

ELEMENTOS PARA EL DESARROLLO DE UNA HIDROLOGÍA OPERACIONAL CON SENSORES REMOTOS: SUELO DESNUDO

- Fernando Paz-Pellat • Ma. Isabel Marín-Sosa •
 - Eliezer López-Bautista • Alfonso Zarco-Hidalgo •
 - Martín A. Bolaños-González • José Luis Oropeza-Mota •
 - Mario Martínez-Menes • Enrique Palacios-Vélez •
 - Enrique Rubiños-Panta •
- Colegio de Postgraduados, México*

Resumen

El uso de los sensores remotos en las aplicaciones hidrológicas ha sido limitado y orientado a la estimación de los valores de modelos de diferentes complejidades. Usando el paradigma del número de curva para modelar la relación precipitación-escorrentía, en este trabajo se presentan los elementos para el desarrollo de una hidrología operacional con base en sólo información espectral adquirida por sensores remotos para suelo desnudo. El caso de la relación humedad-reflectancias es analizado y modelado usando una relación simple, la cual fue validada con información de campo y de laboratorio (mediciones de reflectancia). La evolución temporal de la humedad y las reflectancias del suelo son analizadas y modeladas por segmentos lineales, de tal forma que con un solo parámetro, el tiempo de secado, se pueda caracterizar en forma completa. Los resultados de experimentos de campo fueron usados para validar la propuesta.

Palabras clave: relación precipitación-escorrentía, sensores remotos, suelo desnudo.

Introducción

El uso de los sensores remotos en la solución de problemas aplicados ha generado grandes expectativas (parametrización directa de modelos) desde la década de los setenta, cuando se lanzaron los primeros satélites comerciales de exploración de la superficie terrestre. No obstante, hasta hoy día los resultados obtenidos con el uso de la tecnología de los sensores remotos han sido menores a los esperados.

Uno de los problemas de la baja aplicabilidad práctica de los sensores remotos es el relacionado con su uso en forma indirecta para estimar valores de parámetros biofísicos de las coberturas vegetales, por ejemplo. En ese formato es común la utilización de aproximaciones empíricas o teóricas para estimar valores de los parámetros necesarios

para la modelación de algún proceso físico o biológico. Así, los sensores remotos generan valores de parámetros, generalmente con alta incertidumbre, para hacer operacionales modelos específicos de los procesos, los cuales, en la mayoría de los casos, requieren de una gran cantidad de estos parámetros. La propagación de la incertidumbre en las estimaciones de los modelos, a través de la estrategia de intentar estimar los parámetros de modelos no diseñados para el uso directo de la información por satélite, da como consecuencia un paso doble de estimación con niveles de error altos.

Una alternativa en el uso de los sensores remotos es el desarrollo de modelos basados puramente en información espectral extraída de los satélites en plataformas espaciales. De esta manera, las ventajas de los sensores remotos,

cubrimiento espacial exhaustivo y tiempos de visita cortos, pueden ser usadas en su máximo potencial.

En la hidrología superficial, concretamente en la relación precipitación-escorrentía, han existido diversos intentos de modelación del ciclo hidrológico en cada una de sus componentes, lo que requiere de datos que no están disponibles en forma operacional y, generalmente, los existentes no están actualizados o no son confiables. Así, el problema de modelos complejos sin posibilidades de ser parametrizados es algo ya rutinario en las aplicaciones hidrológicas. Ejemplos de estos modelos son el *Erosion/Productivity Impact Calculator* o *EPIC* (Sharpley y Williams, 1990), y el *Soil and Water Assessment Tool* o *SWAT* (Neitsh et al., 2002). Es importante aclarar que el uso de información por satélite, aunado a otras fuentes, por lo general permite mejores estimaciones que su no uso.

Los modelos *EPIC* y *SWAT* utilizan el modelo del número de curva (*NC*) (SCS, 1972) para parametrizar la relación precipitación-escorrentía. El método del *NC* fue desarrollado con el fin de establecer una base consistente para estimar el escurrimiento ante cambios en el uso del suelo y el tipo de suelo (Rallison y Miller, 1981). Aunque simple, el método del *NC* puede ser usado como un paradigma para el desarrollo de una hidrología operacional usando sensores remotos.

En este trabajo se presentan las bases para establecer los valores de los parámetros asociados con el tipo de suelo en la relación precipitación-escorrentía. El caso de los valores de los parámetros asociados con el uso del suelo son considerados en un trabajo complementario (Paz et al., 2009). El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un esquema de modelación simplificado para la obtención de parámetros del suelo vinculados con la relación precipitación-escorrentía, usando sensores remotos. Los modelos presentados más adelante fueron validados con información a nivel terrestre de diferentes experimentos de campo y laboratorio.

Un paradigma para una hidrología operacional

El modelo del *NC* establece una relación empírica entre el escurrimiento Q (mm) y la precipitación P (mm), a escala diaria, como:

$$Q = \frac{(P - Ia)^2}{(P - Ia + S)} \quad (1)$$

donde Ia es la abstracción inicial antes del escurrimiento (almacenamientos superficiales, intercepción por la vegetación e infiltración antes de la saturación del suelo) y S es un parámetro de retención, el cual varía espacialmente por cambios en el tipo y uso del suelo, manejo y pendiente; así como por cambios temporales en la humedad del suelo. Paz (2009) ha cuestionado fuertemente la validez de la relación (1), concluyendo que no tiene bases hidrológicas. No obstante, el método del *NC* puede ser usado como un esquema o paradigma de desarrollo, en el sentido de un modelo simple y operacional.

El parámetro Ia es puesto generalmente en función de S ($Ia=0.2S$), por lo que el único parámetro restante S es estimado de:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{NC} - 10 \right) \quad (2)$$

Así, el método del *NC* depende de un solo parámetro; de allí su simplicidad y atractivo para ser usado como un método hidrológico operacional.

El número de curva (*NC*), parámetro integrado, depende de varios factores; los principales son:

- Del tipo de suelo, específicamente de su tasa de infiltración.
- Del uso del suelo, específicamente del tipo de vegetación y de su cobertura aérea.
- Del tipo de manejo (práctica) de la vegetación (temporalidad de la cobertura).

