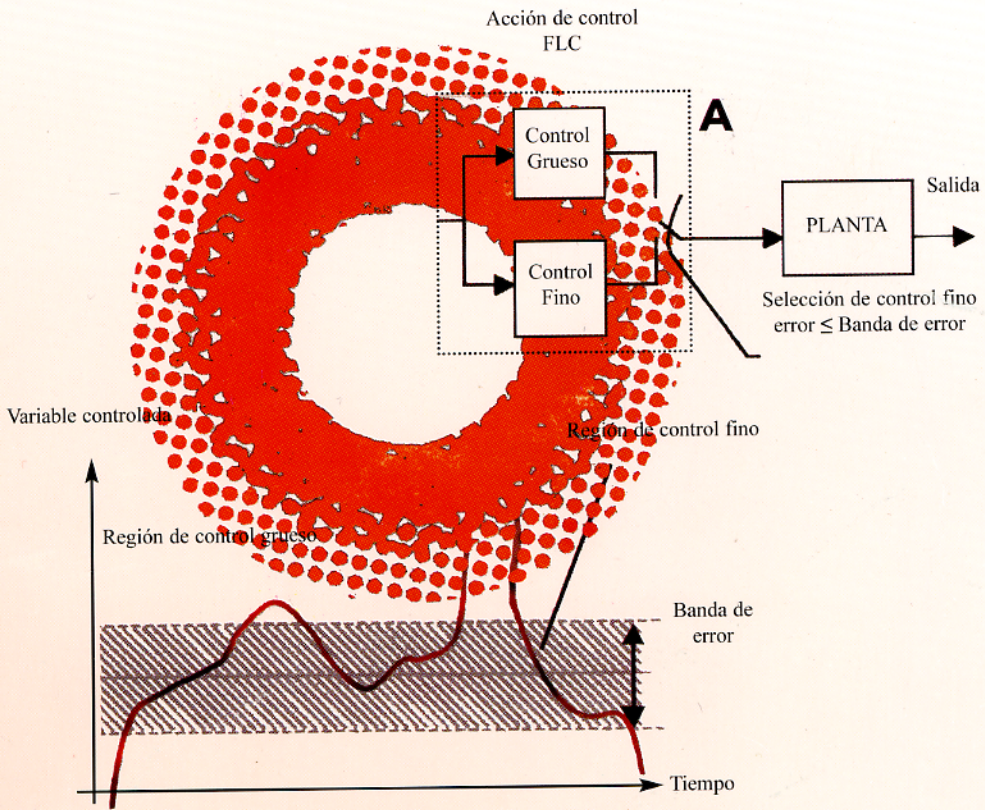


Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
Enero/Diciembre 1999 VOLUMEN 9 Nos. 1 y 2



INGENIERIA

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica
Volumen 9, Enero/Diciembre 1999 Números 1 y 2

DIRECTOR

Rodolfo Herrera J.

CONSEJO EDITORIAL

Víctor Hugo Chacón P.

Ismael Mazón G.

Domingo Riggioni C.

CORRESPONDENCIA Y SUSCRIPCIONES

Editorial de la Universidad de Costa Rica
Apartado Postal 75
2060 Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
San José, Costa Rica

CANJES

Universidad de Costa Rica
Sistema de Bibliotecas, Documentación e Información
Unidad de Selección y Aquisiciones-CANJE
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
San José, Costa Rica

Suscripción anual:

Costa Rica: ₡ 1 000,00

Otros países: US \$ 30,00

Número suelto:

Costa Rica: ₡ 750,00

Otros países: \$ 20,00



EVALUACIÓN Y SOLUCIÓN DE ÁREAS INUNDABLES EN SAN ANTONIO DE BELÉN, USANDO MODELOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS.

