

USO DE SENSORES REMOTOS EN LA MODELACIÓN DE LA RELACIÓN PRECIPITACIÓN-ESCURRIMIENTO

Remote Sensing Use in the Precipitation-Runoff Relationship Modelling

Eliezer López Bautista¹, Fernando Paz Pellat^{1‡}, Mario Martínez Menes¹,
José Donaldo Ríos Berber¹ y Martín A. Bolaños González¹

RESUMEN

La modelación de la relación precipitación-escurrimiento ha sido aproximada en esquemas simplificados, como el del método del número de curva (NC) del Soil Conservation Service del USDA. No obstante esto, las bases teóricas de esta aproximación han sido cuestionadas recientemente. Así, bajo el paradigma de desarrollar un método simple y operacional, se ha planteado el uso de un modelo expo-lineal que puede ser reducido en función de un sólo parámetro, en forma similar al método del NC. Este modelo fue aplicado a datos de un experimento de mezclas físicas de suelo-pastos en un simulador de lluvias tipo Morin y los resultados mostraron buenos ajustes experimentales ($R^2 > 0.99$). Adicionalmente, para estimar el parámetro del modelo expo-lineal, se ha planteado el uso de la tecnología de los sensores remotos. Así, de datos de reflectancias medidas en el experimento mencionado de mezclas, se analizó la factibilidad de caracterizar el modelo expo-lineal en función de reflectancias. Los resultados para el caso de una intensidad fija de precipitación muestran que esta aproximación es viable, pero requiere de un análisis usando diseños experimentales con diferentes niveles de intensidad de la precipitación en el simulador de lluvias para su generalización.

Palabras clave: *modelo expo-lineal, reflectancia, lotes de escurrimiento.*

SUMMARY

The precipitation-runoff relationship has been approximated using simplified schemes like the numerical

curve (NC) method of the USDA Soil Conservation Service. Nevertheless, the theoretical basis of this approximation has been recently questioned. Thus, under the paradigm of develop a simple and operative model, the expo-model has been proposed that can be parameterized using one parameter in a similar way as NC method. This model was applied to data from an experiment using soil-grass mixes in a Morin type rain simulator and the results found were satisfactory in the experimental fits. Furthermore, in order to estimate the parameter of the expo-linear model the use of remote sensing technology has been proposed. Thus, using reflectance data measured in the before mentioned experiment the feasibility of the characterization of the expo-linear model was analyzed. The results, restricted, show that this approximation is feasible, but it requires data without the problems associated to the experimental design used in the rain simulator.

Index words: *expo-linear model, reflectances, runoff plots.*

INTRODUCCIÓN

La modelación de la relación precipitación (P) y escurrimiento (Q) ha sido abordada a través de esquemas simplificados como el del método del número de curva (NC) (SCS, 1972) y de esquemas más complejos como el EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) (Sharpley y Williams, 1990) y el SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Neitsch *et al.*, 2002). Independientemente de la validez de estos modelos hidrológicos, los requerimientos de información son fuertes, en particular en su actualización (humedad del suelo y cobertura y densidad de la vegetación) para simular eventos de precipitación en términos operacionales.

Los sensores remotos ofrece la posibilidad de obtener información sobre el estado de una zona geográfica, cualquier dimensión o configuración geométrica, en términos relevantes para la modelación hidrológica: humedad del suelo,

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo estado de México.

[‡] Autor responsable (ferpazpel@gmail.com)

cobertura y densidad de la vegetación, permanencia de la cobertura, etc. La ventaja de los sensores remotos de hacer cubrimientos espaciales exhaustivos (en los sensores ópticos queda la problemática de la cobertura de nubes) y con tiempo de revisita (resolución temporal) cortos (1 a 16 días) es única para consideraciones operacionales de la modelación hidrológica. Los sensores como MODIS, en la plataforma espacial AQUA/TERRA, permiten obtener muestreos de la superficie terrestre a resoluciones espaciales de 250 × 250 m a nadir y tiempos de revisita menores a 2 días. Ahora bien, si se combinan diferentes sensores a una resolución de alrededor de 1000 × 1000 m (AVHRR, MODIS, MISR, MERIS, VEGETATIO, etc.) es posible obtener alrededor de 20 imágenes satelitales por día en un mismo sitio. Evidentemente este poder de muestreo es extremadamente útil en la actualización de la información relacionada con los modelos hidrológicos.

La utilización de la información espectral de las imágenes satelitales para determinar el estado de las variables de un modelo de la precipitación-escorrentía puede evitar el problema de sobre parametrización de los enfoques clásicos, en especial si se utiliza un esquema de modelación simple y sólido. Al respecto de un modelo hidrológico con bases teóricas sólidas, el método del NC ampliamente usado en la práctica ha sido severamente cuestionado por Paz (2009) en cuanto a su sustento hidrológico. Como alternativa, se puede proponer un modelo que puede ser puesto en términos de un solo parámetro, facilitando su implementación en forma operacional. En relación al uso de los sensores remotos para estimar en forma conjunta la humedad del suelo y la cobertura (y densidad de la vegetación o índice de área foliar o IAF) de la vegetación, Paz *et al.* (2009 y 2010) propusieron un esquema de modelación usando reflectancias obtenidas con sensores remotos del sistema suelo-vegetación.

En este trabajo se realiza un estudio exploratorio de la aplicación de los desarrollos planteados por Paz (2009) en un experimento de lotes de escorrentía en un simulador de lluvias tipo rotatorio, con diferentes coberturas de la mezcla suelo-vegetación. El objetivo planteado es analizar la factibilidad del uso de información espectral en un modelo hidrológico simplificado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo Hdrológico de Paz

El modelo de Paz (Paz, 2009) plantea la modelación de la relación P-Q como compuesta por dos fases

temporales: una exponencial y una lineal, Figura 1; aunque el modelo puede reproducir cada fase en forma única. Por ejemplo, en la Figura 1 con línea punteada se muestra el caso de un comportamiento lineal entre P-Q, el cual es un caso particular del modelo expo-lineal, tal como se muestra más adelante.

El modelo expo-lineal de Paz (2009) es simplemente la solución de los dos tipos de patrones representados por dos ecuaciones diferenciales (fases en la Figura 1) sujeta a la condición dada por la relación de igualdad de las tasas de cambio:

$$Q(t) = \frac{C}{r} \ln\{1 + \exp[r(P - P_b)]\} \tag{1}$$

donde:

r = una tasa relativa de cambio (mm mm⁻¹d⁻¹),

C = tasa máxima de cambio (mm m⁻² d⁻¹)

P_b = precipitación cuando Q(P = 0) en la fase lineal.

Con las siguientes características:

$$Q(P = P_T) = \frac{C}{r} = Q_T \tag{2}$$

$$P_T = P_b + \frac{0.541}{r}$$

donde:

P_T = precipitación donde la condición de igualdad de las tasas de cambio, Figura 2, se cumple.