- d) Humedad antecedente (antes del evento de precipitación) del suelo.
- e) Pendiente del terreno.

Para la consideración de los factores mencionados que inciden en el *NC*, se han desarrollado cuadros que relacionan los tipos de suelo y el uso del suelo con el *NC* (NRCS, 2004), así como relaciones matemáticas que ajustan la humedad antecedente, la pendiente o *S* (Neitsch *et al.*, 2002).

En términos generales, el *NC* es un intento de parametrizar factores múltiples en uno solo, cambiando un problema complejo por, aparentemente, otro más simple. La hipótesis básica para su operación es que se debe contar con información del estado actual de una parcela o cuenca hidrológica para poder definir el *NC*. En la realidad esto no sucede, y es necesario hacer aproximaciones o utilizar algún tipo de información para poder establecer, en forma cruda, los factores que agrupó el *NC*.

Desde un punto de vista hidrológico, el planteamiento del modelo del *NC* requiere fundamentalmente de dos tipos de datos: la respuesta hidrológica del suelo y la respuesta hidrológica de la mezcla suelo-vegetación (dejando fija la geometría). En el caso de la respuesta hidrológica del suelo, es necesario contar con información (exhaustiva en términos espaciales y temporales), que permita modelar o aproximar la hidráulica del perfil del suelo. Para esto se pueden usar indicadores o índices como la textura, materia orgánica, etcétera. No obstante, la existencia de datos indirectos está también sumamente restringida en las aplicaciones operacionales, independientemente de que su actualización (contenido de humedad) es prácticamente imposible a niveles diarios.

De los planteamientos anteriores, los sensores remotos deberían ser capaces de caracterizar la respuesta hidráulica del suelo, espacial y temporal, sin necesidad de calibrar las estimaciones realizadas, para poder ser considerados en aplicaciones operacionales. La estrategia para lograr este objetivo es utilizar

la información espectral en una imagen por satélite en términos relativos; es decir, por ejemplo, definiendo un valor de 1 para cuando la humedad volumétrica (θ) sea igual a la de capacidad de campo (*CC*) u otro valor superior, y un valor de 0 cuando ésta sea igual a la del punto de marchitamiento permanente (*PMP*) u otro valor inferior. Así, en una base de pixel por pixel, podemos darle un seguimiento temporal (y espacial) al suelo (desnudo, sin vegetación) en términos de un índice que varía de 0 a 1, y define en forma completa la respuesta hidrológica del suelo, usando un paradigma similar al del *NC*, donde éste modifica una relación funcional genérica entre la precipitación y el escurrimiento.

Reflectancia de los suelos y contenido de humedad

Aunque los sensores remotos sólo alcanzan a caracterizar una capa muy superficial del suelo (alrededor de 2-10 mm), es generalmente suficiente para definir el estado energético o físico de la respuesta hidráulica del suelo. Conocida la humedad en la capa más superficial del suelo, podemos usar un modelo para describir la distribución de la humedad en el perfil del suelo cuando sólo se conoce la humedad de la capa más superficial. Por ejemplo, en el modelo *SWAT* (Neitsch *et al.*, 2002) se usa una función logística para describir la distribución de la humedad del suelo en relación con su profundidad, la cual es parametrizada de tal manera que el 50% de la demanda evaporativa esté en los primeros 10 mm y que el 95% de la demanda se extraiga de los 100 mm más superiores del suelo.

Partiendo de que tenemos pixeles de suelo desnudo, podemos analizar la relación entre la reflectancia y la humedad del suelo. Palacios *et al.* (2007) muestran cómo generar la clase suelo desnudo de los pixeles de imágenes de satélite tipo *LandSat*.

Puesto que los sensores remotos observan los objetos terrestres en bandas espectrales, la discusión estará basada en las bandas

espectrales del sensor TM5 del satélite LandSat definidas en el cuadro 1. El uso de las bandas espectrales asociadas con el satélite LandSat es para darle contexto al posible uso de imágenes por satélite, aunque los análisis mostrados en lo siguiente se refieren a mediciones terrestres.

La reflectancia de los suelos depende de varios factores, entre los que destacan (Baumgardner *et al.*, 1985): la textura y mineralogía; la humedad del suelo; el contenido de materia orgánica (M.O.); el contenido de óxidos de hierro; el contenido de sales solubles, y la rugosidad superficial del suelo. Así, para analizar la relación de la reflectancia con la humedad del suelo, es necesario dejar fijo el resto de los factores mencionados que inciden en ésta.

Usando datos espectrales de Beck *et al.* (1975), que realizó mediciones de reflectancias de

suelos en laboratorio, usando una fuente de luz difusa, la figura 1 muestra las firmas espectrales en la bandas del sensor TM para diferentes contenidos de humedad de dos suelos (el resto de los factores está fijo: rugosidad, textura y materia orgánica).

En la figura 1 se observan las firmas espectrales típicas de los suelos, las cuales son modificadas en función del contenido de humedad. En el caso de las reflectancias para suelos saturados y a capacidad de campo (CC), los valores están muy próximos entre sí, por lo que difícilmente pueden ser separables. En el otro extremo, las reflectancias entre un suelo a punto de marchitamiento permanente (PMP) y uno seco en un horno muestran diferencias apreciables.

En relación con cuál es la banda espectral mejor para caracterizar un suelo (la que se satura menos; es decir, cuando la reflectancia sí cambia de valor al incrementarse la humedad), la respuesta es simple: la que tiene reflectancia mayor (IRM1) es lo que se satura más lentamente y la peor es la del azul (A). Esto es consecuencia de la teoría de la transferencia radiativa en medios turbios (homogéneos y con elementos ópticos infinitesimales) (Ross, 1981).

La relación funcional entre la reflectancia de los suelos y el contenido de humedad ha sido estudiada previamente y modelada en forma

Cuadro 1. Bandas espectrales del sensor TM/ETM.

