

# Dinámica del uso de la tierra y de la oferta hídrica en la cuenca del río Guacerique, Tegucigalpa, Honduras<sup>1</sup>

**Alex Javier Hernández**

*alexjher@cc.usu.edu*

**Sergio Velásquez**

*CATIE. svelasqu@catie.ac.cr*

**Francisco Jiménez**

*CATIE. fjimenez@catie.ac.cr*

**Samuel Rivera**

*Oficina de Cooperación Canadiense – Honduras  
srivera\_r@yahoo.com*



Fotos: Alex Hernández.

La dinámica temporal del uso de la tierra y caudales en la cuenca muestra una tendencia negativa. La pérdida del 17% de la cobertura original de conífero mixto y su excesiva fragmentación muestra dos implicaciones: (a) parches de bosque con tamaño promedio muy reducido que resulta en hábitats limitados para la fauna de la región y (b) pérdida de la continuidad espacial en su función reguladora de los procesos hidrológicos en la cuenca.

<sup>1</sup> Basado en Hernández Cáceres, A.J. 2003. Dinámica del uso de la tierra y de la oferta hídrica en la cuenca del río Guacerique, Tegucigalpa, Honduras. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 112 p.

## Resumen

Se analizaron los cambios a lo largo del tiempo en el uso de la tierra y la respuesta cuantitativa de caudales en la cuenca del río Guacerique. Mediante técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica se crearon tres escenarios de uso (1980, 1991 y 2003). El análisis de caudales permitió evaluar su patrón de comportamiento durante los escenarios. La herramienta para la evaluación de suelos y aguas (SWAT) se usó para simular caudales en cada escenario. Los cambios en la composición de las clases de uso resultaron significativos. Los bosques de coníferas y mixtos disminuyeron en 17%, mientras que un patrón opuesto se observó en el bosque latifoliado, el cual aumentó su área en 15%. Aunque la cobertura de los bosques es de 63%, el paisaje es altamente fragmentado. El análisis de varianza mostró que no hubo diferencias estadísticas entre los promedios de precipitación de los tres escenarios; sin embargo, hubo diferencias significativas ( $p < 0,01$ ) entre los caudales promedios y se encontró una tendencia hacia la disminución en la época seca. Las comparaciones gráficas y los coeficientes de eficiencia de los caudales observados *versus* los simulados demuestran que el modelo los sobreestima. Asimismo, la eficiencia disminuye cuando la evaluación se inicia desde estaciones hidrométricas aguas arriba hasta estaciones aguas abajo, debido posiblemente a la extracción de agua para irrigación e industria.

**Palabras claves:** Uso de la tierra; recursos hídricos; abastecimiento de agua; cuencas hidrográficas; río Guacerique, Honduras.

## Summary

**Land use and water yield dynamics in the Guacerique River watershed, Tegucigalpa, Honduras.** Temporal land use change and quantitative water yield responses were analyzed in the Guacerique watershed. The application of remote sensing and geographical information systems techniques produced three land use scenarios (1980, 1991, and 2003). Stream flow data were analyzed to assess its behavioral pattern during the scenarios. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was used to simulate stream flow for each scenario. Changes in the composition of land use classes were found significant: coniferous and mixed forests decreased by 17%, whereas an opposite pattern was found in the broadleaf forest which increased 15%. Despite actual forest coverage of 63%, this shows a highly fragmented pattern throughout the landscape. The ANOVA analysis yielded no significant differences among rainfall averages; however, significant differences ( $p < 0.01$ ) were found among yearly stream flow averages showing a descending trend along the dry season. Graphical comparison and coefficients of modeling efficiency of simulated versus observed stream flow values demonstrated that the model over-predicts observed values. Furthermore, the efficiency decreases from an upstream to a downstream hydrometric station. This trend has been attributed to massive water extractions for irrigation and industrial purposes.