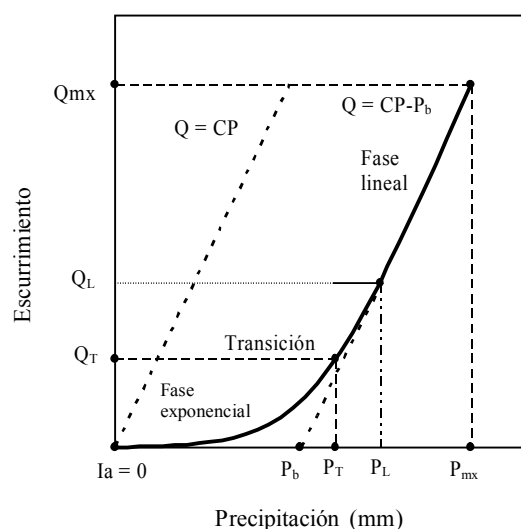


Figura 1. Esquemización del modelo hidrológico de Paz (2009). Q = escorrentía, P = precipitación, Ia = abstracción inicial. Subíndices: mx = máxima, T = transición, L = lineal, b = base.

La relación $Q - (dQ/dP)$ es un sigmoideo simétrico para el modelo expo-lineal, Figura 2.

Puesto que la fase lineal del modelo expo-lineal, Figura 1, esta representada por la Ecuación 3:

$$Q = -CP_b + CP \quad (3)$$

Entonces el valor máximo de C que puede tomar es 1. El punto (P_L, Q_L) , Figura 1, define la condición donde el comportamiento entre P - Q es enteramente lineal.

Para analizar el ajuste empírico del modelo expo-lineal a los datos experimentales de las mezclas físicas de suelo-pastos, en términos puramente estadísticos (regresión no lineal), la Figura 3a muestra este caso, donde los resultados del ajuste son excelentes ($R^2 > 0.99$).

En la Figura 3b se muestran los ajustes realizados con el modelo expo-lineal parametrizado en función del tipo de suelo y cobertura aérea (COB), donde r se dejó constante en función del tipo de suelo y P_b fue estimada de una relación lineal con la cobertura aérea de la vegetación, Figura 4. El parámetro C fue estimado de una relación lineal con P_b , Figura 4, la cual fue forzada a cumplir la condición de $C = 1.0$ cuando $P_b = 0$, representando la línea recta punteada de la Figura 1, para el caso donde toda la precipitación que se presenta se convierte en escurrimiento (hipótesis similar a la usada en el planteamiento del método del NC).

En el modelo de Paz (2009), el escurrimiento Q se ha supuesto como igual al escurrimiento directo, en forma similar al caso del método del NC (Ponce y Hawkins, 1996; NRCS, 2004), de tal forma que éste se define como el residual de los siguientes regímenes

de flujo: (a) flujo superficial Hortoniano, que ocurre cuando la tasa de precipitación es mayor que la tasa de infiltración del agua en el suelo (Horton, 1933); (b) flujo superficial de saturación, que ocurre cuando el perfil del suelo esta saturado y toda la precipitación se convierte en escurrimiento; (c) flujo lateral (sub-superficial), que prevalece en medios con mantillo grueso con suelos con capas permeables arriba y abajo menos permeables (Kirkby y Chorley, 1967; Dunne y Black, 1970); (d) flujo de área parcial, el cual se atribuye a áreas parciales de suelo saturadas que contribuyen al escurrimiento (Dunne y Black, 1970; Boughton, 1987; Steenhuis *et al.*, 1995); (e) flujo por interceptación directa por cauces, que es la precipitación que cae dentro de los cauces y se convierte en escurrimiento (Dunne y Black, 1970); y (f) flujo por fenómenos superficiales, donde estos procesos hacen al suelo impermeable promoviendo el escurrimiento.

La Ecuación 3 muestra una fase posterior a la exponencial de tipo lineal y representa la situación donde se ha alcanzado la tasa de cambio máxima y la relación P - Q mantiene una pendiente constante (que puede ser menor a 1). Este tipo de patrón a sido propuesto por Kirkby y Cox (1995) usando modelos de reservorios (*buckets* en inglés).

De acuerdo con Paz *et al.* (2009), en lo general, podemos establecer dos patrones generales de la relación P - Q . Un patrón está asociado al caso donde todos los reservorios (áreas parciales en una cuenca o parcelas) están saturados o la precipitación en todos ellos tiene una tasa mayor que la de infiltración, por lo que la respuesta general será una línea recta sin la fase exponencial. El otro patrón es el expo-lineal que está asociada a contribuciones parciales de reservorios, hasta llegar al punto de obtener el máximo de la respuesta conjunta ante el evento de precipitación. Este tipo

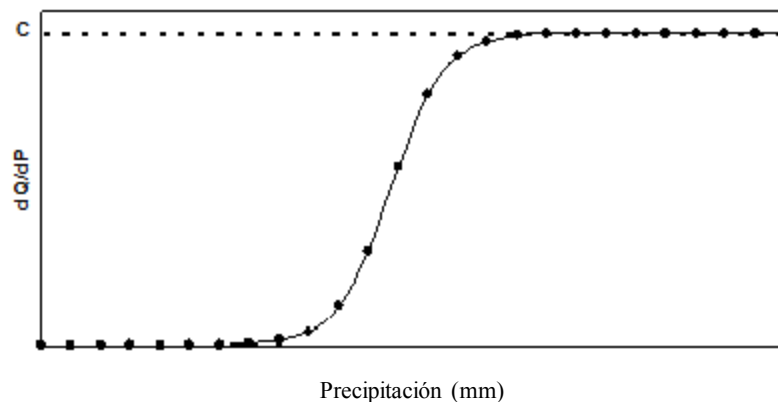


Figura 2. Esquematación simple de las tasas de cambio del modelo expo-lineal. dQ = diferencial del escurrimiento, dP = diferencial de la precipitación.

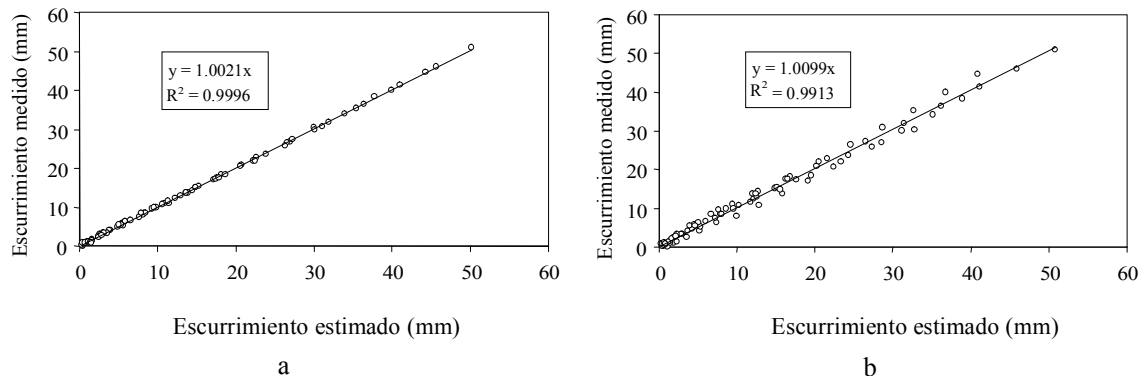


Figura 3. Ajuste del modelo experimental a los datos de un experimento en un simulador de lluvias (suelos 4 y 5). (a) ajustes en términos puramente estadísticos y (b) ajustes del modelo parametrizado.

de patrones se presenta aun para el caso de flujos sub-superficiales en bosques (Whipkey, 1965).

