

INTERCEPCIÓN DE LA LLUVIA EN ESPECIES DE LEGUMINOSAS DEL NORDESTE DE MÉXICO

Rainfall Interception by Leguminous Species of Northeastern Mexico

José de Jesús Návar Cháidez^{1‡}, Jorge Méndez González² y Humberto González Rodríguez³

RESUMEN

La intercepción de la lluvia es un componente importante del ciclo hidrológico poco estudiado y modelado en especies de climas semiáridos y subtropicales. Los objetivos de este estudio fueron derivar los parámetros de la intercepción y probar la aplicabilidad del modelo analítico de Gash ajustado a cuatro especies arbustivas leguminosas del nordeste de México (*Pithecellobium pallens*, *Pithecellobium ebano*, *Acacia rigidula* y *Acacia berlandieri*). La intercepción se estimó a partir de las mediciones de la lluvia en cuatro pluviómetros y de la precipitación bajo la cobertura en 64 colectores cilíndricos. Los resultados mostraron que la intercepción fue estadísticamente diferente entre las especies y las diferencias se asociaron con los parámetros de biomasa y la estructura de la copa de los arbustos. El modelo de Gash predice adecuadamente la intercepción porque las máximas desviaciones no sobrepasaron 5% de la lluvia total. Por esta razón, el modelo se recomienda para estimar la intercepción de la lluvia de las especies estudiadas.

Palabras clave: especies subtropicales pioneras, modelo analítico de Gash, análisis de sensibilidad, calibración.

SUMMARY

Rainfall interception is a major component of the hydrological cycle that has not been extensively studied or modeled in plant species of semi-arid and sub-tropical

¹ Manejo de Recursos Naturales CIIDIR-IPN. Sigma s/n. Fraccionamiento 20 de Noviembre II. 34220 Durango, Dgo., México.

[‡] Autor responsable (josedejesusnavar@yahoo.com.mx)

² Departamento Forestal, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coah., México.

³ Facultad de Ciencias Forestales UANL. Carr. Nacional km 8, 67700 Linares, N. L., México.

Recibido: abril de 2004. Aceptado: octubre de 2007.

Publicado en Terra Latinoamericana 26: 61-68.

environments. The objectives of this study were to derive rainfall interception parameters and to test the applicability of the Gash analytical model adjusted to four leguminous shrub species of Northeastern Mexico (*Pithecellobium pallens*, *Pithecellobium ebano*, *Acacia rigidula*, and *Acacia berlandieri*). Interception loss was estimated from measurements of incident rainfall in four rain gauges and throughfall in 64 cylindrical collectors. The results showed that interception loss was statistically different among species and the differences were associated with plant biomass components and the structure of the shrub-top. Gash's analytical model for rainfall interception adequately predicted total interception loss since maximum deviations between derived and modeled interception loss were 5%. Therefore, the model is recommended to estimate rainfall interception for the plant species studied.

Index words: pioneer subtropical shrub species, Gash analytical model, sensitivity analysis, calibration.

INTRODUCCIÓN

Las especies forestales modifican el ciclo hidrológico local vía la redistribución de la lluvia después de pasar por las copas de los árboles por medio de la escorrentía fustal y la lluvia bajo las copas. Estos procesos se han investigado para diferentes bosques, especies, géneros y comunidades. Es evidente de la revisión de la literatura que la cantidad de lluvia interceptada por los bosques depende de las características morfológicas de las especies de interés (Durocher, 1990; Loustau *et al.*, 1992). Los principales factores de los árboles que controlan la intercepción y la redistribución de la lluvia son: el área foliar (Giacomin y Trucchi, 1992), la densidad de la copa (Johnson, 1990), la forma y el arreglo de las hojas (Návar y Bryan, 1990, 1994; Návar, 1993), el tipo de corteza y el área basal (Teklehaimanot *et al.*, 1991; Kelliher *et al.*, 1992).

