Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM
Núm. 47, 2002, pp. 36-58

Modelamiento hidrológico espacialmente distribuido: una revisión de sus componentes, niveles de integración e implicaciones en la estimación de procesos hidrológicos en cuencas no instrumentadas

Manuel Mendoza*
Gerardo Bocco*a
Miguel Bravo**
Christina Siebe***
Mario Arturo Ortiz****

Recibido: 4 de julio de 2001
Aceptado en versión final: 4 de abril de 2002

Resumen. En este artículo se revisan y discuten las técnicas de percepción remota (PR) y sistemas de información geográfica (SIG), así como el conocimiento geomorfológico ligado al modelamiento hidrológico espacialmente distribuido. La discusión permitió definir cuatro grupos, en los cuales se integran las distintas técnicas de percepción remota (PR), sistemas de informaciópn geográfica (SIG) y el conocimiento geomorfológico aplicado a entender las implicaciones ambientales de la degradación de tierras y de manejo de recursos, especialmente en países subdesarrollados. Los grupos son: *a)* modelamiento hidrológico y SIG; *b)* PR y modelos hidrológicos; *c)* modelamiento hidrológico, PR y SIG, y *d)* integración del conocimiento geomorfológico, PR y la aplicación de SIG al modelamiento hidrológico.

Palabras clave: Modelamiento hidrológico espacialmente distribuido, percepción remota, sistemas de información geográfica, conocimiento geomorfológico, cuencas no instrumentadas.

Spatially distributed hydrological modeling: a review of components, integration levels and implications for estimating hydrological processes in non-instrumented basins

Abstract. This article reviews and discusses the remote sensing (RS) techniques and geographic information systems (GIS), as well as the geomorphological knowledge associated to spatially distributed hydrological modeling. The discussion allowed to defined four groups which integrate the different Remote Sensing (RS) techniques, Geographic Information systems (GIS) and the geomorphological knowledge oriented to understand the environmental implications of land degradation and resource management, especially in developing countries. Groups include: a) hydrological modeling and GIS; b) RS and hydrological models; hydrological modeling, RS and GIS; and d) integration of the geomorphological knowledge, RS and GIS application to hydrological modelling.

Key words: Spatially distributed hydrological modeling, remote sensing, geographic information systems, geomorphological knowledge, non-instrumented basins.

*Instituto de Ecología, UNAM, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Col. Ex Hacienda San José de La Huerta, 58190, Morelia, Michoacán, México. a) Dirección actual: Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de los Ecosistemas, Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT. E-mail: mmendoza@oikos.unam.m gbocco@oikos.unam.mx
**CENAPROS-INIFAP, Km 18.5 Carretera Morelia-Aeropuerto, Álvaro Obregón, Michoacán, México.
E-mail: bravo_miguel@infosel.net.mx
***Instituto de Geología, UNAM, Circuito Exterior, Cd. Universitaria, 04510, México D. F. E-mail: siebe@servidor.unam.mx
****Instituto de Geografía, UNAM, Circuito Exterior, Cd. Universitaria, 04510, México D. F.
E-mail: maop@igiris.igeograf.unam.mx

INTRODUCCIÓN

El ciclo hidrológico, término que describe la circulación y almacenamiento de agua en la tierra (Maidment, 1993a), es afectado por la influencia humana a diferentes escalas, desde la local hasta la planetaria (*Committee on Opportunities in the Hydrologic Sciences*, 1991).

El efecto del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo (CCVUS) asociado con la expansión de la agricultura y ganadería ha tenido una profunda influencia en los procesos hidrológicos en pequeñas cuencas y a nivel regional (Sahagian, 2000).

El manejo de cuencas proporciona el marco conceptual, espacial e integral que permite el manejo ecosistémico de recursos naturales, el cual minimiza los efectos del CCVUS. Actualmente, este marco conceptual es la mejor opción para el manejo y conservación de recursos naturales (Ersten, 1999; Jain *et al.*, 2000). El ciclo del agua regula la variabilidad natural de los procesos físicos que impactan el ecosistema (Elkaduwa y Sakthivadivel, 1998). Sin embargo, los hidrólogos no pueden diagnosticar rápidamente las condiciones a nivel regional, si los datos hidrológicos son insuficientes para este nivel de análisis (Bergström y Graham, 1998). El problema se resuelve cuantificando los procesos hidrológicos en períodos del orden de varios años o bien, simulando los procesos hidrológicos (Bastiaanssen, 2000a).

Algunas de las necesidades urgentes que deben ser resueltas por este tipo de estudio científico y evaluación técnica son: *a)* la localización y magnitud de las fuentes de agua, *b)* análisis de la distribución, duración, intensidad, frecuencia y fecha de inicio de la sequía o inundación, entre otros (Sehmi y Kunzewicz, 1992). Además, se debe considerar el crecimiento de la población, nivel de desarrollo económico, cambio climático, variabilidad climática, uso actual y futuro del agua existente y asequible para diferentes actividades humanas.

El objetivo de este artículo es describir y analizar los diferentes enfoques en el análisis espacial de la distribución del agua, principalmente superficial y a escala regional, y especialmente en áreas donde existe escasez de datos hidrometeorológicos. Se hará énfasis en la integración de métodos indirectos: percepción remota (PR), sistemas de información geográfica (SIG) y conocimiento geomorfológico.

LA PROBLEMÁTICA DE LA ESTIMACIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS

En muchas áreas del planeta, específicamente en países subdesarrollados, la investigación hidrológica se dificulta por la escasez de series confiables de datos de largo plazo, ya que obstaculizan la aplicación y desarrollo de modelos hidrológicos. En muchas regiones las redes hidrometeorológicas son muy poco densas e incluso inexistentes debido, entre otras razones, a que su establecimiento y mantenimiento es oneroso, particularmente, por el costo del equipo, su operación y el desarrollo de bases de datos.

Lo anterior motiva la necesidad de desarrollar métodos indirectos, pero es preciso señalar que el establecimiento de redes de estaciones de aforo se debe impulsar por su importancia en la generación de registros para validar modelos o para evaluar prácticas de manejo de cuencas (Olsson y Pilesjo, 1999; Bastiaanssen, 2000a y 2000b).

De acuerdo con una perspectiva no convencional, los métodos indirectos requieren reconocer las características y distribución espacial de escurrimientos y los componentes bióticos y abióticos de las cuencas, así como las relaciones espaciales y temporales entre éstos (Schaumm, 1964; Ward, 1979; Verstappen, 1983; Meijerink, 1996; entre otros).

MODELOS, TÉCNICAS Y HERRAMIENTAS EN EL ANÁLISIS HIDROLÓGICO

Modelos hidrológicos

Un modelo hidrológico puede ser definido como una simplificación de un sistema natural. Tradicionalmente, los modelos hidrológicos se agrupan en modelos basados en procesos físicos y modelos conceptuales (Bergström, 1991). Los modelos conceptuales son aquellos que manifiestan el entendimiento de un proceso; este modelo puede ser representado por un modelo matemático o físico. Los modelos físicos describen el sistema natural con base en la elaboración de un prototipo, que puede tener una representación matemática utilizando las leyes de conservación de masa, momento y varias formas de energía. Desde el punto de vista matemático, los modelos pueden ser empíricos y teóricos, y con solución analógica o numérica. Si las variables presentan un comportamiento aleatorio o no, pueden ser clasificados como estocásticos o determinísticos (Brooks *et al.*, 1992).

Adicionalmente, existen los modelos agregados y distribuidos, dependiendo del grado de discretización en la descripción de las características de la cuenca (por ejemplo variabilidad espacial de los parámetros o variables de entrada o salida; Meijerink *et al.*, 1994). Para la aplicación de modelos espacialmente distribuidos, las cuencas son regularmente divididas en unidades de respuesta hidrológica, subcuencas y laderas representativas (Kite y Kouwen, 1992; Kite, 1993; Bergström y Graham, 1998).

La construcción de modelos mensuales de precipitación-escurrimiento y balance hídrico (BH) son herramientas para el manejo de recursos hídricos, especialmente a nivel regional (Xu y Sing, 1998; Xu, 1999). Existe consenso en que las estimaciones indirectas del BH son útiles en el análisis del efecto del CCVUS (Harbor, 1994; Bhaduri *et al.*, 1997), cambio climático a largo plazo (Gleick, 1987; 1986; Vörösmarty y Moore, 1991; McGuffie *et al.*, 1998; Xu, 2000).

Estos modelos hidrológicos deben cumplir dos condiciones: *a)* los datos necesarios para la calibración deben ser accesibles y *b)* la calibración debe ser sencilla. La última condición tiene que ver con los requerimientos de un modelo hidrológico, especialmente cuando los datos son escasos, de esta manera pocos parámetros deben ser seleccionados para su utilización (las características de la cuenca son desconocidas y deben ser estimadas). Xu y Vandewiele (1994) recomiendan cautela con respecto al número de parámetros a utilizar.

Cuando las relaciones entre las características físicas de la cuenca de drenaje (rocas, suelos y cobertura vegetal), y la respuesta hidrológica está establecida, el comportamiento hidrológico de la cuenca puede ser bastante bien predicho sin la medición directa de procesos (Meijerink *et al.*, 1994; Meijerink y Mannaerts, 2000; Mendoza *et al.*, 2002). Por consideraciones prácticas, no es posible y en muchos casos no es necesario, utilizar todas las características físicas de la cuenca (Vandewiele *et al.*, 1991). El desarrollo de modelos predictivos relacionados con los parámetros de la cuenca se apoya en el uso de análisis de regresión, incluyendo análisis de residuales, sensibilidad al período de calibración y evaluación de la extrapolación. En particular, en estos modelos se utilizan técnicas de calibración automática porque excluye elementos subjetivos (Vandewiele *et al.*, 1992).

El modelo que integra a la hidrología subterránea, la hidrometeorología y las características físicas de la cuenca es conocido como balance BH (Thorhnwaite y Matter, 1955). Éste se refiere al cómputo de las entradas y las salidas de agua, y energía en

una cuenca. La entrada principal es la precipitación y las salidas se refieren a los flujos de agua ocasionados por evapotranspiración, recarga de aguas subterráneas y escurrimiento. El balance puede calcularse para un perfil de suelo, una parcela o una cuenca. En esencia, el método debería permitir calcular un registro continuo de la humedad del suelo, la evapotranspiración actual, la recarga del acuífero a partir de registros meteorológicos limitados y observaciones de vegetación y suelos (Dunne y Leopold, 1978).