Parámetros Hidrológicos Estimados con Sensores Remotos

En lo siguiente la discusión espectral estará basada en las bandas del sensor ETM+ del satélite LANDSAT 7 (azul o A, centrada en 480 nm; verde o V, centrada en 570 nm; rojo R centrada en 660 nm; infrarrojo cercano IRC centrada en 840 nm; infrarrojo medio 1 o IRM1 centrada en 1650 nm; infrarrojo medio 2 o IRM2 centrada en 2200 nm). Los desarrollos mostrados en este apartado están basados en Paz *et al.* (2009 y 2010)

En el caso de los suelos desnudos, en las bandas del IRC y del R, las reflectancias forman una línea del suelo (Baret *et al.*, 1983) definida por:

$$IRC = a_s + b_s R \tag{4}$$

donde:

a_s y b_s = constantes empíricas (valores fijos para diferentes suelos en una zona geográfica).

En la Figura 5 se usó un mismo cultivo (propiedades ópticas de una hoja de maíz) variando su IAF y diferentes tipos de suelos como fondo (Paz *et al.*, 2005). Las líneas iso-IAF ($IRC = a_0 + b_0 R$ en la Figura 5) representan la misma cantidad de vegetación, pero con suelos con humedades θ diferentes; donde el caso de $IAF = 0$ representa la línea del suelo desnudo. Si el suelo permanece constante (sus propiedades ópticas), entonces el crecimiento de la vegetación sigue una curva iso-suelo. El atrayente de la dinámica del crecimiento de la vegetación para la banda del R es el punto de convergencia de todas las curvas iso-suelo. En este

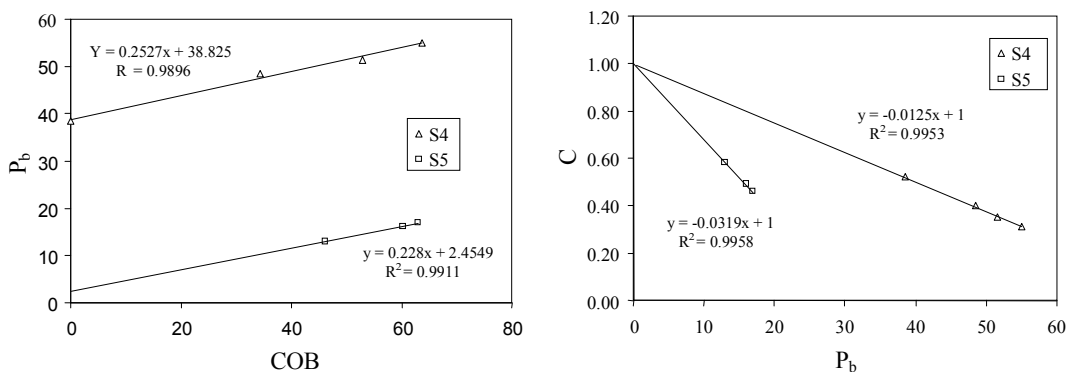


Figura 4. Relaciones COB- P_b -C usadas en la parametrización del modelo de Paz, donde S4 y S5 son el suelo 4 y 5, respectivamente, y represente el tipo de suelo usado en el experimento del simulador de lluvia. COB = cobertura aérea, P_b = precipitación de base, C = tasa máxima de cambio; S = suelo.

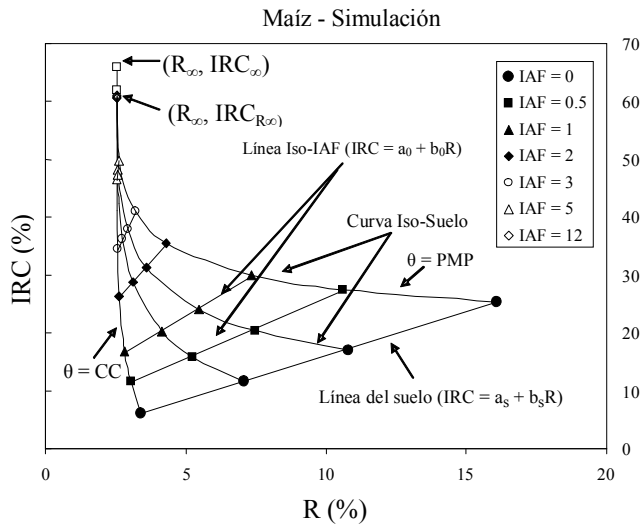


Figura 5. Dinámica espectral del crecimiento de un cultivo en el espacio R-IRC. R = rojo, IRC = infrarrojo cercano, IAF = índice de área foliar, θ = humedad del suelo, PMP = punto de marchitamiento permanente, CC = capacidad de campo. Subíndice ∞ = condición de medio denso.

punto, la banda del R se satura y representa a un medio ópticamente denso o infinito (Ross, 1981), por lo que se le denomina como R_{∞} . El valor del IRC asociado al R de saturación es $IRC_{R_{\infty}}$. La banda del IRC sigue creciendo hasta alcanzar su propio punto de saturación definido por IRC_{∞} .

Para poder usar las reflectancias en forma útil para las aplicaciones hidrológicas, es necesario conocer el contenido de humedad relativo de los suelos debajo de la vegetación. Para lograr este objetivo, es necesario linealizar las curvas iso-suelo usando el espacio

transformado dIRC-IRC (Paz et al., 2006), donde la línea iso-IAF tienen una relación $IRC = a_1 + b_1 dIRC$ y el IVPP-R (Paz et al., 2009), donde $dIRC = IRC - (a_s + b_s R)$, $IVPP = dIRC/IRC$ (Paz et al., 2010). En el espacio IVPP-R, las funciones iso-IAF son no lineales, Figura 6.

En la Figura 6, se muestran los espacios transformados IVPP-R y dIRC-IRC para algunos datos mostrados en la Figura 5.