La modelación de la intercepción y de la redistribución de la lluvia hacia el suelo es clave para entender los componentes climáticos y los atributos de

las plantas que controlan estos procesos (Gash y Morton, 1978). El modelo revisado de Gash se está convirtiendo en una herramienta muy popular debido a la facilidad de su uso en la estimación de parámetros y en la precisión con la que se estima la intercepción de la lluvia (Gash *et al.*, 1995). Sin embargo, este modelo no se ha ajustado, ni su sensibilidad se ha probado para derivar la intercepción de la lluvia en especies que aparecen en diferentes etapas sucesionales en el matorral espinoso tamaulipeco del nordeste de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área experimental se localiza en los terrenos de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, ubicada a 8 km hacia el sur de la ciudad de Linares, Nuevo León (24° 47' N, 99° 32' O, a una altitud de 350 m). El clima de la región, de acuerdo con el sistema de clasificación de Köppen (SPP, 1981), se caracteriza por ser cálido subhúmedo (A) Cx' a (e). Las temperaturas diarias pueden bajar de 0 °C y subir por arriba de los 40 °C, las cuales son registradas en enero y mayo-agosto, respectivamente. La precipitación promedio anual (1960-1994) es de 849 mm con una desviación estándar de 260 mm (Návar *et al.*, 1999b) con 80% del total presente en el periodo de mayo a octubre. El promedio anual del número de días lluviosos es de 84 con una desviación estándar de 15, de los cuales 65% registran menos de 5 mm de precipitación total. La evapotranspiración potencial anual, estimada por el método de Thornthwaite es de 1150 mm (Návar *et al.*, 1999b). Los suelos de la región son, en general, Vertisoles, con horizontes A y B profundos (30 a 100 cm) y una estructura en bloques o prismática (Bravo-Garza y Bryan, 2005).

En este reporte se estudiaron cuatro especies de arbustos: *Pithecellobium pallens*, *Pithecellobium ebano*, *Acacia rigidula* y *Acacia berlandieri*. *A. rigidula* y

P. pallens son especies pioneras, mientras que *A. berlandieri* y *P. ebano* son especies secundarias de la sucesión vegetal. Las especies son nativas de la comunidad vegetal denominada matorral espinoso tamaulipeco del nordeste de México, aunque también se distribuyen en el matorral submontano y en los bosques de encino de la Sierra Madre Oriental (Reid *et al.*, 1990).

El estudio se realizó en plantaciones del tipo monocultivo para entender las diferencias asociadas con los componentes de la intercepción. Las plantaciones se realizaron en 1984 con múltiples objetivos dentro de los cuales destacan la producción de biomasa, la supervivencia, los ritmos de crecimiento, etc. Las plantaciones se establecieron en un diseño de bloques completos al azar, donde las especies y la ubicación fueron los principales factores. Las especies presentan las siguientes características morfológicas: arbustos espinosos en *A. rigidula* y *P. ebano* y multifustales a partir de la base del suelo en *A. berlandieri*, *P. pallens* y *A. rigidula*. Para considerar algunas fuentes de variación intrínseca, se seleccionaron cuatro arbustos de cada especie, las cuales se consideraron como unidades experimentales. Las características dasométricas de los arbustos seleccionados se presentan en el Cuadro 1.

La precipitación total (P_{c}) se colectó en cada uno de cuatro pluviómetros de polietileno de 20 cm de diámetro, insertados dentro de botes de polietileno de 4 L de capacidad volumétrica soportados por una caja de madera de 42 cm de alto para evitar el impacto directo de las gotas de lluvia dentro de los colectores. Los pluviómetros permanecieron fijos durante el periodo de tiempo en el cual se realizó el estudio y se ubicaron en la vecindad de cada una de las plantaciones. La lluvia bajo las copas (P_{bc}) se colectó de una manera similar a la precipitación, solo que se usaron cuatro pluviómetros en cada plantación, cada uno debajo de cada arbusto. Los arbustos con pluviómetro debajo de su copa se seleccionaron aleatoriamente. La intercepción de

Cuadro 1. Algunas características dasométricas de los arbustos leguminosos plantados en el matorral espinoso tamaulipeco del nordeste de México.

Especies	Altura promedio	Diámetro basal promedio	Número de fustes por arbusto	Proyección vertical de la copa
	m	cm		m ²
<i>Acacia rigidula</i>	2.50	1.40	18.2	3.89
<i>Acacia berlandieri</i>	2.63	1.85	9.8	4.80
<i>Pithecellobium ebano</i>	3.01	6.35	1.0	3.18
<i>Pithecellobium pallens</i>	3.80	2.78	6.6	5.26

la lluvia (I) es aquella parte de la precipitación total que se queda en la vegetación y no alcanza el suelo mineral (Sood *et al.*, 1993), y matemáticamente es la diferencia entre la precipitación total y el agua colectada debajo de las copas de los arbustos, incluyendo la escorrentía fustal (Ef). Este último componente no se midió debido al alto número de fustes y porque explica menos de 5% de la precipitación total en estas comunidades vegetales (Návar *et al.*, 1999b).

