



Revista de Ciencias Ambientales (Trop J Environ Sci). EISSN: 2215-3896.

1994. Vol 11(1): 87-100.

DOI: <http://dx.doi.org/10.15359/rca.11-1.8>

URL: www.revistas.una.ac.cr/ambientales

EMAIL: revista.ambientales@una.cr

Carlos Manuel Morera B.

Revista de CIENCIAS AMBIENTALES Tropical Journal of Environmental Sciences



Aplicaciones de los sistemas de información geográficos en el modelaje hidrológico

Applications of geographic information systems in hydrological modeling

Carlos Manuel Morera B.



Los artículos publicados se distribuyen bajo una Creative Commons Reconocimiento al autor-No comercial-Compartir igual 4.0 Internacional (CC BY NC SA 4.0 Internacional) basada en una obra en <http://www.revistas.una.ac.cr/ambientales>, lo que implica la posibilidad de que los lectores puedan de forma gratuita descargar, almacenar, copiar y distribuir la versión final aprobada y publicada (*post print*) del artículo, siempre y cuando se realice sin fines comerciales y se mencione la fuente y autoría de la obra.

APLICACIONES DE LOS SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICOS EN EL MODELAJE HIDROLOGICO

(Recepción del artículo-16 Marzo 1994)

Carlos Manuel Morera B.¹

ABSTRACT

This article reviewed the different relationship existing between Geographis Information System and hydrological modeling. It determined three kind of relationships between GIS and hydrological modeling. The first relation is called hydrological assessment and it refers to the mapping of hydrologic variables that pertain to some situation, usually as means of risk assessment. The second relationship is called hydrologic parameter determination and compute the spatial parameters that go into hydrologic models by analysis of terrain and cover features. The last relationship is the hydrlogical modelling within GIS. Also, This article presents the case of compatibility between GIS and Hydrological Modeling using the SWRRB Model. This study case evaluated the effects of watersheds configuration on runoff on runoff prediction.

RESUMEN

En este artículo se presentan las diferentes relaciones existentes entre los Sistemas de Información Geográficos y el modelaje hidrológico, definiendo tres tipos de relaciones. La primera relación es la avaluación hidrológica refiriéndose al mapeo de variables hidrológicas del balance hídrico y que comúnmente es el mapeo de riesgos hídricos. La segunda relación es la determinación y cálculo de parámetros hidrológicos y espaciales tales como parámetros topográficos y de uso suelo, para luego introducirlo dentro de los modelos hidrológicos. La última relación es el modelaje dentro de los mismos Sistemas de Información Geográficos. Además, este artículo presenta los casos de compatibilidad entre los Sistemas de Información Geográficos y el modelaje hidrológico utilizando el modelo SWRRB, evaluando el efecto de la configuración en la predicción de escorrentía.

INTRODUCCION

La aplicación de Sistemas de Información Geográficos (SIG's) en los estudios hidrológicos se ha incrementado rápidamente durante los últimos años, especialmente en el manejo de cuencas hidrográficas, donde los SIG's fueron desarrollados como

¹ Profesor Universidad Nacional y Consultor en Sistemas de Información Geográfica y Recursos Naturales para PNUD.

un instrumento práctico para perfilar algunos de los problemas operacionales que enfrentan muchas agencias encargadas de los análisis hidrológicos. Dos pasos básicos para cualquier estudio hidrológico son: la definición de las áreas de las cuencas hidrográficas y la estimación de parámetros, los cuales pueden ser fácilmente calculados utilizando SIG's, en oposición a los métodos tradicionales que son tediosos y requieren de significativo tiempo. Por otro lado, los SIG's ofrecen la dimensión espacial, la cual es difícil de evaluar en los modelos hidrológicos, además que la mayoría de estos modelos requieren una base de datos, la cual necesita usualmente de largo tiempo para establecerla, así los SIG's pueden correr diferentes modelos casi en forma simultánea a través de la extracción de la información requerida.

Diversos estudios han utilizado los SIG's en el modelaje hidrológico, ejemplo Fisher (1989), quien desarrolló un diseño conceptual para la interrelación entre un SIG y el modelo de FORTRAN de simulación hidrológica (HSPF), el cual es un modelo compresivo de calidad de agua e hidrología de la cuenca hidrográfica. Lee y otros (1990) integraron un SIG con los componentes de calidad de agua del modelo agrícola de erosión/sedimentación para estimar fuentes de contaminación no puntuales. Otro estudio que utilizó esta técnica fue realizado por Holvert (1989), quien integró la ecuación del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS) para calcular la escorrentía superficial con un SIG (MAP Analysis Package) que le permitió simular datos de escorrentía utilizando una base de datos en SIG.

El ciclo hidrológico es inherentemente espacial, como el agua se almacena, transporta y transforma en el espacio, por lo cual es necesario desarrollar técnicas automatizadas que permitan el análisis espacial dentro de los estudios hidrológicos.