En el espacio transformado IVPP-R, las curvas iso-suelo, transformadas a líneas rectas, convergen el punto $\{R_{\infty}, IVPP_{R_{\infty}} = [IRC_{R_{\infty}} - (a_s + b_s R_{\infty})]/IRC_{R_{\infty}}\}$. Por otro lado, en el espacio dIRC-IRC, las curvas iso-suelo, transformadas a líneas rectas, convergen en el punto $(dIRC_{R_{\infty}}, IRC_{R_{\infty}})$, que representa los puntos debajo de $(R_{\infty}, IRC_{R_{\infty}})$ en la Figura 5. Para valores de IRC y dIRC más grandes, los puntos caen sobre una línea recta de pendiente unitaria hasta llegar al punto de saturación de la banda del IRC (Paz et al., 2006).

De acuerdo a los patrones observados en la Figura 6, la Figura 7 muestra en forma esquemática un modelo general para la estimación de un índice de la humedad del suelo y de la cobertura y IAF de la vegetación, para cualquier banda espectral. Paz et al. (2009) propusieron una humedad del suelo usando reflectancias (θ_{sr}), la cual puede suponerse como $\theta_{sr} = 0$ para la reflectancia en el punto de marchitamiento permanente (PMP) y $\theta_{sr} = 1$ a capacidad de campo (CC) (Figura 7).

De acuerdo al esquema mostrado en la Figura 7, Paz et al. (2009) propusieron:

$$\theta_{eq} = (1 - COB)\theta_{sr} + (COB)\theta_{vr} \tag{5}$$

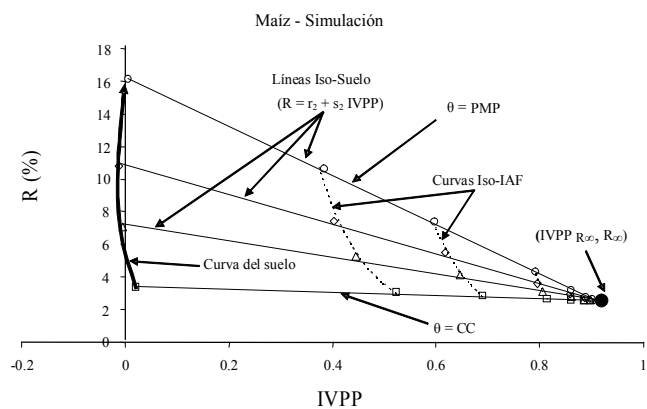
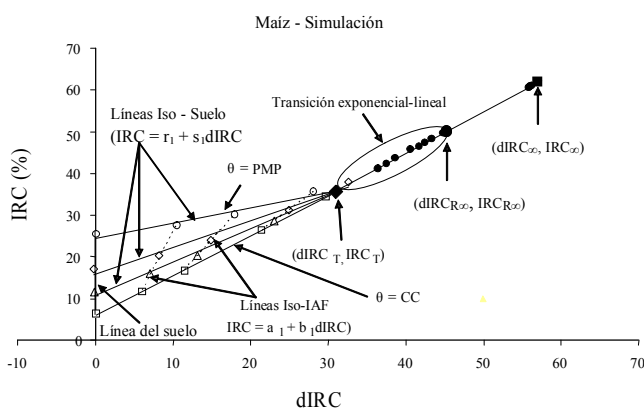


Figura 6. Espacios transformados dIRC-IRC e IVPP-R de la Figura 4. R = rojo, IRC = infrarrojo cercano, dIRC e IVPP = transformaciones de variables, IAF = índice de área foliar, θ = humedad del suelo, PMP = punto de marchitamiento permanente, CC = capacidad de campo. Subíndice: ∞ = condición de medio denso, T = transición.

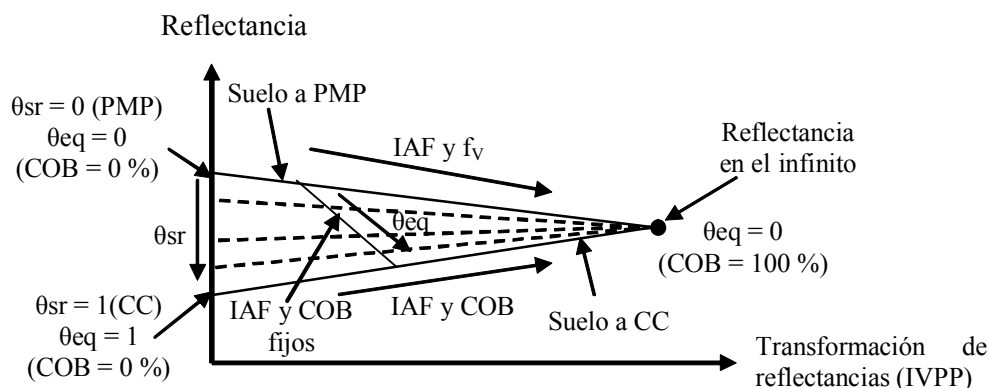


Figura 7. Modelo esquemático general para la estimación de un índice global equivalente de la humedad del suelo-vegetación. COB = cobertura aérea, IAF = índice de área foliar, θ = humedad del suelo, PMP = punto de marchitamiento permanente, CC = capacidad de campo.

La Ecuación 5 muestra que θ_{eq} (medio heterogéneo) es función de la cobertura de la vegetación y las propiedades hidráulicas del suelo y la vegetación. En el caso de COB, la vegetación en esta fracción tiene huecos (ley de Beer-Lambert) por lo que θ_{vr} (medio homogéneo) varía con el crecimiento de la vegetación (IAF local), hasta llegar a la situación de un medio hidráulicamente denso (COB = 100%) donde $\theta_{vr} = 0$, por lo que $\theta_{eq} = 0$ (situación que aunque la precipitación es grande, el follaje absorbe ésta durante el día, pudiendo presentarse el escurrimiento al día siguiente).

Experimentos en Lotes de Escurrimiento con un Simulador de Lluvia Tipo Rotatorio

Con el objetivo de analizar y modelar la variación de las reflectancias de los suelos antes y después de un evento de precipitación, se diseñó un experimento en lotes de escurrimiento en un simulador de lluvia de disco rotatorio (Morin *et al.*, 1967). La Figura 8 muestra el arreglo del experimento.

El procedimiento experimental consistió en la selección de cinco suelos con propiedades hidráulicas contrastantes (Cuadro 1), los cuales fueron colocados en lotes de escurrimiento de dimensiones $50 \times 30 \times 12$ cm (Figura 8), colocando en el fondo una capa de grava y gravilla antes del suelo (Figura 8), separadas las capas por una tela permeable, la cual fue compactada para mantener una superficie homogénea en todos los lotes de escurrimiento.

Los cinco lotes de escurrimiento fueron montados en una base giratoria dentro de un simulador de lluvias rotatorio (Figura 8), para ser sujetos a un evento de lluvia

de 100 mm durante una hora. El estado inicial (suelo seco) corresponde a suelos secados al aire y el final, después del evento de lluvia, a un suelo saturado. Antes de la aplicación del evento de lluvia los suelos fueron llevados a la condición de humedad de capacidad de campo (infiltración por capilaridad).