La precipitación total y la precipitación debajo de las copas de los arbustos se registraron inmediatamente después de cada evento de precipitación. En un par de ocasiones, en los cuales las lluvias continuaron por días consecutivos, estos parámetros se registraron cada 24 h. Las mediciones iniciaron en marzo de 1996 y terminaron en marzo de 1997.

La intercepción total se estimó utilizando el modelo modificado de Gash *et al.* (1995), el cual se define matemáticamente por:

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = n(c)P'_G + (c\bar{E}_c / \bar{R}) \sum_{j=1}^n (P'_{Gj} - P'_G) + (c) \sum_{j=1}^m P_{Gj} + qS_t + p_t \sum_{j=1}^{n-q} P_{Gj} \quad (1)$$

donde: I = la intercepción total (mm); m = el número de lluvias que no saturan las copas; n = el número de lluvias que saturan las copas ($P_{Gj} > P'_G$); q = el número de lluvias que saturan las ramas y los fustes para iniciar la escorrentía fustal; P'_G = la cantidad de lluvia necesaria para iniciar la precipitación debajo de las copas de los arbustos; P_G = la precipitación total; S_t = la cantidad de precipitación necesaria para saturar las ramas y fuste; p_t = la proporción de la lluvia que es escorrentía fustal; P'_G se estimó de la Ecuación 2.

$$P'_G = -Sc * \left[\frac{\bar{R}}{\bar{E}_c} \right] * \ln \left[1 - \left(\frac{\bar{E}_c}{\bar{R}} \right) \right] \quad (2)$$

$$Sc = S/c$$

donde: S = la cantidad de agua necesaria para saturar la copa; c = la cobertura vegetal por unidad de área (%); \bar{E}_c = la tasa de evaporación por unidad de área cubierta por vegetación; \bar{R} = la intensidad promedio de la precipitación que cae sobre las copas (mm); ln = el logaritmo natural.

La metodología de la intercepción planar de la cobertura vegetal por el método de la línea de Canfield se utilizó para estimar el parámetro c. La cantidad de precipitación necesaria para saturar las ramas y el fuste, y la proporción de la lluvia que es escorrentía fustal, S_t y P_t , respectivamente, se consideraron, como en muchos otros estudios, como el intercepto y la pendiente de la relación lineal existente entre la precipitación total y la escorrentía fustal, P_G y Ef (Gash, 1979). Estos valores se obtuvieron de los trabajos desarrollados y reportados por Návar *et al.* (1999a,b) para *A. rigidula*, *P. ebano* y *P. pallens*, y del trabajo de Návar y Bryan (1994) para *A. berlandieri*, porque esta especie es similar morfológicamente a la especie *A. farnesiana* registrada por Návar y Bryan (1994). La cantidad de lluvia necesaria para saturar la copa (S) se consideró como el intercepto y el parámetro $a = \bar{E}_c / \bar{R}$ se consideró como la pendiente de las ecuaciones entre la intercepción (I) y la precipitación total (P_G). En esta investigación, consistente con el trabajo desarrollado por Návar y Synnott (2000), se supuso que P_G dura en promedio 60 min. Las cartas de cantidad duración, registradas en pluviógrafos, soportan esta suposición también (Návar y Synnott, 2000). Para evaluar el comportamiento del modelo analítico de Gash y estimar parámetros, se seleccionaron aleatoriamente 38 lluvias y las restantes 14 lluvias se utilizaron para validar y calibrar el modelo.

Las pruebas de sensibilidad del modelo, resultado de la variación de los parámetros, se realizaron sobre la intercepción total para las 38 lluvias de ajuste del modelo. Estas pruebas se realizaron con los parámetros a, S, P_t y S_t , cuyos nuevos valores fueron estimados por la adición del valor que representa el intervalo de confianza con 95% de probabilidad. Las pruebas de calibración se realizaron con los parámetros que mostraron poseer una mayor sensibilidad al estimar la intercepción. Para mejorar el ajuste de la intercepción total estimada se realizaron pruebas de calibración sobre los parámetros más sensibles, cambiándolos iterativamente hasta encontrar la solución perfecta entre la intercepción observada y estimada por el modelo para las 38 lluvias de ajuste. El modelo revisado de Gash estimó la intercepción total de dos maneras, con y sin los parámetros calibrados para ambas fuentes de datos. La precisión del modelo se derivó de las desviaciones entre los valores observados y estimados por el modelo con parámetros originales menos la desviación entre la intercepción total registrada y la intercepción total

estimada con el modelo con los parámetros calibrados entre la intercepción total registrada:

$(Dev1-Dev2)/intercepción\ total\ registrada$

donde: Dev1 = la desviación de la intercepción medida y estimada por el modelo con parámetros originales y Dev2 = la desviación de la intercepción medida y estimada por el modelo con parámetros calibrados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Precipitación Total

Durante el período experimental, se registraron 52 lluvias las cuales sumaron un total de 522.8 mm. La precipitación promedio fue de 10.05 mm con una desviación estándar de 16.62 mm. La mayoría de las lluvias se originaron de disturbios atmosféricos de las latitudes medias ocasionadas por fenómenos convectivos en el área de Linares. Dos eventos con la presencia de tormentas y dos huracanes (Dolly y Hernan) produjeron lluvias intensas en el área. De los eventos registrados, 60% tuvieron menos de 5 mm, 20% entre 5 y 10 mm, y 5% entre 50 y 70 mm de precipitación total. De los eventos de precipitación, 70% ocurrieron en condiciones medio húmedas, porque las lluvias antecedentes ocurrieron entre 1 y 5 días con anterioridad. El resto ocurrió como eventos aislados con días entre lluvias que duraron entre 5 y 40 días. De la precipitación, 63% se presentó durante el periodo de junio a octubre de 1996.

Precipitación bajo las Copas

La precipitación bajo las copas promedio (Pbc) para todas las especies fue de 463.21 mm, lo que representa 88.51% de la precipitación total. Al nivel de las especies, la precipitación bajo las copas fue de 81.32, 86.62, 92.37 y 94.04% de la precipitación total para *A. rigidula*, *P. ebano*, *A. berlandieri* y *P. pallens*, respectivamente.

La relación entre P_G y Pbc mostró altos coeficientes de determinación para cada una de las especies, con valores de $r^2 > 0.99$ (Figura 1). Cape *et al.* (1991) reportan coeficientes similares. Las pendientes de estas relaciones variaron estadísticamente ($P = 0.95$) entre las especies debido, probablemente, a las diferencias en el área foliar y la morfología de las ramas; p. ej. *P. pallens* posee ramas localizadas en una posición más vertical en contraste con las especies *A. rigidula* y *P. ebano*.

Intercepción Total

La intercepción total promedio (I) para todas las especies fue de 59.67 mm (11.41% de la precipitación total) con una desviación estándar de 30.30 mm (5.89% de la precipitación total). La intercepción fue diferente entre las especies de arbustos ($P > F = 0.0001$). *A. rigidula* (Figura 1a) registró el valor mayor de intercepción (18.68%), seguido por *P. ebano* (13.38%) (Figura 1c), *A. berlandieri* (7.63%) (Figura 1b) y, finalmente, *P. pallens* (5.96%) (Figura 1d). Las altas pérdidas de lluvia por intercepción en *A. rigidula* se encuentran asociadas con el número de fustes, la poca inclinación de las ramas y probablemente con una mayor área foliar. Los valores bajos de intercepción en *P. pallens* pueden ser explicados por poseer hojas más pequeñas, corteza más alisada y ramas más inclinadas hacia el cenit.

En general, los valores de intercepción registrados en este estudio son ligeramente menores que los valores reportados para la misma comunidad vegetal (*D. texana*, *A. farnesiana* y *P. laevigata*) por Nívar y Bryan (1994), aunque valores similares fueron registrados en este estudio para las especies *A. rigidula* y *P. ebano* y la comunidad vegetal como una sola especie por Nívar *et al.* (1999a) y Nívar *et al.* (1999b).

Al considerar todas las especies, la altura total se relacionó negativamente y la biomasa total positivamente con los valores de intercepción. Las estimaciones de biomasa se basaron en las ecuaciones reportadas por Nívar *et al.* (2004). Esto indica que los arbustos con las mayores alturas y las menores cantidades de biomasa registraron las menores tasas de intercepción. Nívar *et al.* (1999b), en un estudio previo de la intercepción en una comunidad vegetal similar, observaron que la intercepción estuvo asociada con las variaciones espaciales de los parámetros que describen la estructura de las copas.