En este artículo, se desarrollan los diferentes niveles de compatibilidad de los SIG en el modelaje hidrológicos. Además se presenta el caso del modelo SWRRB.

Modelos hidrológicos

Brooks y otros (1991) definen modelos hidrológicos como una representación simplificada de un sistema hidrológico con el propósito de estudiar la función y respuesta de la cuenca a varias propuestas de uso. En la mayoría de los casos los modelos hidrológicos se basan en un sistema de enfoque y difieren en término de cómo y que extenso sea considerado cada componente del proceso hidrológico. Existe una amplia gama de tipos de modelos hidrológicos, los cuales se pueden diferenciar en dos tipos básicamente; los mecanicistas y los empíricos. Los mecanicistas están basados en el requisito que el modelo describe el sistema hidrológico en término de las leyes fundamentales y los principios teóricos de la ciencia (Ejemplo; la conservación de la masa, energía y momento). Estos rigurosos enfoques científicos proveen el potencial de describir los mecanismos de control del sistema, la naturaleza de las interacciones y su variabilidad temporal.

Los modelos basados en enfoques empíricos tienden a describir el sistema en término de las relaciones empíricas y estadísticas y presentan un rango de

complejidad que va desde una simple ecuación que considera un solo parámetro, el cual en si mismo representa un índice del efecto neto hasta ecuaciones más complejas que requieren de grandes números de parámetros. En diferencia con los modelos mecánicos, los empíricos ofrecen poco entendimiento de la mecánica interna del sistema. Las aplicaciones de modelos empíricos son severamente limitada debido a que son sólo aplicables a las condiciones para las cuales fueron calibrados sus parámetros, además que no pueden ser usados para explorar la operación interna del sistema físico que describen.

Sistemas de Información Geográficos

Un Sistema de Información Geográfico se define como la habilidad de un sistema de capturar, almacenar, recobrar, transformar, analizar y desplegar información espacial (Cowen, 1988). Todo SIG guarda una serie de registros espaciales en forma de mapas o imágenes que pueden ser almacenados ya sea en forma de rasters o de vectores.

Modelaje Hidrológico y Sistemas de Información Geográfico

Los SIG's proveen representaciones de caracteres espaciales, mientras el modelaje hidrológico esta referido al flujo de agua y sus constituyente sobre y las capas superficiales de la tierra. Partiendo de esta relación, los SIG's ofrecen el potencial de incrementar los grados de detalles de las unidades espaciales. Además, la interrelación entre modelaje hidrológico y SIG's presenta la potencialidad de manipular información a escalas regionales o continentales, procesos en los cuales el ciclo hidrológico no ha sido hasta ahora simulado (Maidment, 1991). Por otra parte, la aplicación de SIG en el modelaje hidrológico aumenta el uso de modelos hidrológicos a través del incremento de la eficacia en la preparación de la base de datos requerida por estos modelos.

Varios niveles de modelos hidrológicos en asociación con los SIG's pueden ser distinguidos siendo los principales; la evaluación hidrológica, determinación de parámetros hidrológicos y el modelaje dentro de los SIG's. A continuación se describen estas diferentes asociaciones.

Avaluación Hidrológica

La evaluación hidrológica se refiere al cartografiado de variables hidrológicas que pertenecen a alguna situación usualmente referida a la evaluación de riesgos. Dentro de esta asociación Ferris y Colgaton (1989) desarrollaron una base de datos en SIG para la cuenca del río Colorado con el objetivo de estimar el volumen de agua de la nieve derretida utilizando información topográfica y de satélite, revelando dicho estudio el potencial de bajo costo de las imágenes de satélite AVHRR (Advance Very High Resolution Radiometer) en la estimación del volumen de agua de la nieve derretida.

Otra aplicación dentro de esta asociación ha sido en la determinación de la susceptibilidad de las aguas superficiales a la contaminación no puntual. Deliman y Wolfe (1990) utilizaron GRASS (Geographic Resource Support System) para estimar el impacto potencial de las lecherías en la calidad de aguas superficiales, concluyendo que los SIG's pueden ser usados efectivamente en la ubicación de nuevas lecherías y en la identificación de áreas actuales susceptibles a la contaminación. Gilliland y Potter (1986) desarrollaron una base de datos en SIG para analizar el potencial de contaminación no puntual con énfasis en bacterias en el condado de Douglas, Nebraska. La base de datos integró mapas de tipo de suelos, topografía y uso de suelo para calcular grado de pendiente y longitud de pendiente y relacionar estas características a los parámetros referentes al suelo y uso del suelo obteniendo un mapa tridimensional de potencial de escorrentía superficial, potencial de contaminación por sedimentos y potencial de contaminación por coliformes fecales.