El problema es que generalmente el modelo de BH no representa un funcionamiento equivalente al de campo; sin embargo, el sesgo es minimizado cuando las clases de mapeo se limitan únicamente a tres o cuatro clases relativas (alta, media y baja) que definen el comportamiento de los diversos componentes del BH (Meijerink *et al.*, 1994 y Meijerink, 2000).

Dunne y Leopold (1978), y Brooks *et al.* (1992) indican que el modelo de BH tiene gran poder en la planeación del uso del agua, predicción del impacto sobre el ciclo hidrológico y de los efectos hidrológicos provocados por las modificaciones del medio (por ejemplo, CCVUS). Considerando el caso mas simple, bajo condiciones naturales (p.e. sin extracciones por bombeo), con referencia a una cuenca en donde coinciden los limites topográfico y freático, y donde el agua subterránea ocurre en acuíferos no confinados, el balance de agua se representa con la siguiente ecuación (Dingman, 1994; Freeze y Cherry, 1979):

$$P - Q - ETA = (R_I + R_{SW}) - CR - Q_{GW}$$

donde P es precipitación, Q es el escurrimiento superficial, ETA es la evapotranspiración actual, (R_I + R_{SW}) es la recarga del acuífero (por infiltración o desde cuerpos de agua superficiales), CR es el movimiento del agua subterránea hacia la zona de capilaridad y Q_{GW} es la contribución del agua subterránea al caudal de corrientes naturales. Todos los componentes representan flujos o almacenamientos sobre períodos de tiempo arbitrarios.

Para los fines de este trabajo se hará énfasis en el cálculo de los términos del lado izquierdo de la ecuación, particularmente para cuencas que carecen de registros de aforo. La estimación de los términos del lado derecho escapan a los propósitos de este trabajo, sin embargo, se abordarán en términos generales.

Modelos espacialmente distribuidos en hidrología

El desarrollo de la computación y de los SIG y la PR han estimulado la construcción de modelos hidrológicos espacialmente distribuidos (MHED) desde los años setenta (Rango, 1985; Stuebe y Johnson, 1990). Un modelo distribuido considera la variación espacial en todos sus parámetros y variables en cada punto de la cuenca. Si un modelo presenta este tipo de estructura es compatible directamente con datos producidos por PR y SIG de formato de celdas. En la extensión vertical, cada celda puede dar una profundidad o ser discretizada en un número de celdas sobrepuestas (por ejemplo columnas). Para cada celda la descarga de agua hacia la celda vecina se calcula de acuerdo con el proceso hidrológico activo; de esta manera, la distribución del flujo de agua dentro de la cuenca se representa a través de mapas (Olsson y Pilesjo, 1999).

La investigación en MHED sobre grandes regiones se basa en la investigación hidrológica de procesos (Venneker y Bruijinzeel, 1997). De esta manera, se construyen modelos hidrológicos de macroescala, los cuales pueden ser ejecutados en forma repetida sobre grandes áreas geográficas

(Arnell, 1999).
Los MHED se han utilizado para evaluar las condiciones hidrológicas (escorrentía, infiltración, recarga de acuíferos); el estado de la vegetación (densidad, calidad), y el cambio climático en amplias regiones geográficas (Neilson, 1995; Najjar, 1999). De hecho, los modelos distribuidos pueden aplicarse a cualquier clase de problema hidrológico incluidas las predicciones en cuencas no instrumentadas (Refsgaard, 1996).

El número de variables y parámetros de un MHED es mucho mayor que el número que incluye un modelo agrupado para la misma área. Esto genera dificultades en la parametrización, calibración y validación del modelo distribuido. Una de las mayores críticas a estos modelos es la modificación de un gran número de parámetros durante la fase de calibración (Beven, 1996). Existen diversas revisiones sobre la calibración y validación de modelos en cuencas instrumentadas que no se discutirán en el presente artículo (Rosso, 1994, Refsgaard y Storm, 1996, Refsgaard, 1997).

En cuencas no instrumentas la validación de MHED ofrece uno de los mayores retos del modelamiento de procesos. Dentro de este reto algunas de las preguntas que se pueden formular son: qué tipo de mediciones se deben realizar en la cuenca para evaluar la capacidad predictiva de un modelo, por ejemplo, de precipitación-escurrimiento. De éstas, cuál tiene una mayor capacidad de discretización en la evaluación del modelo. La respuesta a estas y otras preguntas deben relacionarse, entre otros aspectos, con el propósito de la evaluación y la utilización de las predicciones del modelo.

INTEGRACIÓN DE MODELOS Y HERRAMIENTAS

Aportes de los SIG a la hidrología

Un sistema de información geográfica (SIG) está diseñado para analizar datos referenciados por coordenadas espaciales o geográficas y sus correspondientes bases de datos no espaciales (Burrough, 1986; Valenzuela, 1991). Su principal objetivo consiste en apoyar y asistir en la toma de decisiones para el manejo y conservación de recursos. En el caso de la hidrología, un SIG asiste en el análisis de datos hidrometeorológicos e hidrogeológicos (cuantitativos) y temáticos (roca, relieve, suelo y cobertura; Meijerink *et al.*, 1994).

La mayor parte de los esfuerzos de investigación hacia la integración de los SIG con el modelamiento hidrológico (MH) se realizaron hasta finales de los años ochenta. La integración de tecnologías comenzó lentamente cuando el SIG fue utilizado para ejecutar sobreposición y agregación de información espacial, que permitieran reconocer las características de la cuenca para exportarlas a un programa en algún lenguaje de programación o un paquete estadístico, para su análisis. Estas ligas evolucionaron hacia esquemas más robustos y complejos (Kopp, 1996; McDonell, 1996; Sui y Maggio, 1999).

Sui y Maggio (1999), clasifican el grado de integración entre los SIG y el MH en cuatro tipos: *a)* incorporación de SIG en el modelamiento hidrológico; *b)* incorporación del modelamiento hidrológico en los SIG; *c)* acoplamiento holgado (*loose coopling*), y *d)* acoplamiento estrecho (*tight coopling*; Figura 1).

Los aportes del uso de un SIG tienen que ver con la integración y modelamiento de datos espaciales. En el caso de integrar datos climáticos preexistentes de baja y muy baja resolución, los trabajos se caracterizan por elaborarse a pequeña escala, en el orden de los miles a millones de km^2, principalmente. El modelamiento del BH se realiza en regiones amplias, generalmente semiáridas poco aforadas (Maidment *et al.*, 1995 y 1996; Maidment y Reed, 1997; Olivera *et al.*, 1995; Olivera, 1995; Reed, *et*

al., 1997; Reed, 1996; Beek, 1996, Mendoza y Bocco, 2001); medianamente aforadas en el sur de Estados Unidos de América (Olivera, 1996), y templadas tropicales y áridas que cuentan con grandes bases de datos históricas provenientes de aforos (Arnell, 1999); con bases de datos resultado de experimentos (Seguin *et al.*, 1989). La resolución espacial de estos trabajos varía de las centenas de kilómetros hasta miles de kilómetros por lado.

Dentro de este grupo se puede incluir a los trabajos de caracterización morfométrica de cuencas que utilizan como fuente de datos a los Modelos Digitales de Terreno (MDT) a varias resoluciones espaciales, de los cuales se derivan la delimitación de cuencas, redes de drenaje y dirección de escurrimientos (Olivera y Maidment, 1996; Miller y Morrice, 1996; Müller-Wohlfeil, *et al.*, 1996; Beek, 1996). Además, las herramientas de modelamiento espacial en los SIG permiten estimar y generar la distribución espacial de los parámetros hidrológicos a partir de la aplicación de diferentes técnicas de interpolación dentro del sistema (*kriging, trend surface analysis*, *moving average*, entre otros).

Como parte de este enfoque, Maidment (1993b) desarrolló un procedimiento de diez pasos para el MHED en SIG (Tabla 1). Los primeros cinco pasos se relacionan con la definición del modelo espacio-temporal, además de la descripción ambiental. La descripción incluye modelos espaciales de la distribución del relieve, suelos, cobertura, hidrología subterránea, así como datos puntuales de precipitación, escorrentía y concentración de elementos químicos. Los últimos cinco pasos se relacionan con la simulación del BH de las unidades espaciales, el flujo del agua y transporte de elementos entre las unidades, el efecto de las estructuras de utilización del agua, tales como presas y sistemas de bombeo.

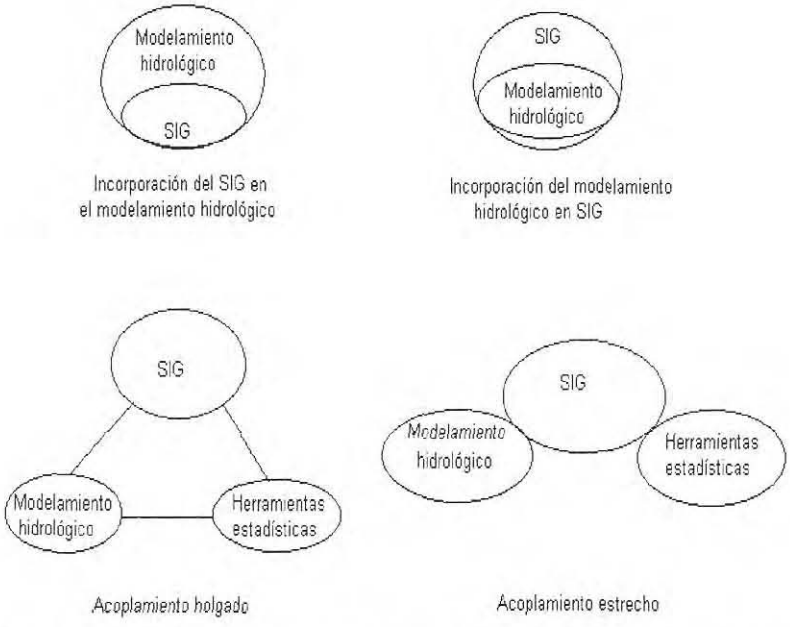

Figura 1. Esquemas actuales de integración de los SIG con el modelamiento hidrológico. Tomado de Sui y Maggio (1999).