Banda	Nombre	Centro de banda (nm)
A	Azul	486
V	Verde	572
R	Rojo	661
IRC	Infrarrojo cercano	839
IRM1	Infrarrojo medio 1	1 679
IRM2	Infrarrojo medio 2	2 207

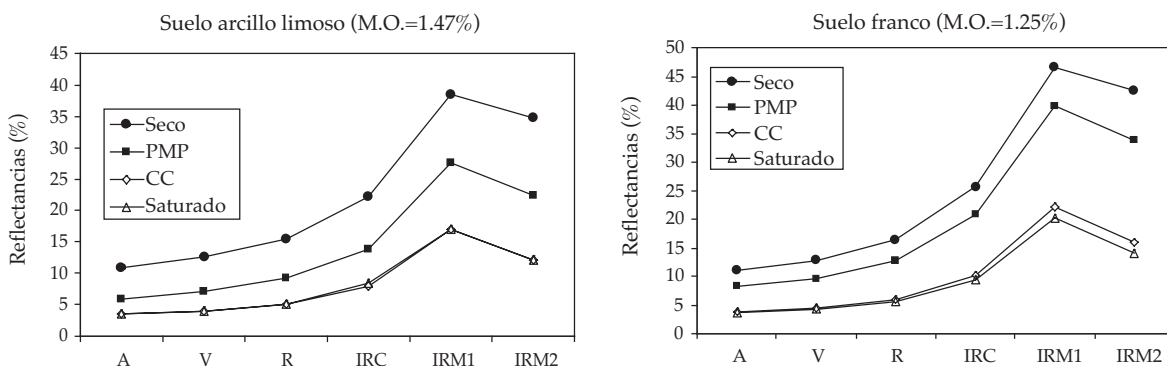


Figura 1. Firmas espectrales de dos suelos en función de su humedad.

exponencial (Muller y Décamps, 2000; Weidong et al., 2002; Lobell y Asner, 2002). Estos autores notaron que, generalmente, las reflectancias se saturan (no cambian de valor) para contenidos volumétricos que van de 0.3 a 0.4 en las bandas del infrarrojo, y alrededor de 0.2 en las bandas del visible (A, V y R). Ahora bien, considerando el objetivo de construir un modelo de humedad del suelo basado en las reflectancias para usos hidrológicos, podemos definir un límite de humedad como el de CC (si definimos la saturación como límite de humedad, éste es indistinguible del de CC). Para texturas finas (las de mayor CC), la humedad volumétrica a capacidad de campo (θ_{CC}) está entre 0.30 y 0.42 (Allen et al., 1998), por lo que podemos usar a las reflectancias en forma confiable como estimadores de la CC de los suelos. El otro límite a usar sería el de PMP (θ_{PMP}), aunque para el estudio de la evaporación del suelo se puede usar el límite $p\theta_{PMP}$ con $p=0.5$ (Allen et al., 1998).

La figura 2 muestra los cambios en la reflectancia de la banda IRC con la humedad del suelo, para el caso de un suelo claro (franco arenoso) y uno oscuro (franco arcilloso) (mediciones en la superficie del suelo, dentro de las instalaciones del Colegio de Postgraduados (Colpos) en Montecillo, Estado de México, México). Las mediciones fueron

realizadas en campo, con un radiómetro Cropscan^{MR} multiespectral con las mismas bandas del sensor TM5.

Una forma adecuada para relacionar la reflectancia con la humedad del suelo es (Duke y Guérif, 1998; Lobell y Asner, 2002):

$$R = R_{SAT} + (R_{SECO} - R_{SAT}) \exp(-c\theta) \quad (3)$$

donde R significa reflectancia, cualquier banda, y R_{SAT} y R_{SECO} son las reflectancias para un suelo saturado y seco, respectivamente. La constante c es un coeficiente de atenuación.

Usando los límites de humedad definidos anteriormente, podemos invertir la ecuación (3) para estimar la humedad volumétrica ($R_{SECO}=kR_{PMP}$ y $R_{SAT}=R_{CC}$):

$$\theta = -\frac{1}{c} \ln \left[\frac{R - R_{CC}}{kR_{PMP} - R_{CC}} \right] \quad (4)$$

donde k es una constante empírica.

El problema de usar la relación (4) en términos operacionales con sensores remotos es que es necesario conocer las reflectancias en CC y PMP, así como el coeficiente de atenuación. Una forma alterna y simple es generar una relación similar a la (4) entre θ y R , y definir

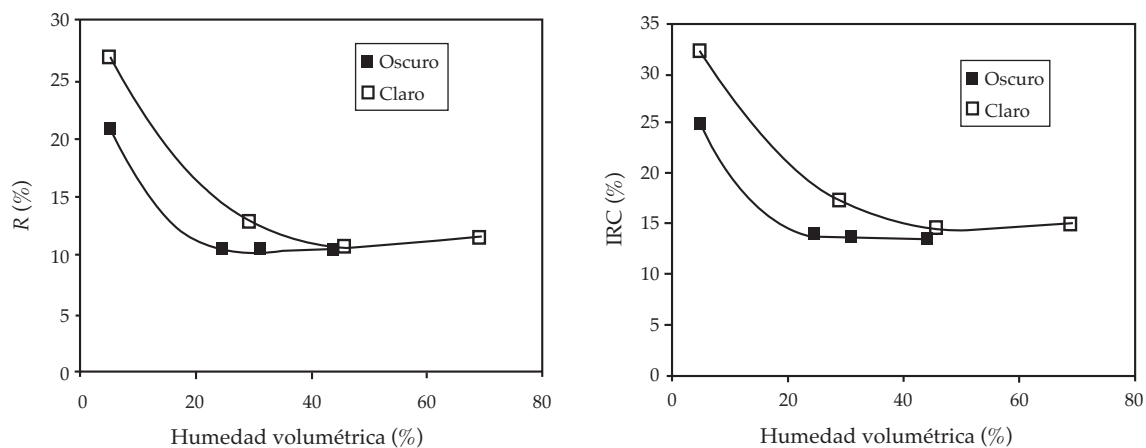


Figura 2. Cambio de la reflectancia del IRC con la humedad para dos suelos.

los límites $\theta=0$ cuando $R=kR_{PMP}$ y $\theta=1$, cuando $R=R_{CC}$, generando una variable indirecta de la humedad del suelo usando reflectancias (θsr) como:

$$\theta sr = 1 - \left[\frac{1}{\ln(2)} \right] \left[1 + \frac{R - R_{CC}}{kR_{PMP} - R_{CC}} \right] \quad (5)$$

La cual puede aproximarse bi-linealmente por:

$$\theta sr = 1 - \left[\frac{R - R_{CC}}{kR_{PMP} - R_{CC}} \right] \quad (6)$$

La ecuación (6) puede ser simplificada si definimos una relación entre R_{PMP} y R_{CC} , dejando fija k . La aproximación de la ecuación (5) es mejor cuando la reflectancia tiende a la de un suelo a PMP, dado que $\exp(X)=X$, cuando X es muy pequeño.