Para minimizar el impacto ambiental de las actividades militares Warren y otros (1989), integraron la ecuación universal de erosión a un GRASS con el fin de crear un sistema de clasificación de tierras para ser usado por los administradores y capacitadores militares.

Determinación de Parámetros Hidrológicos

La determinación de parámetros hidrológicos es actualmente la área más activa dentro de los SIG's y sus aplicaciones en el modelaje hidrológico. Considerando la enorme cantidad de información espacial necesaria para analizar procesos hidrológicos, los SIG's han llegado a ser un instrumento práctico para determinar las variables necesarias por un modelo hidrológico. Este tipo de aplicación generalmente utiliza simplemente técnicas de sobreposición y presenta la ventaja de aumentar la precisión de los resultados a través de la obtención de representaciones más detalladas tales como: uso de suelo, longitud de la pendiente y tipos de suelos. El aumento de la precisión varían de acuerdo al área total de la cuenca que ha sido modelada y se diferencian según el grado de estandarización de las variables representadas.

Un ejemplo dentro de esta aplicación fue realizada por VarBlargarn y Schaake (1987), quienes aplicaron la técnica de SIG para predecir inundaciones utilizando el modelo KWAVE (Kinematic Wave Model) en pequeñas cuencas hidrográficas. El SIG leyó los datos geográficos necesarios y estimaron los parámetros del KWAVE, mientras que aquellos parámetros que no fueron calculados utilizando la base de datos en SIG fueron obtenidos de datos regionales. Esta aplicación demostró que los SIG pueden ser usados para obtener parámetros del drenaje de una cuenca de mayor detalle, obteniendo mejores resultados ya que considera las variaciones espaciales de la precipitación y de las características de las cuencas. Otro ejemplo fue Wolfe y Neale (1988), quienes aplicaron GRASS para montar una base de datos en SIG con el objetivo de calcular los parámetros requeridos por el modelo FESHM (Finite Element Storm Hydrograph Model).

Schmidt y otros (1987), realizaron una investigación para evaluar los valores de las unidades de un hidrógrafo y los parámetros de tasas menores para modelos de tipo de precipitación-escorrentía, utilizaron una información climática y edafológica almacenada en una base de datos en SIG junto con datos de hidrógrafos y parámetros de tasas menores de un modelo precipitación-escorrentía calibrado para 616 eventos en 98 estaciones en diferentes estaciones de aforo.

En 1989, Fisher relacionó el programa FORTRAN de simulación hidrológica (HSPF) con ARC/INFO a través de una serie de procedimientos de análisis con funciones primarias para calcular los parámetros del modelo y ejecutar los procedimientos computacionales. Uno de los procedimientos incluía funciones tales como análisis de frecuencia mientras que otra de las series manipulaba la base de datos obteniendo información referente a las coordenadas geográficas. Tres métodos generales fueron utilizados para los parámetros del modelo fueron definidos a constantes, fueron calculados utilizando simples algoritmos y fueron determinados corriendo programas separados. Esta investigación demostró que el cálculo de los parámetros hidrológicos fueron fácilmente y rápidamente desarrollados por HSPF utilizando una base de datos en SIG.

Otro modelo hidrológico en el cual los parámetros fueron definidos utilizando SIG fue AGNPS (Agriculture Source)(Panuska y otros, 1991). Métodos de análisis del terreno fueron usados para estimar los atributos topográficos de una cuenca. Otra aplicación de este tipo fue realizada por Sasowsky y Gardner (1991) quienes utilizaron los SIG's para determinar los parámetros requeridos por el modelo SPUR (Simulation of Production and utilization of Rangeland) definiendo diferentes configuraciones de la cuenca por medio de la simplificación progresiva de la red de drenaje limitada según un sistema de elevación digital (DEM). Este estudio encontró que la simulación del modelo no puede ser aumentado significativamente con el incremento de la configuración de la cuenca más allá del cuarto orden por razones de parameterización de SPUR.

Modelaje Hidrológico dentro de los SIG

El modelaje hidrológico puede realizarse dentro de los SIG's, siempre y cuando la variable tiempo no sea contemplada. Johnston (1990) evaluó el potencial de aplicabilidad de los SIG's en todas las etapas del modelaje de eventos, estimando escorrentía usando el modelo de curve number (SCS) y utilizando SIG, para seis diferentes cuencas hidrográficas. Información de elevación, suelos y cobertura fueron utilizadas en todas las fases de la estimación incluyendo estimar el curve number y la delineación de la cuenca. Los resultados mostraron que los SIG's son una alternativa aceptable en comparación con los métodos tradicionales para la estimación de escorrentía superficial. Hill y otros, (1989) generaron datos de escorrentía utilizando el método de curve number dentro de una base de datos en SIG donde se combinaba información del satélite LANDSAT con fotografía digital de uso del suelo. White (1989), también usó la técnica de curve number para evaluar los efectos de los cambios en el uso del suelo y prácticas de conservación en la escorrentía; concluyendo que considerando la complejidad de la información las

predicciones del modelo estuvieron dentro de un rango razonable de los datos reales de escorrentía para cuatro de los ocho eventos evaluados.