**Keywords:** Land use; water resources; water supply; watershed; Guacerique River, Honduras.

El crecimiento no planeado de las poblaciones ejerce presión sobre los recursos naturales en las cuencas hidrográficas. Esta situación se magnifica cuando no se establecen estrategias para el ordenamiento territorial, dado que se generan procesos de degradación cuando el uso actual excede la capacidad de uso de la tierra, principalmente en las zonas media y alta de

las cuencas, las cuales generalmente constituyen las principales áreas de recarga hídrica (Richters 1995). Este entorno es notable en la cuenca del río Guacerique que abastece la represa Los Laureles, proveedora del 25% de agua potable que consume la población de Tegucigalpa, Honduras. Esta cuenca presenta un fuerte deterioro ambiental por la tala forestal, avance de la frontera

agrícola, incendios forestales y presión urbana (SANAA 2000), todo lo cual repercute negativamente en la cantidad y calidad del agua que recibe la población de casi un millón de habitantes. Esta situación se agrava año con año, por lo que aumenta la vulnerabilidad de la población usuaria por la falta del agua en cantidad y calidad suficiente para suplir sus necesidades.



Foto: Alex Hernández.

#### Reducción del bosque de coníferas por cultivos anuales

El objetivo del estudio fue evaluar el cambio temporal y espacial en el uso de la tierra y la oferta hídrica en la cuenca del río Guacerique, los cuales conforman el patrón de caudales determinados por modelación hidrológica. Dado que Tegucigalpa es la ciudad más poblada de Honduras, se justifica realizar estudios que sirvan como instrumentos de identificación y análisis de este problema en las cuencas hidrográficas colindantes con la ciudad.

#### Metodología

**Área de estudio.-** La cuenca del río Guacerique es de segundo orden y se localiza en la cabecera del río Choluteca, vertiente del Pacífico de Honduras. Se ubica al oeste de Tegucigalpa (entre 14°01'09" y 14°09'19" Norte; 87°12'24" y 87°26'19" Oeste) y tiene un área de 194 km<sup>2</sup>. El relieve es propio de zonas de ladera, con pendiente ondulada y 1420 msnm de altitud media. El clima se caracteriza por una época seca de diciembre a abril y lluviosa de mayo a noviembre; la precipitación promedio anual es de 1142 mm y la temperatura media de

18,5°C (SANAA 2000). Los suelos son entisoles y alfisoles, principalmente. El área tiene categoría de zona de protección forestal (Decreto No.72, junio de 1972, Congreso Nacional de Honduras).

**Generación de patrones de uso de la tierra.-** Los mapas de uso se derivaron del análisis de fotografías aéreas pancromáticas para el escenario de 1980 (1:20.000) y de imágenes satelitales Landsat TM (pixel de 30 m y 7 bandas espectrales) para los escenarios 1991 y 2003. La fotografía aérea se digitalizó e interpretó mediante vectorización automática con el programa Raster2Vector 3,4<sup>®</sup>, y luego se exportó al programa de SIG Arcview 3.3<sup>®</sup>, donde se georeferenció con error RSM máximo de 1,7 m.

Para el mapa de uso 2003 se generó una clasificación no supervisada con el algoritmo isodata, mediante el programa Erdas Imagine 8,5<sup>®</sup>. La clasificación se evaluó con visitas de campo para posteriormente generar una clasificación supervisada con un mínimo de 20 muestras por clase de uso. El resultado se revisó en el campo para probar el grado

de precisión y calcular el porcentaje de aciertos ([estimado/observado] \* 100) en un 91% (ERDAS 1999). Para el mapa de uso 1991 se trabajó de manera similar, excepto por la clasificación no supervisada y el trabajo de campo. Se generó una clasificación supervisada tomando como base el mapa de 2003. Los centroides de las poligonales de uso del 2003 se asumieron como zonas alejadas de focos de intervención y menos susceptibles a sufrir cambios. Con esta condición, la estabilidad temporal de estas zonas se consideró apta para servir como muestras en la clasificación supervisada de la imagen de 1991.

Se definieron cuatro clases uniformes de uso para los tres escenarios: bosque de coníferas y mixto, bosque latifoliado, uso agropecuario (agricultura y pastos) y otros usos (matorrales, cuerpos de agua y áreas urbano-desnudas). Las áreas por tipo de uso se estimaron en cada escenario, junto con un análisis de superposición espacial para evaluar los patrones de cambio.

Para definir el grado de fragmentación se cuantificó el número



de rodales de bosque, sus perímetros y áreas y se determinaron los mínimos, máximos y promedios. Se calculó un índice de complejidad de forma (ICF) al dividir el perímetro por el área, que es una indicación del grado de irregularidad de las poligonales de uso de la tierra (Kammerbauer y Ardón 1999).