Tabla 1. Procedimiento para el MH en SIG. Tomado de Maidment (1996)

1. Diseño del estudio. Objetivos y alcances del estudio, dominio espacial y temporal; modelos de procesos, variables a ser calculadas.
2. Análisis del terreno. Delimitación del arreglo de la red de drenaje y la cuenca a partir de datos de un modelo digital de elevación y mapas de corrientes.
3. Superficie del terreno. Descripción de los suelos, de la cobertura y uso de suelo, ciudades y caminos
4. Subsuperficial. Descripción hidrogeológica de acuíferos.
5. Datos hidrológicos. Localización de sitios de aforo, ligado a series de tiempo y valores promedio e interpolación de datos climáticos puntuales.
6. Balance hídrico del suelo. Distribución de la precipitación en evaporación, recarga de mantos acuíferos y escorrentía superficial; conocimiento de los productos químicos aplicados sobre la superficie.
7. Flujo de agua. Movimiento del agua a través del paisaje en corrientes y acuíferos. Cálculo de las velocidades de escorrentía y de los flujos en acuíferos.
8. Transporte. Transporte de sedimentos y contaminantes en agua como flujos. Calcular las concentraciones y cargas.
9. Impacto de la utilización del agua. Localización de embalses, extracción del agua, descarga en ríos, y bombeo de acuíferos. Sus efectos sobre el flujo de agua y concentración de elementos químicos.
10. Presentación de resultados. Desarrollo de la presentación visual y tabulación de los resultados del estudio. Uso de Internet y CD-ROM para transferencia de resultados.

Aportes de la percepción remota a la hidrología

La PR proporciona observaciones de la superficie terrestre y marina en longitudes de onda visible (Vis), infrarrojo (In), térmico (Te) y de microondas (Mo). Los instrumentos se encuentran en plataformas satelitales y aeronaves. Entre los datos comúnmente extraídos de estos documentos, se encuentran los de cobertura del suelo, relieve, suelos, rocas y biomasa, entre otros (Lillesand y Kiefer, 1987; Barret *et al.*, 1990; Sabins, 1997).

La descripción de las relaciones entre la precipitación (P), temperatura (T), humedad en el suelo (HS), infiltración (I), recarga de aguas subterráneas (Ri, Ssw), escorrentía (Q) y evapotranpiración (ET) es posible realizarse con modelos de distribución espacial, con los cuales se puede estimar un BH regional cualitativo, semi-cualitativo y en algunas ocasiones cuantitativo. En la Tabla 2 se presentan las características generales de los sensores remotos comúnmente utilizados en la generación y estimación de variables ligadas a los aspectos hidrológicos.

La mayor parte de los avances del uso de PR en hidrología han surgido al intentar responder a preguntas en áreas donde los métodos hidrológicos existentes fueron poco satisfactorios y donde los datos necesarios para el análisis fueron escasos o inexistentes (Engman, 1996). Actualmente la PR se encuentra en una fase de transición de ser una herramienta descriptiva para convertirse en una tecnología cuantitativa que proporciona información espacial (Baumgartner y Apfl, 1996).

Tabla 2. Características generales de las imágenes de satélite más comunes*

Sensor	Resolución espacial	Resolución temporal	Cobertura geográfica	Longitud de onda (bandas)	Usos frecuentes
METEOSAT	3 a 5 km por lado	0.5 h	Generalmente en el orden de la decena de miles de km^2 (escala subcontinental y continental)	0.5-0.9 µm 5.7-7.1 µm 10.5-12.5 µm	Estimación de la precipitación.
GOES	3 a 5 km por lado	0.5 h	Generalmente en el orden de la decena de miles de km^2 (escala subcontinental y continental)	0.55-0.72 µm 10.5-12.6 µm	Estimación de la profundidad de la nieve, de la precipitación y de la evapotraspiración.
AVHRR	1.1 x 1.1 km 4 x 4 km	Dos veces al día	Generalmente en el orden de los miles de km^2 (escala de grandes regiones)	0.58-0.60 µm 0.72-1.10 µm 3.55-3.93 µm 3.55-3.93 µm 10.50-11.50 µm 11.50-12.50 µm	Delimitación y monitoreo de la cobertura del suelo, estimación de temperatura superficial y precipitación, y cobertura de nieve y nubes.
Landsat MSS	80 x 80 m	18 días	Generalmente en el orden de las centenas de km^2 (escala regional)	0.5-0.6 µm 0.6-0.7 µm 0.7-0.8 µm 0.8-1.1 µm	Delimitación de cobertura vegetal y uso de suelo.
Landsat TM	30 x 30 m 120 x 120 m 30 x 30 m	16 días	Generalmente en el orden de las centenas de km^2 (escala regional)	0.45-0.52 µm 0.52-0.60 µm 0.63-0.69 µm 0.76-0.90 µm 1.55-1.75 µm 10.40-12.50 µm 20.8-2.35 µm	Delimitación de la cobertura vegetal y uso de suelo, temperatura, humedad del suelo, relieve, erosión, y extensión de cuerpos de agua.
SPOT	20 x 20 m 10 x 10 m (pan)	26 días	Generalmente en el orden de los km^2 (escala de pequeñas regiones)	0.50-0.59 µm 0.61-0.68 µm 0.79-89 µm 0.51-0.73 µm	Delimitación de la cobertura vegetal y uso de suelo, temperatura, humedad del suelo, relieve y erosión

*Recopilado de Jensen (1986); Lillesan y Kiefer (1987); Sabins (1997), y Barret y Curtis (1999).

La integración de la PR y la hidrología permite estimar los componentes del BH, tales como P, T, ET y HS, a partir de la transformación de datos digitales de las bandas Vis, In y Te (Tabla 3). Estos datos son obtenidos a partir de imágenes de satélite de muy baja resolución (3 x 3 a 5 x 5 km por pixel, GOES y Meteosat); de imágenes de resolución baja (1 km^2, AVHRR); y de imágenes de alta resolución (20 x 20 a 120 x 120 m, Spot y Landsat, respectivamente). En la presente revisión se enfatiza en los algoritmos de transformación de datos de PR provenientes del rango espectral que corresponde a las bandas Vis, Te e In.

Salomonson (1983), dividió el uso de la PR en el MH en tres categorías. La más simple corresponde al uso de imágenes satelitales para identificar objetos de interés como son plumas de sedimentos en cuerpos de agua. El segundo nivel se relaciona con la obtención de datos de cobertura vegetal, rasgos geológicos, o geomorfológicos a través de interpretación y clasificación de datos de percepción remota. El tercer nivel involucra el uso de datos digitales para estimar parámetros hidrológicos directamente. Este último

se logra a través de la correlación de datos de PR con datos hidrológicos conocidos en campo. El grado de error de las estimaciones depende de la densidad, calidad y escala de los datos disponibles. Todos los niveles han sido exitosamente utilizados, particularmente cuando el segundo nivel delimita datos apropiados para la ejecución de modelos hidrológicos (Kite y Prietoniro, 1996).

Entre las principales ventajas del uso de la PR se encuentra la habilidad de proporcionar datos espacialmente distribuidos en lugar de datos puntuales; tiene, además, el potencial para proporcionar estimaciones de variables hidrológicas no medidas a través de técnicas tradicionales tales como HS; y tiene la habilidad de proporcionar datos de largo plazo en regiones generalmente inaccesibles (Engman, 1996). La precipitación es la principal variable de entrada del MH. La estimación correcta de la distribución espacial de la precipitación, es la base para el cálculo del BH. Desde la década de 1970 se han desarrollado varios métodos para el cálculo de la P, los cuales consideran las características físicas de las nubes en una imagen satelital.

Tabla 3. Modelamiento hidrológico espacial en zonas templadas y (semi)áridas

Parámetro estimado	Sensor	Localización geográfica	Fuente
Precipitación	Meteosat	África	Pietroniro *et al.*, 1989 D'Souza, 1990.
	GOES		Scofield y Oliver, 1977. Scofield, 1983.
	AVHRR	Los Ángeles, EUA	Dousset, 1989
Radiación neta	AVHRR	Nebraska, EUA	Goodin, 1995.
Temperatura superficial	AVHRR	Sahel, África Sur de África India Escocia Europa Sahel, África	Caselles *et al.*,1997. Coll *et al.*, 1994. Ottlé y Vidal-Madjar, 1992. Seguín, 1996. Richard y Poccard, 1998. Gupta *et al.*, 1997. Collier *et al.*, 1989. Roy, 1997. Andersen, 1997.
	Landsat TM	Kansas, EUA Norte centro Tailandia	Hope y Mcdowell, 1992. Zuviría, M. de, 1992.
Vegetación-cobertura/uso	AVHRR	China Argentina	Hasegawa *et al.*, 1998. Di Bella *et al.*, 2000.
	Landsat MSS	Japón	Hashiba *et al.*, 2000.
	Landsat TM	Norte centro Tailandia México Japón	Zuviría, M. de, 1992. Palacio *et al.*, 2001. Hashiba *et al.*, 2000.
	SPOT	México	Bocco, 1991.
Evapotranspiración	AVHRR	Sur de Australia Turquía	Prata, 1990; Bastiaanssen, 1998 y 2000b.
	AVHRR	La Mancha, España	Caselles *et al.*, 1992.
	Landsat TM	Oeste de EUA	Laymon *el al.*, 1998.
Humedad del suelo	AVHRR	Oeste India	Narasimha *et al.*, 1993.

Las técnicas digitales se basan en el análisis del espectro electromagnético, especialmente en las regiones de Mo, Vis y en la región del infrarrojo térmico (Ter). Sin embargo, ninguna de estas técnicas proporciona una medición directa de la cantidad de precipitación, pero pueden proporcionar indicaciones de la precipitación probable en condiciones particulares (Bonifácio, 1991; Petty y Krajewski, 1996; Kite y Prietoniro, 1996). Dos de la técnicas se conocen como: *a)* Técnica Manual de Monitoreo de Lluvia por Satélite o Método Bristol (Barret, 1970; Barret *et al.*, 1990) y *b)* BIAS (Bristol/NOAA *InterActive Scheme*).