Hernán Solís B.¹
Pablo Calderón V.²

Resumen

Las inundaciones son fenómenos naturales que presentan una mezcla compleja de perjuicios y beneficios. El problema de las inundaciones surge cuando el hombre, por ignorancia o imprudencia, irrespeta las leyes naturales que rigen estos fenómenos. La ocupación de las planicies de inundación y/o la construcción de obras hidráulicas diseñadas inadecuadamente provocan daños económicos y para la vida humana, que a veces pueden ser catastróficos. Las soluciones son estructurales y no estructurales. Ambos tipos de soluciones deben basarse en una adecuada comprensión de los fenómenos hidrológicos e hidráulicos involucrados. Frecuentemente estos problemas son atacados con métodos simplificados, que dan respuestas insuficientes e incluso erróneas. En este artículo se presenta un caso de análisis de la ciudad de San Antonio de Belén, expuesta a inundaciones, utilizando los modelos de computación hidrológicos (HEC-1) e hidráulicos (HEC-2) de mayor difusión mundial. Su utilización permite una precisa identificación de las zonas de riesgo y el diseño geométrico de las soluciones hidráulicas. Recientemente estos modelos han evolucionado hacia los modelos HEC-HMS y HEC-RAS respectivamente, los cuales deberían usarse en el futuro. Se espera que esta publicación contribuya a la difusión de estos modelos y de esta manera, disminuir nuestro retraso tecnológico en esta área, de modo que los políticos e ingenieros puedan enfrentar esta problemática con mayor éxito.

Summary

Floods happen naturally, even in a beneficial way. Floods become a major problem when people do not respect natural laws that control these phenomena, because of ignorance or recklessness. Floodplain occupation and/or inappropriate design of hydraulic works may provoke economical and human loss, sometimes catastrophic. Solutions may be structural or nonstructural. Both types of solutions must be based on a sound understanding of the hydrologic and hydraulic issues involved. Frequently, these problems are dealt with simple methods, leading to inaccurate or wrong solutions. In this paper the case of San Antonio de Belén, a flood prone city, is considered, using the most widely used hydrologic (HEC-1) and hydraulic models (HEC-2). Their use allows an accurate identification of risk areas, and geometrical design of engineering solutions. These models have recently evolved towards HEC-HMS and HEC-RAS, which should be used in the near future. It is expected that this paper will contribute to a wider use of water models and so increase the technological capacity in this area, so that the politicians and engineers could face these problems with more success.

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son un fenómeno natural en el ciclo hidrológico de una cuenca. Su función es fundamental en diversos procesos de renovación de los ecosistemas. En efecto, suelos muy fértiles y con gran facilidad de aprovechamiento agrícola se ubican en las planicies de inundación de los ríos (Cunningham, 1999). Por otra parte, las inundaciones tienen efectos positivos en el control de plagas, al producir una eliminación

masiva de roedores, insectos y otros organismos patógenos. Su función es importante también en el proceso de lixiviación de sales acumuladas en la superficie de los terrenos o en la zona radical de los cultivos, debido al proceso de la evapotranspiración.

Las inundaciones se transforman en una amenaza cuando las actividades humanas ignoran las leyes naturales de la ocurrencia de las mismas, procediendo a construir viviendas

¹ Ing., Dr., Prof., Esc. Ing. Agrícola y Civil. Univ. de Costa Rica.

² Ing. Agrícola.

de alto riesgo en las planicies de inundación, irrespetando el uso adecuado del suelo, levantando puentes con una sección hidráulica insuficiente o en bancos erosionables, desarrollando importantes proyectos agrícolas o industriales en zonas inundables (Esquivel et al. 1993). La vulnerabilidad de nuestros países es muy grande, en especial, por la debilidad de los programas de diagnóstico y de prevención. Las leyes son desactualizadas, y frecuentemente ignoradas, no sólo por los empresarios sino también por los organismos estatales cuyo derecho y obligación debería ser la implementación de esas leyes para reducir los niveles de riesgo. La presión ejercida por estratos sociales de bajo nivel, constituye un reto difícil de abordar, y la solución debe incorporar el criterio sociológico. La capacidad del estado es insuficiente en el manejo de las inundaciones, pese a los esfuerzos realizados (CNE, 1993). Las oficinas encargadas de este manejo no tienen la suficiente capacidad financiera, técnica, ni humana para enfrentar un problema que es particularmente grave en nuestro país, dadas sus características geomorfológicas accidentadas, sus condiciones meteorológicas caracterizadas por precipitación de muy alta intensidad e influencia de huracanes, sumada a la deforestación masiva de sus cuencas, lo cual incrementa el escurrimiento superficial.

El manejo de las inundaciones debe basarse en tres premisas fundamentales (Solís, 1999):

- Reducción del nivel de la amenaza.
- Reducción del nivel de vulnerabilidad.
- Mayor capacidad de respuesta de las comunidades e instituciones involucradas.

La inadecuada solución a este problema se debe a varias causas:

- Insuficiencia de datos básicos de precipitación y caudales. Tal información se obtiene principalmente en las cuencas de interés hidroeléctrico, manejadas por el ICE. Si una cuenca hidroeléctrica tiene problemas de inundación se trata de una

coincidencia que puede ser aprovechada, pero en muchos casos esta situación no se da.