**Análisis hidroclimático y modelación hidrológica.**- Los datos de precipitación y caudales promedio mensuales fueron evaluados mediante análisis de varianza para determinar si existían diferencias estadísticas entre los escenarios temporales del estudio. Para evaluar en qué medida la dinámica de caudales ha sido influenciada por la precipitación y por el patrón de uso de la tierra, se simuló también el comportamiento hidrológico con el modelo SWAT. El modelo SWAT opera en una base diaria y por subcuenca en un tiempo continuo. Su base teórica está basada en la ecuación del balance hídrico que considera procesos como precipitación, evapotranspiración, escorrentía y almacenamiento de agua en el suelo. La escorrentía se calcula por subcuenca y busca obtener el total de la cuenca. La técnica del número de curva CN del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS)

es utilizada para calcular la escorrentía. Esta usa los insumos disponibles y permite asociaciones entre suelos, uso de la tierra y prácticas de manejo (Chanasyk *et al.* 2003).

Los insumos para el modelo son: (a) modelo digital de elevación, (b) tipos de suelos, (c) uso de la tierra, (d) base de datos meteorológicos y (e) red hídrica. Las variables a, b y c se trabajaron en formato cuadrícula con píxel de 30 m. La base de datos meteorológicos posee estadísticos para las variables precipitación, temperatura, radiación solar y velocidad del viento. La red hídrica se requiere como vector. Los procesos principales incluyen la definición de puntos de aforo. Estos se definieron de tal forma que permitiera la comparación de caudales observados con los simulados en tres estaciones hidrométricas. En la Fig. 1 se indica la ubicación de la cuenca en el contexto del país y la ubicación de las tres estaciones de aforo que se utilizaron en este estudio.

Se han propuesto diversos enfoques para evaluar la bondad de ajuste de mediciones simuladas *versus* las directas. Sin embargo, el coeficiente modificado de eficiencia  $E$  (1) de Nash y Sutcliffe (1970) y el índice modificado de concordancia

$d$  (2) propuesto por Willmott (1985) son los más objetivos para esta evaluación (Legates y McCabe 1999). Estos autores critican el calificar de buena eficiencia las salidas de un modelo sólo por un alto  $r^2$ , dado que este coeficiente es influenciado por los valores extremos en la serie analizada, por lo que recomiendan usar  $E$  y  $d$ ; ya que en estos los errores y sus diferencias muestran pesos apropiados no inflados por sus cuadrados. Se tiene, entonces, que:

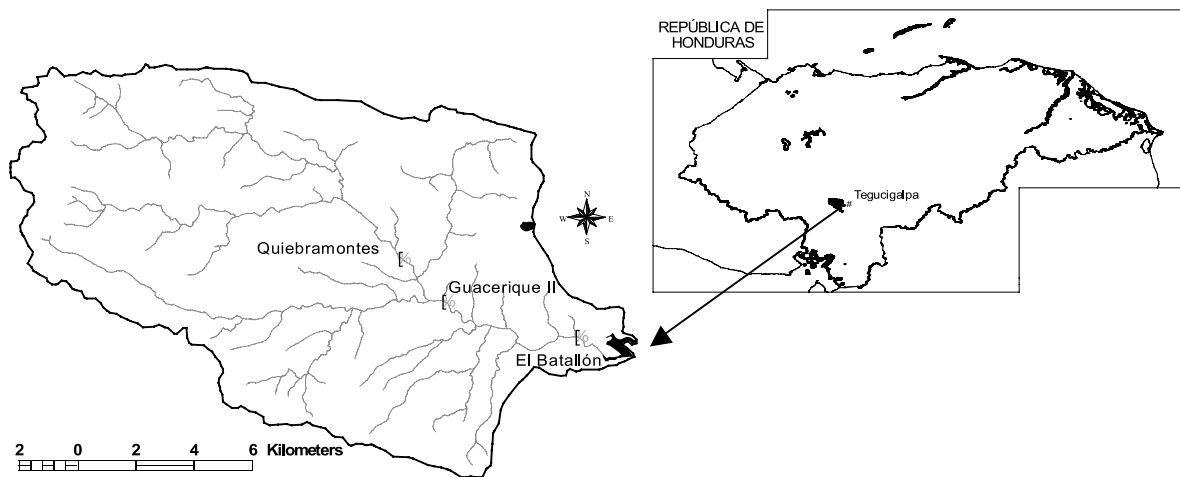
(1)

$$E = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - P_i|^j}{\sum_{i=1}^N |O_i - \bar{O}|^j}$$

(2)

$$d = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - P_i|^j}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^j}$$

Donde:  $O$  = datos observados;  $P$  = datos simulados por el modelo;  $N$  = periodo de tiempo en incrementos de duración arbitraria (años, meses, días);  $j$  = potencia arbitraria;  $\bar{O}$  = media aritmética de los datos medidos.