Petty (1995), y Petty y Krajewski (1996) analizan a profundidad las técnicas actuales de estimación de la precipitación basadas en datos satelitales; mientras que Foufoula-Georgio y Krajewski (1995) revisan los avances en el modelamiento de la precipitación. Ellos se enfocan en aquellos algoritmos y productos relevantes para la hidrología superficial. Concluyen que las estimaciones de precipitación basadas en Vis/In, en general, sobreestiman la precipitación real por área y son útiles a escalas regionales, donde se calculan promedios semanales y mensuales de precipitación (de tipo convectivo).

Los algoritmos utilizados en la estimación de la temperatura han sido elaborados a partir de la aparición de sensores remotos de muy baja resolución (*National Oceanic Atmospheric Administration*, NOAA y *Aeronautic and Space Administration,* NASA) (Czajkowski *et al.*, 1998). La estimación precisa de la temperatura superficial es un requisito importante del monitoreo global o regional del BH, de energía y de radiación. La estimación de la temperatura superficial involucra la corrección de los efectos atmosféricos y de emisividad superficial (Andersen, 1997 y Pozo-Vázquez *et al.*, 1997); además de considerar las discrepancias en las estimaciones realizadas en zonas con escasa cobertura vegetal (Chehbouni, 1997).

Por otro lado, existe la necesidad de determinar la incertidumbre ocasionada por la agregación de variables, producto de la PR [temperatura superficial (Ts) y reflactancia (ρ)] y flujos de energía superficial [flujos de calor sensible (H) y latente (λE)] sobre grandes áreas. Esta incertidumbre está directamente relacionada con dos factores: *a)* la no linearidad de la relación entre la señal del sensor y Ts, ρ, H o λE, y *b)* la heterogeneidad del sitio. Los resultados enfatizan la necesidad de ser cuidadosos en la agregación de los componentes del balance de energía en paisajes heterogéneos, con presencia de vegetación escasa o mixta (Moran *et al.*, 1997).

La estimación de la temperatura superficial, en general, se lleva a cabo a través del análisis digital de las bandas térmicas de imágenes AVHRR o Landsat. Aunque las imágenes AVHRR tienen ventajas en el modelamiento ambiental (Belward, 1992), especialmente a niveles regionales, su principal limitación está en la resolución espacial. La limitación de las imágenes Landsat se encuentra en su resolución temporal (16 días; Cuadro 2).

Se han desarrollado otros algoritmos con intención de estimar la temperatura superficial, por ejemplo a partir de la transformación de los valores del Índice del Vegetación Normalizado (NDVI; Kerr *et al.*, 1992; Hope y Mcdowell, 1992). El NDVI tiene la ventaja de poder ser calculado en imágenes de baja resolución (NOAA-AVHRR) y mediana resolución (Landsat TM y SPOT). Las imágenes SPOT y Landsat sirven para realizar estimaciones locales de temperatura superficial. Su principal desventaja está en la resolución temporal. Otra ventaja del método radica en la sustitución de la emisividad, la cual debe ser estimada a partir de datos de terreno con radiosondas o radiómetros, por un índice basado en el NDVI (Pozo *et al.*, 1997).

Richard y Poccard (1998) encontraron índi-

ces de correlación superiores a 0.80 entre la temperatura superficial y el NDVI derivado de imágenes AVHRR del sur de África. La distribución espacial del NDVI medio mensual concuerda con la distribución de la precipitación media mensual sobre la mayor parte del área; excepto para las áreas desérticas y semidesérticas con precipitaciones menores a 300 mm al año. Este enfoque puede tener la desventaja de que los resultados obtenidos en zonas con coberturas severamente perturbadas pueden ser poco confiables. El NDVI está en función de la turgencia de la vegetación, en caso de encontrarse vegetación perturbada por cambio de cobertura (por ejemplo, bosque por matorral), los valores de NVDI reflejarán las características de la cobertura, pero su transformación a temperaturas superficiales, puede ser incorrecta.

Pozo *et al.* (1997) reconocen que la topografía perturba prácticamente cada uno de los procesos y las variables en las interacciones tierra-atmósfera, incluyendo radiación, temperatura del aire, déficit de saturación, viento, turbulencia, nubosidad, precipitación, propiedades del suelo y de la vegetación. En consecuencia, los valores de NDVI deben ser corregidos por efectos topográficos para utilizarse en la estimación de parámetros superficiales. Sin embargo, en topografías ligeramente suaves, el balance regional de energía superficial (promedios espaciales sobre varias colinas) es insensible a la presencia de la topografía (Raupach y Finnigan, 1997). Por otro lado, Burgess *et al.* (1995) señalan que los errores topográficos son mayores a un 13 % cuando la resolución es más alta (20 m^2), mientras que se reduce a aproximadamente 10% cuando se trabaja con imágenes de baja resolución (1 km^2).

Para comprender las interacciones atmósfera-superficie en una variedad de escalas espaciales, es necesario estimar la radiación neta a partir de datos espaciales (Goodin, 1995). En este sentido, se han desarrollado algoritmos, los cuales preferentemente se utilizan en imágenes Landsat TM, aunque pueden ser modificados para utilizarse con NOAA-AVHRR.

A partir de la PR la evaporación en cuerpos de agua también puede ser estimada. En primera instancia debe medirse el área del cuerpo de agua. La estimación se basa en que la radiación en 0.85 μm es más fuertemente atenuada en el agua que en 0.68 μm. Contrariamente sobre la tierra, la absorción debida a la vegetación conduce a mayor absorción en 0.68 μm que en 0.85 μm. Este procedimiento ha sido ampliamente utilizado para delimitar cuerpos de agua con datos de AVHRR (Schneider *et al.*, 1985). Posteriormente se estima la temperatura superficial y con apoyo de la batimetría existente o estimada por técnicas de PR puede conocerse la evaporación del cuerpo de agua.

El monitoreo de la evapotranspiración tiene importantes implicaciones en el modelamiento regional y global del clima, del ciclo hidrológico, así como la evaluación del estrés de los ecosistemas naturales y agrícolas (Kustas y Norman, 1995). En consecuencia, la evapotranspiración es un parámetro muy importante en los modelos de producción agrícola, determinación de la humedad del suelo y detección del estrés en cultivos (Caselles *et al.*, 1992; Seguin *et al.*, 1989). La evapotranspiración puede ser estimada a partir de las bandas térmicas tanto de NOAA-AVHRR, como de Landsat TM. La ejecución de los algoritmos implica la obtención de datos de radiación en campo.

Los métodos utilizados en la estimación de la evapotranspiración varían desde acercamientos estadísticos/semi-empíricos, aproximaciones basadas en análisis de procesos físicos y, recientemente, se incluye el modelamiento numérico para simular el flujo de calor y agua a través del suelo, vegetación y atmósfera (Kustas y Norman, 1995;

Bastiaanssen *et al.*, 1998; Bastiaanssen, 2000b).

Entre los acercamientos estadísticos para estimar la evapotranspiración y realizar su monitoreo puede aplicarse uno que implique un análisis de regresión entre la evapotranspiración calculada para las estaciones meteorológicas y la distribución espacial del NDVI obtenido a partir de imágenes satelitales (por ejemplo, NOAA-AVHRR). Esta aproximación ha sido utilizada con éxito para estimar la evapotranspiración en la región de la pampa de Argentina (Di Bella *et al.*, 2000).

La HS, altamente variable en espacio y tiempo; puede ser estimada a partir de PR; sin embargo, es más difícil de estimar con datos provenientes de satélites meteorológicos (GOES, NOAA-AVHRR) o temáticos (Landsat MSS o TM y SPOT). Las mejores estimaciones se realizan con datos provenientes de la sección del espectro que corresponde a las Mo (Houser *et al.*, 1998; Jackson *et al.*, 1996). Se asume que muchos procesos hidrológicos despliegan una firma única que es detectable con sensores remotos de microondas. Estas firmas están en forma de distribuciones espaciales y temporales de la HS superficial (Engman, 1997). Sin embargo, se han elaborado experimentos en pequeñas cuencas, que condujeron a estimaciones satisfactorias de la HS en India, con datos de AVHRR (Narasimha *et al.*, 1993) en sus bandas Ter e In (Capehart y Carlson, 1997).

La recarga del agua subterránea es esencialmente un fenómeno que se presenta por debajo de la superficie terrestre; mientras que los sensores remotos actuales comúnmente registran rasgos de la superficie, razón por la cual la mayor parte de la información requerida para aguas subterráneas, hasta ahora, tiene que ser obtenida por razonamientos cualitativos y enfoques semicuantitativos que incorporan datos de relieve, suelos y cobertura vegetal. La información generada por percepción remota frecuentemente suple datos, pero tiene que ser ligada con datos geohidrológicos para convertirse en significativa (Engman y Gurner, 1991; Meijerink, 2000).

Actualmente, la aplicación práctica de la PR en estudios de aguas subterráneas confía en los enfoques cualitativos, por lo cual la experiencia hidrogeológica es requerida. La interpretación de imágenes en fotografías aéreas estereoscópicas, imágenes multiespectrales e imágenes de Mo activa han probado su mérito para la compilación y actualización de mapas hidrogeológicos y mapeo de la recarga relativa. Con el progreso de la computación ligada a datos geofísicos de terreno y aeroespaciales, para tener información subterránea, el modelamiento hidrogeológico ha podido realizarse eficazmente (Vekerdy, 1996; Meijerink *et al.*, 1994; Meijerink, 2000; Meijerink y Mannaerts, 2000).