- Utilización de tecnologías simplificadas que no pueden describir una problemática tan compleja. Existen modelos sofisticados, de uso común en los países desarrollados, que no son utilizados regularmente por los profesionales encargados de este sector. La ausencia de programas de capacitación de los profesionales debe ser corregida a la brevedad posible.
- La solución a este problema se ve obstruida por una serie de problemas oficiales de distinta índole:
 - Políticas gubernamentales, que dan una atención limitada a este problema
 - Financieros pues se designan recursos insuficientes para enfrentar esta amenaza.
 - Legales, que limitan la potestad de la Comisión Nacional de Emergencias a emplear recursos en proyectos de prevención.

En este trabajo se pretende considerar los aspectos siguientes:

- Reducción del nivel de amenaza al analizar los factores cuya modificación conduciría a la reducción de los caudales que provocan inundaciones.
- Reducción del nivel de vulnerabilidad del país al definir los sitios de mayor riesgo y fortalecer un mecanismo para evitar que se realicen proyectos de desarrollo en esas áreas.
- Incrementar la capacidad de respuesta al desarrollarse obras de ingeniería que eleven el nivel de protección de los centros de producción y habitación.

Una de las deficiencias más notorias del manejo de la problemática de las inundaciones es el desconocimiento de la conducta hidrológica e hidráulica de las cuencas amenazadas, lo cual debe cambiar por medio

de estudios con herramientas de gran capacidad de análisis, como lo son los modelos hidrológicos e hidráulicos. La utilización de estos modelos, en estudios como el presente, y su difusión, contribuirán a su popularización, de modo que los profesionales de ingeniería los utilicen cada vez más, hasta convertirse en herramientas usuales, que sustituyan a los métodos simplistas utilizados en la actualidad, como son el método racional en diseños hidrológicos, o la aplicación de la ecuación de Manning, para el cálculo del flujo uniforme o gradualmente variado en secciones prismáticas, para diseños hidráulicos. Los ríos tienen secciones totalmente irregulares que requieren metodologías especiales. Como ilustración se presenta la situación de San Antonio de Belén, con severos problemas de inundaciones pese a pertenecer a una pequeña cuenca.

2. PROBLEMÁTICA DE SAN ANTONIO DE BELÉN

San Antonio de Belén está ubicado en la provincia de Heredia, en la parte baja de la subcuenca de la Quebrada Seca, cuyas coordenadas son $9^{\circ}58'$ - $10^{\circ}04'$ de latitud norte y $84^{\circ}05'$ - $84^{\circ}12.5'$ de longitud oeste. Esta microcuenca pertenece a la cuenca del río Bermúdez, afluente a su vez del río Grande de Tárcoles. En esta ciudad se han venido produciendo inundaciones durante la estación lluviosa, lo cual afecta a zonas urbanas colindantes con el río. Esta cuenca está densamente urbanizada, pues incluye sectores de las ciudades de San Rafael, San Joaquín de Flores, Barva, Heredia, y otras comunidades menores, además de San Antonio de Belén. Este proceso de urbanización produce una sustancial impermeabilización de la cuenca, que provoca un incremento de los volúmenes y caudales de escurrimiento. Por otra parte, hay una invasión masiva de las planicies de inundación, con proyectos urbanísticos, industriales y comerciales. En consecuencia, las inundaciones provocadas producen suficientes daños como para tomar medidas urgentes (Marín, 1991).

Estas medidas son de tipo estructural y no estructural. Estas últimas sugieren planificar el desarrollo urbano, de acuerdo a criterios técnicos, y por consiguiente tomar las medidas administrativas y legales para que esa planificación se convierta en una realidad. La solución de los problemas de inundaciones no compete solamente a la ingeniería, sino también al ordenamiento territorial. A continuación se tratará principalmente las soluciones estructurales o de ingeniería.

3. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

3.1 ESTRATEGIAS DE CALIBRACIÓN

En el caso de disponer de suficiente información hidrometeorológica en la cuenca de estudio, se procede a la modelación de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Se calibra la cuenca para eventos extraordinarios, los cuales disponen de información acerca de la distribución espacial y temporal de la lluvia, además de hidrogramas. A raíz de esta calibración se dispone de parámetros ajustados de infiltración (abstracción inicial y número de curva del método del Servicio de Conservación de Suelos) y de la ecuación del tiempo de desfase. También se obtiene información sobre parámetros unitarios de flujo base.
- Se realiza un análisis estadístico de la información sobre precipitación, y se selecciona la lámina de lluvia correspondiente al periodo de retorno escogido, esto de acuerdo a la importancia de las edificaciones y cultivos existentes, y al riesgo de pérdida de vidas humanas.
- Se procede a modelar la cuenca, dividiéndola en varias subcuencas para obtener una información detallada del caudal a lo largo del río, y de la forma en que evoluciona utilizando un método de tránsito de avenidas, usualmente el método de Muskingum (Chow, 1988)

Este procedimiento ha sido utilizado en Costa Rica para la cuenca del río Turrialba (Solís et al., 1992) y Panamá (Solís et al., 1995).

Tal como se indicó previamente, no todas las cuencas cuentan con la suficiente información básica que necesitan para aplicar directamente los modelos matemáticos hidrológicos computarizados disponibles. El Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos ha diseñado la siguiente estrategia (HEC, 1982):

- Calibración de una cuenca cercana, con suficiente información hidrometeorológica y de naturaleza geomorfológica e hidrometeorológica semejante a la cuenca de interés.
- Regionalización de los parámetros principales del modelo, especialmente los relativos a la infiltración, a la abstracción inicial y al tiempo de desfase.
- Modelación hidrológica de la cuenca de interés con los parámetros regionalizados.

Esta estrategia fue adoptada para la cuenca del río Purires, en Cartago (Solís et al., 1991).

Debido a la ausencia total de información hidrometeorológica dentro de la cuenca de la Quebrada Seca, se hizo necesario seleccionar una cuenca cercana de características similares del punto de vista climático y geomorfológico. La cuenca escogida fue la del río Poás, que cuenta con un limnógrafo en la estación Tacares y un pluviómetro, la estación El Descanso, No. 84103. La cuenca del río Poás tiene un área de 201.5 km². La estación pluviográfica más cercana a estas cuencas es la del Aeropuerto Juan Santamaría.

3.2 CALIBRACIÓN DEL RÍO POÁS

Para la calibración del modelo hidrológico en la cuenca del río Poás, para el evento del 11 de octubre de 1983, se utilizó (Calderón, 1999):

- El hietograma de la estación Aeropuerto, para la distribución temporal de la lluvia

- La precipitación medida en las estaciones Aeropuerto y el Descanso, para la distribución espacial de la lluvia. Utilizando los polígonos de Thiessen se obtiene un coeficiente de 0.51 para la estación Aeropuerto y 0.49 para la estación el Descanso.
- El hidrograma de la estación Tacares en el que se midió un caudal máximo de 143 m³/s.

La utilización del hietograma del Aeropuerto dio resultados inaceptables, al no lograrse una aproximación del caudal máximo utilizando valores de número de curva y abstracción inicial razonables para las condiciones de uso de la tierra y tipo hidrológico del suelo de la cuenca. En la Tabla No. 1 se presenta el archivo de entrada de la calibración del río Poás usando el hietograma del Aeropuerto. El inadecuado ajuste de los hidrogramas modelados y observados es debido a la pobre densidad de la red pluviométrica, de modo que el evento de precipitación fue obviamente subevaluado. En consecuencia, los caudales modelados son muy inferiores a los medidos. Los resultados obtenidos son los siguientes:

- Caudal máximo modelado de 49 m³/s, caudal máximo observado de 143 m³/s.
- Caudal medio modelado de 33 m³/s, caudal medio observado de 67 m³/s.

Tanto en esta situación como en el caso contrario en que el evento de precipitación es sobrevalorado, la calibración genera resultados poco realistas, y debe ser descartada.

Los resultados anteriores condujeron a la necesidad de escoger los valores de número de curva (CN) y abstracción inicial (IA), relativos a la capacidad de infiltración de la cuenca, para la modelación, a partir de recomendaciones de la literatura (Hoggan, 1989). Por otra parte, se utilizaron los valores medidos en el limnógrafo de Tacares, para derivar los parámetros relativos al caudal base:

3.3 OBTENCIÓN DE LÁMINA DE PRECIPITACIÓN

Para calcular la lámina de precipitación utilizada en la modelación de la Quebrada Seca, se procedió a realizar un análisis estadístico utilizando la función de distribución de probabilidad de Tipo Valor Extremo I (Gumbel), de la precipitación máxima diaria de la estación Aeropuerto (Chow, 1988), como se muestra en la Tabla No. 2.