Para revisar la validez del modelo propuesto en la relación (5) se realizó otro experimento en el Colpos, suelo franco arcillo limoso, bajo dos condiciones de manejo: con labranza y sin labranza. El suelo fue saturado al inicio del experimento y se realizaron mediciones de humedades gravimétricas y reflectancias (radiómetro CropScan^{MR}; bandas del sensor TM5) durante dos días, con diferentes periodicidades: al inicio se tomaron mediciones cada quince minutos y

posteriormente fueron espaciadas a media hora, y una hora.

En la figura 3 sólo se presentan los resultados de las mediciones temporales de humedad y reflectancias para la banda del IRC para el caso del suelo sin labranza. Considerando que existieron diferencias en los tiempos de muestreo para la humedad y el IRC (desfases de minutos en la toma de muestras), se ajustaron polinomios de orden tres o cuatro a los datos de la figura 3 para interpolar valores de ambas variables en tiempos similares. La figura 4 muestra la relación entre la humedad e IRC en el día uno para el suelo sin labranza, donde se observa que el modelo bi-lineal se ajusta bien a los datos experimentales estimados, donde existe un valor del IRC que permanece constante (se satura) al incrementarse la humedad del suelo y esta banda no puede ser usada para estimar la humedad más allá de su saturación, la cual está asociada cercanamente con θ_{CC} . Esto se observa claramente en la figura 2.

En la figura 5 se presenta la relación entre θsr y la humedad para los dos días de medición del suelo sin labranza. Se observa de esta figura que el modelo de la relación (6) se ajusta bien a los datos experimentales estimados (como aproximación inicial), definiendo los valores de kR_{PMP} y R_{CC} . En las aplicaciones operacionales de los sensores remotos, estos dos valores pueden ser obtenidos fácilmente, ya que representan el

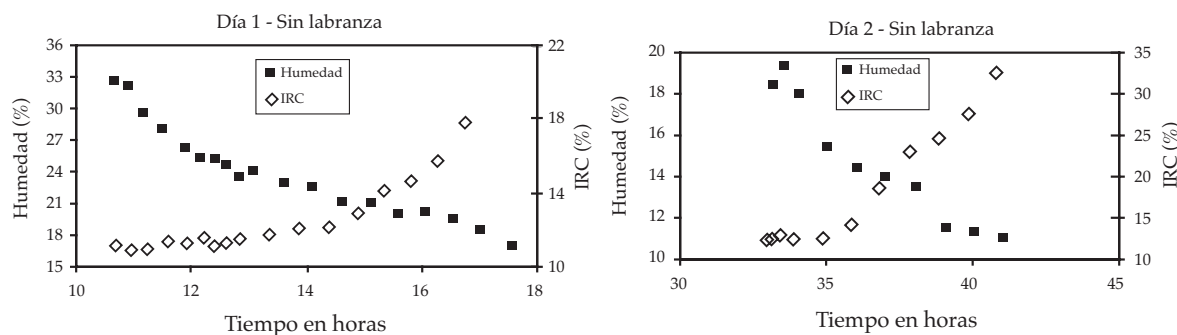


Figura 3. Evolución temporal de la humedad e IRC para el suelo sin labranza.

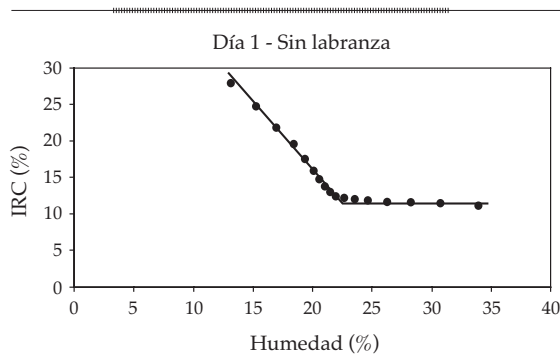


Figura 4. Relación entre la humedad e IRC en el día uno del suelo sin labranza.

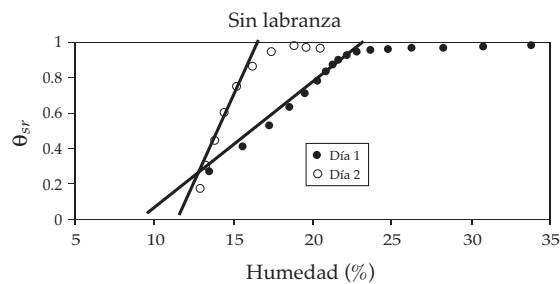
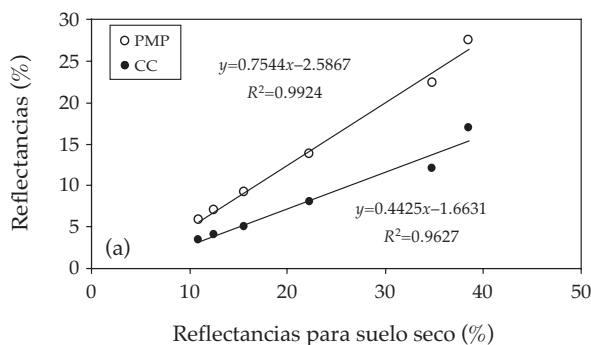


Figura 5. Relación entre θ_{sr} y la humedad del suelo sin labranza.

valor máximo y mínimo, respectivamente, de las reflectancias de un pixel (estandarizando las condiciones atmosféricas y la geometría sol-sensor).



El modelo mostrado en la figura 5 presenta una situación de cambio en las propiedades del suelo (cambios en el contenido inicial de humedad del suelo al inicio de las mediciones), donde la relación entre θ_{sr} y la humedad del suelo se modifica en función del contenido inicial de esta última.