Aportes de la Geomorfología a la hidrología

La clasificación del terreno permite caracterizar las condiciones hidrológicas de una región dada (Schaumm, 1964; Verstappen, 1983; Schumann *et al.*, 2000). El propósito de hacer mapas de tipo geomorfológico, edafológico y de cobertura vegetal consiste en generar información concisa y sistemática sobre las formas del terreno, los procesos geomorfológicos, la estructura, composición, dinámica de los suelos y de la vegetación, así como de los fenómenos naturales relacionados (Zonneveld, 1979; Meijerink, 1988; Zinck, 1988). De esta manera, los mapas elaborados no son únicamente documentos científicos en sí mismos, sino también herramientas valiosas en la evaluación y manejo de recursos naturales (Bocco *et al.*, 2001). El método reconoce una concepción sistémica de las unidades de relieve; por lo tanto, cada unidad tiene una función ecológica distribuida en el espacio.

El MHED puede enriquecerse con el apoyo de la información geomorfológica, al incorporar un modelo espacial que permite diferenciar al territorio en unidades relativamente homogéneas. Las unidades tienen potencialmente respuestas hidrológicas similares, consecuentemente puede construirse un modelo robusto de la distribución de los parámetros hidrológicos, basado tanto en un número limitado de mediciones, y de un número limitado de estaciones hidrometeorológicas. La integración de la delimitación de unidades relativamente homogéneas y el MH constituyen un enfoque frecuentemente utilizado en países subdesarrollados, con objeto de estimar el BH. La estimación del BH o de alguno de sus componentes varía en función de la existencia de datos puntuales (P, T, Q, HS, etc.). Entre las estimaciones de carácter cualitativo a semi-cualitativo se encuentran las realizadas en Kenia (Bocco *et al.*, 1991); en Sudán (Osman, 1996); en Tailandia (Zuviría, 1992); en Indonesia (Meijerink *et al.*, 1994); en Bolivia (Beek, 1996) y en Puerto Rico (Cruise y Miller, 1994), entre otros.

La integración de técnicas en investigación en cuencas no instrumentadas

La relevancia de la integración de los SIG y la PR ha sido analizada como herramientas de captura y modelamiento espacial de datos geográficos y de atributos en países subdesarrollados (Perera y Tateishi, 1995). La integración de estas herramientas auxilia en la planeación a nivel regional. El análisis digital y los procedimientos dentro del SIG facilitaron la integración de datos y la producción de mapas para la evaluación del recurso hídrico superficial y subterráneo (Sharma y Anjaneyulu, 1993; Thunnissen *et al.*, 1992; Allewijn, 1988). También ha sido utilizado en la predicción de la erosión y pérdida de suelos en cuencas agrícolas de una zona árida en India (Sharma y Singh, 1995). Es decir, la PR, efectivamente integrada dentro de un SIG, puede ser utilizada para facilitar las actividades de medición, cartografía, monitoreo y MHED, especialmente en grandes regiones (Baumgartner y Apfl, 1996).

La integración de bases de datos espaciales, junto con el modelamiento espacial y el análisis estadístico, ha probado su eficiencia en la construcción de modelos descriptivos y explicativos del desarrollo de cárcavas, (Bocco, 1990; Palacio, 1989; Vázquez, 1992), del crecimiento urbano (López *et al.*, 2001), de la recarga de aguas subterráneas (Meijerink, 1996; Narayana *et al.*, 1996; Vekerdy, 1996), contaminación por fuentes no puntuales (Olivera, 1996; Lobo, 1996), de la distribución espacial del BH (Bocco *et al.*, 1991; Meijerink, 1974; Osman, 1996; entre otros) y mejoramiento de técnicas de evaluación de tierras con fines agrícolas (Zuviría, 1992). Este enfoque, además, permite evaluar en forma rápida implicaciones espaciales del CCVUS en el modelamiento de la escorrentía (Bhaduri *et al.*, 1997; Grove y Harbor, 1997; Sado e Islam, 1996; Mendoza y Bocco, 2001).

La revisión y discusión efectuada permitió reconocer cuatro grupos en los que se utiliza la integración de modelos y herramientas en estudios hidrológicos espacialmente distribuidos: *a)* los que integran el modelamiento hidrológico y los sistemas de información geográfica (SIG); *b)* los que integran el modelamiento hidrológico y percepción remota; *c)* los que integran el modelamiento hidrológico, la PR y los SIG, y *d)* los que integran el conocimiento geomorfológico, la PR, los SIG´s al modelamiento hidrológico.

El primero de ellos se limita a espacializar e integrar datos meteorológicos de baja resolución a modelos hidrológicos en un ambiente de SIG. El segundo incluye trabajos en los cuales se estiman parámetros básicos de entrada de datos para el cálculo de precipitación, evapotranspiración, radiación, etc., a partir del análisis digital de datos de percepción remota, con los cuales se

alimentan los modelos hidrológicos, ya sean agregados o espacialmente distribuidos. El tercero liga las herramientas de SIG y PR con el MH; en general, hace un uso intensivo de las herramientas de SIG para el modelamiento espacial a varias escalas. El último grupo incluye la integración de SIG, PR y MH apoyado en gran medida por la delimitación de unidades ambientales y la caracterización de las mismas, generalmente a escalas detalladas y semidetalladas.

LIMITACIONES EN LA ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO

Shade (1996), señala que la estimación de los componentes del BH a partir de información hidrometeorológica, del conocimiento de relaciones geomorfológicas y con el apoyo de datos productos de PR presenta limitaciones. Las limitaciones tienen relación con la naturaleza empírica del modelo, el uso de valores promedio tanto de las características de la cuenca, como debido a la resolución mensual de los datos meterológicos. Al utilizar promedios de los atributos físicos de la cuenca, así como de los datos de clima, se elimina a los valores extremos que ocurren en la naturaleza. Además, los valores promedio eliminan la oportunidad de simular el drenaje en suelos no saturados, también las pérdidas por evapotransporacion a través del ascenso capilar en la interfase raíz-matriz del suelo. Por lo tanto, al usar datos mensuales de la recarga del agua subterránea, probablemente se subestimen especialmente al comparar estos resultados con aquellos modelados a partir de datos diarios o, más aún, datos horarios. Desafortunadamente, los registros meteorológicos existentes en países subdesarrollados sólo permiten el cálculo mensual.

Con relación al error debido a la variabilidad espacial, algunos estudios indican que, para reducir el error en la estimación de Q, y por diferencia en ET, es vital mejorar el conocimiento de la variabilidad espacial de la lluvia. Lopes (1996) examinó el efecto, medido en términos del error relativo, sobre la predicción del escurrimiento a partir de la estimación especial o regional de la precipitación en una cuenca de 6.7 km^2 dominada por eventos de tipo convectivo y escurrimiento hortoniano. En su estudio concluyó que la densidad de pluviógrafos tuvo un efecto significativo sobre la predicción del escurrimiento; cuando se redujo de diez a seis pluviógrafos el error en la predicción fue de un 30%, sin embargo, cuando se redujo de diez a uno, el error se incrementó en un 130%.

En estudios realizados en cuencas forestales pequeñas se ha determinado que la ET puede ser estimada con ±15 % de incertidumbre, aun cuando los componentes P y Q sean estimados con gran precisión. Las discrepancias se han atribuido a cambios en el contenido de humedad y al movimiento de agua en la matriz del suelo (precolación). En el enfoque del BH la incertidumbre o error de estimación asociado a los términos conocidos se esconde en los componentes del balance determinados por sustracción.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A pesar de las limitaciones mencionadas, el modelamiento integral representa una opción viable, que permite entender el comportamiento hidrológico y realizar su modelamiento espacio-temporal. Los modelos de investigación deben tener la capacidad de funcionar razonablemente bien en distintas regiones y con diferentes características hidrológicas y ambientales (Venneker y Schellekens, 1997). El estudio integrado de cuencas enfocado a la planeación, ingeniería, manejo ambiental y de recursos hídricos tiene su base en el entendimiento de los procesos hidrológicos y sus interacciones. Estos procesos generalmente exhiben variabilidad temporal y espacial (Venneker y Bruijinzeel, 1997).

La naturaleza distribuida de un sistema de modelamiento permite reconocer la variación espacial, las características y los cambios dentro de una cuenca; además, éstos pueden utilizarse para crear nuevos escenarios. Los MHED tienen ventajas particulares en estudios sobre los efectos del CCVUS. El modelo no únicamente proporciona una descarga de salida, sino salidas múltiples sobre una base temporal y espacialmente distribuida. Las desventajas con estas formas de modelamiento son la gran cantidad de datos de alta resolución y los elevados requerimientos computacionales (Olsson y Pilesjo, 1999).

El MHED es resultado de la integración de modelos hidrológicos convencionales, el análisis de documentos aeroespaciales y de tecnologías de PR y SIG. Los MHED permiten el modelamiento de los datos bajo un marco espacial que facilita el entendimiento de las condiciones hidrológicas de las cuencas en estudio. Sin embargo, esta línea de investigación se encuentra poco desarrollada en la bibliografía, la cual es abundante en la aplicación de modelos en cuencas aforadas.

Este enfoque representa una alternativa para entender el comportamiento hidrológico a escala regional en cuencas poco aforadas y con necesidad de evaluar la disponibilidad y distribución del agua. Estos requerimientos de información son comunes en los países subdesarrollados. Además, este enfoque facilita el entendimiento de los efectos del deterioro y CCVUS sobre los componentes del BH en cuencas no experimentales. Este tipo de conocimiento que es la base para la formación de planes de manejo y conservación de cuencas, así como para la identificación de áreas prioritarias que requieren rehabilitación.

AGRADECIMIENTOS

La investigación de la cual se desprende este trabajo, fue financiada por las becas de posgrado del CONACyT y DGEP-UNAM, recibidas durante el Doctorado realizado por el primer autor en la UNAM. Se agradece la cuidadosa revisión del primer manuscrito realizada por Erna López y los valiosos comentarios de dos árbitros anónimos.

REFERENCIAS

Allewijn, R. (1988), "Regional hydrological system analysis using remote sensing data and geographical information system. Application to groundwater modelling of the Roermod area, The Netherlands", *International Journal of Remote Sensing,* 9 (10), pp. 1775-1785.

Andersen, H. S. (1997), "Land surface temperature estimation based on NOAA-AVHRR data during the HAPEX-Sahel experiment", *Journal of Hydrology,* 188-189 (1-4), pp. 788-814.