TABLA No. 2
REGISTRO DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA DIARIA ANUAL
ESTACIÓN AEROPUERTO

DATO	AÑO	PRECIPITACIÓN (mm)	DATO	AÑO	PRECIPITACIÓN (mm)
1	1956	60	22	1977	74.8
2	1957	70.6	23	1978	76.2
3	1958	47.4	24	1979	119.4
4	1959	51.4	25	1980	56.3
5	1960	105.1	26	1981	86.5
6	1961	109.3	27	1982	82.6
7	1962	61.9	28	1983	77
8	1963	86.2	29	1984	67.6
9	1964	60.2	30	1985	75.9
10	1965	64.2	31	1986	83.8
11	1966	54.6	32	1987	66.3
12	1967	56.6	33	1988	79.7
13	1968	90.5	34	1989	72.3
14	1969	112.3	35	1990	62.5
15	1970	64.5	36	1991	56.9
16	1971	66.2	37	1992	57.3
17	1972	66.5	38	1993	65.3
18	1973	87.4	39	1994	57.5
19	1974	86.4	40	1995	71.6
20	1975	73.5	41	1996	138.9
21	1976	65.7	42	1997	106.6

Media = 75.61 mm

Desviación standard = 19.96 mm

Factor de frecuencia para un período de retorno de 25 años = 2.045

Lámina de precipitación para un período de retorno de 25 años = 116 mm

3.4 MODELACIÓN DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA SECA

Con la información obtenida anteriormente se procedió a modelar la cuenca de la Quebrada Seca. En la Tabla No. 3 se presenta el archivo de entrada (HEC, 1990). Se estimó un área impermeable del 15 %. Esta modelación condujo al resultado de un caudal máximo de 79.54 m³/s que se redondea a 80 m³/s.

Este caudal se utiliza en la modelación hidráulica de la Quebrada, a su paso por la ciudad de San Antonio.

TABLA No. 3
ARCHIVO DE ENTRADA DE MODELACIÓN DE QUEBRADA SECA

ID	SIMULACIÓN DE LA QUEBRADA SECA PARA UN PERÍODO DE 25 AÑOS									
ID	LIMNÍGRAFO TACARES DEL 11 DE OCTUBRE DE 1983									
ID	PLUVIÓMETRO Y PLUVIÓGRAFO DE ESTACION AEROPUERTO									
IT	12	11OCT83	1300	75						
IO	2	2								
IM										
IN	60	11OCT83	1300							
PG	AEROP	101.8								
PI	4.3	1.2	0.7	3	1.9	3.2	2.4	3.5	0.6	
KK	SECA									
BA	17.7									
BF	-1.48	-2.92	1.15							
PT	AEROP									
PW	1									
PR	AEROP									
PW	1									
LS	22	70	15							
ZZ										

4. MODELACIÓN HIDRÁULICA

4.1 INFORMACIÓN DE ENTRADA

Para realizar la modelación hidráulica se requiere de:

- Caudal que se toma de la modelación hidrológica.
- Estimación de la rugosidad, con base en las visitas de campo, para escoger los coeficientes de Manning para el cauce principal y las planicies de inundación.
- Levantamiento topográfico de secciones transversales y el perfil longitudinal del río, de tal manera que la geometría de este último sea detalladamente descrita, tomando en cuenta las curvas horizontales

y verticales, cambios de pendiente, invasión de planicies de inundación, cambios de rugosidad del cauce y presencia de estructuras tales como puentes (Petersen, 1986). En los puentes se requiere información más detallada de la geometría de la estructura. Esta información fue suministrada por la Municipalidad de San Antonio de Belén. Se detectó un serio problema de invasión de las construcciones en las planicies de inundación e incluso en los mismos taludes del cauce principal. Esta condición reduce significativamente la gama de posibles soluciones a los problemas existentes. Se tomaron 31 secciones transversales (Figura No. 1 y Tabla No. 4).

TABLA No. 4
ESTACIONAMIENTO DE LAS SECCIONES TRANSVERALES

No. DE ESTACIÓN	ESTACIONAMIENTO (metros)	ESTRUCTURA
1	0-015	
2	0+000	PUENTE
3	0+165	
4	0+330	
5	0+350	PUENTE
6	0+435	
7	0+470	
8	0+490	
9	0+570	
10	0+646	
11	0+765	
12	0+857	
13	0+985	
14	1+105	
15	1+175	
16	1+218	
17	1+250	
18	1+418	
19	1+430	PUENTE
20	1+460	
21	1+544	PUENTE
22	1+551	
23	1+613	
24	1+650	
25	1+790	
26	1+840	
27	1+890	
28	1+962	
29	1+970	PUENTE
30	2+032	
31	2+115	