**Figura 1.** Ubicación de la cuenca y esquema espacial de puntos de aforo para evaluar con SWAT

**Cuadro 1.**

Cambios en la cobertura natural entre los años 1980 al 2003 en la cuenca del río Guacerique

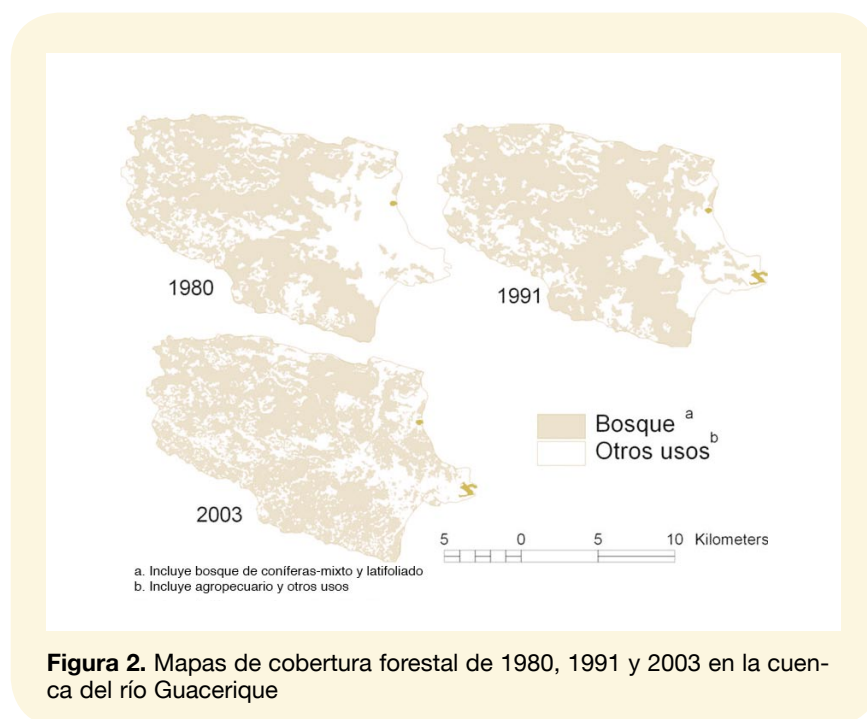
| Escenario | Uso                         | Cobertura de área |       | Cambios   |        | Ganancia o pérdida (% por año) |
|-----------|-----------------------------|-------------------|-------|-----------|--------|--------------------------------|
|           |                             | (ha)              | (%)   | (ha)      | (%)    |                                |
| 1980      | Bosque de coníferas y mixto | 11.762,37         | 60,61 |           |        |                                |
|           | Bosque latifoliado          | 886,77            | 4,57  |           |        |                                |
|           | Agropecuario                | 1.640,34          | 8,45  |           |        |                                |
|           | Otros usos                  | 5.118,39          | 26,37 |           |        |                                |
| 1991      | Bosque de coníferas y mixto | 10.379,88         | 53,48 | -1.382,49 | -11,75 | -1,07                          |
|           | Bosque latifoliado          | 2.800,44          | 14,43 | 1.913,67  | 215,80 | 19,62                          |
|           | Agropecuario                | 4.315,86          | 22,24 | 2.675,52  | 163,11 | 14,83                          |
|           | Otros usos                  | 1.911,69          | 9,85  | -3.206,70 | -62,65 | -5,70                          |
| 2003      | Bosque de coníferas y mixto | 8.435,43          | 43,46 | -1.944,45 | -18,73 | -1,56                          |
|           | Bosque latifoliado          | 3.871,26          | 19,95 | 1.070,82  | 38,24  | 3,19                           |
|           | Agropecuario                | 4.739,67          | 24,42 | 423,81    | 9,82   | 0,82                           |
|           | Otros usos                  | 2.361,51          | 12,17 | 449,82    | 23,53  | 1,96                           |

## Resultados

**Uso de la tierra.-** La Fig. 2 y el Cuadro 1 ilustran y cuantifican los cambios en las clases de uso. Es evidente la tendencia de pérdida anual en la clase conífera-mixto superior al 1%, así como un incremento inicial superior al 19% en la clase latifoliado que retrocedió al 3,19%.