Arnell, N.W. (1999), "A simple water balance model for the simulation of streamflow over a large geographic domain", *Journal of Hydrology*, 217, pp. 314-335.

Barret, E. C. (1970), "The estimation of monthly rainfall from satellite data", *Monograph of Weatehring Review, 98*, pp. 322-327.

Barret, E. C. y L. F Curtis (1999), *Introduction to environmental remote sensing*, Stanley Thornes, Cheltenham.

Barret, E. C., C. H. Power y A. Micallef (eds.; 1990), *Satellite remote sensing for hydrology and water management. The Mediterranean coast and islands*, Gordon and Breach Science Publisher, Switzerland.

Bastiaanssen W., G.M. (2000a), *Shared water resources information from space. New management opportunities or unwanted interference?*, Department of Water Resources and Environmental Studies, ITC. http://www.itc.nl/wres/basti_text.html.

Bastiaanssen W., G. M. (2000b), "SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey", *Journal of Hydrology,* 229, pp. 87-100.

🕮 Bastiaanssen W., G. M., H. Pelgrum, J. Wang, Y. Ma, J. F. Moreno, G. J. Roerink y T. van der Wal (1998), "A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL); part 2, validation", *Journal of Hydrology*, 212-213 (1-4), pp. 213-229.

🕮 Baumgartner, M. F. y G. M. Apfl (1996), "Remote sensing and geographic information systems", *International Journal of Remote Sensing*, 41 (4), pp. 593-607.

🕮 Beek, M.A. (1996), *Drainage pattern analysis and extraction of hydrologic properties from digital elevation model*, M.Sc. Thesis, Silsoe College, Cranfield University, U.K.

🕮 Belward, A.S. (1992) "Spatial attributes of AVHRR imagery for environmental monitoring", *Hydrological Sciences,* 13 (2), pp. 193-209.

🕮 Bergström, S. (1991), "Principles and confidence in hydrological modeling", *Nordic Hydrology,* 22, pp. 123-136.

🕮 Bergström, S. y L.P. Graham (1998), "On the scale problem in hydrological modeling", *Journal of Hydrology*, 211, pp. 235-265.

🕮 Beven, K. J. (1996), "A discussion of distributed modelling", en Refsgaard, J. C. y M B Abbott (eds.), *Distributed Hydrological Modelling*, Dordrecht: Kluwer Academic.

🕮 Bhaduri B., M. Grove, C. Lowry y J. Harbor (1997), "Assessment of long-term, hydrologic effects of land use change. The curve number technique for calculating runoff is modified to estimate lost groundwater recharge", *Journal of American Water Works Association*, 89 (11), pp. 94-106.

🕮 Bocco, G. (1990), *Gully erosion analysis using remote sensing and geographic information systems. A case of study in Central Mexico*, Ph.D. Thesis University of Amsterdam-ITC. Netherlands.

🕮 Bocco, G., H. A. M. de Brouwer y F. Karanga (1991), *Modelling water resources and water demand in semi-arid areas: data integration and anallysis using a Geographic Information System. Samburu District, north-western Kenya*, ITC-UNESCO internal Report prepared for the UNESCO-ITC Programme, Enschede, The Netherlands.

🕮 Bocco, G., M. Mendoza y A. Velázquez (2001), "Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping-a tool for land use planning in developing countries", *Geomorpholog*, 39 (3.4), pp. 211-219.

🕮 Bonifácio, R. (1991), "Rainfall estimation in Africa using remote sensing techniques". en Belward, A. S. y C.R. Valenzuela (eds.), *Remote Sensing and Geographic Information Systems for resource management in developing countries*, Kluwer Academic Publishers. Netherlands, pp. 215-234.

🕮 Brooks, K., P. F. Ffolliott, H. M. Gregersen y J. L. Thamnes (1992), *Hydrology and the management of watersheds*, Iowa University Press/AMES, Iowa.

🕮 Burgess, D. W., P. Lewis y J. P.A. L. Muller (1995), "Topographic effects in AVHRR NDVI data", *Remote Sensing of Environment*, 54, pp. 223-232.

🕮 Burrough, P. A. (1986), *Principles of geographical information systems for land resources assessment*, Clarendon Press, Oxford U.K.

🕮 Capehart, W. J. y T. N. Carlson (1997), "Decoupling of surface and near-surface soil water content: a remote sensing perspective", *Water Resources Research*, 33 (6), pp. 1383-1395.

🕮 Caselles, V., C. Coll, y E. Valor (1997), "Land surface emmisivity and temperature determination in the whole HAPES-Sahel are from AVHRR data", *International Journal of Remote Sensing*, 18, pp. 1009--1027.

🕮 Caselles, V., J. Delguido, J.A. Sobrino y E. Hurtado (1992), "Evaluation of maximun evapotranspiration over the La Mancha region, Spain, using NOAA-AVHRR data", *International Journal of Remote Sensing*, 13 (5), pp. .939–946.

🕮 Chehbouni A. G., D. Lo-Seen, E. G. Njoku, J. P. Lhomme, B. A. Monteny, e Y. H. Kerr (1977), "Estimation of sensible heat flux over sparsely vegetated surfaces", *Journal of Hydrology*, 188-189 (1-4), pp. 855-868.

Coll, C. V. Caselles, A. Sobrino y E. Valor (1994), "On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature", *International Journal of Remote Sensing,* 15, pp. 105–122.

Collier, P., A. M. E. Runacres y J. McClatchey (1989), "Mapping very low surface temperatures in the Scottish Highlands using NOA-AVHRR data", *International Journal of Remote Sensing*, 10 (9), pp. 1519-1529.

Committee on Opportunities in the Hydrologic Sciences (1991), *Opportunities in the hydrologic sciences*, National Academy Press, New York.

Cruise, J. F. y R. L. Miller (1994), "Hydrologic modeling of land processes in Puerto Rico using remotely sensed data", *Water Resources Bulletin*, 30, (3), pp. 419-428.

Czajkowski, K. P, S.N. Goward y H. Ouadrari (1998), "Impact of AVHRR filter on surface temperature estimation from split window approach", *International Journal of Remote Sensing* 10, (10), pp. 2007-2012.

D'Souza, G. (1990), "Mid-to long-term objective rainfall estimation techniques", en Barret, E. C., C. H. Power y A. Micallef (eds.), *Satellite remote sensing for hydrology and water management. The Mediterranean coast and islands*, Gordon and Breach Science Publisher. Switzerland.

Di Bella, C. M., C.M. Rebella y J. M. Paruelo (2000), "Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina", *International Journal of Remote Sensing* 21, (4), pp. 791-797.

Dingman, S. L. (1994), *Physical hydrology*, Macmillan, New York.

Dousset, B. (1989), "AVHRR-derived cloudiness and surface temperature patterns over the Los Angeles area and their relationships to land use", en *Quantitative remote sensing: an economic tool for the nineties*, Proccedings IGARSS´89, IEEE, pp. 2132-2137.

Dunne, T. y L. B. Leopold (1978), *Water in environmental planning*, W. H. Freeman and Company, San Francisco.

Elkaduwa W., K. B. y R. Sakthivadivel (1998), *Use of historical data as a decision support tool in watershed management: a case study of the Upper Nilwala basin in Sri Lanka*, Report 26, Colombo, Sri Lanka, International Water Management Institute.

Engman, E. T. (1996), "Remote sensing applications to hydrology: future impact", *Hydrological Science Journal,* 41 (4), pp. 637-647.

Engman, E.T. (1997), "Soil moisture, the hydrologic interface between surface and ground waters", *Proceedings International symposium of fifth scientific assembly of the International Association of Hydrological Sciences*, IAH Publication, Rabat, Morocco, April 23-May 3, 242, pp. 129-140.

Engman, E. T. y R. J Gurney (1991), "Groundwater", en *Remote Sensing in Hydrology,* Londres, Chapman and Hall, pp. 155-174.

Ersten, A.C.D. (1999), "Ecohydrological impact-assessment modelling: an example for terrestrial ecosystems in Nord-Holland, The Netherlands", *Environmental Modelling and Assessment*, 4, pp. 13-22.

Foufoula-Georgio E. y W.F. Krajewski (1995), "Recent advances in rainfall modelling, estimation and forecasting", en *Reviews of Geophysics, Supplement*, U.S., National Report to the International Union of Geodesy and Geophysics 1991-1994, pp. 195-209.

Freeze, R. A. y J. A. Cherry (1979), *Groundwater,* Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, Inc.

Gleick, P. H. (1986), "Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes", *Journal of Hydrology, 88*, pp. 97–116.

Gleick P. H. (1987), "The development and testing of a water balance model for climate impact assessment: modeling the Sacramento basin", *Water Resources Research*, 23 (6), pp. 1049-1061.

Goodin, D. G. (1995), "Evaluation of a combined modelling-remote sensing method for estimating net radiation in a wetland: a case in study in the Nebraska Sand Hills, U.S.A",

International Journal of Remote Sensing, 16 (8), pp. 1481-1494.

Grove, M. y J. Harbor (1997), "Development and application of a GIS-based model for assessing the long-term hydrologic impacts of land-use change", *Annual meeting. Abstracts with Programs - Geological Society GSA*, Boulder, CO, United States of America. (29) 6

Gupta, R. K., S. Prasad, M. V. R. Sesha Sai y T.S. Viswanadham (1997), "The estimation of surface temperature over an agricultural area in the state of Haryana and Panjad, India. And its relationship with the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), using NOAA-AVHRR data", *International Journal of Remote Sensing, 18 (18)*, pp. 3729 – 3741.

Harbor, J. (1994), "A practical method for estimating the of land-use change on surface runoff, groundwater recharge and wetland hydrology", *Journal of the American Planning Association*, 60 (1), pp. 95-108.

Hasegawa, I., M. Yasushi, N. Yasunori y T. Shoji (1998), "Land cover analysis using multi seasonal NOAA AVHRR mosaicked images for hydrological applications", *Advances in Space Research*, 22 (5), pp. 677-680.

Hashiba, H., K. Kameda, S. Uesugi, y S. Tanaka (2000), "Landuse change analysis of Tama River basin with different spatial resolution sensor data by Landsat/MSS and TM", *Advances in Space Research*, 26 (7), pp. 1069-1073.

