

CASO RIO TURRIALBA

INTRODUCCION

Las cuencas de Costa Rica, al igual que las de otros países subdesarrollados, son sometidas a grandes presiones dada la alta tasa de crecimiento demográfico y a la lentitud en la incorporación de tecnologías apropiadas de uso sostenible de los recursos.

La cuenca del río Turrialba, sin ser un caso patético, no escapa a esta tendencia habiendo sido sometida, en su mayor parte, al tradicional cambio de uso de la tierra de bosque a pasto o terreno agrícola. Este proceso, legítimo en sí, tiene el defecto de no regirse por las normas del uso adecuado y potencial del suelo, de modo que amplias zonas de uso inadecuado han hecho su aparición.

Las consecuencias negativas son inevitables: incremento de los caudales máximos, erosión, contaminación y pérdida de fertilidad. El registro histórico de inundaciones desastrosas en la cuenca del Turrialba se inicia en 1928, con repeticiones de eventos extraordinarios en 1949, 1970, 1983, 1987, 1990 y 1991 (Fig 5). Pero no toda la culpa recae sobre el mal manejo de la cuenca alta. La ubicación de la ciudad de Turrialba es inadecuada, al invadir literalmente las zonas naturales de inundación del río. En consecuencia, es necesario lograr un manejo adecuado de la cuenca y definir las planicies de inundación del río para su consideración en el plan de crecimiento urbanístico.

El Gobierno de la República ha reaccionado por medio de una declaratoria de emergencia, en la Gaceta del 23 de mayo de 1990. Este es un punto de partida necesario pero no suficiente para la solución de los problemas de la cuenca. Este estudio pretende, entonces, iniciar las acciones que hagan una realidad la eliminación de una amenaza que inquieta a la comunidad de Turrialba. Dentro de las limitaciones económicas, siempre es posible hacer algo por revertir esa problemática; y acciones iniciales simples, exitosas, de impacto palpable, irán gestando las condiciones favorables para acciones subsecuentes, más ambiciosas y respaldadas, que conduzcan evolutiva y finalmente al manejo integrado y sostenible de la cuenca.

Para evitar acciones contradictorias, se debe mantener como norte de toda la estrategia, la adecuación del uso real con el uso potencial del suelo. Pero además, la implantación de tecnologías biofísicas deben ser acompañadas por programas de capacitación a la población de la cuenca, con base en sus características socioeconómicas.

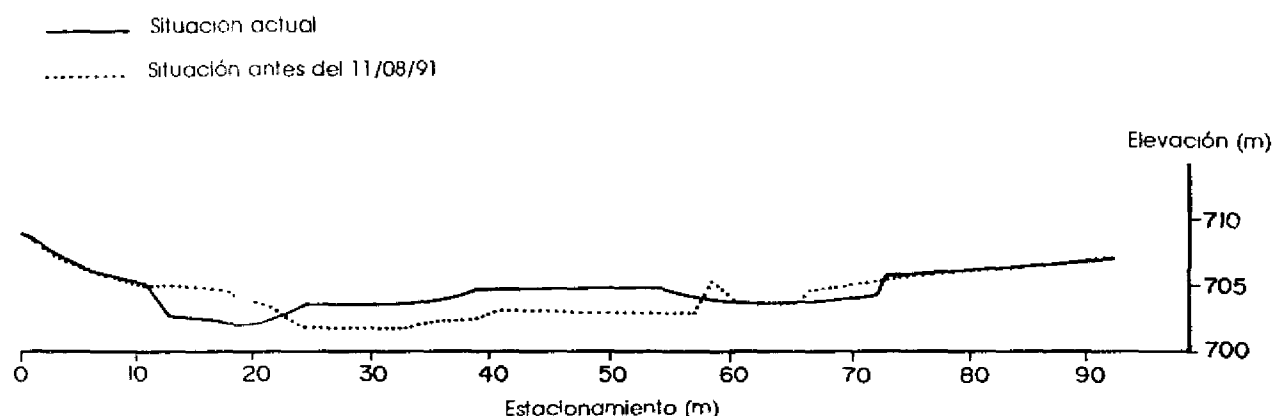


Fig. 5 Modificación de sección transversal del río Turrialba

El uso del recurso hídrico de la cuenca presenta dos situaciones problemáticas. Los recursos hídricos de la cuenca son abundantes y se emplean para consumo poblacional, agroindustrial y producción hidroeléctrica. Sin embargo, debe buscarse un equilibrio en su explotación, por una parte, y un manejo que garantice su disponibilidad sostenida, por otra, armonizando los intereses locales y nacionales. Un segundo problema se refiere a la contaminación agroindustrial y urbana. Si se lograra generar en la comunidad más autoestima, se podrían alcanzar mejoras ambientales sustanciales en un corto plazo.

En lo que atañe a los caudales máximos, se ha observado en la cuenca baja, específicamente en la ciudad de Turrialba, la expansión de zonas inundables, trayendo como consecuencia severos daños materiales. En este caso se deben definir las áreas de inundación para diferentes períodos de retorno. Este estudio permitiría el establecimiento de políticas de restricción urbanística en esas zonas, en el campo preventivo, y la posible rectificación de situaciones riesgosas existentes, en el campo correctivo.