Aunque las condiciones de cobertura forestal son aparentemente positivas, es conveniente revisar la distribución espacial y fragmentación de las clases boscosas en la actualidad (Cuadro 2). Los valores ICF altos indican parches con forma más irregular que los valores bajos. La clase latifoliado presentó una tasa positiva de persistencia, ya que el número de rodales supera actualmente en 205 al de conífera-mixto, así como formas de paisaje más irregulares. El análisis en ambas clases forestales exterioriza una pérdida de zonas contiguas y reducciones del 83% en el tamaño promedio de rodales de conífera-mixto, así como la reducción de la masa forestal individual máxima al 31,33% de su tamaño original; en el bosque latifoliado se da una tendencia distinta.

**Comportamiento hidrológico.-** El análisis de varianza de los regis-



**Figura 2.** Mapas de cobertura forestal de 1980, 1991 y 2003 en la cuenca del río Guacerique

tros de precipitación mostró que no hay diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre las medias mensuales de los diferentes escenarios; el régimen pluvial mantiene su magnitud y tendencia a través del espacio temporal de análisis. Sin embargo, se encontraron diferencias ( $p < 0,01$ ) al comparar las series mensuales de registros de cau-

dal de tres estaciones hidrométricas; se destaca una disminución considerable en el último periodo en la época de estiaje (Fig. 3).

El análisis sirvió para caracterizar el comportamiento de la oferta hídrica temporal por medio de registros de campo. Si no se contara con este tipo de bases de datos, puede recurrirse

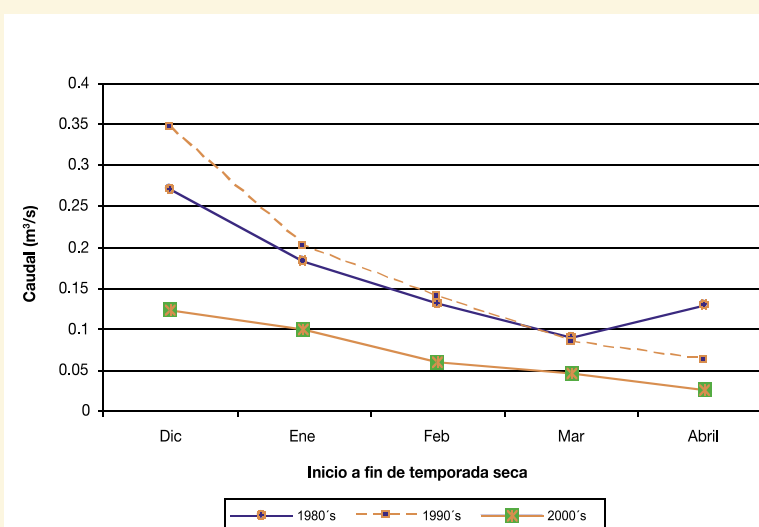
**Cuadro 2.**

Cambios en la contigüidad espacial de las zonas boscosas como indicadores de fragmentación

| Escenario | Tipo de uso      | Número de parches | Área (ha) |        |           | Perímetro promedio (m) | Índice de complejidad de forma ICF (m/ha) |
|-----------|------------------|-------------------|-----------|--------|-----------|------------------------|---|
|           |                  |                   | Promedio  | Mínimo | Máximo    |                        |   |
| 1980      | Conífera y mixto | 107               | 110,19    | 0,06   | 11.304,34 | 5.516,21               | 50  |
|           | Latifoliado      | 129               | 6,85      | 0,06   | 102,55    | 936,23                 | 137                                       |
| 1991      | Conífera y mixto | 268               | 38,82     | 0,06   | 9.974,82  | 2.238,63               | 58  |
|           | Latifoliado      | 401               | 6,98      | 0,06   | 1.217,54  | 905,27                 | 130                                       |
| 2003      | Conífera y mixto | 478               | 17,72     | 0,06   | 5.715,37  | 1.734,31               | 98  |
|           | Latifoliado      | 683               | 5,67      | 0,06   | 1.559,94  | 851,38                 | 150                                       |