Modelo Analítico de Intercepción de Gash

Los parámetros del modelo de Gash indicaron que la cantidad de precipitación necesaria para iniciar la lluvia bajo las copas (P'_G) fue diferente entre las especies y varió desde 0.090 hasta 0.695 mm. El número de lluvias que saturan las copas (n) fue superior a 85% del número total de los eventos de precipitación registrados (Cuadro 2). La intercepción total promedio derivada de las mediciones de los componentes de precipitación para todas las especies fue de 47.45 mm (10.89% de

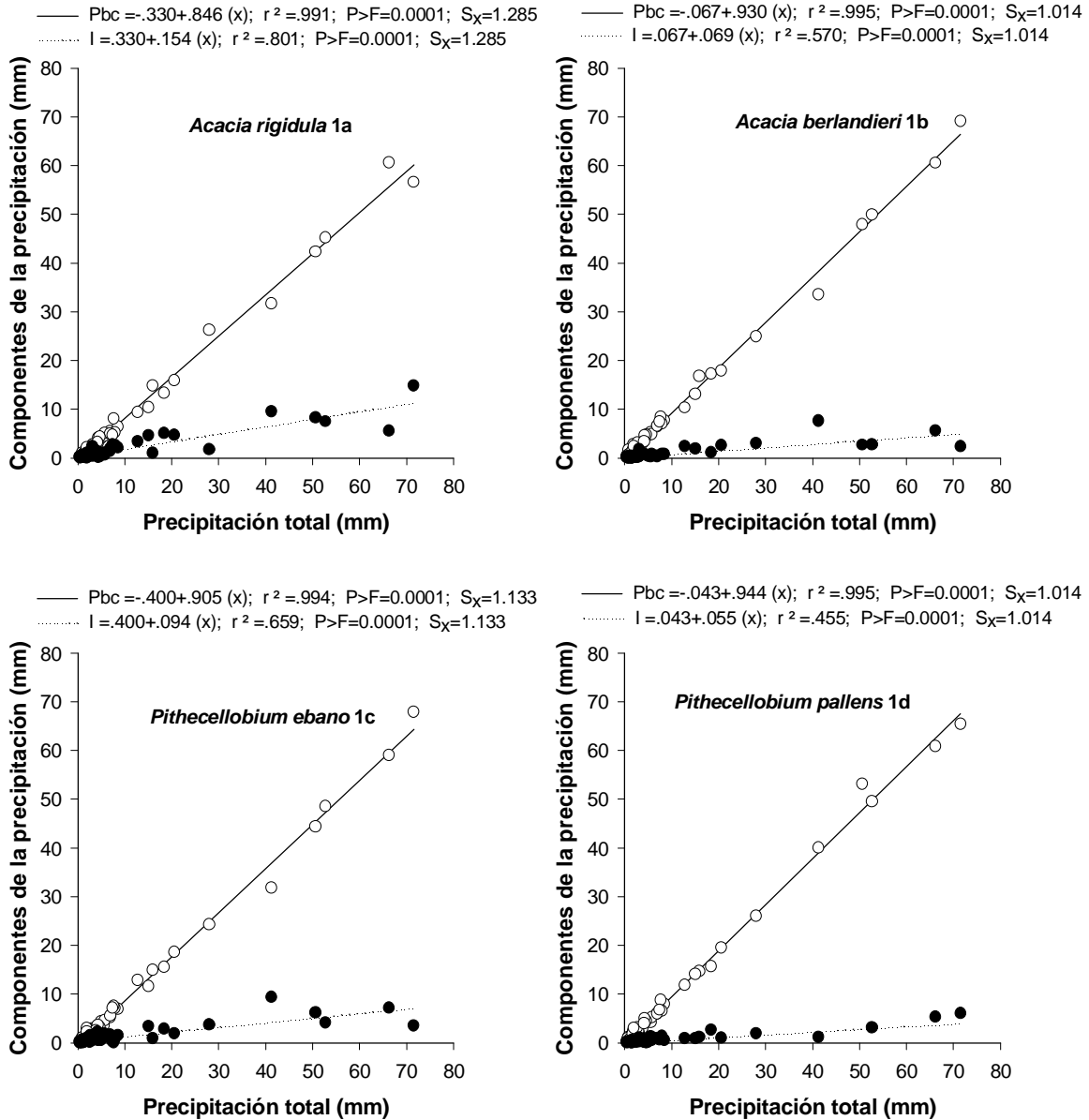


Figura 1. La relación entre la precipitación debajo de las copas, la intercepción y la precipitación total para cuatro especies plantadas dentro del matorral espinoso tamaulipeco del nordeste de México.