Relación entre R_{PMP} y R_{CC}

Para analizar la relación entre R_{PMP} y R_{CC} se usó la base de datos de Beck *et al.* (1975) de reflectancias de suelos en condiciones de laboratorio. La figura 6 muestra la relación entre las reflectancias para humedad del suelo a PMP y CC para las bandas del sensor TM5 referenciadas a las de suelo seco en horno para un suelo arcillo limoso (M.O.=1.47%).

La figura 6a muestra patrones lineales entre las reflectancias referenciadas, donde la banda del IRM1 (valor más alto de la reflectancia) rompe el patrón mencionado. En la figura 6b se eliminaron las reflectancias de las bandas de IRM1, por lo que el patrón lineal resulta en mejores ajustes.

Considerando el interés en establecer una relación simple entre R_{PMP} y R_{CC} la figura 7 muestra el patrón entre estas bandas para un suelo arcillo limoso y uno franco.

En el caso del suelo arcillo limoso de la figura 7, se ha forzado la relación a que pase por el

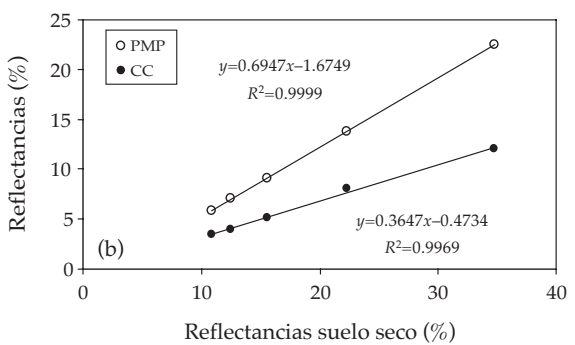


Figura 6. Relación entre las reflectancias de un suelo seco con las de CC y PMP.

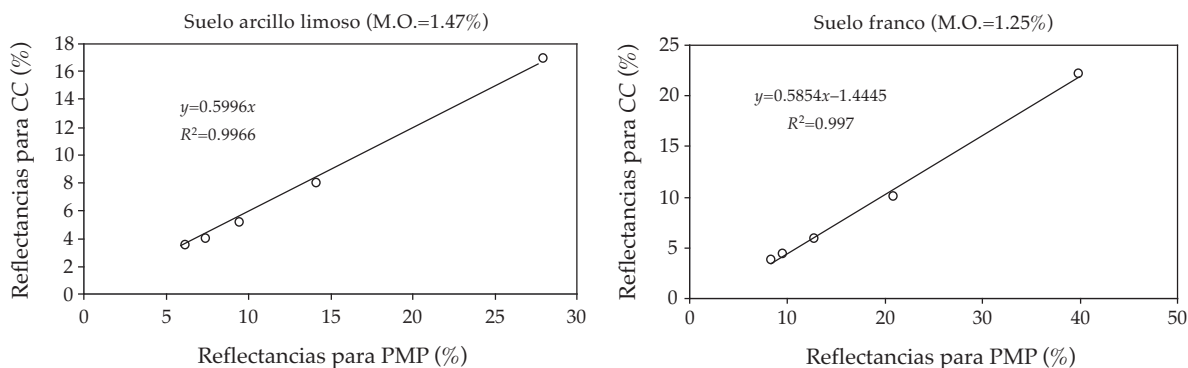


Figura 7. Relación entre R_{PMP} y R_{CC} para dos suelos.

Cuadro 2. Estimación del parámetro m para combinaciones de bandas espectrales.

Suelo	M.O. (%)	A, V, R, IRC, IRM2	A, V, R, IRC	V, R, IRC, IRM2	R, IRC	IRC*	IRM1
Arcillo limoso	1.47	0.5524	0.5738	0.5504	0.5724	0.5793 (0.6193)	0.6117
	1.84	0.4585	0.4562	0.4595	0.4602	0.4622 (0.7131)	0.5283
	3.33	0.5530	0.5619	0.5518	0.5594	0.5679 (0.6522)	0.6144
Franco arcillo limoso	1.14	0.5179	0.5448	0.5172	0.5556	0.5695 (0.7904)	0.5728
	1.47	0.4863	0.4672	0.4880	0.4728	0.4812 (0.8168)	0.5776
	1.55	0.4858	0.4792	0.4855	0.4791	0.4881 (0.7965)	0.5642
	1.83	0.4350	0.4483	0.4352	0.4623	0.4779 (0.7100)	0.5009
	2.64	0.5313	0.5272	0.5308	0.5273	0.5333 (0.5969)	0.6029
	2.66	0.4220	0.4478	0.4215	0.4510	0.4553 (0.7257)	0.4937
Franco limoso	0.6	0.4354	0.4541	0.4333	0.4596	0.4693 (0.9474)	0.4892
	0.63	0.4436	0.4348	0.4456	0.4446	0.4586 (0.8009)	0.5279
	0.66	0.4708	0.4729	0.4716	0.4780	0.4842 (0.8780)	0.5561
	0.86	0.4425	0.4540	0.4458	0.4719	0.4895 (0.8730)	0.5223
	1.32	0.4425	0.4540	0.4458	0.4719	0.4895 (0.8436)	0.5223
Franco	1.25	0.4708	0.4729	0.4716	0.4780	0.4842 (0.8137)	0.5561
Promedio		0.477	0.483	0.477	0.490	0.499 (0.769)	0.549
Desviación estándar		0.044	0.045	0.043	0.042	0.042 (0.103)	0.041

* Los valores entre paréntesis son de la constante n ($R_{PMP}=nR_{SECO}$).

origen, de tal manera que se pueda establecer la relación $R_{CC}=mR_{PMP}$ obteniéndose buenos resultados. Para el caso del suelo franco, el forzar la regresión lineal genera mayor error (figura 7).

El cuadro 2 muestra el valor de m obtenido por regresiones lineales forzadas a pasar por el origen ($R^2>0.96$ en todos los casos), usando diferentes combinaciones de bandas espectrales

del sensor TM5 y todos los datos de Beck *et al.* (1975).