al uso de modelos hidrológicos. Con SWAT se pudo modelar este comportamiento por escenario. Un ejemplo para un periodo en la década de 1980 (Fig. 4) muestra la aproximación del modelo a los datos observados. Se evidencia una sobreestimación de los caudales simulados, aunque la tendencia es la misma en ambos casos; no obstante, esta evaluación visual debe fortalecerse con la evaluación de coeficientes estadísticos (Cuadro 3).

El rango para evaluar  $r^2$  y  $D$  es de 0,00 a 1,00 mientras que para  $E$  es de  $-\infty$  a 1,00. La estación El Batallón (Fig. 1, aforo total de la cuenca) presenta los coeficientes más bajos y la media simulada difiere en más de 1,4 m<sup>3</sup>/s de la observada. La estación Quiebramontes (Fig. 1, zona alta) tiene los valores más precisos y la media simulada menos distanciada (0,514 m<sup>3</sup>/s) de la observada.

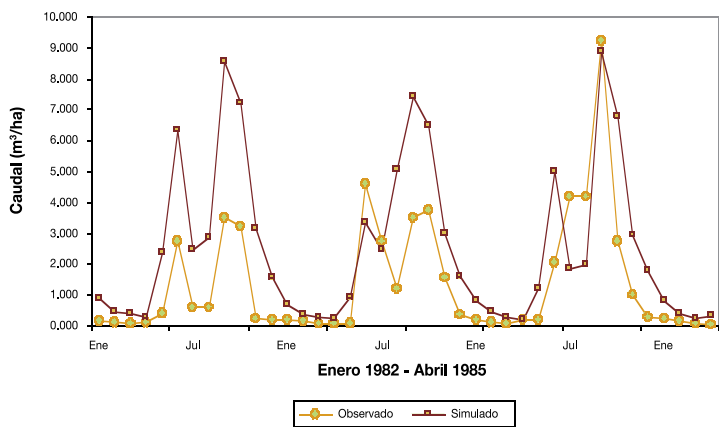


**Figura 3.** Caudales medios mensuales en la estación seca en la cuenca del río Guacerique

**Cuadro 3.**

Estadísticos anuales de bondad de ajuste entre series observadas y simuladas por SWAT para el periodo 1999-2003 por cada estación hidrométrica analizada

| Estadístico      | Estación hidrométrica |          |               |          |             |          |
|------------------|-----------------------|----------|---------------|----------|-------------|----------|
|                  | Quiebramontes         |          | Guacerique II |          | El Batallón |          |
|                  | Observado             | Simulado | Observado     | Simulado | Observado   | Simulado |
| $\bar{Y}(m^3/s)$ | 0,501                 | 1,015    | 0,724         | 1,933    | 1,122       | 2,543    |
| $r^2$            |                       | 0,854    |               | 0,860    |             | 0,809    |
| $D$              |                       | 0,620    |               | 0,580    |             | 0,520    |
| $E$              |                       | 0,050    |               | -0,105   |             | -0,340   |



**Figura 4.** Comportamiento mensual de los caudales en la estación hidrométrica Guacerique II y los generados por SWAT en el escenario de los años 1980

## Discusión y conclusiones

La dinámica temporal del uso de la tierra y caudales en la cuenca muestra una tendencia negativa. Las tasas de deforestación son similares a las encontradas por Rivera (1998) para todo el territorio nacional, estimadas en 0,9% para coníferas y 1,2% para bosques latifoliados. La pérdida del 17% de la cobertura original de conifera-mixto y su excesiva fragmentación muestra dos implicaciones de interés: (a) parches de bosque con tamaño promedio muy reducido que resulta en hábitat limitados para la fauna de la región (Kammerbauer y Ardón 1999) y (b) pérdida de la continuidad espacial en su función reguladora de los procesos hidrológicos en la cuenca (Sandström 1998; Bruijnzeel 1989). Esto contribuye a que se den patrones de reducción en la época seca, de un promedio mensual de 0,16 m<sup>3</sup>/s en los años 1980 a un exiguo 0,06 m<sup>3</sup>/s en el 2003.

