
R	Escurrimiento	mm
r_a	Resistencia aerodinámica	s/m
R_n	Radiación neta	W/m ²
S	Capacidad de almacenamiento	mm
S_c	Almacenamiento de la copa	mm
S_f	Flujo cortical	mm
S_t	Capacidad de almacenamiento de ramas y tronco	mm
t	Tiempo	s
T	Transpiración	mm
T_a	Temperatura ambiental	
Th	Percolación	mm
Th_f	Percolación libre	mm
T_s	Temperatura del suelo	
u_z	Velocidad del viento	m/s
z_h	Altura a la que se midió la humedad	m
z_m	Altura a la que se midió el viento	m
z_{om}	Tamaño de la rugosidad	m
γ	Constante psicométrica	KPa/°C
Δ	Pendiente de la relación entre la presión de vapor y la temperatura	KPa/°C

ANEXO I (Temperatura en el suelo)

En El Carmen la temperatura del suelo a los 10, 30, 60 y 75 cm para todo el 2006 y el intervalo en que se midió la intercepción, parece no tener variación en el perfil de temperatura para cada profundidad (Figura 1), de hecho la temperatura promedio para las cuatro profundidades es de 15.47 ± 0.4 ° C. Al hacer un acercamiento para el período de estudio se observa que sí existen pequeñas diferencias entre profundidades y que la capa de los 10 centímetros es la más dinámica, obviamente por su cercanía a la superficie, esta capa es la que gana y pierde calor más rápidamente en los ciclos diarios, esta dinámica disminuye conforme la profundidad aumenta (Figura 3). La pequeña variación de la temperatura entre profundidades probablemente se deba a que la capa de suelo desde la superficie a los 75cm, sea uniforme tratándose de un mismo horizonte.

Para Cadereyta la temperatura a los 10, 30 y 50 cm se comporta de la misma forma durante todo el año con una media de 14.54 ± 0.08 °C. Por otro lado, la temperatura a los 75 cm presenta una disminución en la media anual la cual es de 13.7 °C, esta diferencia de temperatura se mantiene durante todo el año incluyendo el tiempo de estudio para este sitio (Figura 2). Si observamos el comportamiento de esta variable a manera diaria, las temperaturas a 10, 30 y 50 cm no difieren mucho entre si y a los 75 cm es muy notoria la diferencia de temperaturas, incluso esta capa es menos dinámica que las más superficiales (Figura 4) esto puede ser que a diferencia de El Carmen, en donde todas las capas pertenecen a un mismo horizonte, en Cadereyta las primeras tres capas pertenecen a uno y la última se encuentra en otro horizonte, el cual amortigua el desplazamiento de la temperatura.

En el caso de Amazcala la temperatura únicamente se midió a una profundidad de 10 cm por lo que la comparación entre los tres sitios, solo se hizo a esta profundidad. En la Figura 5 se puede observar que el sitio más dinámico es El Carmen (70 °C máximo y -30 °C mínimo) con una media en el año de 16 °C, seguido de Cadereyta (40 °C máximo y -10 °C mínimo) con una media anual de 14.5 °C y en el caso de Amazcala (30 °C máximo y 5 °C mínimo) no se puede asegurar sea el menos dinámico de los tres ya que no se tienen registros para primavera y verano que son las épocas más dinámicas.

Al hacer la comparación de los períodos de estudio para los tres sitios las variaciones disminuyen entre ellos, sin embargo la diferencia permanece, esto puede ser observado en la dinámica diaria semejante para los tres sitios (Figura 6).

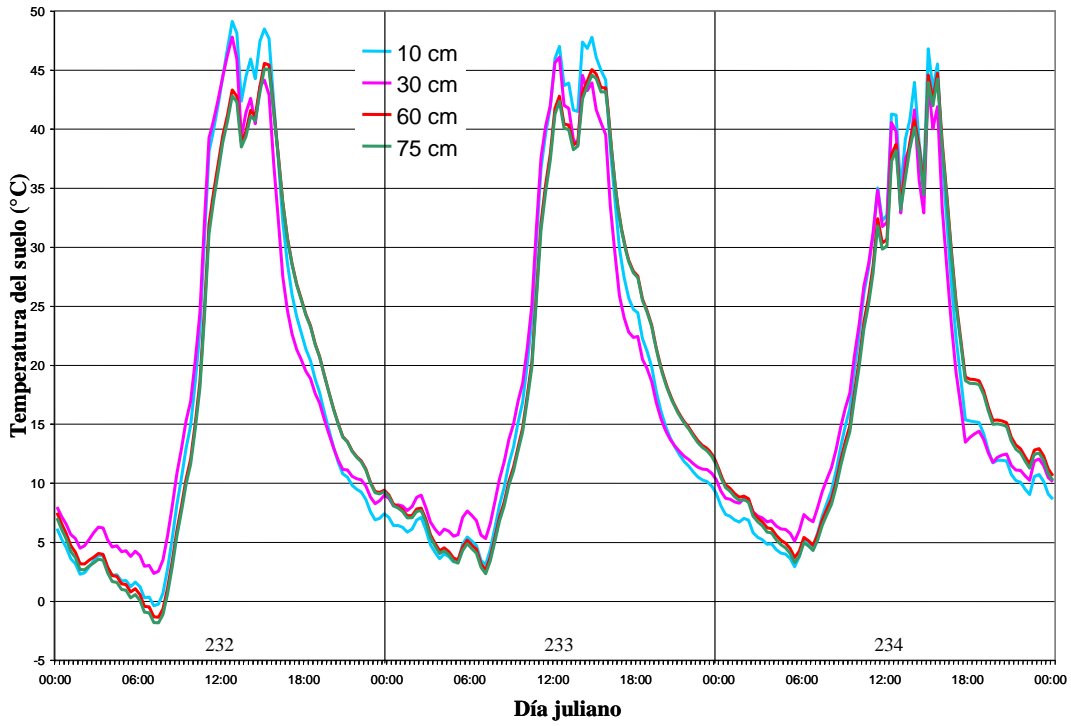


Figura 1. Comportamiento diario de la temperatura del suelo a distintas profundidades para El Carmen durante el período de estudio de la intercepción (232, 233 y 234 días julianos).