Por otro lado, Silfer y otros (1987) usaron el modelo TINFLOW (Triangle Irregular Network) y una estructura de datos asociados junto con un modelo hidrológico determinista para simular los procesos de precipitación-escorrentía vía superficial y subsuperficial. El TIN es una serie de planos triangulares conectados en las orillas y es comúnmente usado en fotogrametría y sensores remotos para el modelado topográfico. Por su capacidad de asignar atributos a pequeñas parcelas de tierra, el modelo TINFLOW puede ser usado en áreas urbanas para predecir modificaciones en los patrones de la escorrentía causados por cambios en el uso del suelo.

El modelo AGNS (Agriculture Source Pollution) que contiene componentes de escorrentía, erosión, sedimentación y calidad de agua, fue aplicado por Lee y otros (1990) para examinar las fuentes no puntuales de contaminación. Información de suelos, tipo de suelos, del cauce, límites de la finca, localizaciones de los monitoreos y manejo de la tierra fueron almacenadas en una base de datos, la cual fue utilizada junto con un modelo de elevación digital (DEM) y sensores remotos indicados los resultados que esta técnica es económicamente factible.

De Roo y otros (1989), interrelacionaron una base de datos en SIG con el modelo ANSWERS (Aerial Nopoint Source Waterhed Environment Response Simultion) para simular la escorrentía y la erosión para una cuenca hidrográfica con uso agrícola, concluyendo que los que los SIG proveen nuevas posibilidades de desarrollar un modelo útil que prefija erosión y escorrentía a una escala pequeña.

Caso del Modelo SWRRB

El modelo SWRRB (Simulador for Water Resources in Rural Basins) fue desarrollado para simular procesos hidrológicos en cuencas hidrográficas rurales, obteniéndose la predicción de efectos de cambios en el uso del suelo sobre la producción de sedimentos y el agua para cuencas hidrográficas sin medidas de aforos. Los tres principales componentes del SWRRB son climatología, precipitación y sedimentación, incluyendo procesos como; escorrentía superficial, percolación, período de retorno, evapotranspiración y sedimentación.

Se realizó una aplicación del modelo SWRRB a la subcuenca número 11 de la cuenca del Walnut Gulch, ubicada en el sur del estado de Arizona, Estados Unidos, simulándose resultados para un período de 6 años.

El modelo requiere de una división de la cuenca hidrográfica con base en tipos de suelos, uso del suelo, pendiente, topografía, temperatura, precipitación y cada fracción debe incluir una parte del cauce. Cinco diferentes configuraciones de la cuenca hidrográfica fueron determinadas. En la primera y la segunda configuración se asumió que la característica de las mayores unidades tanto en materia edafológica como vegetativa eran homogéneas dentro de la cuenca hidrográfica. Para la tercera

configuración se subdividió la subcuenca en dos unidades, diferenciándose el tipo de vegetación debido a que los dos principales tipos de vegetación (hierba y charral) cubrían áreas similares, aproximadamente el 50% de la superficie total de la subcuenca. Dentro de la cuarta configuración, se mantuvieron las diferencias de suelos y además se sumó las dos unidades mayores de tipos de suelo obteniéndose tres subunidades. En la quinta configuración además de contar con las unidades de suelo y vegetación de la anterior configuración, se añadió otra unidad en tipo de suelo que cubría una área relativamente pequeña, resultando cinco subunidades.

Debido a que el modelo SWRRB sólo puede leer valores de una estación y se contaba valores para once diferentes estaciones que no estaban distribuidas uniformemente dentro de la subcuenca, se aplicó el método Thiessen para elevar la precisión de los valores de precipitación. Para los valores diarios de temperatura (máxima y mínima) necesarios se utilizaron mediciones de una estación ubicada a 5 kilómetros del área de estudio.

El valor de curve number, dato necesario para la simulación fueron calculados de dos formas: una utilizando la ecuación creada por Simanton y otros (1973) para suroeste de los Estados Unidos y otra utilizando datos de tabla desarrollada por Servicio de Conservación de Suelos (1972).

Procedimientos utilizados SIG

Mapas topográficos, de tipos de suelos, vegetación, límites de la subcuenca, red de drenaje fueron digitalizados utilizando el sistema de información geográfico ARC-INFO transportándose luego a IDRISI que es un sistema de análisis geográfico. Todos los diferentes archivos vectoriales fueron transportados a imágenes de 160 líneas por 300 columnas con unidades de celda de 10 metros por 10 metros.