Del cuadro 2 se observa que podemos usar un valor constante para m , como primera aproximación, el cual varía alrededor de 0.5. El valor más alto le corresponde a la banda IRM1 y el menor a la banda A, tal como es esperado. Para el IRC, se puede usar un valor de m de 0.5. En el caso de la banda del IRC, en el cuadro 2 también se presenta entre

paréntesis la constante n ($R_{\text{PMP}} = nR_{\text{SECO}}$), que muestra mayor variación que el caso de m .

En cuanto a los píxeles de suelo desnudo en una imagen por satélite, las reflectancias medidas por los sensores remotos representan un promedio de la humedad del suelo en cada píxel. Así, la heterogeneidad de la distribución espacial de la humedad es integrada a la escala del píxel y representada como una humedad equivalente (homogénea) en todo el píxel.

Para visualizar el efecto de la heterogeneidad de la humedad del suelo, la figura 8 muestra un experimento en el Colpos, donde se midieron las reflectancias de un suelo franco arcillo arenoso en condición seca y húmeda a diferentes alturas (relación altura del sensor a diámetro de medición de dos a uno). En la figura 8 se observa que el valor de m varía con la dimensión del píxel (entre más grande, mayor la probabilidad de encontrar una distribución heterogénea de la humedad) y fluctúa alrededor de 0.5. Esto demuestra un efecto de escala relativo a las dimensiones de los píxeles en la distribución de la humedad.

Evolución temporal de la humedad y reflectancia de los suelos

Uno de los puntos críticos de los modelos precipitación-escurrimiento es la determinación del estado de la humedad del suelo con respecto al tiempo, para poder analizar los cambios producto de la saturación del suelo.

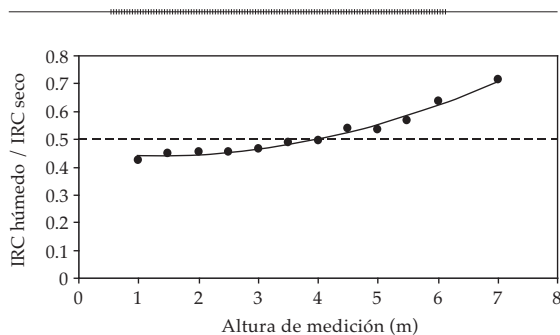


Figura 8. Efecto de escala en la distribución de la humedad del suelo en el IRC.

La evaporación de la humedad del suelo manifiesta al menos dos estados diferentes (Gardner y Hillel, 1962): en el primero, la evaporación está limitada por la atmósfera (energía disponible) y en el segundo, la evaporación está limitada por las propiedades hidráulicas de los suelos. Estos dos estados han sido caracterizados en condiciones de campo (Idso *et al.*, 1974; Brutsaert y Chen, 1995), con transiciones entre ellos. El primer estado está definido por la evaporación potencial, promedio temporal del suelo y puede estimarse usando información disponible en estaciones meteorológicas modernas (Makkink, 1957; Priestley y Taylor, 1972).

El patrón temporal de la tasa de evaporación en el segundo estado sigue un comportamiento proporcional a $t^{-1/2}$ (Ritchie, 1972). La caracterización del segundo estado requiere del conocimiento de algunas propiedades hidráulicas del suelo (básicamente la desortividad), por lo que puede ser aproximado usando modelos hidráulicos simples (Brutsaert y Chen, 1995; Salvucci, 1997). Bajo condiciones límites, y usando hipótesis de similaridad, es posible definir el patrón temporal de la evaporación del suelo en el segundo estado y parametrizarlo sólo en función del tiempo de duración del primer estado (t_d , tiempo al inicio del secado) (Salvucci, 1997; Amano y Salvucci, 1999). No obstante estas simplificaciones, el modelar la evolución temporal de la evaporación del suelo requiere de su medición (al menos conocer t_d).

Una alternativa de medición de la evaporación del suelo ha sido el uso del albedo (reflectancia) (Idso *et al.*, 1974 y 1975; Jackson *et al.*, 1976; Salvucci, 1997; Amano y Salvucci, 1999). Idso *et al.* (1975) presentan un modelo de variación del albedo del suelo con la humedad, en el perfil del suelo, por lo que puede usarse para expandir las mediciones superficiales en todo el perfil del suelo. La evidencia experimental muestra que la variación temporal del albedo se puede aproximar en forma lineal (Idso *et al.*, 1974; Salvucci, 1997; Amano y Salvucci, 1999), aunque otras relaciones funcionales se ajustan bien (\ln y $t^{1/2}$).

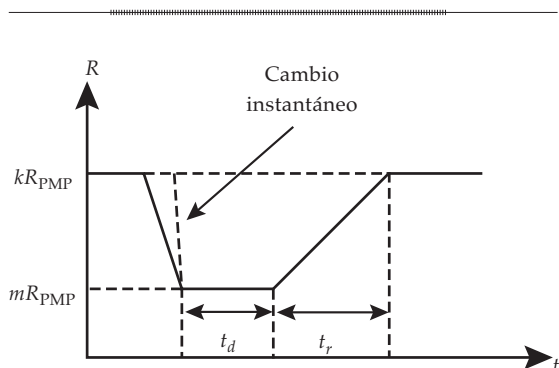


Figura 9. Modelo de la evolución temporal de la reflectancia-humedad del suelo.

De acuerdo con la discusión anterior, la figura 9 muestra el modelo propuesto de la evolución temporal de la reflectancia asociada con los cambios de humedad de los suelos. En la figura 9, t_r es el tiempo de recuperación (secado) y describe una fase lineal de la reflectancia. Considerando intervalos temporales de un día o algo menores, en la figura 9 se ha supuesto un cambio brusco (dentro de un día) de la reflectancia de la condición de suelo seco a húmedo (evento de precipitación o riego). Esta situación corresponde al caso donde $P > I_a$ en el método del NC.

Ahora bien, si suponemos que los cambios en la humedad del suelo (θ) siguen un patrón aproximadamente logarítmico en el tiempo (segundo estado), entonces la aproximación de la ecuación (6) puede ser usada en forma sólida.