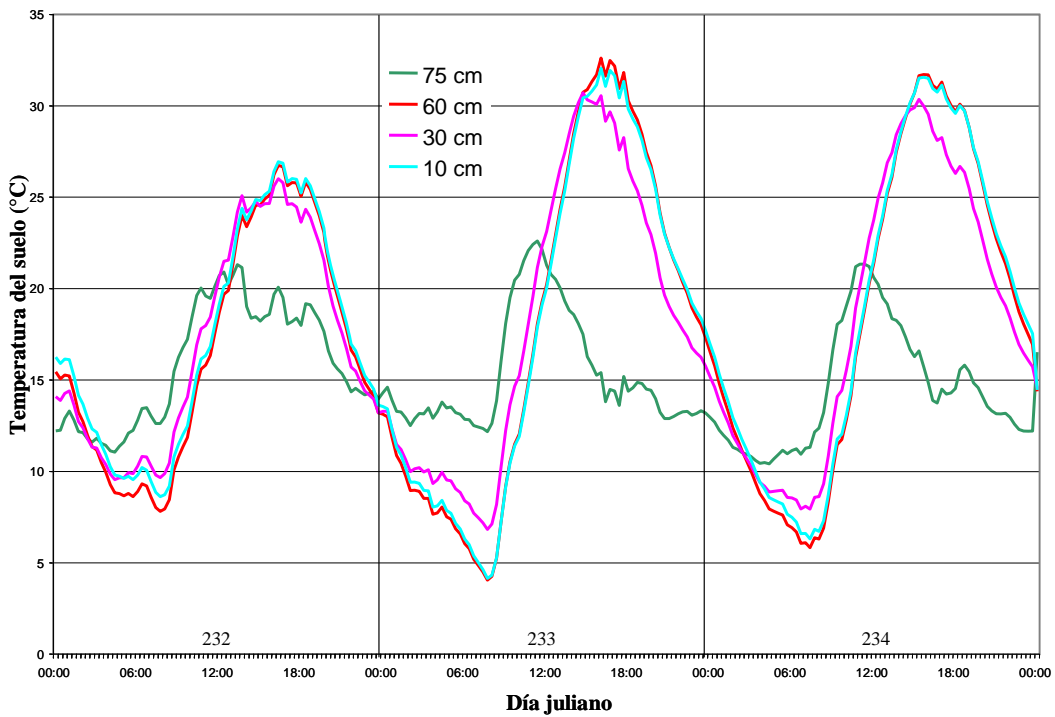


Figura 2. Comportamiento diario de la temperatura del suelo a distintas profundidades para Cadereyta durante el período de estudio de la intercepción (232, 233 y 234 días julianos)