Para analizar el efecto de la mezcla suelo-vegetación se utilizaron plantas de matorral y pastizal de las especies Palo dulce (*Eysenhardtia polystachya*) y Pasto navaja (*Bouteloa gracilis*), respectivamente. Debido a problemas del posicionamiento de los matorrales dentro de los lotes de escurrimiento (follaje fuera del lote), estos datos no son analizados en lo siguiente. A continuación se describe el procedimiento seguido para la colocación de las plantas:

Los sistemas pastizal y matorral se simularon en tres porcentajes de coberturas nominales diferentes (> 75 , $50-75$ y $< 50\%$), para cada uno de los tipos de suelo del Cuadro 1, Figura 9.

Para colocar las plantas, primeramente se marcó sobre cada uno de los lotes el patrón de posición que corresponde al sistema a simular.

Una vez marcado la posición de las plantas, se hicieron cavidades en donde se colocaron las plantas posteriormente.

En cualquier caso, antes de realizar la medición de reflectancias, se colocaron los lotes a una pendiente del 3% y el radiómetro a 52 cm de la superficie de los lotes.

Después de aplicado el evento de precipitación o lluvia, los suelos fueron iluminados (única fuente de energía, además de la residual que ocurrió en el cuarto cerrado y rodeado de cortinas para mantener condiciones de oscuridad) con cinco lámparas de halógeno de cuarzo

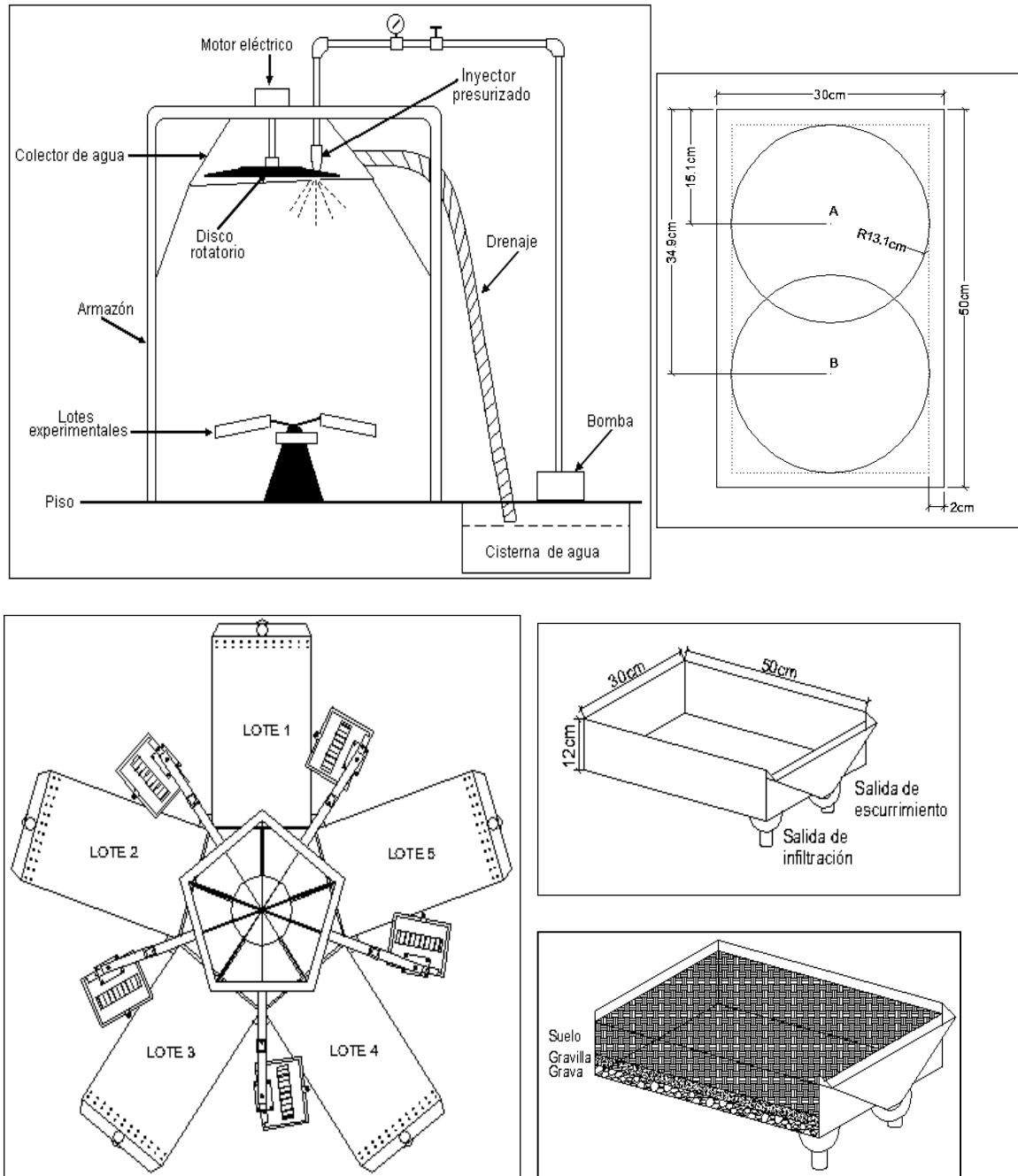


Figura 8. Arreglo experimental para el análisis de la respuesta espectral de mezclas suelo-vegetación bajo iluminación artificial en un simulador de lluvia tipo rotatorio.

de 500 watts, dispuestas en el arreglo mostrado en la Figura 8. Durante el seguimiento de los cambios en la humedad de los suelos se utilizó un radiómetro hiperespectral, FieldSpec@Pro^{MR} modelo FR (Analytical Spectral Devices) con rango de medición de 350 a 2500 nm y resolución de proceso de 1 nm, las lámparas

se mantuvieron encendidas sólo durante las horas de toma de datos y fueron apagadas posteriormente y el cuarto del simulador sin luces y cerrado.

Durante el evento de precipitación se midió, en cada lote, el escurrimiento (y sedimentos) y la infiltración (Figura 8) cada cinco minutos hasta completar una hora.