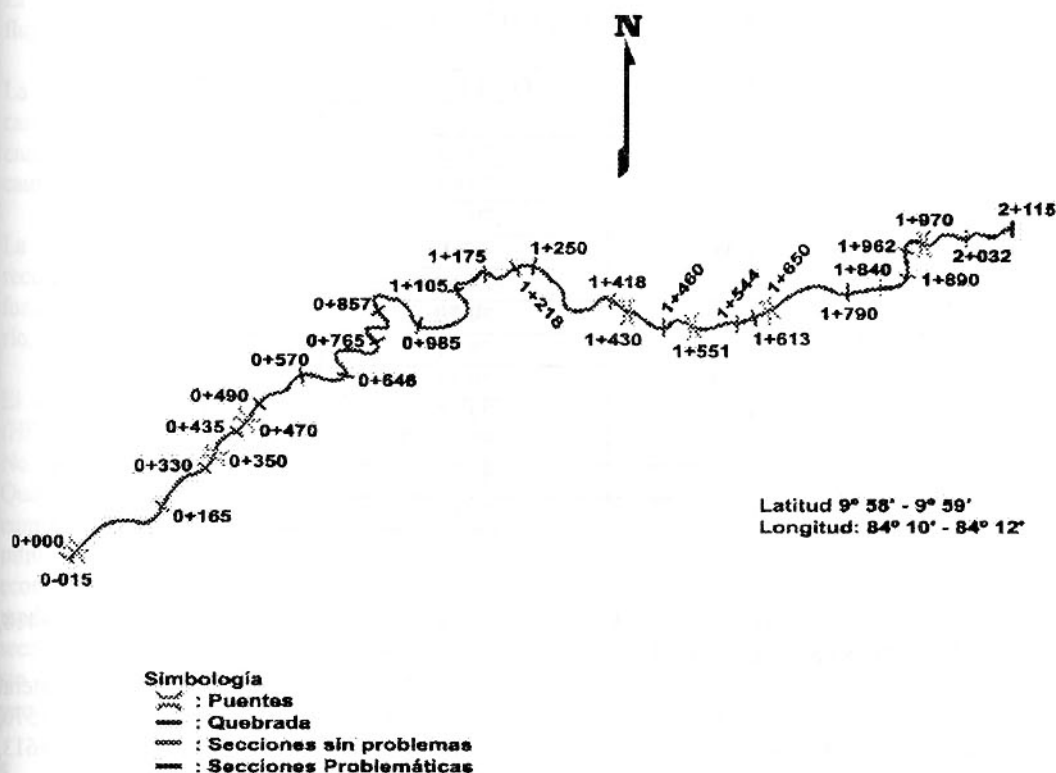


Figura No. 1 Secciones Transversales de la Quebrada Seca

4.2 MODELACIÓN DE LA CONDICIÓN ACTUAL DEL RÍO.

El archivo de entrada del modelo hidráulico (HEC, 1990) se puede encontrar en Solís (1999), para las condiciones actuales de la Quebrada Seca, y el caudal correspondiente a un período de retorno de 25 años. En la Tabla No. 5 se presentan las secciones que presentan desbordamientos: 0+435, 0+490, 0+570, 0+646, 0+765, 0+857, 0+985, 1+105, 1+1175, 1+218, 1+250, 1+613 y 2+115.

Los desbordamientos se presentan en la margen derecha, la izquierda o ambas. Para la interpretación de la Tabla No. 5 se explica el significado de las siguientes variables de salida del modelo (HEC, 1990):

- SECNO: Estacionamiento de la sección transversal.
- QLOB: Caudal desbordado en la planicie izquierda.
- QCH: Caudal en el canal principal.
- QROB: Caudal desbordado en la planicie derecha.

TABLA No. 5
CONDUCTA HIDRÁULICA DEL CAUCE ACTUAL

SECNO	QLOB (m ³ /s)	QCH (m ³ /s)	QROB (m ³ /s)
0+435	0	77.33	2.67
0+490	0	79.79	0.21
0+570	0.92	79.08	0
0+646	0.15	79.85	0
0+765	1.08	77.7	1.22
0+857	0.69	75.88	3.44
0+985	0.21	79.79	0
1+105	1.29	78.71	0
1+175	0.49	79.51	0
1+218	1.28	77.22	1.50
1+250	2.94	77.06	0
1+613	0.36	79.64	0
2+115	0.02	79.98	0

4.3 MODELACIÓN DE LAS MODIFICACIONES DEL CAUCE.

La detección de trece secciones transversales con problemas de desbordamiento, de las cuales ocho en la margen izquierda, dos en la margen derecha y tres en ambas márgenes, hace necesaria la modificación de dichas secciones para evitar los desbordamientos. La presencia de casas en la cercanía del cauce limita drásticamente las posibilidades de corrección. Sin embargo, se buscaron soluciones que no obligaran a la remoción de construcciones actuales.

