



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE
INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

**PROGRAMA MANEJO INTEGRADO DE
RECURSOS NATURALES**

AREA DE MANEJO DE CUENCAS



PUBLICACIONES DEL PROYECTO RENARM/MANEJO DE CUENCAS

**MODELACION HIDROLOGICA E HIDRAULICA
PARA EL CONTROL DE INUNDACIONES
EN CENTROAMERICA**

CASOS RIO PURIRES Y TURRIALBA

**HERNAN SOLIS BOLAÑOS
RAFAEL OREAMUNO VEGA
WILLIAM MURILLO MONTERO
JOSE J. CHACON SOLANO**

**CATIE, TURRIALBA
DICIEMBRE, 1993**

El Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) es una asociación civil sin fines de lucro, de acción regional y de carácter científico y educacional. Fundado en 1973, su mandato se centra en el campo de las ciencias agropecuarias y de los recursos naturales, en beneficio de las regiones del trópico americano. Sus países miembros son Costa Rica (1973), Panamá (1975), Nicaragua (1978), Honduras y Guatemala (1979), República Dominicana (1983), El Salvador (1987), México y Venezuela (1992).

Esta publicación se realizó con el apoyo del Proyecto Manejo de Recursos Naturales y del Medio Ambiente (RENARM), componente Manejo de Cuencas, el cual es financiado por la Agencia Internacional para el Desarrollo de los Estados Unidos de América (USAID), a través de su Oficina Regional para Programas Centroamericanos (ROCAP).

AGRADECIMIENTO

Este trabajo se pudo realizar gracias al valioso y decidido apoyo técnico y/o financiero de las siguientes instituciones.

- *Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA)
Dirección de Ingeniería*
- *Ministerio de Planificación (MIDEPLAN)
Dirección de Proyectos, PL-480*
- *Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT)
Dirección General de Obras Portuarias y Fluviales
Departamento de Avalúos y Terrenos*
- *Junta Administrativa del Servicio Eléctrico de Cartago (JASEC)
Planificación de Obras*
- *Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)
Departamento de Estudios Básicos*
- *Comisión Nacional de Emergencias (CNE)*
- *Instituto Meteorológico Nacional*
- *Municipalidad de Turrialba*
- *Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)
Programa Manejo Integrado de Recursos Naturales
Proyecto ROCAP/RENARM/CUENCAS
Centro de Cómputo*

INDICE

INTRODUCCIÓN	
Problemática de las inundaciones en Centroamérica	5
Objetivos	6
METODOLOGÍA	
Modelación hidrológica	7
Modelación hidráulica	10
CASO RÍO PURIRES	
Introducción	13
Objetivo y alcance del estudio	14
Caracterización de la cuenca	14
Modelación hidrológica con HEC-1	17
Calibración del modelo en el río Navarro	17
Resultados de la calibración	21
Modelación en la cuenca del río Purires	22
Modelación hidráulica con HEC-2	25
Información de entrada	25
Generación de perfiles naturales	30
Diseño de diques	31
Acciones correctivas	31
Conclusiones y recomendaciones	34
Financiamiento requerido	36
CASO RÍO TURRIALBA	
Introducción	37
Objetivo y alcance del estudio	38
Caracterización de la cuenca	39
Modelación hidrológica con HEC-1	41
Calibración del modelo	41
Modelación para el evento extremo de diseño	46

Registro limnigráfico de la estación Turrialba	50
Modelación hidráulica con HEC-2	52
Condiciones hidráulicas iniciales	52
Conducta hidráulica del perfil natural	53
Diseño geométrico longitudinal y transversal del cauce	54
Diseño de espigones	55
Protección de taludes y de las pilas de los puentes	58
Plan de reubicación urbana	59
Conclusiones y recomendaciones	60
BIBLIOGRAFIA	63
ANEXOS	
A. Archivos de calibración del HEC-1	
B. Archivos de modelación hidrológica con HEC-1	
C. Archivos de modelación hidráulica con HEC-2	