A pesar del aumento del bosque latifoliado en casi 15%, este presenta un carácter xerofítico con condiciones de ecosistemas degradados de baja cobertura y bajo poder de regulación hidrológica. Esta condición favorece la incidencia de incendios forestales que dañan la estructura de los suelos y la existencia de sitios con especies que no proporcionan adecuada cobertura. Asimismo, se dan altas tasas de escorrentía superficial y bajo aporte a los caudales base, lo que incide

negativamente en las oportunidades de recuperación para mantener una oferta hídrica apropiada en la época seca (Brooks *et al.* 1991; Nik 1988; Swindel *et al.* 1983).

Los resultados obtenidos con SWAT sugieren que es una herramienta útil, más que todo en zonas con registros hidrométricos escasos o nulos, ya que puede servir para establecer una línea base de datos. En la estación Guacerique II se observó un

$r^2$  más alto que en Quebramontes, pero su eficiencia  $E$  fue negativa, lo que indica que es mejor utilizar la media de la serie observada en lugar del modelo para realizar predicciones. Esta apreciación se refuerza al analizar las concordancias  $d$  menores: las predicciones del modelo son más precisas en las zonas donde las extracciones no agotan el caudal excesivamente y donde el reconocimiento de campo demuestra que las extracciones se van incrementando a medida que se transita de las zonas altas hasta las bajas. Sin embargo, es necesario contar con datos confiables para establecer juicios más acertados; será necesario un proceso de calibración subsiguiente al modelo para alcanzar un nivel de precisión más aceptable. 🌱

## Agradecimientos

Se agradece al Proyecto de Fortalecimiento de la Capacidad Local para el Manejo de Cuencas y la Prevención de Desastres Naturales (FOCUENCAS) el financiamiento de este estudio. Asimismo, al personal del departamento de manejo de cuencas del Servicio Autónomo de Acueductos y Alcantarillados SANAA por el apoyo logístico prestado.

## Literatura citada

- Brooks, KN; Folliot, PF; Gregersen, HM; Thames, JL. 1991. Hydrology and the management of watersheds. Ames, Iowa, Iowa State University Press. 392 p.
- Bruijnzeel, LA. 1989. (De)forestation and dry season flow in the tropics: a closer look. *Journal of Tropical Forest Science* 1(3):229-243.
- Chanasyk, DS; Mapfumo, E; Willms, W. 2003. Quantification and simulation of surface runoff from fescue grassland watersheds. *Agricultural Water Management* 59:137-153.
- ERDAS INC. 1999. *Erdas field guide*. Ed. 5. Atlanta, Georgia, US. 698 p.
- Kammerbauer, J; Ardón, C. 1999. Land use dynamics and landscape change pattern in a typical watershed in the hillside region of central Honduras. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 75:93-100.
- Legates, DR; McCabe, GJ. 1999. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* 35(1):233-241.
- Nash, JE; Sutcliffe, JV. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I-a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3):282-290.
- Nik, AR. 1988. Water yield changes after forest conversion to agricultural landuse in peninsular Malaysia. *Journal of Tropical Forest Science* 1(1):67-84.
- Richters, E. 1995. Manejo del uso de la tierra en América Central: hacia el aprovechamiento sostenible del recurso tierra. San José, CR, IICA. 439 p. (Colección Investigación y Desarrollo no. 28).
- Rivera, S. 1998. Análisis de la deforestación en Honduras (1965-1992) usando técnicas de sensores remotos y sistemas de información geográfica. *Tatascán* 10(2):65-79.
- SANAA. 2000. II curso internacional de manejo integral de cuencas hidrográficas. Tegucigalpa, HO. 25 p.
- Sandström, K. 1998. Can forest "provide" water: widespread myth or scientific reality? *Ambio* 27(2):132-138.
- Swindel, BF; Lassiter, CJ; Riekerk, H. 1983. Effects of clearcutting and site preparation on stormflow volumes of streams in *Pinus elliotii* flatwood forests. *Forest Ecology and Management* 5:245-253.
- Willmott, CJ; Ackleson, SG; Davis, RE; Feddema, JJ; Klink, KM; Legates, DR; O'Donnell, J; Rowe, CM. 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research* 90(C5):8995-9005.