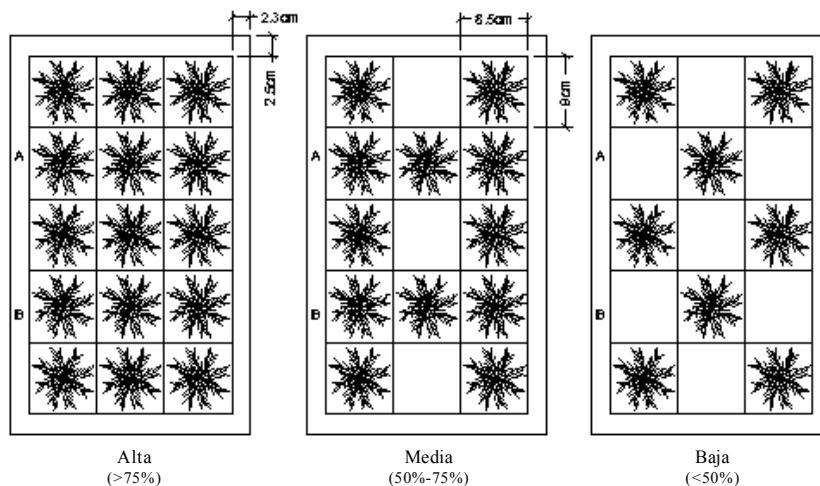


Figura 9. Coberturas para los sistemas pastizal y matorral.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Patrones Hidrológicos de las Mezclas Suelo-Vegetación de los Lotes con Pastos

En la Figura 10 se muestran los patrones temporales del escurrimientos y la infiltración acumulada de los suelos analizados.

En la Figura 11 se muestra la relación P-Q, supuesta como equivalente a eventos discretos (continuos en la respuesta hidráulica del suelo) de precipitación, para los suelos 2 y 4.

De la Figura 10, el suelo 2 y 5 tienen respuestas hidráulicas relativamente similares, por lo que en lo siguiente solo se analizan los casos de los suelos 4 y 5, contrastantes entre si.

En el caso del modelo expo-lineal de la relación precipitación-escurrimiento, los patrones de P-Q de la Figura 11 fueron modelados en términos estadísticos y los resultados están mostrados en la Figura 3, mostrada previamente.

Patrones Espectrales de las Mezclas Suelo-Vegetación de los Lotes con Pastos

En la Figura 12 se muestran dos ejemplos de las reflectancias integradas para el sensor ETM+ del satélite LANDSAT 7, usando las funciones de respuestas correspondientes.

En la Figura 12 se observa que los valores de las reflectancias para las diferentes coberturas de los pastos tienen asociados valores de reflectancia muy cercanos entre si, contrastando con observaciones en condiciones de iluminación natural donde las reflectancias tienen valores con mayores diferencias. Esta situación es producto del arreglo geométrico de lámparas usadas en las mediciones, Figura 8, donde todas se mantuvieron prendidas durante las mediciones con el radiómetro, provocando una situación de iluminación directa de fuentes múltiples, además del problema de la cercanía de las lámparas a los lotes de escurrimiento y las distancias de medición de reflectancias usadas.

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas de los suelos usados en el experimento.

Suelo	pH	Conductividad eléctrica (1:2)	Densidad aparente	Materia orgánica	Arena	Limo	Arcilla	Clasificación de textura
	1:2	dS m ⁻¹	g cm ⁻³	-----	%	-----	-----	
1	7.5	0.65	1.31	1.78	64	19	17	Franco arenoso
2	6.6	0.20	1.18	1.54	44	19	37	Franco arcilloso
3	7.7	0.36	1.53	2.55	30	25	45	Arcilloso
4	7.2	0.79	1.29	1.72	54	23	23	Franco arcillo arenoso
5	7.6	0.43	1.87	2.62	40	41	19	Franco

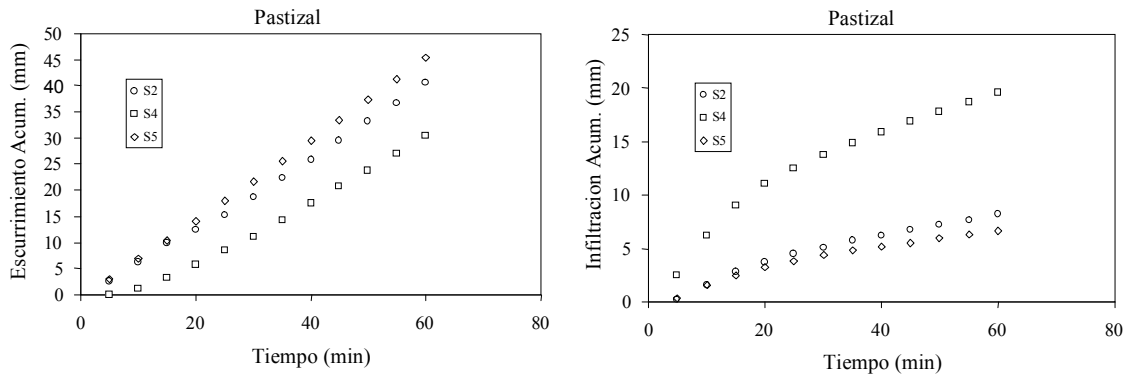


Figura 10. Patrones temporales del esguerrimiento e infiltración acumulada de los suelos 2, 4 y 5. S = suelo.

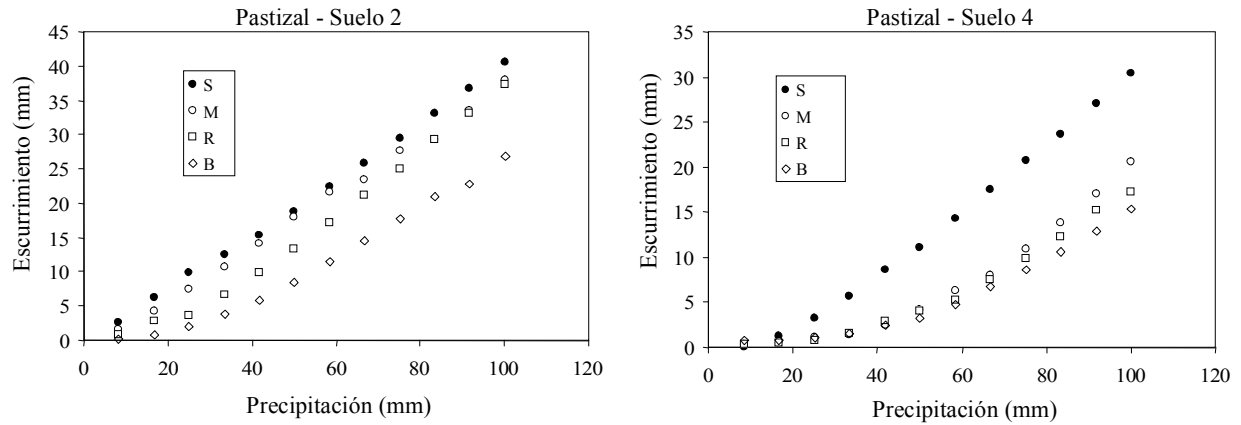


Figura 11. Relación precipitación-esguerrimiento para los suelos 2 y 4 para diferentes coberturas del suelo (S = suelo desnudo; M = cobertura mala; R = cobertura regular y B = cobertura buena).