Hope, A. S. y T. P. Mcdowell (1992), "The relationship between surface temperature and spectral vegetation index of tallgrass prairie: effect of burning and other landscape controls", *International Journal of Remote Sensing*, 13 (15), pp. 2849-2863.

Houser, P. R., W. J. Shuttleworth, J. S. Flamiglietti, H. V. Gupta, K. H. Syed y D. C. Goodrich (1998), "Integration soil moisture remote sensing and hydrologic modeling using data assimilation", *Water Resources Research*, 34 **(12)**, pp. 3405-3420.

Jackson, T. J., J. Schmugge y E.T. Engman (1996), "Remote sensing applications to hydrology: soil moisture", *International Journal of Remote Sensing*, 41 (4), pp. 495-515.

Jain, A., S. C. Rai y E. Sharma (2000), "Hydro-ecological analysis of a sacred lake watershed system in relation to land-use cover change from Sikkim Himalaya", *Catena*, núm. 4, pp. 263-278.

Jensen, J. R. (1986), *Introductory Digital Image Processing. A remote sensing perspective*, Prentice Hall, New Jersey.

Kerr, Y. H., J. P. Lagouarde y J. Imbernon (1992), "Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window", *Remote Sensing of Environment*, 41, pp. 197-209.

Kite, G. W. (1993), "Application of land class hydrological model to climatic change", *Water Resources Research*, 29 (7), pp. 2377-2384.

Kite, G. W. y A. Prietoniro (1996), "Remote sensing applications in hydrological modeling", *Hydrological Science*, 41 (4), pp. 563-591.

Kite, G.W. y N. Kouwen (1992), "Watershed modeling using land classification", *Water Resources Research*, 28 (12), pp. 3193-3200.

Kopp, S. M. (1996), "Linking GIS and hydrological models: where we have been, where we are going?", en Kovar, K. y H.P. Narchtnebel (eds.), *Application of Geographic Information Systems in hydrology and water resources management*, IAHS Publ. no. 235, pp. 133-140.

Kustas, W. P. y J. M. Norman (1995), "Use remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surface", *International Journal of Remote Sensing*, 41 (4), pp. 517-530.

Laymon, C., D. Quatrrochi, E. Malek, L. Hipps, J. Boettinger y G. McCurdy (1998), "Remotely-sensed regional-scale evapotranspiration of a semi-arid Great Basin desert and its relationship to geomorphology, soils, and vegetation", *Geomorphology*, 21, pp. 329-349.

Lillesand, T. M. y R. W Kiefer (1987), *Remote sensing and image interpretation*, John Wiley and Son. New York.

Lobo, M. A. (1996), *Integration of remote sensing data and geographic information systems*

to implement the agricultural nonpoint source pollution (AGNPS) model, M.Sc. Thesis, Murray State University, Murray, K.Y., United States.

Lopes, V. L. (1996), "On the effect of uncertainty in spatial distribution of rainfall on catchment modeling", *Catena*, núm. 28, pp. 107-119.

López, E., G. Bocco y M. E. Mendoza (2001), "Predicción del cambio del cambio de uso del suelo. El caso de Morelia", *Investigaciones Geográficas*, núm. 45, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 56-76.

Maidment, D.R. (ed.; 1993a), *Handbook of hydrology,* Mc Graw Hill, New York.

Maidment, D.R. (1993b), "GIS and hydrologic modeling", en Goodchild, M. F., B. O. Parks, and L.T. Steyaert (eds), *Environmental modeling with GIS*, Oxford University Press, New York, pp. 147-167.

Maidment, D. R. (1996), "GIS and Hydrologic Modeling - an Assessment of Progress", *Proceedings Third International Conference/ Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*, Santa Fe, NM, Santa Barbara, CA: NCGIA. http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/main.html.

Maidment, D.R. y S. Reed (1997), *Soil water balance in Morocco*, CRWR, University of Texas, http://www.ce.utexas.edu.

Maidment, D.R., F. Olivera, S. Reed, Z. Ye, S. Akmansoy y D. C. McKinney (1995), *Water balance of the Niger River basin in West Africa*, CRWR, University of Texas at Austin, http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment.

Maidment, D.R., F. Olivera, Z. Ye, S. Reed y D. C. McKinney (1996), "Water balance of the Niger River", en *Proceedings, ASCE - North American Water and Environment Congress '96 NAWEC '96*, Anaheim, California: ASCE.

McDonell, R.A. (1996), "Including the spatial dimension: using the spatial information system in hydrology", *Progress in Physical Geography*, 20 (2), pp. 159-177.

McGuffie, K., A. Henderson-Sellers y H. Zhang (1998), "Modelling climate impacts of future rainforest destruction", en Malovey, B.K. (ed.), *Human activities and the tropical rainforest.* Netherlands, Kluwer Academic Publisher.

Meijerink A., M. J. (2000), "Groundwater", en Schultz, G and E. Engman (eds.), *Remote sensing in hydrology and water management*", Springer, Alemania.

Meijerink, A.M.J. y C.M.M. Mannaerts, (2000), "Introduction to general aspects of water management with the aid of remote sensing", en Schultz, G. and E. Engman (eds.), *Remote sensing in hydrology and water management*, Springer, Alemania.

Meijerink A., M. J. (1974), *Photohydrological reconnaissance surveys*, Ph. D. Thesis Free Reformed University Amsterdam.

Meijerink A., M. J. (1988), *Data acquisition and data capture through terrain mapping units*, ITC Publication No. 7, Enschede, The Netherlands, pp. 23-44.

Meijerink A., M. J. (1996), "Remote sensing applications to hydrology: groundwater", *Hydrological Science Journal*, 41 (4), pp. 549-561.

Meijerink A., M. J., H. A. M. de Brouwer, C. M. Mannaerts y C.R. Valenzuela (1994), *Introduction to the use of Geographical Information Systems for practical hydrology*, UNESCO, International Hydrology Programme and ITC publication No. 23, Enschede, The Netherlands.

Mendoza, M. E. y G. Bocco (2001), "Balance hídrico espacialmente distribuido", en Mendoza, M. E., E. M. López y G. Bocco (2001), *Regionalización ecológica, manejo de recursos y ordenamiento territorial de la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán*, Informe Técnico Final al SIMORELOS (CONACYT), DERN, IE-UNAM.

Mendoza, M. E., G. Bocco y M. Bravo (2002), "Spatial prediction in hydrology: status and implications in the estimation of hydrological processes for applied research", *Progress in Physical Geography*, 26 (2), pp. 271–290.

Miller, D. R. y J. G. Morrice (1996), "Assessing uncertainty in catchment boundary delimitation", *Proceedings Third International Conference/ Workshop on Integrating GIS and Environmental*

Modeling, Santa Fe, NM, Santa Barbara, CA: NCGIA. http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/main.html.

Moran, M. S., K. S. Humes, P. J. Pinter Jr. (1997), "The scaling characteristics of remotely-sensed variables for sparsely-vegetated heterogeneous landscapes", *Journal of Hydrology*, 190 (3-4), pp. 337-362.

Müller-Wohlfeil, D. I., W. Lahmer, V. Krysanova, A. Becker (1996), "Topography-based hydrological modelling in the Elbe drainage basin", *Proceedings Third International Conference/ Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*, Santa Fe, NM, Santa Barbara, CA: NCGIA. http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/main.html.

Najjar, R. G. (1999), "The water balance of the Susquehanna River Basin and its response to climate change", *Journal of Hydrology*, 219, pp. 7-19.

Narasimha, P. V., L. Venkataratman, P. V. Krisna-Rao, K. V. Ramana y M. N. Singaro (1993), "Relation between root soil moisture and normalized difference vegetation index of vegetated fields", *International Journal of Remote Sensing,* 14 (3), pp. 441-449.

Narayana, G. S., Nakshmaiah y P. V. P. Goud (1996), "Hydrogeomorphological studied based on remote sensing of Mulung Tuluk, Warangal District, Andra Pradesh, India", *Hydrological Science Journal*, 41 (2), pp. 137-151.

Neilson, R. P. (1995), "A model for predicting continental-scale vegetation distribution and water balance", *Ecological Application*, 5 (2), pp. 362-385.

Olivera, F. (1995), *Water Balance of the Souss basin, Morocco. Using Geographic Information Systems for water resources management*, CRWR and UNFAO, University of Texas at Austin. http://www.ce.utexas.edu/prof/olivera.

Olivera, F. (1996), *Spatial distributed modeling of storm runoff and non-point source pollution using geographic information systems*, Ph.D. Thesis University of Texas at Austin.

Olivera, F., D. C. McKinney, D. R. Maidment, Z. Ye y S. Reed (1995), *Mean-annual water balance of the Niger River, West Africa*, Predicting the Water Balance of Surface and Ground Water Resources Over Large Areas, UNESCO Symposium on Runoff Computations for Water Projects, St. Petersberg, Russia.

Olivera, F. y D.R. Maidment (1996), *Runoff computation using spatially distributed terrain Parameters*, Proceedings, ASCE-North American Water and Environment Congress '96 (NAWEC '96), Anaheim, California, June 22-28.

Olsson, L. y P. Pilesjo (1999), *Development and applications of spatially distributed hydrological models in a GIS environment*, ITC Short Course of Environmental Modelling. http://www.natgeo.lu.se/lennartweb.

Osman B., E. T. (1996), *GIS-Hydrological Modelling in Arid Lands. A geographical Synthesis of surface waters for the African Read Sea region in the Sudan*, Ph.D. Thesis, Lund University, Sweden.

Ottlé, C. y D. Vidal-Madjar (1992), "Estimation of land surface temperature with NOAA9 data", *Remote Sensing of Environment*, 40, pp. 27 – 41.

Palacio Prieto, J. L. (1989), *Evaluation gully erosion using ILWIS, an example of central Mexico*, ITC Internal Report. Enschede. The Netherlands.

Palacio Prieto, J. L., G. Bocco, A. Velázquez *et al.* (2000), "La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Nacional Forestal 2000", *Investigaciones Geográficas*, núm. 43, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 183-203.