El modelo de la figura 9 puede ser usado para estimar el coeficiente de reducción de la evaporación, usando la ecuación (6), para evaluar el efecto del cambio en la humedad del suelo en los coeficientes del cultivo usados en la estimación de la evapotranspiración (Allen *et al.*, 1998).

Si en la figura 9 se supone un patrón de cambio de la reflectancia proporcional a t (la reflectancia representa una propiedad acumulativa), entonces la única incógnita es t_d o, suponiendo valores para k y m , con dos puntos en la etapa de secado se puede caracterizar el modelo propuesto.

Para revisar la validez del modelo propuesto en la figura 9, se analizó el experimento discutido previamente de las dos condiciones de manejo del suelo: sin y con labranza. La figura 10 muestra la evolución temporal de IRC para los dos días de medición, aproximadamente de 10:00 a.m. a 6:00 p.m.).

En la figura 10 se observa que el modelo propuesto es seguido en forma adecuada por los datos experimentales. En el segundo día, el suelo sufrió cambios de humedad ligados con neblina (cambios en el contenido inicial del suelo al inicio de las mediciones).

En la figura 11 se muestra el modelo ajustado al segundo estado (secado) durante el segundo día del experimento.

En los análisis anteriores se enfatizó el uso de la banda del IRC debido a su disponibilidad

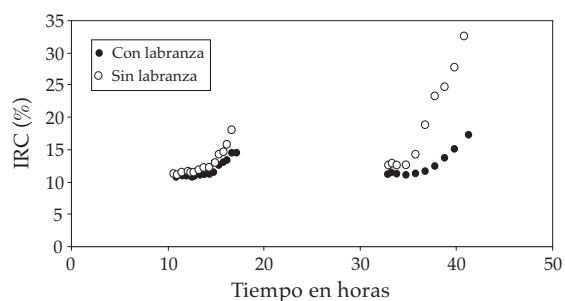


Figura 10. Evolución temporal del IRC asociado con la humedad del suelo.

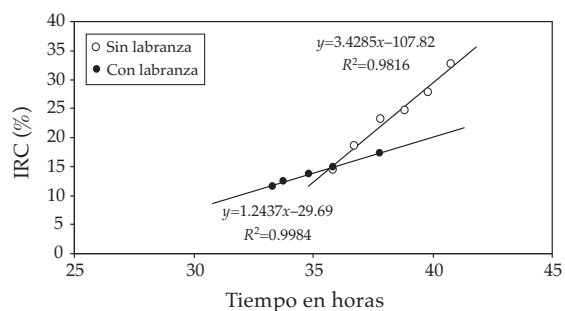


Figura 11. Modelo ajustado al segundo estado de la evaporación del suelo.

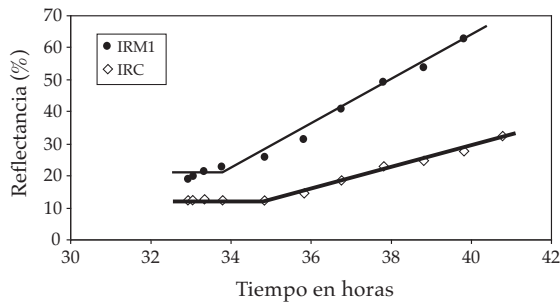


Figura 12. Modelos temporales de la reflectancia para las bandas del IRC e IRM1 para el segundo día del suelo sin labranza.

en prácticamente todos los sensores en satélites, además de razones asociadas con la simetría (línea del suelo) de las reflectancias entre esta banda y la del R , tal como se discute en Paz *et al.* (2009). No obstante lo anterior, el uso de la banda del IRC presenta problemas de saturación mayores que el uso de la banda del IRM1 (figura 12). El uso de la banda del IRM1 es analizado en el formato de la mezcla suelo-vegetación por Paz *et al.* (2009), por lo que el uso de esta banda para el caso del suelo desnudo tiene las mismas bases que las presentadas para el IRC. En cuanto a la discusión asociada con la figura 6, el uso de la banda del IRM1 tiene ligado un factor m (cuadro 2) diferente al del IRC.

Conclusiones

La caracterización operacional de la condición de humedad del suelo, para fines de modelación de la relación precipitación-escurrimiento, ha sido revisada bajo la consideración de sólo usar información espectral de sensores remotos. Así, en términos relativos, los cambios de humedad del suelo pueden ser caracterizados por medio de la reflectancia de la capa más superficial del suelo.

Los análisis realizados muestran que es posible construir un modelo simple, operacional, de la evaporación del suelo, si

consideramos como constantes la relación entre las humedades a capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente. La humedad obtenida por los sensores remotos se refleja en una humedad, que varía de 0 (kR_{PMP}) a 1 (mR_{PMP}), donde m puede suponerse igual a 0.5 (banda del infrarrojo cercano) y $k=1$.

La evidencia experimental de la evolución temporal del secado del suelo (segundo estado de la evaporación) muestra resultados compatibles con modelos acumulativos de la evaporación, suponiendo una relación lineal de la reflectancia proporcional al tiempo. Así, la única variable requerida para modelar la evaporación, relativa, del suelo es el tiempo hasta el inicio del secado (t_d) o contar con dos mediciones de la reflectancia en la etapa de recuperación (t_r).

Recibido: 07/01/2008
Aprobado: 02/09/2009

Referencias

- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D. and SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 56*. Rome: FAO, 1998, 300 pp.
- AMANO, E. and SALVUCCI, G.D. Detection and use of three signatures of soil-limited evaporation. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 67, 1999, pp. 108-122.
- BAUMGARDNER, M.F., SILVA, L.F., BIEHL, L.L. and STONER, E.R. Reflectance properties of soils. *Advances in Agronomy*. Vol. 38, 1985, pp. 1-44.
- BECK, R.H., ROBINSON, B.F., MCFEE, W.W. and J.B. PETERSON. *Spectral characteristics of soil moisture, organic carbon and clay content*. LARS Technical Note 081176. University of Purdue, Indiana, 1975, pp. 91.
- BRUTSAERT, W. and CHEN, D. Desorption of the two stages of drying of natural tallgrass prairie. *Water Resources Research*. Vol. 31, 1995, pp. 1305-1313.
- DUKE, C. and GUÉRIFF, M. Crop reflectance estimate errors from the SAIL model due to spatial and temporal variability of canopy and soil characteristics. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 66, 1998, pp. 286-297.
- GARDNER, W.R. and HILLEL, D.I. The relation of external evaporative conditions to the drying of soils. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 67, 1962, pp. 4319-4325.
- IDSO, S.B., JACKSON, R.D., REGINATO, R.J., KIMBALL, B.A. and NAKAYAMA, F.S. The dependence of bare soil