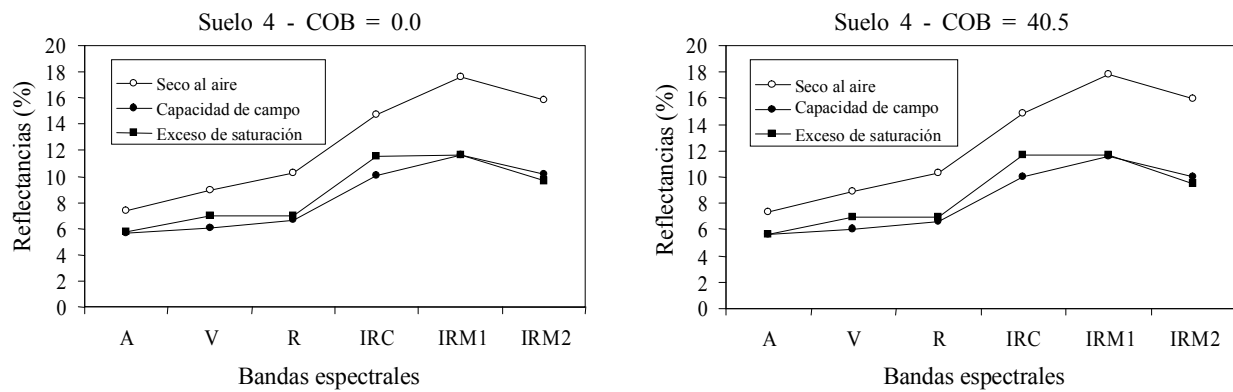


Figura 12. Patrones de las bandas espectrales del sensor ETM+ para diferentes coberturas del suelo 4 y diferentes condiciones de humedad del mismo. A = azul, V = verde, R = rojo, IRC = infrarrojo cercano, IRM1 = infrarrojo medio 1, IRM2 = infrarrojo medio 2, COB = cobertura aérea.

Por otro lado, en las Figura 12 se observa que los valores de las reflectancias en las bandas espectrales del verde, un poco en la del rojo y en la del infrarrojo medio 2 (IRM2), diferencias entre la condición de suelos a capacidad de campo y con exceso de saturación. Esto es un efecto de agua superficial residual sobre la superficie del suelo y en el follaje y no corresponde al caso planteado en Paz *et al.* (2010) donde se consideró que las reflectancias a CC y a saturación son prácticamente similares.

En lo siguiente, los datos de reflectancias presentados corresponden al promedio de las posiciones A y B, ponderadas por las coberturas específicas en las tomas, Figura 8. Asimismo, las coberturas son promedios aritméticos de las posiciones A y B. Las coberturas fueron estimadas de fotografías digitales usando técnicas de clasificación supervisada.

Considerando que las pendientes de las líneas iso-IAF, definidas en la Figura 5, fueron prácticamente iguales para las diferentes coberturas utilizadas (promedio de 1.31 y desviación estándar de 0.016, n = 18), se utilizó la intersección a_0 para relacionarla con la cobertura de los pastos. La Figura 13 muestra estos resultados, donde el caso del suelo desnudo es discordante del patrón establecido. Esto es producto

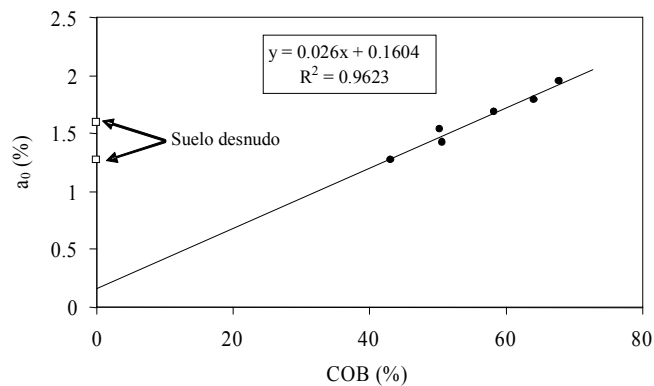


Figura 13. Relación entre la COB y el parámetro a_0 para los experimentos analizados. a_0 = intercepto de la ecuación iso-IAF, COB = cobertura aérea.

de la geometría de sombreado generada en las mezclas suelo-pastos, principalmente.

Tal como se discutió previamente, las curvas iso-IAF (líneas y curvas no lineales) están muy cercanas entre si producto del arreglo experimental usado. No obstante esto, en el Cuadro 2 se muestra las estimaciones de los puntos de convergencia estimados usando la condición de suelo seco al aire y suelo a CC, Figura 14. Se observa en el Cuadro 2 que las estimaciones de los puntos de convergencia son muy

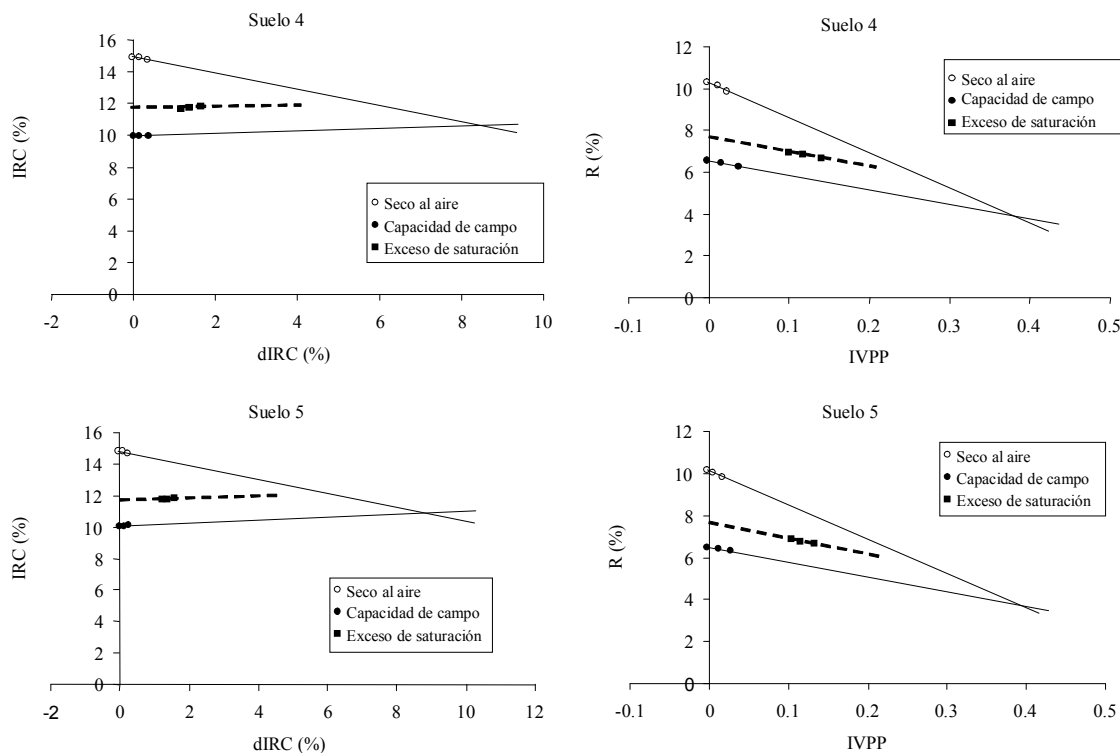


Figura 14. Patrones observados de las mezclas suelo-vegetación en los espacios dIRC-IRC e IVPP-R para los suelos 4 y 5. R = rojo, IRC = infrarrojo cercano, dIRC e IVPP = transformaciones de variables.