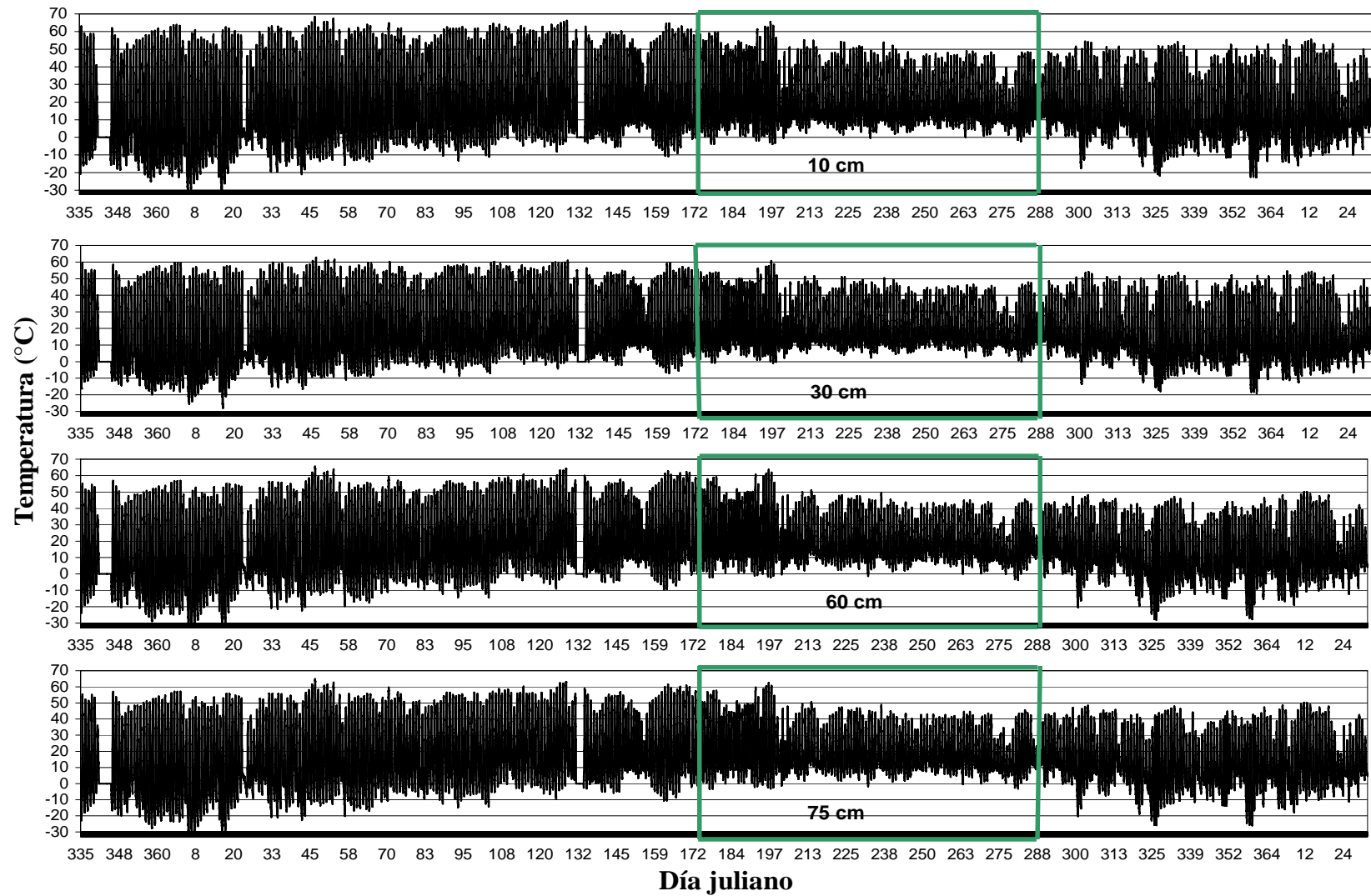


Figura 3. Temperatura del suelo a distintas profundidades para El Carmen durante el 2006. En el recuadro se observa el período de estudio en que se midió la intercepción y en ceros los períodos en los que no se registró la temperatura del suelo.