A continuación se presentan las medidas recomendadas y las secciones para las cuales se aplican (algunas secciones requieren diferentes medidas combinadas):

- Propuesta de mantenimiento permanente de limpieza del cauce de basuras, troncos y piedras (todo el tramo analizado del río).
- Ampliación del ancho del fondo del canal principal en las secciones problemáticas, en las que la invasión de las planicies de inundación lo hiciera factible, al menos en una margen (0+015, 0+165, 0+435, 0+490, 0+570, 0+646, 0+765, 0+857,

1+105, 1+175, 1+218, 1+250, 1+418, 1+460, 1+613, 1+790, 2+115).

- Reducción de la pendiente del talud lateral del cauce (0+165, 0+435, 0+490, 0+570, 0+646, 1+105, 1+175, 1+218, 1+613, 1+790, 2+115).
- Levantamiento de diques en sitios en que la ampliación del cauce es imposible sin desalojo de viviendas (0+435, 1+790).
- Excavación del fondo del canal, cuando otras soluciones son muy difíciles o insuficientes (0+000, 0+330, 0+985).
- Reducción de la rugosidad introduciendo muros de concreto en sitios en que otras soluciones eran muy difíciles o insuficientes (1+460, 1+613).

Como se puede observar la solución más frecuente es la de ampliar el fondo del canal y la pendiente de los taludes laterales, para aumentar el área del flujo en el canal principal, que tiene un coeficiente de Manning menor, lo cual conduce a mayores velocidades del agua, y mayor eficiencia en la conducción de la misma. Además esta medida mantiene la pendiente del cauce, lo que significa que no se altera el gradiente topográfico, lo cual contribuye a mantener el equilibrio energético.

El levantamiento de diques aumenta el área de flujo y reduce la rugosidad del canal principal.

La excavación del fondo aumenta el área del canal principal, pero altera el balance energético, lo cual debe ser manejado con cautela, y limitarlo al máximo.

La reducción de la rugosidad introduciendo recubrimiento de concreto de las paredes y fondo, aumenta la eficiencia de transporte del río.

El archivo de entrada del modelo hidráulico (HEC, 1990) se puede encontrar en el Anexo No. 2, para las condiciones modificadas de la Quebrada Seca. Estas modificaciones deben cumplir con los requisitos hidráulicos mínimos, pero a su vez deben ser económicamente óptimas. Los resultados de la modelación indican que la totalidad de las secciones tendrían una conducta satisfactoria, sin presentar desbordamientos, y todos los puentes funcionarían adecuadamente.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La población de San Antonio de Belén presenta problemas de inundaciones en algunos sectores de la quebrada Seca. Los resultados de la modelación así lo muestran y lo confirmaron los ribereños entrevistados.
- Esta situación no es más grave debido a la pequeña área de la cuenca. Sin embargo la ausencia de planificación urbana e irrespeto de las leyes de retiro de las construcciones en las planicies de inundación, ha conducido a problemas que nunca debieron darse. Esta condición, cabe mencionar, es típica de la mayoría de las ciudades costarricenses desarrolladas en planicies de inundación.
- El acentuado e inevitable proceso de crecimiento urbano e industrial de la zona provocará caudales cada vez mayores en un futuro, al reducir la capacidad de infiltración de la cuenca. Por otra parte, la

invasión de las planicies de inundación difícilmente será controlada, además los gobiernos locales no disponen de los mecanismos técnicos y administrativos para frenar efectivamente esta perjudicial tendencia.