INTRODUCCION

PROBLEMATICA DE LAS INUNDACIONES EN CENTROAMERICA

Centroamérica está localizada en una región de extrema inestabilidad geológica, como resultado de una continua actividad sísmica y volcánica, que provoca una topografía muy irregular, predominantemente montañosa. En efecto, las zonas planas ocupan aproximadamente un 25% en Nicaragua, Costa Rica y Panamá; un 18% en Guatemala y Honduras y un 5% en El Salvador (Leonard, 1985). Por otra parte, las altas intensidades y láminas de precipitación, que alcanzan 7500 mm, las fuertes pendientes, la fragilidad de muchos suelos, el uso conflictivo de la tierra -en frecuente contradicción con su uso potencial- y las prácticas agropecuarias inadecuadas, dificultan la sostenibilidad de la explotación de las zonas montañosas.

Una de las opciones para aliviar la creciente presión sobre las tierras en ladera es optimizar la productividad de las zonas planas, menos vulnerables a la degradación erosiva y más aptas para una intervención intensiva. Lamentablemente, Centroamérica, y en especial en la costa Atlántica, sufre el flagelo de periódicas y frecuentes inundaciones que afectan principalmente las zonas planas. Un ejemplo lo constituye el Valle de Sula, en Honduras, el cual es un pilar de la economía hondureña, pero víctima de constantes desbordamientos de los ríos Ulúa y Chamelecón. En 1974, el huracán Fifi azotó a varios países del istmo, provocando la muerte de más de 8000 personas y desplazando a más de 600 000 personas; sólo en Honduras provocó pérdidas económicas estimadas en \$100 millones. En general, se estima que las pérdidas anuales provocadas por las inundaciones del valle de Sula varían entre \$15 y \$35 millones (Corps, 1991).

Extrañamente, pese a que las inundaciones constituyen posiblemente el más perjudicial desastre natural del área, no se les ha dado la atención debida. Las oficinas encargadas de este problema se han caracterizado, en el pasado, por un débil apoyo institucional. Las soluciones empíricas, basadas en criterios profesionales desprovistos de suficiente información hidrológica e hidráulica, han intentado en forma aislada enfrentar problemas de una extraordinaria complejidad. Las formas tradicionales de solución han sido, por definición, incapaces de abordar satisfactoriamente este enorme reto.

La relativamente reciente aparición de los programas de computadora para la modelación hidrológica e hidráulica ha permitido dar un importante paso adelante en la solución de

la problemática de las inundaciones. Grandes volúmenes de información de precipitación, topografía, vegetación y suelos, pueden ser manejados en los complejos fenómenos involucrados durante las avenidas extremas de los ríos.

Los modelos HEC-1 (hidrológico) y HEC-2 (hidráulico) hicieron su aparición en 1968 y las versiones en microcomputadora en 1984. Estos modelos fueron creados por el Hydrologic Engineering Center (HEC), del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. En la actualidad estos y otros modelos son usados con éxito en los países desarrollados gracias a la excelente disponibilidad de información básica.

La introducción del uso de modelos en nuestra área ha sido frenada por el argumento de que no existe suficiente información de entrada. Este argumento es sólo parcialmente cierto. Algunas cuencas, especialmente las de interés hidroeléctrico, iniciaron en el pasado procesos de monitoreo que ya permiten disponer de registros adecuados, tanto espacial como temporalmente.

Tales consideraciones han servido de base para plantear la posibilidad de utilizar estos modelos para el control de inundaciones en cuencas del área centroamericana. Así, se aplicaron en dos casos en Costa Rica. Los resultados son los que aparecen en esta obra.

OBJETIVOS

- Evaluar la viabilidad de la utilización de los modelos hidrológicos e hidráulicos para el control de inundaciones en dos cuencas adecuadamente monitoreadas de Costa Rica, una en condiciones de flujo subcrítico y la otra con flujo supercrítico.
- Adaptar la metodología de obtención de los datos de entrada de los modelos a las condiciones de escasez de datos de la región.
- Utilizar la modelación como una herramienta de implementación, por primera vez en Centroamérica, y no solo de planificación; para esto se escogieron cuencas en las que instituciones públicas y empresas privadas estaban dispuestas a financiar la ejecución de las obras de control de inundaciones.
- Finalmente, se pretende promover el uso de los modelos en el ámbito centroamericano, para lo cual se planearon cursos regionales y proyectos de asistencia técnica a instituciones interesadas.