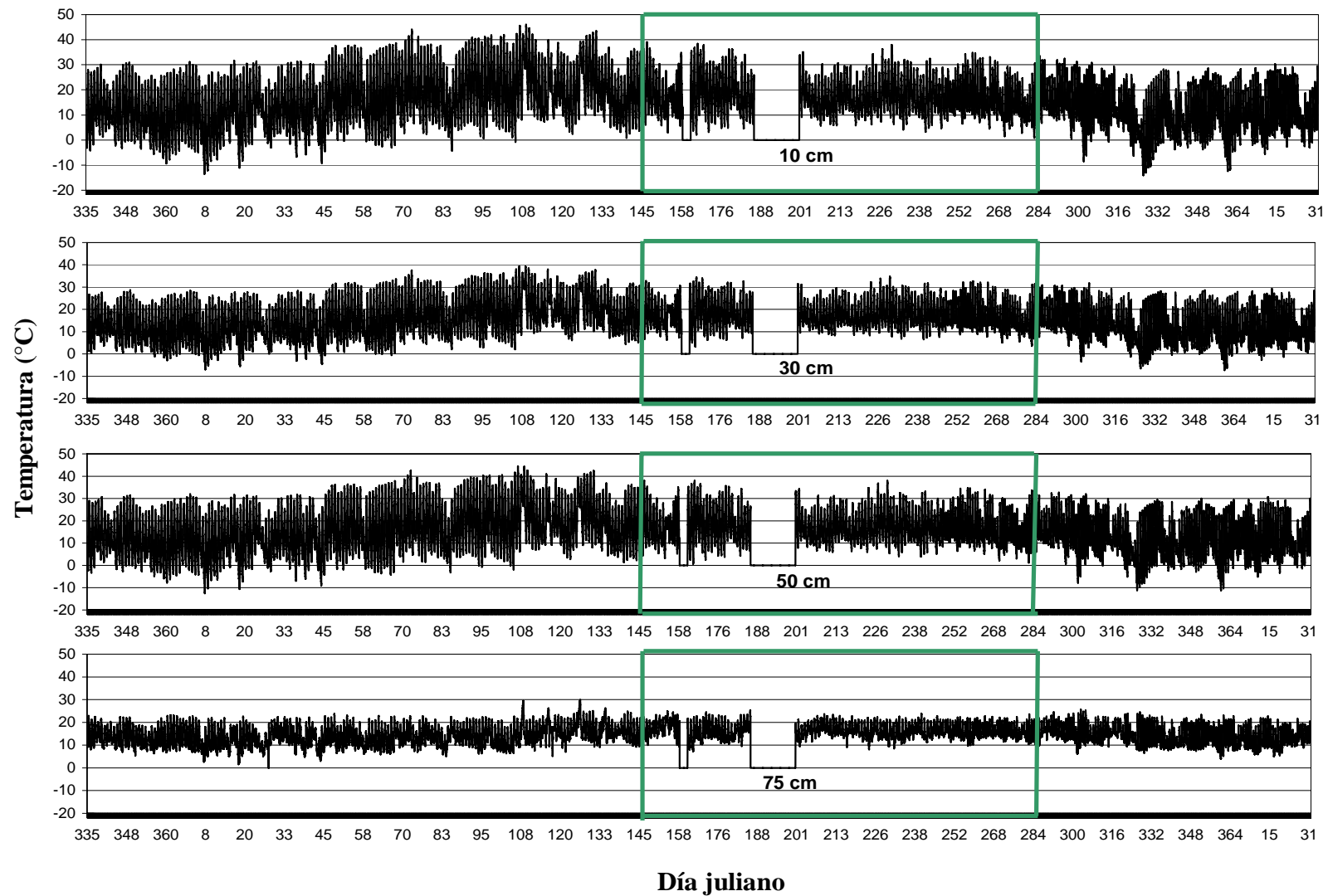


Figura 4. Temperatura del suelo a distintas profundidades para Cadereyta durante el 2006. En el recuadro se observa el período de estudio en que se midió la intercepción y en ceros los períodos en los que no se registró la temperatura del suelo.

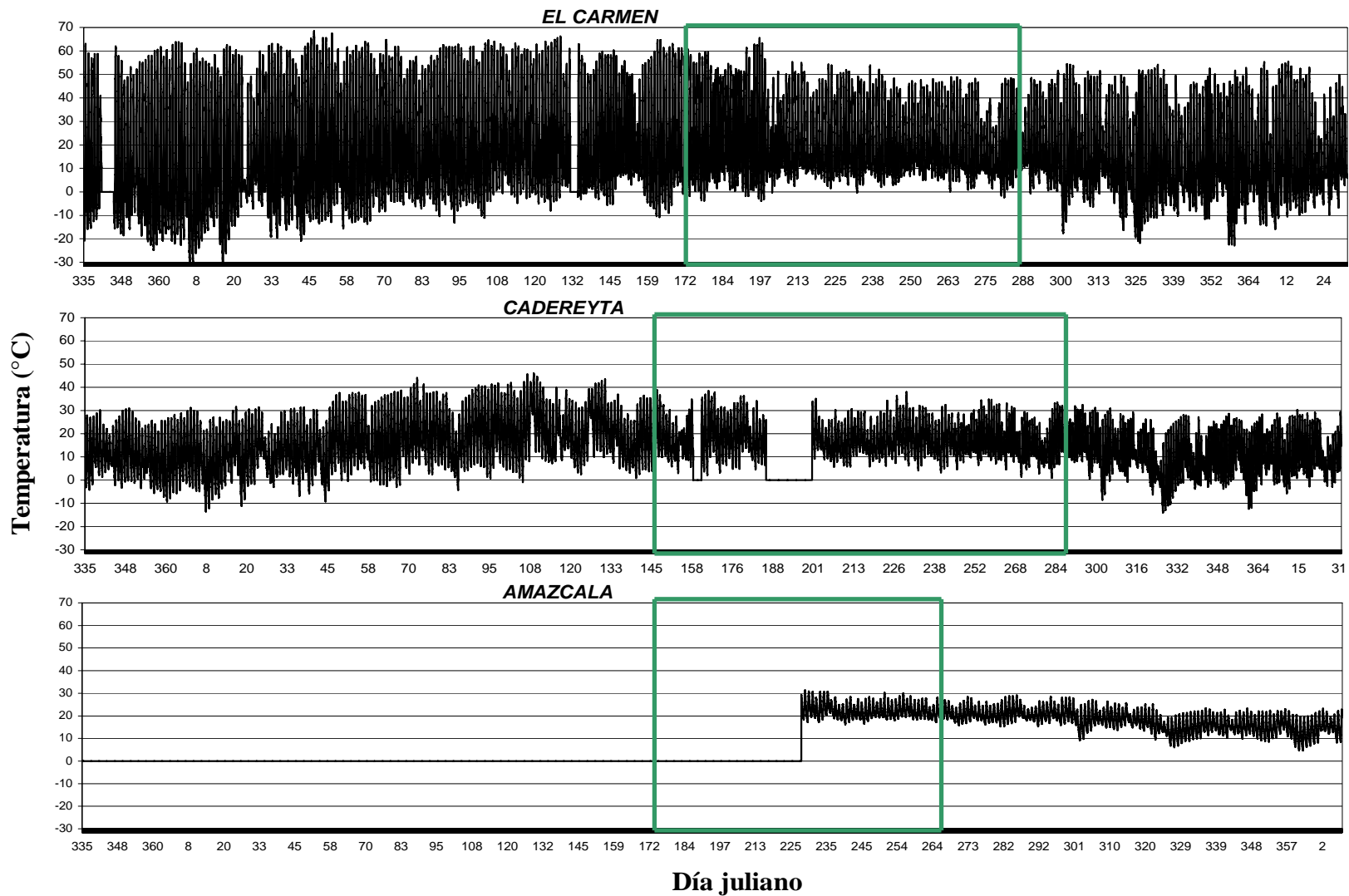


Figura 5. Temperatura en el suelo a los 10 cm de profundidad para los tres sitios experimentales durante el 2006. En el recuadro se observa el período de estudio en que se midió la interceptación y en ceros los períodos en los que no se registró la temperatura del suelo.