- En la modelación hidrológica se detectó el problema de que la información hidrometeorológica disponible es muy limitada, consecuencia de la debilidad de las políticas de prevención de inundaciones en Costa Rica. Las ciudades con problemas de inundación no cuentan generalmente con programas de medición que permitan modelar adecuadamente los eventos extremos que provocan los desastres.
- En los esfuerzos realizados en este trabajo, para calibrar cuencas semejantes cercanas, se encontró con la dificultad de que los eventos extremos seleccionados no contaron con una medición de precipitación representativa del evento real. Esto se debe a que la cuenca seleccionada, del río Poás, cuenta ciertamente con un limnógrafo, pero sólo tiene un pluviómetro, y no cuenta con ningún pluviógrafo.
- La modelación hidráulica para un período de retorno de 25 años, permitió la detección de varios sectores de la quebrada Seca en los cuales se presentan inundaciones. Pero otras modelaciones, para períodos de retorno menores, ya presentan este problema.
- La corrección de la problemática se dificulta por la presencia de construcciones dentro de la zona de retiro inmediata al río. Algunas de estas construcciones están literalmente metidas en el cauce, obstaculizando el flujo y la posibilidad de implementar las medidas correctivas.
- Las medidas correctivas recomendadas incluyen: ampliación del ancho del cauce, reducción de la pendiente de los taludes laterales, eliminación de piedras y basura, revestimiento con concreto de los taludes

laterales, levantamiento de diques y profundización del fondo del canal.

- Se recomienda, además de la implementación de las obras, un programa de monitoreo y mantenimiento. El gobierno local debe abocarse a la tarea de planificar el desarrollo urbano, en conjunto con las otras municipalidades involucradas en la cuenca, y a hacer respetar las normas y restricciones recomendadas.
- Se recomienda continuar la modelación hidrológica e hidráulica con los nuevos modelos, del Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, aparecidos recientemente, HEC-HMS y HEC-RAS, en ambiente windows. Estos modelos no sólo contienen un gran avance informático, sino que incorporan importantes avances hidrológicos e hidráulicos.
- Es recomendable que se repitan estudios semejantes al presente en las numerosas cuencas del país que presentan problemas de inundaciones. Este esfuerzo debe acompañarse con una creciente presión para que las instituciones estatales instalen y administren un sistema de medición adecuado a los riesgos de inundación existentes.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Calderón, P. *Modelación hidrológica e hidráulica para el control de inundaciones en la cuenca de la Quebrada Seca*. Tesis. Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Agrícola, San José, Costa Rica, 1999.
- [2]. Chow, V., Maidment, D. and Mays, L. *Applied Hydrology*. Mc-Graw Hill Co: New York, 1988.
- [3]. Comisión Nacional de Emergencia. *Plan Nacional de Emergencia*. Comisión Nacional de Emergencia: San José, Costa Rica, 1993.
- [4]. Cunningham, W. and Woodward, B. *Environmental Science, a global concern*. WCB McGraw-Hill Co: Boston, 1999.
- [5]. Esquivel et al. *Uso de Suelo con Fines Constructivos en Áreas de Amenaza Natural*. Comisión Nacional de Emergencia: San José, Costa Rica, 1993.
- [6]. Hoggan, D. *Computer Assisted Floodplain Hydrology and Hydraulics*. McGraw-Hill Publishing Co.: New York, 1989.
- [7]. Hydrologic Engineering Center. *Hydrologic Analysis of Ungaged Watersheds Using HEC-1*. Training Document No. 15. U.S. Army Corps of Engineers. HEC: Davis, California, 1982.
- [8]. Hydrologic Engineering Center. *HEC-1, Flood Hydrograph Package, User's Manual*. HEC: Davis, Ca., 1990.
- [9]. Hydrologic Engineering Center. *HEC-2, Water Surface Profiles, User's Manual*. HEC: Davis, Ca., 1990.
- [10]. Marín, M. *Estudio Integral de la Cuenca de la Quebrada Seca*. Tesis. Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil, San José, Costa Rica, 1991.
- [11]. Petersen, M. *River Engineering*. Prentice-Hall: New Jersey, 1986.
- [12]. Solís, H. et al. *Iniciativa de Mitigación en Centro América, Capacidades y Vulnerabilidades de Manejo de Riesgos en Costa Rica*. San José, 1999.
- [13]. Solís, H. y Cuevas, J. *Modelación Hidrológica e Hidráulica en la Cuenca Media del Río Caldera*. IRHE: Panamá, 1995.
- [14]. Solís, H. y Chacón J. *Modelación Hidrológica e Hidráulica para el Control de Inundaciones en el Río Turrialba*. CATIE: Turrialba, 1992.
- [15]. Solís, H., Murillo, W. y Oreamuno, R. *Estudio Hidrológico e Hidráulico para el Control de Inundaciones en la Cuenca del Río Purires*. CATIE: Turrialba, 1991.

Dirección electrónica:
hsolis@terraba.fing.ucr.ac.cr