- albedo on soil water content. *Journal of Applied Meteorology*. Vol. 14, 1975, pp. 109-113.
- IDSO, S.B., REGINATO, R.J., JACKSON, R.D., KIMBALL, B.A. AND NAKAYAMA, F.S. The three stages of drying of a field soil. *Soil Science Society of America Proceedings*. Vol. 3, 1974, pp. 831-837.
- JACKSON, R.D., IDSO, S.B. and REGINATO, R.J. Calculation of evaporation rates during the transition from energy-limiting to soil-limiting phases using albedo data. *Water Resources Research*. Vol. 12, 1976, pp. 23-36.
- LOBELL, D.B. and ASNER, G.P. Moisture effects on soil reflectance. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 66, 2002, pp. 722-727.
- MAKKINK, G.F. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institute of Water Engineering*. Vol. 11, 1957, pp. 277-288.
- MULLER, E. and DÉCAMPS, H. Modeling soil moisture-reflectance. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 76, 2000, pp. 173-180.
- NRCS. Part 630 Hydrology. *National Engineering Handbook*. Chapter 10 Estimation of direct runoff from storm rainfall. Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture. 210-VI-NEH, July, 2004.
- NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R., WILLIAMS, J.R. and KING, K.W. *Soil and water assessment tool theoretical documentation. Version 2000*. TWRI Report TR-191. College Station, USA: Texas Water Resources Institute, 2002, 498 pp.
- PALACIOS, L.A., PAZ, F., OROPEZA, J.L., FIGUEROA, B., MARTÍNEZ, M., ORTIZ, C.A. y GARCÍA, E. Clasificador genérico de objetos en imágenes ETM+. *Agrociencia*. Vol. 40, 2007, pp. 613-626.
- PAZ, F. Mitos y falacias del método hidrológico del número de curva del SCS/NRCS. *Agrociencia*. Vol. 29, 2009, pp. 521-528.
- PAZ, F., MARÍN, M.A., LÓPEZ, E., ZARCO, A., BOLAÑOS, M.A., OROPEZA, J.L., MARTÍNEZ, M., PALACIOS, E. y RUBIÑOS, E. Elementos para el desarrollo de una hidrología operacional con sensores remotos: mezcla suelo-vegetación. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XXIV, núm. 2, abril-junio de 2009, pp. 69-80.
- PRIESTLEY, C.H. and TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*. Vol. 100, 1972, pp. 81-92.
- RALLISON, R.E. and MILLER, N. Past, present and future of SCS runoff procedure. *Rainfall Runoff Relationship*. Singh, V.P. (editor). Littleton, USA: Water Resources Publications, 1981, pp. 353-364.
- RITCHIE, J.T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*. Vol. 8, 1972, pp. 1204-1213.
- ROSS, J. *The radiation regime and architecture of plant stands*. Norwell, USA: W. Junk, 1981, 391 pp.
- SALVUCCI, G.D. Soil and moisture independent estimation of stage-two evaporation from potential evaporation and albedo or surface temperature. *Water Resources Research*. Vol. 33, 1997, pp. 111-122.
- SHARPLEY, A.N. and WILLIAMS, J.R. (editors). EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator. 1. Model documentation. *USDA Technical Bulletin*. No. 1768, 1990, 235 pp.
- SCS. *Section 4: Hidrology*. Washington, D.C.: National Engineering Handbook, Soil Conservation Service, USDA, 1972.
- WEIDONG, L., BARET, F., XINGFA, G., QINGXI, T., LANFEN, Z. and BING, Z. Relating soil surface moisture to reflectance. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 81, 2002, pp. 238-246

Abstract

PAZ-PELLAT, F., MARÍN-SOSA, M.I., LÓPEZ-BAUTISTA, E., ZARCO-HIDALGO, A., BOLAÑOS-GONZÁLEZ, M.A., OROPEZA-MOTA, J.L., MARTÍNEZ-MENES, M., PALACIOS-VÉLEZ, E. & RUBIÑOS-PANTA, E. Elements for developing an operational hydrology using remote sensing: bare soil. *Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering en Mexico (in Spanish)*. Vol. I, no. 2, April-June, 2010, pp. 59-71.

The use of remote sensing in hydrological applications has been limited and oriented to the estimation of the values of parameters of models with different complexities. Using the curve number paradigm for modeling the precipitation-runoff relationship, this paper presents the elements for developing an operational hydrology based only in spectral information of remote sensing for the case of bare soil. The moisture-reflectance relationship is analyzed and modeled using a simple relationship which was validated with field and laboratory data (reflectance measurements). The temporal evolution of soil moisture and reflectances are analyzed and modeled through linear segments in such a way that only one parameter is required, time to drying, for the complete characterization. The results of field experiments were used in order to validate the model proposal.

Keywords: precipitation-runoff relationship, remote sensing, bare soil.

Dirección institucional de los autores

Dr. Fernando Paz-Pellat
Dra. Ma. Isabel Martín-Sosa
Dr. Eliezer López Bautista
Dr. Alfonso Zarco Hídalgo
Dr. Martín A. Bolaños González
Dr. José Luis Oropeza Mota
Dr. Mario Martínez Menes
Dr. Enrique Palacios Vélez
Dr. Enrique Rubiños Panta

Colegio de Postgraduados
Kilómetro 36.5, carretera México-Texcoco
56230 Montecillo, Estado de México, México
teléfono: + (52) (595) 952 0200, extensión 1151
pellat@colpos.mx
marin@colpos.mx
ellopez81@hotmail.com
azarco@colpos.mx
bolanos@colpos.mx
oropeza@colpos.mx
mmario@colpos.mx
epalacio@colpos.mx
jerpikike@colpos.mx