METODOLOGIA

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

La modelación hidrológica se define como la descripción matemática de la respuesta de una cuenca ante la ocurrencia de una serie de eventos de precipitación. Estos modelos permiten la generación sintética de hidrogramas en sitios en que no hay estaciones limnigráficas (Viessman *et al.*, 1989).

En las cuencas evaluadas, dado que se trata de eventos extremos de inundaciones y teniendo en cuenta la limitada disponibilidad de datos hidrometeorológicos, se decidió utilizar el modelo HEC-1. Este modelo es adecuado para lluvias de alta intensidad y corta duración, situación en que las consideraciones de humedad del suelo y evapotranspiración son secundarias y pueden ser despreciadas en el análisis (HEC-1, 1990).

Descripción del modelo HEC-1

El modelo hidrológico HEC-1 simula el escurrimiento superficial de una cuenca, producto de la precipitación, por medio de la representación de la cuenca como un sistema interconectado de componentes hidrológicos e hidráulicos: subcuencas, canales o ríos, embalses, sitios de desviación o descarga del caudal y estaciones de bombeo (HEC-1, 1990).

SUPOSICIONES Y LIMITACIONES

Las siguientes **suposiciones** deben ser tomadas en cuenta a la hora de pesar los resultados obtenidos con el HEC-1.

- Los parámetros que caracterizan los fenómenos hidrológicos sólo reflejan condiciones promedio, tanto de espacio como de tiempo.
- El área de estudio y el intervalo de tiempo escogidos deben tener una dimensión acorde con los parámetros utilizados.
- El modelo sólo genera resultados para un evento de precipitación, debido a que no considera las pérdidas de humedad durante períodos secos.

- Los resultados obtenidos se expresan en términos de caudal y no de altura.
- El tránsito de avenidas se basa en métodos hidrológicos (sólo utiliza la ecuación de continuidad). La confiabilidad de estos métodos disminuye en ríos de pendiente muy baja (ríos de llanura).
- El modelo HEC-1 considera como pérdidas en el proceso de precipitación todo fenómeno de interceptación, almacenamiento en depresiones, percolación e infiltración.

Existen dos **limitaciones** del modelo referidas al cálculo de las pérdidas de precipitación:

- Las tormentas que no producen escorrentía no las considera el modelo para el análisis.
- Las relaciones matemáticas para el cálculo de las pérdidas no toman en cuenta el efecto de la capacidad de almacenamiento del subsuelo.

MÉTODOS DE CÁLCULO DE PÉRDIDAS

Para el cálculo de las pérdidas por interceptación e infiltración existe la posibilidad de utilizar los siguientes métodos:

- *Razón de pérdida uniforme*
- *Razón de pérdida exponencial*
- *Razón de pérdidas de Holtan*
- *Número de curva del Servicio de Conservación de Suelos de los EEUU (SCS)*

De los métodos mencionados, el método más recomendable para el medio centroamericano es, a nuestro criterio, el método del SCS debido a que pueden realizarse estimaciones de las diferentes variables involucradas con base en la información disponible y visitas de campo (Solís et al., 1991).

La técnica del SCS se basa en las características de drenabilidad de varios grupos de suelos registrados. El sistema de clasificación de suelos relaciona el tipo de grupo de suelo con un número de curva en función de la cobertura vegetal del suelo, el modo de utilización del terreno y condiciones antecedentes de humedad.

ESTIMACIÓN DE LA ESCORRENTÍA

La técnica del hidrograma unitario se utiliza para determinar la escorrentía provocada por un determinado evento de precipitación. El modelo HEC-1 da la posibilidad de seleccionar entre los siguientes métodos de generación de hidrogramas unitarios:

- *Hidrograma unitario de Clark*
- *Hidrograma unitario de Snyder*
- *Hidrograma adimensional del SCS*

El hidrograma unitario adimensional del SCS se generó con base en hidrogramas unitarios calculados en cuencas de muy variadas condiciones climatológicas y de diferentes áreas de drenaje en los EEUU, siendo el resultado de la combinación de los mismos. Este hidrograma requiere de poca información de entrada que es posible generar con registros de precipitación y caudal de la cuenca de interés.