Perera, L. K. y R. Tateishi (1995), "Do remote sensing and GIS have practical applicability in developing countries? (including some Sri Lanka experiences", *International Journal of Remote Sensing*, 16 (1), pp. 35-51.

Petty, G. W. (1995), "The status of satellite rainfall estimation over land", *Remote Sensing of Environment*, 51, pp. 79-100.

Petty, G. W. y W. F. Krajewski (1996), "Satellite estimation of precipitation over land",

Hydrological Sciences, 41 (4), pp. 433-451.

Pietroniro, A., W. Wishart y S. I. Solomion (1989), "Use of remote sensing data for investigating water resources in Africa", en *Quantitative remote sensing: an economic tool for the nineties*, Proceedings IGARSS´89, IEEE, pp. 2169-2172.

Pozo Vázquez, D., F. J. Olmo Reyes y L. Alados Arboledas (1997), "A comparative study of algorithms for estimating land surface temperature from AVHRR data", *Remote Sensing of Environment*, 62, pp. 215-222.

Prata A. J. (1990), "Satellite-derived evaporation from Lake Eyre, South Australia", *International Journal of Remote Sensing*, 11 (11), pp. 2051-2068.

Rango, A. (1985), "Assessment of remote sensing input to hydrologic models", *Water Resources Bulletin*, 21 (3), pp. 423-432.

Raupach, M. R. y J. J. Finnigan (1997), "The influence of topography on meteorological variables and surface--atmosphere interactions", *Journal of Hydrology*, 190 (3-4), pp. 182-213.

Reed, S. (1996), *Soil-water budget. Part I: Methodology and Results*, CRWR, University of Texas at Austin. http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/GISHydro/seann/explsoil/.

Reed, S., D. Maidment y J. Patoux (1997), *Spatial water balance of Texas*, CRWR. University of Texas. http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishyd97/library/wbtexas/.

Refsgaard, J. C. (1996), "Terminology, modeling protocol and classification of hydrological model codes", en Abbott, M. B., and J. C. Refsgaard (eds.). *Distributed hydrological Modeling*, Klumer Academic, pp. 17-39.

Refsgaard, J. C. (1997), "Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models", *Journal of Hydrology*, 198, pp. 69-97.

Refsgaard, J. C. y B. Storm (1996), "Construction, calibration and validation of hydrological models", en Abbott, M. B. y J. C. Refsgaard (eds.), *Distributed hydrological modeling*, Klumer Academic, pp. 41-54.

Richard, Y. e I. Poccard (1998), "A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa", *International Journal of Remote Sensing*, 19 (5), pp. 2907-2920.

Rosso, R. (1994), "An introduction to spatially distributed modelling of basin response", en Rosso, R., A. Peano, I. Becchi y G. A. Bemporad (eds.), *Advances in distributed hydrology*, Water Resources Publications, pp. 3-30.

Roy, D. P. (1997), "Investigation of the maximum Normalized vegetation Index (NDVI) and the maximum surface temperature (T_s) AVHRR compositing procedures for the extraction of NDVI and T_s over forest", *International Journal of Remote Sensing,* 18 (11), pp. 2383 -2401.

Sabins, F. F. (1997), *Remote sensing. principles and interpretation*, W. H. Freeman and Company. New York.

Sado, K. y M. Islam (1996), "Effect of land cover on areal evapotranspiration using Landsat TM data with meteorological and height data: the case of Kitami city, Japan", *Hydrological Science Journal*, 41 (2), pp. 202-217

Sahagian, D. (2000), "Global physical effects of anthropogenic hydrological alterations: sea level and water redistribution", *Global and planetary change*, 25, pp. 39-48.

Salomonson, V. V. (1983), "Water resources assessment", en Colwell, J. (ed.), *Manual of remote sensing*, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 1497-1570.

Schaumm, S. A. (1964), "Airphotos and water resources", *Trans. UNESCO Symposia Aerial Survey and integrated studies*, Tolouse. UNESCO, pp. 70-80.

Schneider, S. R., D. F. Mcginnis y G. Stephens (1985), "Monitoring Africa´s Lake Chad Basin with Landsat and NOAA satellite data", *International Journal of Remote Sensing*, 6, pp. 59-73.

Schumann, A. H., R. Funke y G. A. Schultz (2000), "Application of a geographic information system for conceptual rainfall-runoff modeling",

Journal of Hydrology, 240, pp. 45-61

🕮 Scofield, F. R. (1983), *Satellite-derived precipitation estimates for hydrological applications*, IAHS Publicación No. 145, pp. 259-272

🕮 Scofield, F. R. y V. J. Oliver (1977), *A scheme for estimating convective rainfall from satellite imagery*, NOAA Technical Memorandum NESS 86, Washington, D.C.

🕮 Seguin, B. (1996), "The use of AVHRR-derived land surface temperature estimates for agricultural monitoring", en D'Souza, G. *et al.* (eds.), *Advances in the use of NOAA-AVHRR data for land applications*, Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands, pp. 357–376.

🕮 Seguin, B., E. Assad, J. P. Freteaud, J. Imbernon, Y. Kerr y J. P. Lagouarde (1989), "Use of meterological setellites for water balance monitoring in Sahelian regions", *International Journal of Remote Sensing,* 19 (6), pp. 1101-1117.

🕮 Sehmi, N. S. y Z. W. Kunzewicz (1992), "Water, drought and desertification in Africa", en *Sustaintability of Water Resources under Increasing Uncertainty*, Proceedings of a Symposium held during the Fifth IAHS Scientific Assembly, Rabat, Morocco, April–May 1997, IAHS Publicación no. 240, pp. 57-66.

🕮 Shade, P. J. (1996), "Water budget for the Lahaina District, Island of Maui, Hawaii", U.S. Geological Survey, *Water Resources Investigations Report 96-4238.*

🕮 Sharma S. K. y D. Anjaneyulu (1993), "Application of remote sensing and GIS in water resource management", *International Journal of Remote Sensing*, 14 (17), pp. 3209-3220.

🕮 Sharma, K. D. y S. Singh (1995), "Satellite remote sensing for soil erosion modelling the ANSWERS model", *International Journal of Remote Sensing*, 13 (9), pp. 259-272.

🕮 Stuebe, M. M y D. M. Johnson (1990), "Runoff volume estimation using GIS techniques", *Water Resources Bulletin*, 26 (4), pp. 611-620.

🕮 Sui, D. Z. y R. C. Maggio (1999), "Integrating GIS with hydrological modelling: practices, problems, and prospects", *Computers, Environment and Urban Systems*, 23, pp. 33-51.

🕮 Thorhnwaite, C. y J. Matter (1955), *The water balance: publication in Climatology*, Drexel Institute of Technology, Centeron, New Jersey.

🕮 Thunnissen H., A .M., M. N. Jaarma y O. F. Schoumans (1992), "Land cover inventory in the Netherlands using remote sensing; application in a soil and water vulnerability assessment system", *International Journal of Remote Sensing*, 13 (9), pp. 1693-1708.

🕮 Valenzuela, C. R. (ed.; 1991), *Introduction to Geographical Information Systems*, ITC, Enschede, The Netherlands.

🕮 Vandewiele, G. L., C. Y. Xu y N. Lar-Win (1992), "Methodology and comparative study of monthly water balance models in Belgium China and Burma", *Journal of Hydrology*, 134, pp. 315 –347.

🕮 Vandewiele, G. L., C. Y. Xu y W. Huybretch (1991), "Regionalization of physically based models in Belgium, Application to ungauged catchments", *Water Resources Management*, 5, pp. 199-208.

🕮 Vázquez Selem, L. (1992), *Gully erosion, soils, and landforms in a volcanic area of central Mexico*, M. Sc. Thesis, ITC, Enscehde, The Netherlands: 133 pp.

🕮 Vekerdy, Z. (1996), *GIS based hydrological modelling of alluvial regions. Using the example of the Kisalföld (Hungry)*, Ph.D. Thesis ITC, The Netherlands.

🕮 Venneker R., G. W. y L. A. Bruijinzeel (1997), *The IHE-VUA Cathment Research and Modelling Initiative (CRMI)*, The IHE-VUA Catchment research and modelling initiative CRMI-RN-001, IIIHEE, Delft, Vrije Universiteit Amsterdam, The Netherlands.

🕮 Venneker R., G. W. y J. Schellekens (1997). *A framework for development of hydrological models*, The IHE-VUA Catchment research and modelling initiative. Document CRMI-TR-001. IIIHEE, Delft, Vrije Universiteit Amsterdam, The Netherlands.

📖 Verstappen, H.Th. (1983), *Applied Geomorphology (Geomorphological Survey for Environmental Development)*, Elsevier, Amsterdam.

📖 Vörösmarty, C. J. y B. Moore III (1991), "Modeling basin-scale hydrology in support of physical climate and global biogeochemical studies: An example using the Zambezi river", *Surveys in Geophysics*, 12, pp. 271-311.

📖 Ward, R. C. (1979), "Geographical hydrology", *Progress in Physical Geography*, 3 (3), pp. 392-412.

📖 Xu, C.Y. y G. L. Vandewiele (1994), "Sensitivity of rainfall-runoff models to input errors and data length", *Hydrological Science Journal*, 39 (2), pp. 157–176

📖 Xu C.Y. y V. P. Singh (1998), "A review on monthly water-balance models for water resources Investigations", *Water resources management*, 12, pp. 31–50.

📖 Xu C.Y. (1999), "From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modelling approaches", *Progress in Physical Geography*, 23 (2), pp. 229–249.

📖 Xu, C.Y. (2000), "Climate change and hydrologic models: A review of existing gaps and recent research developments", *Water Resources Management*, 13, pp. 369–382.

📖 Zinck, J. A. (1988), *Physiography and soils*, ITC, Enschede, The Netherlands.

📖 Zonneveld, I. S. (1979), *Land evaluation and Land(scape) science*, ITC, Enschede, The Netherlands.

📖 Zuviría, M. de (1992), *Mapping Topoclimates by integrating topographic, meteorological and land ecological data in a geographic information system. A case study of the Loam Sak area, north central Thailand*, Ph.D. Thesis University of Amsterdam-ITC, The Netherlands.