Uno de los pasos más importantes en el modelo SWRRB es la definición de las diferentes subcuencas, basándose en tipos de suelo y vegetación, el cual fue obtenido a través de la sobreposición de los files de tipo de suelo y vegetación con el archivo que contenía la delimitación de la cuenca, luego los más obtenidos fueron clasificados eliminando aquellas categorías fuera de la subcuenca de estudio (ver Figura 1).

Como es requerido por parte del modelo calcular las áreas de cada subunidades, el mapa de subcuencas fue reclasificado delimitándose una subunidad y aplicándose el comando AREA para calcular las diferentes superficies (ver Figura 2).

Para definir los parámetros de pendiente necesarios, el mapa de curvas de nivel fue transportado a un modelo de elevación digital y posteriormente se aplicó el comando surface, el cual computariza la pendiente. Este procedimiento fue utilizado tanto para calcular la pendiente total de la subcuenca, de las unidades dentro de la subcuenca, de todo el cauce, del cauce ubicado dentro de las subunidades (ver Figura 3).

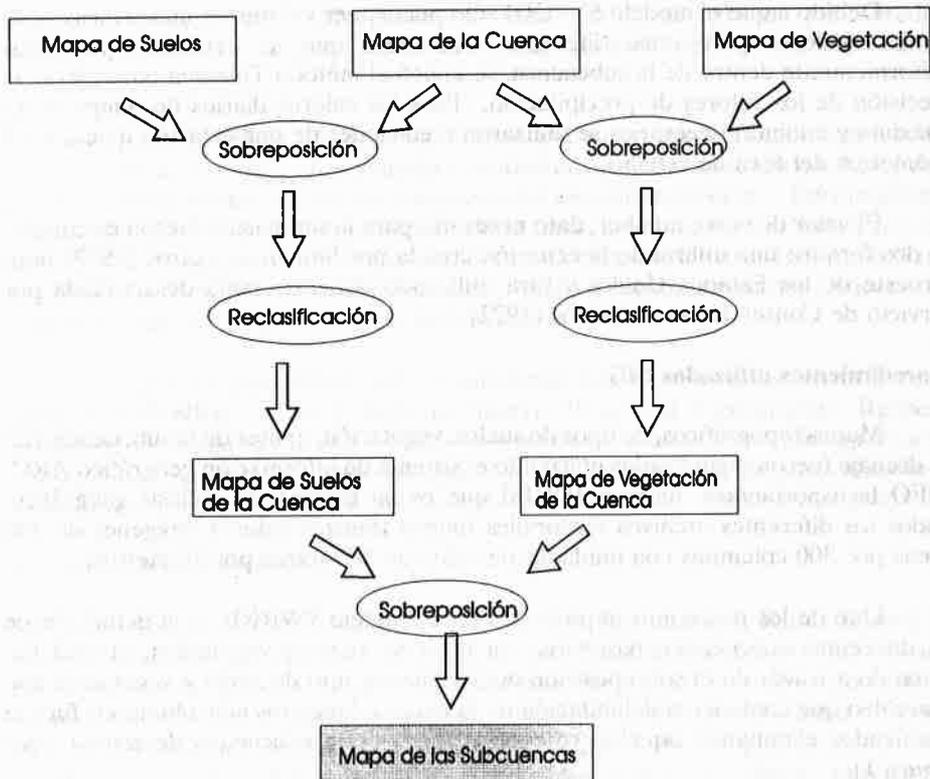


Figura 1, Delimitación de las subcuencas

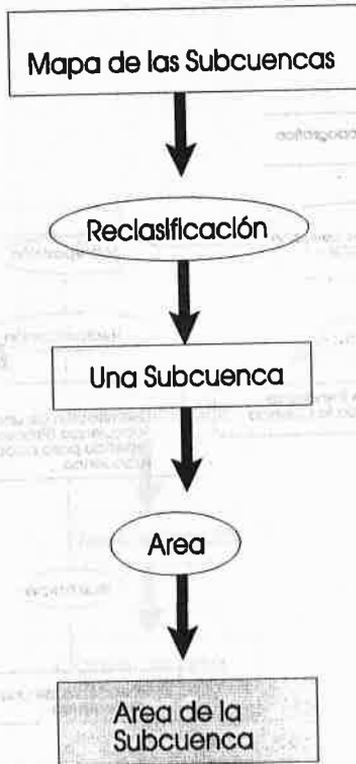


Figura 2, Cálculo de Areas de las Subcuencas

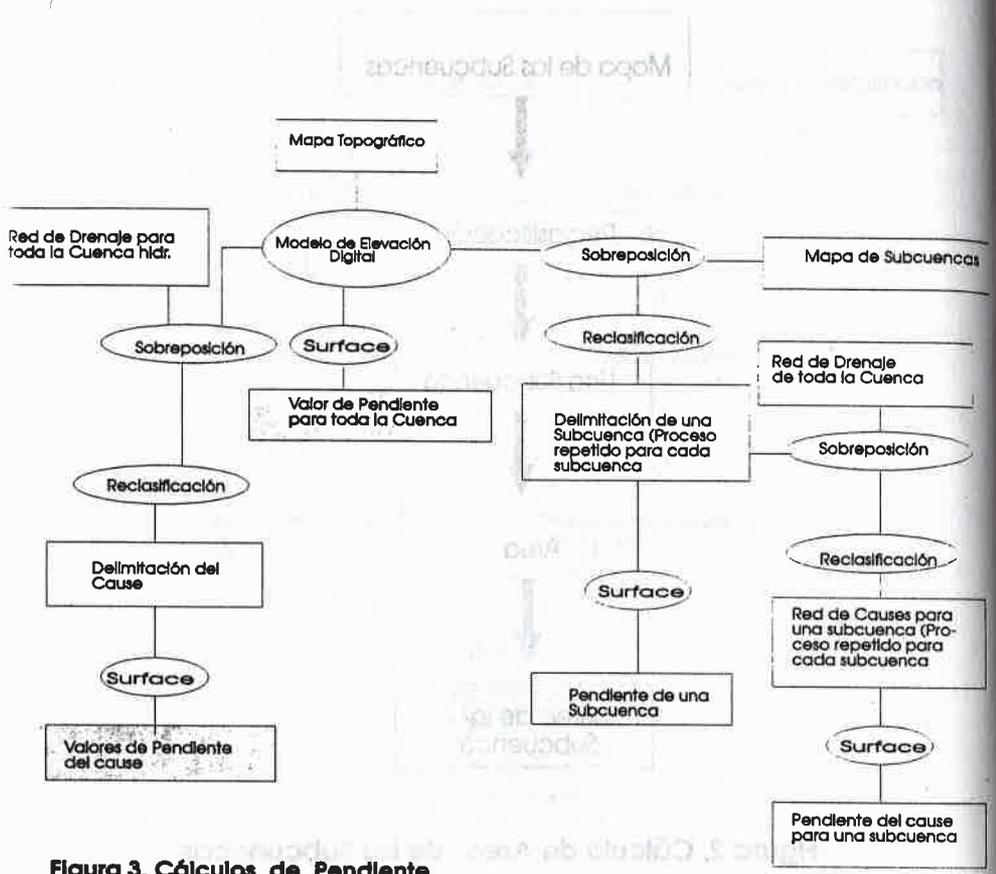


Figura 3, Cálculos de Pendiente

Para calcular la longitud total del cauce y la fracción del cauce ubicado en cada subunidad, los mapas de red de drenaje y de subunidades o subcuencas se superpusieron (ver Figura 4) y luego se aplicó el comando área.