la precipitación total), mientras que la intercepción total estimada por el modelo de Gash fue de 48.14 mm (11.05% de la precipitación total). En general, el modelo de Gash sobrestimó la intercepción por sólo 0.69 mm (0.16% de la precipitación total). Al nivel de las especies, la intercepción se subestimó en *P. ebano* (9.9%) y *A. berlandieri* (5.6%), pero se sobrestimó en *A. rigidula* (0.75%) y *P. pallens* (19.5%). Gash y Morton (1978), Pearce *et al.* (1980) y Nívar *et al.* (1999a; 1999b) señalan que el modelo de Gash frecuentemente sobrestima

la intercepción. En contraste, Sambasiva (1987) encontró que el modelo sobrestimaba la intercepción en 10% de la precipitación total.

Análisis de Sensibilidad

La intercepción total promedio varió para todas las especies arbustivas cuando se les agregó el intervalo de confianza a 95% de los parámetros a, S, St y Pt por 25.9, 37.6, 0.5 y 0.07%, respectivamente. El modelo de

Cuadro 2. Parámetros del modelo analítico de Gash de intercepción de la lluvia ajustado a cuatro especies plantadas dentro del matorral espinoso tamaulipeco del nordeste de México.

Parámetro [†]	Especies arbustivas			
	<i>Acacia rigidula</i>	<i>Acacia berlandieri</i>	<i>Pithecellobium ebano</i>	<i>Pithecellobium pallens</i>
S (mm)	0.36	0.106 (0.14)	0.415 (0.46)	0.068 (.06)
c (%)	0.88	0.9	0.61	0.8
Sc (mm)	0.40 (0.44)	0.16	0.68 (0.75)	0.09 (0.07)
a (h ⁻¹)	0.153 (0.15)	0.069 (0.07)	0.094 (0.11)	0.055 (0.04)
R (mm)	9.14	9.14	9.14	9.14
Ec (mm h ⁻¹)	1.23 (1.21)	0.57	0.52 (0.61)	0.40 (0.32)
Pt (%)	0.04	0.01	0.04	0.04
St (mm)	0.09	0.02	0.09	0.07
St / pt	2.21	3	2.21	1.89
P' _G (mm)	0.43	0.12 (0.16)	0.70 (0.78)	0.09 (0.07)
N	38	38	38	38
n > P' _G	38	38	34	38
M < P' _G	0	0	4	0
Q > St / pt	23	19	23	25
P _G (mm)	435.59	435.59	435.59	435.59

[†]S = cantidad de lluvia necesaria para saturar la copa (mm), c = cobertura vegetal (%), Sc = cantidad de lluvia necesaria para saturar la vegetación de la copa (mm), a = pendiente (h⁻¹), R = lluvia promedio (mm), Ec = tasa de evaporación (mm h⁻¹), Pt = proporción de escorrentía fustal (%), St = lluvia necesaria para saturar fustes y ramas (mm), P'_G = cantidad de lluvia necesaria para iniciar la precipitación bajo las copas (mm), N = número de lluvias, P_G = lluvia total (mm). Entre paréntesis se encuentra el conjunto de parámetros calibrados iterativamente.

intercepción fue más sensible a los parámetros a y S, y muy insensible a los parámetros St y Pt (Cuadro 3).

Para cada una de las especies estudiadas, el modelo de intercepción fue más sensible al parámetro S y muy insensible a los parámetros St y Pt. El error total que resultó para la intercepción de todas las especies por este análisis fue 60.81%. Para cada una de las especies, el error total fue de 43, 75, 23 y 198% para *A. rigidula*, *P. ebano*, *A. berlandieri* y *P. pallens*, respectivamente.

Calibración del Modelo

El procedimiento iterativo de búsqueda de valores para los parámetros S y a (y consecuentemente de S_c, E_c, y P'_G) produjo resultados mixtos para las 14 lluvias de validación del modelo. El nuevo conjunto de parámetros mejoró la precisión para estimar la intercepción para las especies *A. rigidula* (0.2 mm, 1.12%) y *A. berlandieri* (0.2 mm, 3.6%). Sin embargo,

Cuadro 3. Análisis de sensibilidad de la intercepción total a los parámetros a, S, Pt y St.