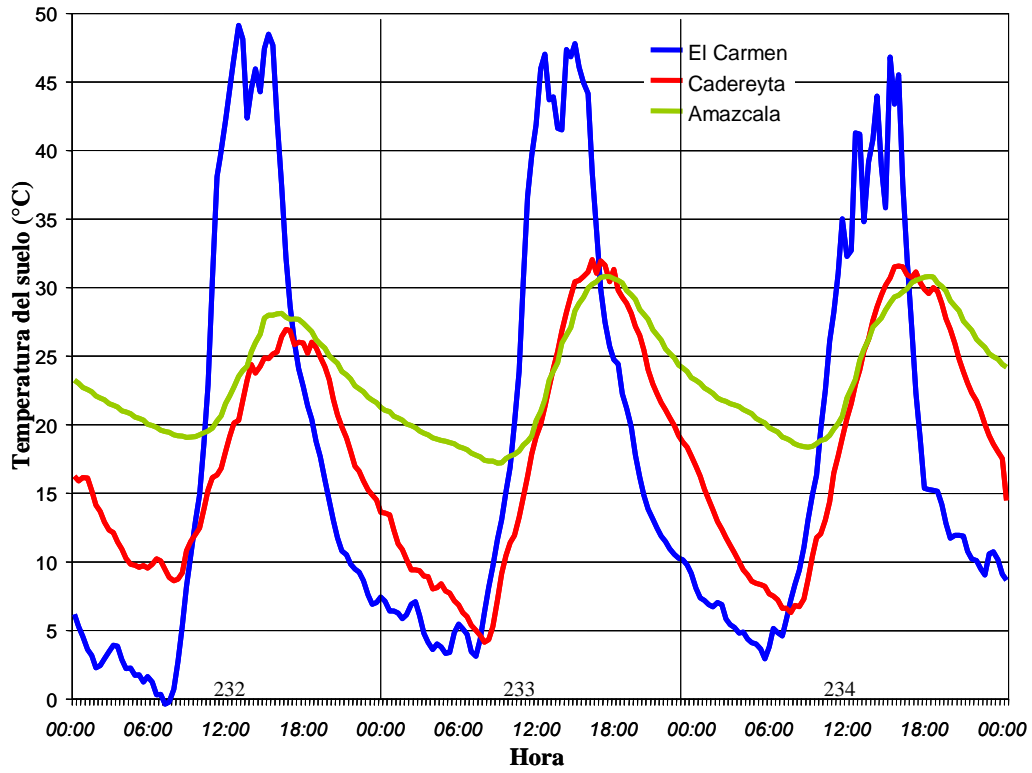


Figura 6. Comportamiento diario de la temperatura en el suelo a una profundidad de 10 cm durante el período de estudio de la intercepción para los tres sitios experimentales (20, 21 y 22 de agosto).

ANEXO II (Flujo de calor en el suelo)

Los registros que se tienen para los sitios y que son comparables a lo largo del año, indican que el comportamiento del flujo de calor en el suelo es similar, manteniendo los mismos rangos durante el verano (1.2 a -0.8 W/m^2) y otoño-invierno (0.4 a -0.4 W/m^2); durante la primavera sólo se tienen datos para Cadereyta, mostrando que el flujo de calor durante el día aumenta hasta 1.6 W/m^2 , la ausencia de datos para El Carmen y Amazcala hace imposible determinar si en estos sitios también se da ese aumento en el flujo de calor (Figura 2).

Específicamente, en los períodos de estudio en que se cuantificó la interceptación, el comportamiento para los tres sitios es muy semejante, alcanzando un promedio entre los 0.8 W/m^2 a las 6 de la tarde y -0.4 W/m^2 alrededor de las 9 de la mañana, con una media diaria de aproximadamente 0.3 W/m^2 en las tres localidades que nos ocupan (Figura 1).