Cuadro 2. Puntos de convergencia estimados de la Figura 15.

Suelo	IRC _{R∞}	dIRC _{R∞}	IVPP _{R∞}	R∞
4	8.48	10.63	0.38	3.9
5	8.84	10.88	0.39	3.73

R = rojo, IRC = infrarrojo cercano, dIRC e IVPP = transformaciones de variables. Subíndice: ∞= condición de medio denso.

similares entre sí para el suelo 4 y 5, tal como se esperaría de un sistema de follajes con diferentes coberturas, pero propiedades ópticas y angulares de las hojas similares. El modelo de la Figura 7 sólo ha podido ser validado en forma parcial, dadas las restricciones experimentales, pero los resultados muestran que el esquema es congruente con la evidencia experimental analizada; en especial sus atrayentes o puntos de convergencia.

En la Figura 14 el caso de los patrones de las reflectancias asociadas a la condición de exceso de saturación de los suelos muestra un aparente estado de crecimiento adicional de la cobertura de los pastos y de una condición de humedad menor a la de CC, ver Figura 6 y 7. Esto es producto del agua superficial remanente en el suelo y en el follaje y debe considerarse en los análisis de imágenes satelitales inmediatamente posteriores a la ocurrencia de un evento de precipitación. En la Figura 14 se ha usado la hipótesis de que las pendientes iso-suelo de la condición de exceso de saturación tienen una pendiente similar al caso de suelos a CC. Las líneas punteadas ajustadas bajo esta hipótesis representan bien las mediciones experimentales, Figura 14.

CONCLUSIONES

- El modelo expo-lineal de Paz (2009) de la relación precipitación-escurrimiento fue aplicado a eventos de precipitación en lotes de escurrimiento dentro de un simulador de lluvias y los resultados obtenidos de la versión paramétrica son prometedores en el sentido de que es posible utilizar el modelo con sólo información del tipo de suelo y cobertura aérea e índice de área foliar (IAF) de la vegetación. Esto plantea la necesidad de estimar la humedad del sistema suelo-vegetación en forma operacional para parametrizar el modelo expo-lineal en las aplicaciones.
- El estudio exploratorio presentado en este trabajo demuestra la factibilidad inicial de la implementación conjunta del modelo expo-lineal introducido por Paz

(2009) y el esquema de hacerlo operativo en función de la información espectral disponible en los sensores remotos.

- El uso de la tecnología de los sensores remotos permite caracterizar en forma unificada el estado de la cobertura y humedad del suelo, de acuerdo al modelo desarrollado por Paz *et al.* (2009). Este modelo fue revisado usando los datos de un experimento en un simulador de lluvia y aunque los resultados obtenidos mostraron problemas asociados al diseño experimental, éstos indican que los patrones definidos en el modelo son adecuadamente representados. Para obtener una validación mejor, es necesario el rediseño de la estrategia de toma de datos radiométricos en los lotes de escurrimiento, de tal forma que se eviten los problemas presentados en el experimento mencionado.

LITERATURA CITADA

- Baret, F., S. Jacquemoud, and J. F. Hanocq. 1983. The soil line concept in remote sensing. *Remote Sens. Rev.* 7: 65-82.
- Boughton, W. C. 1987. Evaluating partial areas of watershed runoff. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 113: 356-366.
- Dunne, T. and R. D. Black. 1970. Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. *Water Resour. Res.* 6: 1296-1311.
- Horton, R. 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. Union* 14: 446-460.
- Kirkby, M. J. and N. J. Cox. 1995. A climatic index for soil erosion potential (CSEP) including seasonal and vegetation factors. *Catena* 25: 333-352.
- Kirkby, M. J. and R. J. Chorley. 1967. Throughflow overland flow, and erosion. *Int. Assoc. Sci. Hydrol.* 12: 5-21.
- Morín, J., D. Goldberg, and I. Singer. 1967. A rainfall simulator with a rotating disk. *Trans. ASAE* 10: 74-78.
- Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams, and K. W. King. 2002. Soil and water assessment tool theoretical documentation, version 2000, TWRI Report TR- 191. Texas Water Resources Institute, College Station. Temple, TX, USA.
- NRCS (Natural Resources Conservation Service). 2004. Part 630 Hydrology. National engineering handbook. Chapter 10. Estimation of direct runoff from storm rainfall. Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture. Washington, DC, USA.
- Paz Pellat., F. 2009. Mitos y falacias del método hidrológico del número de curva del SCS/NRCS. *Agrociencia* 43: 521-528.
- Paz Pellat, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez y L. A. Palacios. 2005. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia* 39: 293-301.
- Paz Pellat, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez y L. A. Palacios. 2006. Determinación del estado de crecimiento de cultivos usando la transformada de Hough de las reflectividades del follaje. *Agrociencia* 40: 99-108.

- Paz Pellat, F., M. I. Marín, E. López, A. Zarco, M. Bolaños, J. L. Oropeza, M. Martínez, E. Palacios y E. Rubiños. 2009. Elementos para el desarrollo de una hidrología operacional con sensores remotos: mezcla suelo-vegetación, Ing. Hidrául. Méx. 24: 69-80.
- Paz Pellat, F., M. I. Marín, E. López, A. Zarco, M. A. Bolaños, J. L. Oropeza, M. Martínez, E. Palacios, y E. Rubiños. 2010. Elementos para el desarrollo de una hidrología operacional con sensores remotos: suelo desnudo. Tec. Cienc. Agua 1: 59-71.
- Ponce, V. M. and R. H. Hawkins. 1996. Runoff curve number: has it reached maturity? J. Hydrol. Engin. ASCE. 1: 11-19.
- Ross, J. K. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. Dr. W. Junk Publishers, The Hague, The Netherlands.
- SCS (Soil Conservation Service). 1972. Section 4: Hidrology. National engineering handbook. Soil Conservation Service. United States Department of Agriculture. Washington, DC, USA.
- Sharpley, A. N. and J. R. Williams. 1990. EPIC – Erosion productivity impact calculator. 1. Model documentation. Tech. Bull. No. 1768. US Department Agriculture. Washington, DC, USA
- Steenhuis, T. M., M. Wincell, J. Rossing, J. A. Zollweg, and M. F. Walter. 1995. SCS runoff equation revisited for variable-source runoff areas. J. Irrig. Drain. Eng. 121: 234-238.
- Whipkey, R. Z. 1965. Subsurface stormflow from forested slopes. Bull. IAHSX. 1: 74-85.