Parámetro [†]	Nuevo parámetro	Error total	
		mm	mm
		<i>Acacia rigidula</i>	
a	0.137	4.46	4.13
S	0.932	29.13	7.70
St	0.095	0.75	0.11
Pt	0.043	0.77	1.48
		<i>Pithecellobium ebano</i>	
a	0.116	3.30	6.35
S	0.617	9.43	27.77
St	0.095	6.61	4.26
Pt	0.043	6.60	4.25
		<i>Pithecellobium pallens</i>	
a	0.116	3.30	6.35
S	0.617	9.43	27.77
St	0.095	6.61	4.26
Pt	0.043	6.60	4.25

[†]a = pendiente, S = cantidad de lluvia necesaria para saturar la copa, St = lluvia necesaria para saturar fustes y ramas, Pt = proporción de escorrentía fustal.

Cuadro 4. La intercepción derivada de las mediciones de los componentes de precipitación y estimada por el modelo de Gash con los parámetros calibrados iterativamente para las cuatro especies arbustivas del matorral espinoso tamaulipeco del nordeste de México.

	Intercepción total			
	Derivada de mediciones		Modelada	
	Ajuste	Validación	Ajuste	Validación
	----- mm -----			
Especies/lluvias	38.0	14.0	38	14
<i>Acacia rigidula</i>	79.9	17.8	80.5 (79.9)	19.7 (19.5)
<i>Acacia berlandieri</i>	34.4	5.5	32.5 (34.4)	5.8 (5.6)
<i>Pithecellobium ebano</i>	56.8	13.2	51.2 (56.8)	9.7 (16.9)
<i>Pithecellobium pallens</i>	21.5	9.7	25.6 (21.5)	5.2 (4.2)

Los valores de intercepción entre paréntesis es aquella estimada con los parámetros calibrados iterativamente.

para las especies *P. ebano* (-0.2 mm, 1.5%) y *P. pallens* (-1.0 mm, 10.3%) el procedimiento de calibración redujo la precisión para las lluvias independientes (Cuadro 4). Estos resultados contrastantes parecen ser el resultado de alguna función de los parámetros estructurales de las copas. *A. rigidula* y *A. berlandieri* se caracterizan por poseer copas amplias y un tanto ralas. *P. ebano* y *P. pallens* pudieron haber controlado la redistribución de la lluvia en una manera diferente entre tormentas. En consecuencia, las desviaciones entre la intercepción derivada de las mediciones y la estimada por el modelo parecieron estar en función de la cantidad, duración e intensidad de la lluvia. Para las lluvias de ajuste de parámetros, la intercepción total fue 11.1%, mientras que para las lluvias independientes este valor fue mayor (13.2%). Sin embargo, no existió evidencia clara de que la cantidad de intercepción pudo controlar las desviaciones entre los valores derivados y modelados de intercepción, como ha sido sugerido anteriormente por Teklehaimanot *et al.* (1991).

CONCLUSIONES

Las especies arbustivas estudiadas mostraron diferentes valores de intercepción derivada y modelada, y contribuyeron a la redistribución de la lluvia en una manera diferente, ocasionando una mayor heterogeneidad en la disponibilidad de recursos en el matorral espinoso tamaulipeco del nordeste de México. Las especies mostraron una ligera tendencia a reducir la intercepción y, por consiguiente, a aumentar la cantidad de lluvia disponible para la evapotranspiración con la etapa de sucesión. Este patrón parece ser explicado por los parámetros estructurales de las copas, junto con la biomasa total. En general, el modelo de Gash se ajustó y

validó adecuadamente para estimar la intercepción previa medición de los parámetros estructurales de la vegetación y los valores de precipitación. El modelo mejoró parcialmente la precisión en la estimación de la intercepción con el proceso de búsqueda iterativa de parámetros. Por esta razón, se recomienda su uso en la estimación de la intercepción para las especies de plantas arbustivas estudiadas porque las desviaciones no sobrepasaron 5% de la lluvia total.

AGRADECIMIENTOS

El Fondo Sectorial CONACYT-CONAFOR financió parcialmente los trabajos para la escritura y publicación de esta investigación a través del proyecto 6231. Se agradece también al sinnúmero de revisores y editores anónimos quienes mejoraron sustancialmente la escritura de este manuscrito.