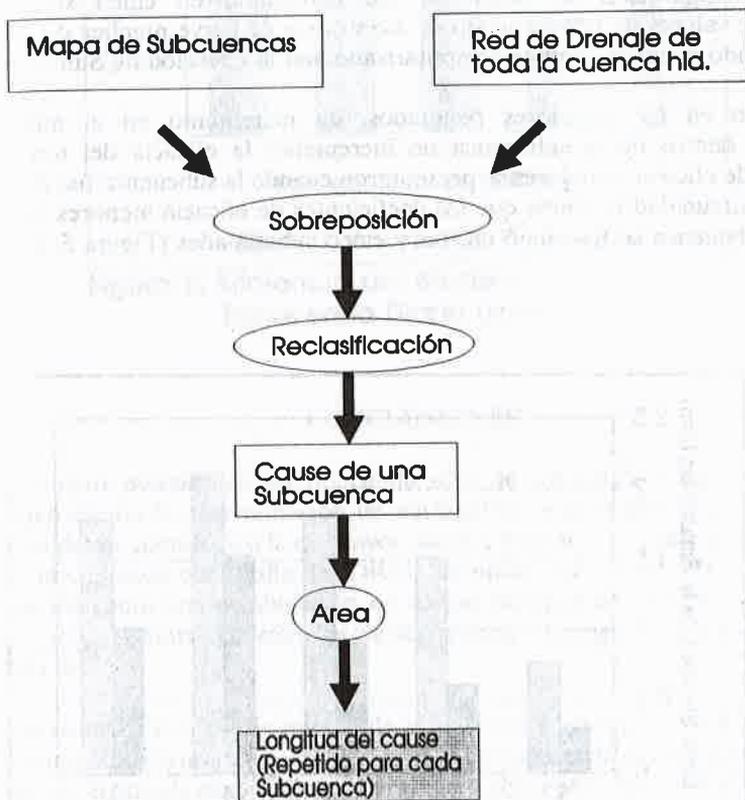


Figura 4, Cálculos de Longitud del Cause

RESULTADOS Y DISCUSION

En los seis años simulados 40 eventos de escorrentía fueron calculados. Utilizando el coeficiente de Nash y Sutcliffe (1970) fue evaluada la eficiencia del modelo, en el cual cuando los valores observados fueron iguales a los simulados es coeficiente es igual a 1. Así, para la configuración uno y dos, cuando la subcuenca fue delineada en una subunidad la eficiencia del modelo fue de 0.945 y 0.793 utilizando la curve number de la tabla y cuando se aplicó la ecuación de Simanton los índices fueron 0.989 y 0.958. Para la tercera configuración, cuando la subcuenca se fraccionó en dos subunidades la eficiencia del modelo fue 0.695 utilizando valores de la tabla y 0.913 con la ecuación de Simanton. En la cuarta configuración, la subcuenca fue dividida en tres subunidades, resultando un coeficiente de 0.558 cuando se usó el curve number de la tabla y 0.792 con la ecuación Simanton. Para la quinta configuración la subcuenca fue delimitada en cinco subunidades, obteniéndose valores de 0.695 cuando se uso valores de curve number de la tabla y 0.884 utilizando el curve number computarizado con la ecuación de Simanton.

Basado en los anteriores resultados, un incremento en el número de subunidades dentro de la subcuenca no incrementó la eficacia del modelo, los coeficientes de eficiencia mejores se presentaron cuando la subcuenca fue delimitada en una sola subunidad mientras que los coeficientes de eficacia menores resultaron cuando la subcuenca se fraccionó en tres y cinco subunidades (Figura 5, Eficiencia de Modelo).

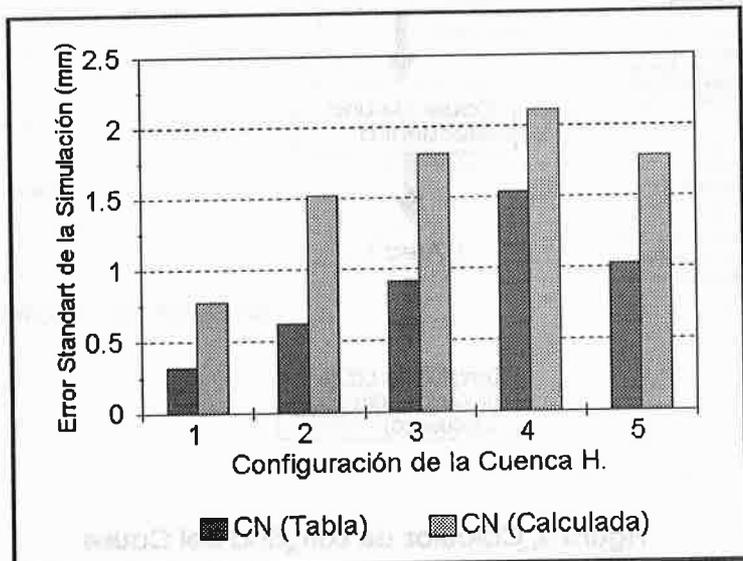


Figura 5. Error Standard de la Simulación Escorrentía Diaria (mm)

El error estándar de la simulación presenta igual comportamiento que el coeficiente de Nash y Sutcliffe, los valores del error standard fueron menores cuando la subcuenca se configuró en una subunidad y menor cuando se dividió en tres y cinco subcuencas (Figura 6, Error Estándar de la Simulación).

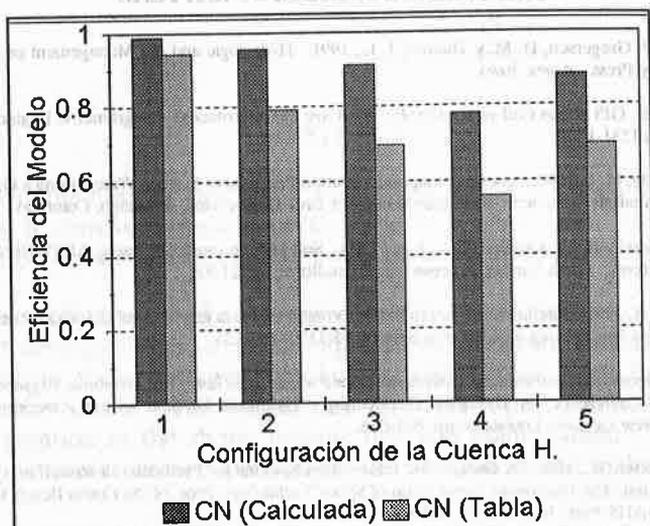


Figura 6. Eficiencia del Modelo Escorrentía Diaria (mm)

CONCLUSIONES

Resultan potenciales las aplicabilidades de los SIG's dentro del modelaje hidrológico siendo la determinación de parámetros la área más activa actualmente y el del modelaje hidrológico la de mayor alcance a futuro. En este estudio una base de datos manipulada por medio de IDRISI fue unida al modelo SWRRB, definiendo la subcuenca como una combinación de mapas de tipos de vegetación y de suelos, además que parámetros de cálculos de superficies y topográficos fueron calculados utilizando SIG.