Para su uso es necesario conocer solamente el tiempo de respuesta existente entre el pico del hidrograma de escurrimiento y el centroide de la precipitación efectiva. El hidrograma unitario del SCS ha sido utilizado en los esfuerzos de modelación descritos en este estudio. Sin embargo se supone que el método de Clark podría dar resultados satisfactorios, por lo que se recomienda investigar comparativamente el uso de los hidrogramas unitarios del SCS y de Clark (Hoggan, 1989).

FLUJO BASE

El flujo base es producido por el escurrimiento de aguas subterráneas. El HEC-1 permite incluir el flujo base en el hidrograma como una función de tres variables: caudal inicial (STRTQ), caudal de inicio de la recesión (QRCSN) y tasa de abatimiento del caudal de recesión (RTIOR).

$$Q = Q_0 \cdot (RTIOR)^{-n\Delta t}$$

donde:

Q_0 = STRTQ para el flujo base inicial

Q_0 = QRCSN para el flujo base de recesión

$n\Delta$ = tiempo en horas desde el inicio de la recesión

TRÁNSITO DE AVENIDAS

El tránsito de avenidas se utiliza para simular el movimiento de la onda de flujo a lo largo de tramos del río o de embalses. El método de Muskingum es sencillo y permite hacer estimaciones razonables de las variables involucradas, aún cuando no hayan datos para la calibración del tránsito, como es habitual en nuestra región (Solís *et al.*, 1991).

Las variables utilizadas son:

AMSKK tiempo de viaje de la onda en horas

X factor de peso de Muskingum

NSTPS número de subdivisiones del tramo

CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración y verificación es la base esencial de la confiabilidad de los resultados de la modelación. Los hidrogramas calculados deben ser calibrados contra hidrogramas observados en estaciones limnigráficas. El modelo HEC-1 posee una poderosa herra-

mienta de calibración de algunas variables fundamentales, cuando se dispone de registros de precipitación y caudales, de eventos de una significativa magnitud. Utilizando esta técnica y regionalizando los resultados, se pueden estimar parámetros de precipitación/escorrentía para cuencas no calibradas.

MODELACION HIDRAULICA

La modelación hidráulica permite, a partir de caudales de entrada, analizar la conducta hidráulica de un río, en condiciones de funcionamiento normal o extremo dando información sobre el nivel del agua, profundidad, velocidad, zonas de desbordamiento, etc. De este modo se puede, por ejemplo, prever cuales sectores del río son incapaces de transportar de manera segura el caudal producido por eventos extremos de precipitación y escurrimiento y tomar las medidas de prevención correspondientes. Permite a su vez analizar las características energéticas del torrente, lo cual está asociado a su capacidad de socavación.

Descripción del modelo HEC-2

El modelo HEC-2 fue desarrollado para calcular el perfil del agua para canales artificiales o ríos. Se pueden calcular perfiles tanto para flujo supercrítico como subcrítico. En el caso de flujo subcrítico, los cálculos se inician en la sección inferior y se procede hacia aguas arriba. Lo contrario procede para el caso de flujo supercrítico. El modelo no permite el cambio de régimen de flujo en un perfil. En el caso en que el flujo de un régimen de flujo a otro, es necesario calcular el perfil en ambos regímenes en forma alternativa, y combinar las soluciones obtenidas. HEC-2 permite además considerar el efecto de diversas obstrucciones en el cauce, tales como puentes, vertederos y alcantarillados (HEC-2, 1991).

El modelo ha sido usado para:

- Determinar las áreas inundables para los caudales correspondientes a diferentes períodos de retorno.
- Estudiar el efecto de cambio de uso de la tierra en el riesgo de inundaciones.
- Estimar la mitigación de los daños por inundación, por medio de mejoras en la geometría del cauce.
- Analizar la capacidad hidráulica de los puentes.