LITERATURA CITADA

- Bravo-Garza, M. R. and R. Bryan. 2005. Soil properties along cultivation and fallow time sequences on Vertisols in Northeastern Mexico. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 473-481.
- Cape, J. N., A. H. Brown, S. M. Robertson, G. Howson, and I. S. Paterson. 1991. Interspecies comparisons of throughfall and stemflow at three sites in northern Britain. *For. Ecol. Manage.* 46: 165-177.
- Durocher, M. G. 1990. Monitoring spatial variability of forest interception. *Hydrol. Processes* 4: 215-229.
- Gash, J. H. C. 1979. An analytical model of rainfall interception by forests. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 105: 43-55.
- Gash, J. H. C. and A. J. Morton. 1978. An application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from Thetford forest. *J. Hydrol.* 38: 49-58.
- Gash, J. H. C., C. R. Lloyd, and G. Lachaud. 1995. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *J. Hydrol.* 170: 79-86.

- Giacomin, A. and P. Trucchi. 1992. Rainfall interception in a beech coppice (Acquerino, Italy). *J. Hydrol.* 137: 141-147.
- Johnson, R. C. 1990. The interception, throughfall and stemflow in a forest in Highland Scotland and the comparison with other upland forests in the U.K. *J. Hydrol.* 118: 281-287.
- Kelliher, F. M., D. Whitehead, and D. S. Pollock. 1992. Rainfall interception by trees and slash in a young *Pinus radiata* D. Don stand. *J. Hydrol.* 131: 187-204.
- Loustau, D., P. Berbigier, A. Granier, and F. Moussa. 1992. Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. I. Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy. *J. Hydrol.* 138: 449-467.
- Návar, J. 1993. The causes of stemflow variation in three semi-arid growing species of northeastern Mexico. *J. Hydrol.* 145: 175-190.
- Návar, J. and R. Bryan. 1990. Interception loss and rainfall redistribution by three semi-arid growing shrubs in northeastern Mexico. *J. Hydrol.* 115: 51-63.
- Návar, J. and R. B. Bryan. 1994. Fitting the analytical model of rainfall interception of Gash to individual shrubs of semi-arid vegetation in northeastern Mexico. *Agric. For. Meteorol.* 68: 133-143.
- Návar, J. and T. J. Synnott. 2000. Surface runoff, soil erosion, and land use in northeastern México. *Terra* 18: 247-253.
- Návar, J., D. E. Carlyle-Moses, and A. Martínez M. 1999a. Interception loss from the Tamaulipan matorral thornscrub of north-eastern Mexico: an application of the Gash analytical interception loss model. *J. Arid Environ.* 41: 1-10.
- Návar, J., F. Charles, and E. Jurado. 1999b. Spatial variations of interception loss components by Tamaulipan thornscrub in northeastern México. *For. Ecol. Manage.* 124: 231-239.
- Návar, J., E. Méndez, A. Nájera, J. Graciano, V. Dale, and B. Parresol. 2004. Biomass equations for shrub species of Tamaulipan thornscrub of North-eastern Mexico. *J. Arid Environ.* 59: 657-674.
- Pearce, A. J., L. K. Rowe, and J. B. Stewart. 1980. Nighttime, wet canopy evaporation rates and the water balance of an evergreen mixed forest. *Water Resour. Res.* 16: 955-959.
- Reid, N., D. M. Stafford-Smith, P. Beber-Munzel, and J. Marroquín. 1990. Floristic and structural variation in the Tamaulipan thornscrub, Northeastern Mexico. *J. Vegetation Sci.* 1: 529-538.
- Sambasiva, R. A. 1987. Interception loss of rainfall from cashew trees. *J. Hydrol.* 90: 293-301.
- Sood, V. K., R. Singh, and M. Bhatia. 1993. Throughfall, stemflow and canopy interception in three hardwood tree species around Shimla, Himachal Pradesh. *Indian J. For.* 16: 39-44.
- SPP (Secretaría de Programación y Presupuesto). 1981. Carta de climas. Escala 1:1 000 000, Hoja Monterrey. Tipos de climas según Köppen, modificado por E. García. Secretaría de Programación y Presupuesto. México, D. F.
- Teklehaimanot, Z., P. J. Jarvis, and D. C. Ledger. 1991. Rainfall interception and boundary layer conductance in relation to tree spacing. *J. Hydrol.* 123: 261-278.