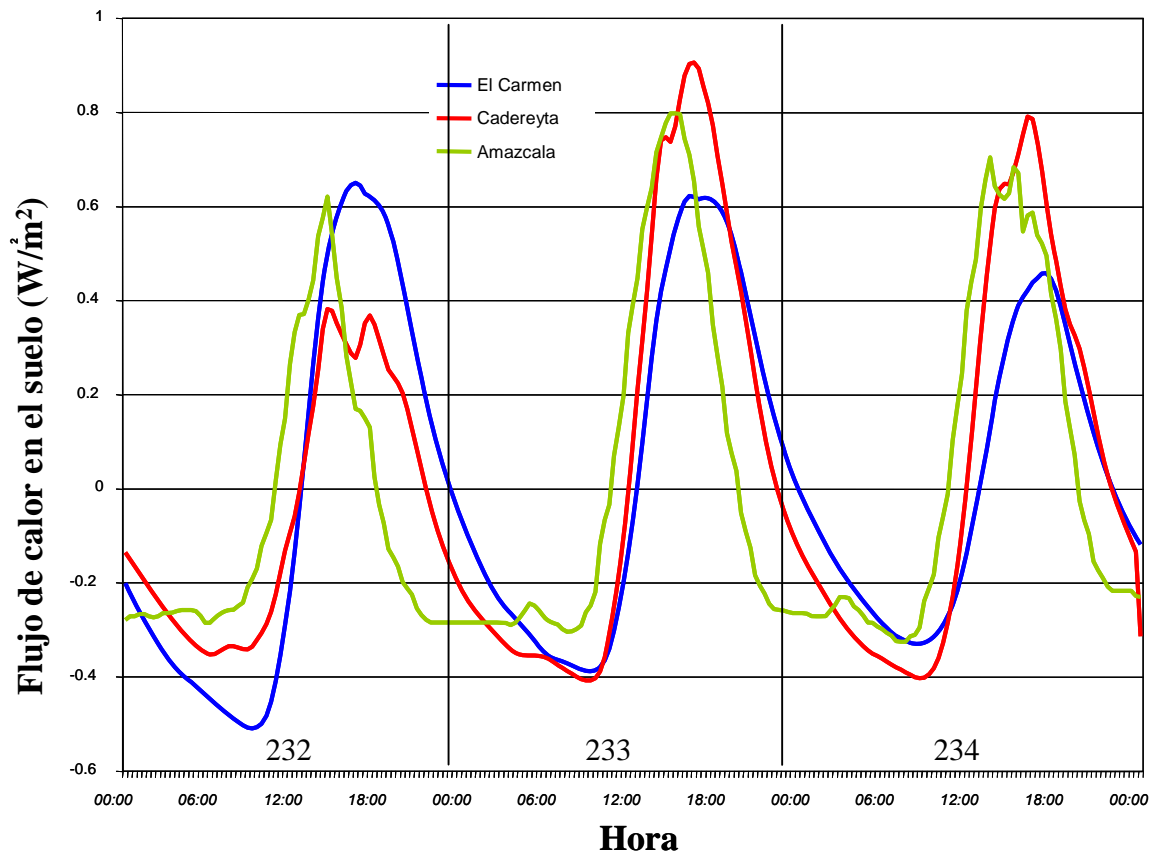


Figura 1. Comportamiento diario del flujo de calor en el suelo durante el período de estudio de la interceptación, en los tres sitios experimentales (232, 233 y 234 días julianos).

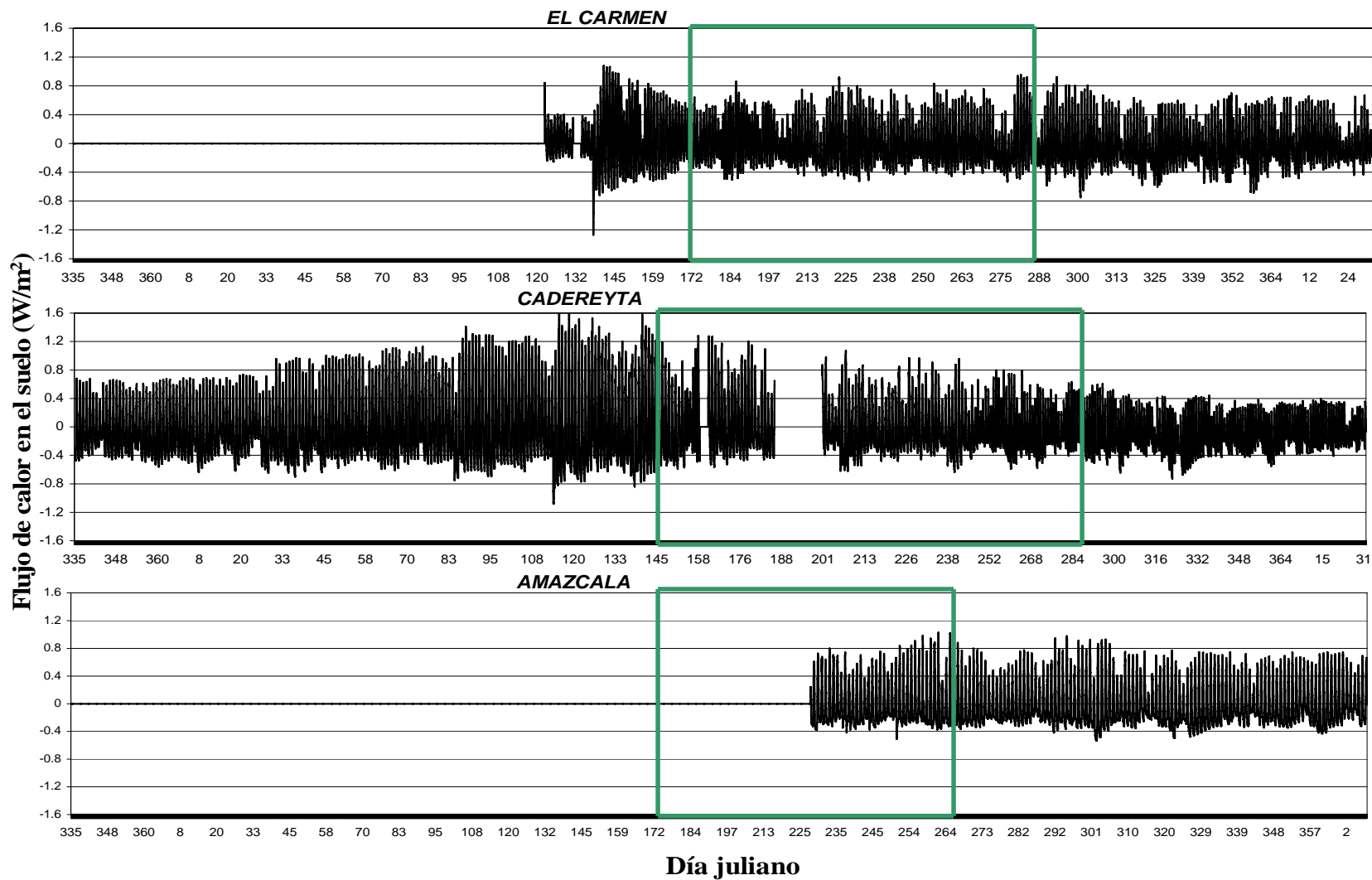


Figura 2. Flujo de calor en el suelo en los tres sitios experimentales durante el 2006. En el recuadro se observa el período de estudio en que se midió la intercepción y en ceros los períodos en los que no se registró la radiación neta.