SUPOSICIONES Y LIMITACIONES

El HEC-2 está orientado a calcular curvas de flujo gradualmente variado en flujo permanente, en canales naturales y artificiales. El programa tiene las siguientes limitaciones:

- No se considera el flujo no permanente.
- No se analiza el flujo rápidamente variado.
- Al considerarse flujo unidimensional, no se consideran los componentes transversales de la velocidad del agua.
- La pendiente del río debe ser menor del 10%.
- El programa no tiene la capacidad de considerar fronteras movibles.

BASES TEÓRICAS DE ANÁLISIS

Las ecuaciones de continuidad, Bernoulli y de pérdidas lineales y locales constituyen un sistema implícito, el cual es resuelto por el método iterativo del paso standard. Una vez realizado el análisis de la situación hidráulica vigente se puede modificar la capacidad de transporte del río por medio de opción de mejoramiento de canal. HEC-2 permite la modificación de la línea central del canal, la elevación del fondo, los taludes laterales, el ancho de la plantilla y los valores de n de Manning, hasta obtenerse la solución técnica y económicamente óptima.

INFORMACIÓN DE ENTRADA

El mayor esfuerzo en la modelación con HEC-2 se concentra en la obtención de los datos de entrada. Esta información incluye: régimen de flujo, elevación inicial, caudal, coeficientes de pérdidas, geometría longitudinal y transversal del cauce.

- *Régimen de flujo.* Los cálculos se inician en una sección transversal en la que se conoce o asume la altura del agua. Si el flujo es subcrítico se procede hacia aguas arriba; si es supercrítico, se procede hacia aguas abajo.
- *Elevación inicial.* La elevación inicial puede ser especificada por la profundidad crítica, una altura conocida, el método de área-pendiente, o una curva de caudal versus altura.
- *Caudal.* El caudal es generado por medio del modelo HEC-1 y puede ser cambiado en cualquier sección. HEC-2 permite la utilización de diferentes caudales para la obtención de perfiles múltiples. Esta opción facilita la identificación de los caudales críticos, o sea, aquellos caudales que provocan inundaciones.
- *Coefficiente de pérdidas de energía.* Se utilizan los siguientes tipos de coeficientes de pérdidas: valores n de Manning para el cauce principal y las planicies de inundación; coeficientes C de expansión o contracción, y coeficientes de pérdidas en puentes para pilas, vertederos o flujo a presión.
- *Geometría longitudinal y transversal del cauce.* Es necesaria una descripción detallada de las características geométricas del cauce, por medio de un levantamiento topográfico longitudinal y transversal. Se requiere levantar la sección

transversal en cada sitio en que se presentan cambios geométricos o hidráulicos del cauce. Las obstrucciones, tales como puentes, deben ser levantadas con precisión. Asimismo es necesario considerar los cambios de rugosidad, pendiente o caudal. El levantamiento no solo debe considerar el cauce principal, sino también las planicies de inundación.

Los datos se deben orientar hacia aguas abajo, ya que el programa considera que la información es provista de margen izquierda a margen derecha.

INFORMACIÓN DE SALIDA

EL HEC-2 provee la siguiente información de salida:

- Impresión de los datos de entrada.
- Distribución de caudales en las planicies de inundación izquierda y derecha, y el canal principal.
- Perfiles longitudinales indicando profundidad normal, profundidad crítica, línea energética, fondo del río, elevación de los bancos izquierdo y derecho, elevación más baja de las estaciones finales.
- Secciones transversales en cualquiera o en todas las estaciones, mostrando el nivel de agua y el nivel energético.
- Resumen de resultados. En esta tabla se indican diferentes variables geométricas e hidráulicas, tales como número de sección, elevación del fondo, elevación del agua, pendiente, velocidad, caudal, etc. El usuario puede diseñar tablas de salida de resultados, de acuerdo a su interés particular. Para ello dispone de una amplia gama de variables a escoger.