De acuerdo a la configuración de la subcuenca, durante mucho tiempo se ha asumido que al aumentar el detalle de representación de la cuenca se incrementa la precisión de las predicciones, sin embargo este concepto varía con el tamaño de la cuenca. Así, se asume que en pequeñas cuencas hidrográficas con representaciones más detalladas las predicciones resultan con mayor precisión mientras que en cuencas grandes representaciones detalladas no producen predicciones más detalladas (Sasowsky y Gardner, 1991), este estudio tiende a contradecir el anterior argumento, donde el detalle en la configuración de la cuenca no aumenta la precisión de las predicciones. Dooge (1986) justifica estos resultados argumentando que los modelos

hidrológicos estandarizan procesos hidrológicos puntuales por lo cual la heterogeneidad espacial de las cuencas hidrográficas no son bien representadas por modelos que promedian parámetros.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Brooks, K., Folliot, P., Gregersen, H. M. y Thames, J. L., 1991. Hydrologic and the Management of Watersheds. Iowa State University Press. Ames, Iowa.
- Cowen, David J. 1988. GIS versus Cad versus DBMS: What are the differences? Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54 (11):1551-1556.
- Deliman, P. N. y Wolfe, M. L. 1990. Assessing Nonpoint Pollution Potential of Surface Waters using a GIS. En: Watershed Planning and Analysis in Action. American Society of Civil Engineering. Durango, Colorado. 325-331.
- De Roo, A. P. J., Hazelhoff, L., and Burrough, P.A. 1989. Soil erosion modelling using ANSWERS and geographical information systems. Earth Surface Processes and Landform 14:517-532.
- Ferris, J., y Colgaton R. 1989. Satellite and Geographic Information System estimates of Colorado River Basin snowpack. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 55(11):1069-1635.
- Fisher, G.T. 1989. Geographic Information System/watershed model Interface. En: Hydraulic Engineering. Proc. of the 1989 National Conference on Hydraulic Engineering. Hydraulic Division of the American Society of Civil Engineering. New Orleans, Louisiana. pp. 851-856.
- Gilliland, M. T., y Potter, W., 1986. A Geographic Information Systems for Prediction of Runoff and Non-point Source Pollution Potential. En: Hydrologic Application of Space Technology. Proc. of the Cocoa Beach Workshop, Florida, August 1985. IAHS Publ. No. 160, pp. 437-446.
- Hill, J. M. Singh, V. P. u Aminian, H. 1987. A computerized data base for floods prediction modelling. Water Resources Bulletin 23(1):21-27.
- Holvert, S. B. 1989. Development of a Geographic Information System based Hydrologic Model for Stormwater Management and Land Use Planning. University of Arizona, Tucson.
- Lee M. T., Kao J.-J., y Ke Y., 1990. Integration of GIS, Remote Sensing, and Digital Elevation Data for a Hydrologic model. En: Hydraulic Engineering. Proc. of the 1990 National Conference. Hydraulic Division of the American Society of Civil Engineering. Vol. 2, New York, New York. pp. 281-289.
- Maident, D. R. 1991. Introduction to Hydrologic Science Process Modeling. First International Conference/Workshops on integrating GIS & Environmental Modeling. Boulder, Colorado.
- Panuska, J.L. Moore, I.D. and Kramer, L.A., 1991. Terrain analysis: Integration into the agricultural nonpoint source (AGNPS) pollution model. Journal of Soil and Water Conservation January-February 1991. pp. 59-64.
- Servicio de Conservación de Suelos. 1972. National Engineering Handbooks, US Department of Agriculture, Section 4, Washington D.C.
- Silfer, A., Hassett, J. M., and Sutter, N.G. 1987. Hidrologic runoff modeling of small watersheds: The TINFLOW Model. En: Engineering Hidrology. Proc. of the 1987 National Conference on Engineering Hydrology. Williamsburg, Virginia. pp. 545-550.
- Warren, S. D., Diersing, V. E., Thompson, P. J., and Goran W. D. 1989. An Erosion-based Land Classification System for Military Installations. Environmental Management 13(2):251-257.
- White, D., 1989. Grid-based application of runoff curve number. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE 114(6):601-612.
- Wolfe, M. L., y Neale, C., 1988. Input data development for a distributed parameter hydrologic model (FESHM). Modeling Agricultural, Forest and Rangeland Hydrologic. American Society of Agricultural Engineering. Chicago Illinois. pp. 462-469.