ANEXO III (Humedad del suelo)

Los sensores de humedad del suelo que se colocaron en El Carmen presentaron anomalías en las mediciones debido a fallas técnicas en la estación, esto originó que no se pudiera medir la humedad en continuo para todo el 2006, por lo que sólo se tienen mediciones continuas para los días de 140 a 159 y de 172 a 206, también se tienen registros de la humedad para días aislados 242, 284, 291, 328 y 360. Se observa que la humedad a los 10 cm es la más dinámica de todas, ya que se pueden observar claramente las oscilaciones diurnas y nocturnas de la humedad a esta profundidad, esta capa también es la más seca durante el año y la que más humedad pierde, sin embargo en épocas de lluvia esta capa gana bastante humedad volviendo a su comportamiento normal a finales de año (Figura 1).

La humedad a los 30 cm, 60 cm y 90 cm tiene un comportamiento en el que también se aprecian los cambios de humedad durante el día y la noche, sin embargo, estos son menos dinámicos que a los 10 cm y van disminuyendo gradualmente conforme aumenta la profundidad. Estas tres capas presentan mayor humedad que a los 10 cm a lo largo del año, excepto en la época de lluvias ya que en la capa superficial la humedad sube considerablemente.

La humedad a 120 cm ya no aumenta como se venía dando con las 3 capas superiores, sino que en esta capa la humedad disminuyó considerablemente, incluso colocándose por debajo de la capa de los 40 cm al principio del año. La pérdida de humedad a esta profundidad probablemente fue originada por la rápida extracción de agua por las raíces de las plantas que ahí se localizan y/o un cambio en el perfil del suelo. Por último en El Carmen las capas más profundas a 150 cm y 170 cm presentaron los contenidos de humedad más altos durante todo el año llegando casi hasta el 50%, los cuales pueden ser anormales ya que pudieran estar registrándose entradas laterales ocasionadas por los cultivos de riego que se encuentran en la parte alta de la cuenca.

Al igual que en El Carmen, Cadereyta presentó problemas en los sensores de humedad por lo que para este sitio se registró la humedad en el suelo durante dos períodos de los días julianos, de 28 a 82 y de 172 a 365. También existió otro problema con el sensor de humedad a los 10 cm el cual en el segundo período sólo funcionó de manera pausada durante algunas horas (Figura 2).

En este sitio la humedad a los 10 cm es la más dinámica y durante el período de lluvias, con los registros a manera discontinúa del sensor, se puede observar que la humedad llega a 30 %, la cual una vez terminadas las lluvias comienza a descender.

Las capas subsecuentes a la de 10 cm presentaron una mayor humedad la cual disminuía conforme aumentaba la profundidad, en la segunda capa se pueden apreciar claramente los cambios de humedad durante el y como fue ganando humedad en los días en que se registraron eventos de lluvia, este efecto incluso se puede observar hasta los 120 cm de profundidad.

En comparación de El Carmen y Cadereyta el primer sitio fue el más húmedo en todas sus capas, en este también se puede observar un incremento continuo en la humedad conforme la profundidad aumenta, cosa que es contraria a lo observado en Cadereyta, este comportamiento puede deberse a diversos factores o al conjunto de ellos, dentro de los cuales destacan las posibles diferencias de horizontes edafológicos entre los dos sitios, lo cual también se vio reflejado en los cambios de temperatura en el suelo descritos en el ANEXO I, otra posible causa es la presencia de entradas laterales debido a los cultivos de riego en la parte alta de la cuenca, por último las diferencias en la composición vegetal también juegan un papel importante debido a que El Carmen presenta el mayor grado de conservación y cobertura en comparación con Cadereyta, que es la menor conservada y de menor cobertura, por lo que el comportamiento de la humedad en el suelo en este sitio puede ser reflejo del deterioro.

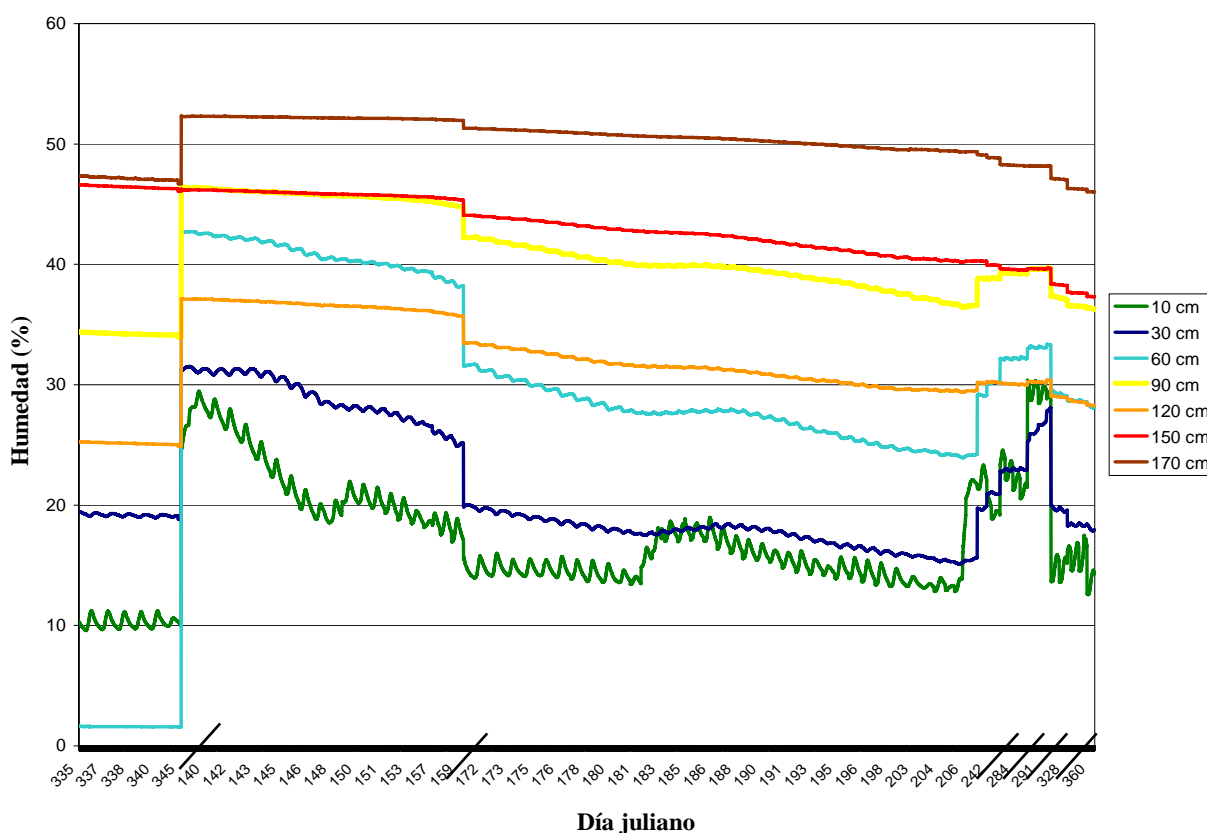


Figura 1. Comportamiento diario de los sensores de humedad del suelo en El Carmen durante el 2006.

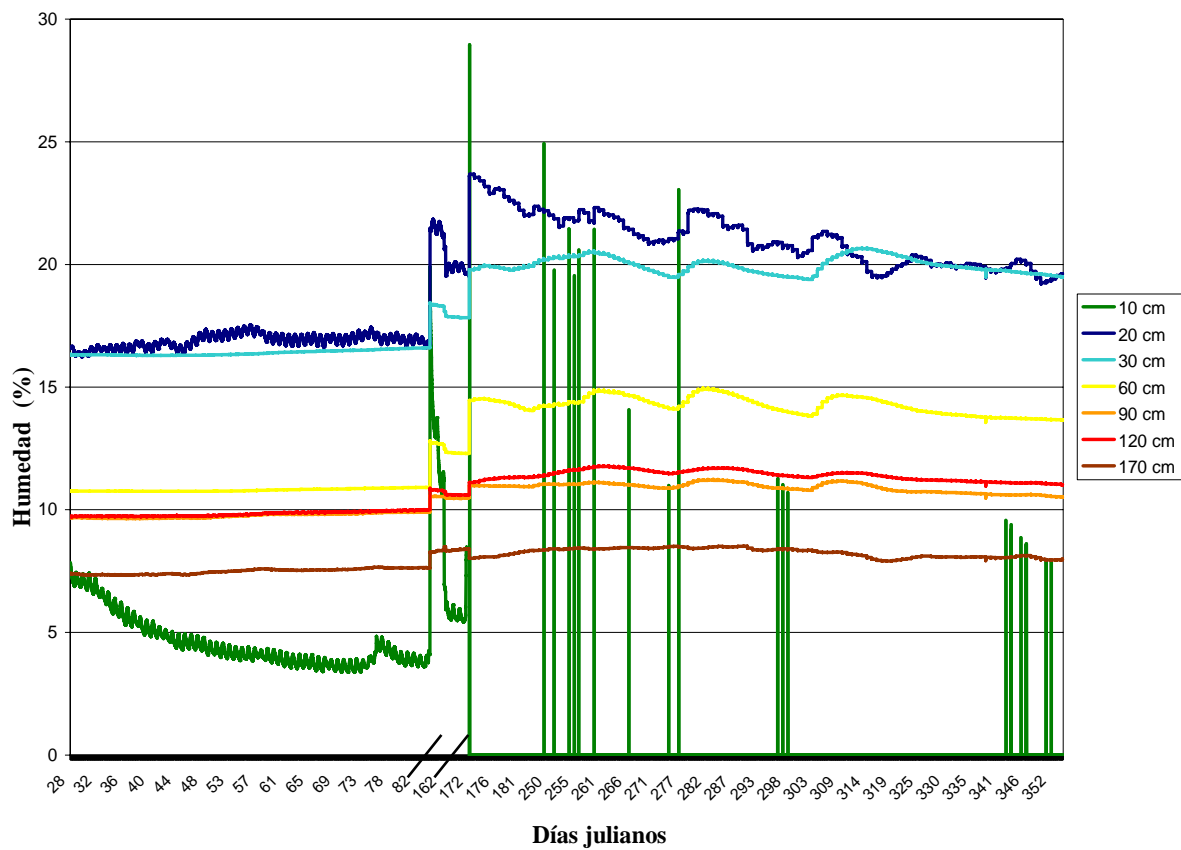


Figura 2. Comportamiento diario de los sensores de humedad del suelo en Cadereyta durante el 2006.