Objetivo y alcance de estudio

Este estudio tiene como objetivo básico la determinación y selección del caudal de diseño en el río Turrialba a su paso por la ciudad del mismo nombre, para el diseño geométrico de las obras de rectificación, protección y reforzamiento de taludes, diques y otras obras que eviten el desbordamiento del río.

Se pretende modelar hidrológicamente, utilizando el HEC-1, la cuenca del río Turrialba. En un primer paso se calibra el modelo con base en eventos históricos de inundación, debidamente documentados y medidos. En un segundo paso, se calcula el caudal correspondiente a un período de retorno de 100 años. A continuación se analiza, utilizando el HEC-2, la conducta hidráulica del río para el caudal de diseño, en su condición natural.

Finalmente se diseñan las modificaciones geométricas del cauce para mejorar las condiciones de flujo.

Caracterización de la cuenca

La cuenca del río Turrialba posee, gracias principalmente al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), una vasta red hidrometeorológica que incluye una estación limnigráfica (estación Turrialba) aguas abajo de la confluencia de los ríos Turrialba y Colorado, situación óptima para la calibración de la cuenca; dos pluviógrafos (estaciones del CATIE y San Antonio) y varios pluviómetros dispersos alrededor de toda la cuenca. Desde el punto de vista hidrometeorológico, la disponibilidad de información es satisfactoria.

La cuenca alta. La información siguiente se tomó del mapa de uso potencial del MAG (1970). La cuenca alta incluye dos clases de uso potencial: IV-H y III-D. La clase IV se refiere a uso muy extensivo. Los suelos tienen recursos físicos que dan bajos rendimientos por hectárea y una baja rentabilidad económica. La categoría H se refiere a áreas de terrenos escarpados, localizados a una altitud superior a los 2800 msnm, no aptos para uso agropecuario.

La clase III comprende áreas de uso forestal. Estas áreas, por su topografía y por sus suelos, no tienen capacidad para ser dedicados a una actividad agropecuaria de mayor productividad. La categoría D incluye zonas aptas para conservar el bosque natural, con una explotación y un manejo controlado que incluyan prácticas de conservación y protección.

Como se puede observar, las dos zonas de la cuenca alta califican para una zona de protección; sin embargo, el uso actual difiere sustancialmente del uso potencial.

La cuenca media. La cuenca media tiene una sola clase de uso potencial: I-Pf. La clase I se caracteriza por tierras de uso intensivo. Estas áreas tienen, en más de un 75% de su superficie, recursos físicos con capacidad para dar altos rendimientos por hectárea. La categoría Pf comprende terrenos ondulados, localizados en su mayoría en las faldas de volcanes; son suelos de ligeramente pesados a livianos, de texturas limo arcillosas, arcillo arenosas y francas; responden bien a la aplicación de fertilizantes. Son aptas para cultivos permanentes y ganadería intensiva; en algunas áreas de esta unidad se presentan condiciones favorables para la siembra de cultivos anuales. Los cultivos permanentes y la ganadería requieren de métodos sencillos de conservación; los cultivos anuales requieren el empleo de una tecnología más desarrollada y de sistemas más refinados de conservación de suelos. En esta zona, la más extensa de la cuenca, se debe concentrar el esfuerzo en las técnicas de conservación de agua y suelo.

La cuenca baja. Comprende a la ciudad de Turrialba, y presenta una sola clase de uso potencial: I-P_p. La clase I fue descrita anteriormente. La categoría P_p abarca zonas planas o casi planas, de origen aluvial, con suelos ligeramente pesados de textura limosa a limo arcillosa. Son aptos para cultivos permanentes y ganadería intensiva, requieren de facilidades de drenaje y el empleo de métodos sencillos de conservación.

Esta región, como se sabe, tiene severos problemas de drenaje, lo cual determina las acciones correctivas necesarias.

Modelación de la cuenca

RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN

Se realizó un esfuerzo para recopilar toda la información existente y pertinente sobre la cuenca del río Turrialba. Las fuentes de información son las instituciones públicas y las visitas para la observación directa. También se realizaron visitas de reconocimiento para detectar la problemática general e interpretar mejor la información recopilada.

Dado que no hay suficiente información, debe llenarse ese vacío generando la información realmente fundamental para la implementación de la metodología escogida. Se debe ser realista, teniendo en cuenta las limitaciones financieras y de tiempo, en el tipo y grado de detalle de la información generada.

DIAGNÓSTICO

El análisis de la información recolectada permitirá la evaluación biofísica de los problemas de interés, tales como presencia de procesos erosivos, dinámica de deforestación, técnicas de producción, limitación del recurso hídrico, etc.

Además, bajo este enfoque interesa prever la aceptabilidad del proyecto por parte de los habitantes de la cuenca, las formas de organización para realizar acciones físicas o educativas, nivel cultural, tenencia de la tierra, densidad poblacional, etc.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

La información de precipitación y escurrimiento de la cuenca misma o cuencas limítrofes provee los datos para la aplicación de modelos hidrológicos, los cuales son inicialmente calibrados, para luego generar los hidrogramas para avenidas críticas correspondientes a diferentes períodos de retorno, y las consecuentes planicies de inundación.

Se justifica la escogencia del modelo HEC-1 para la generación de hidrogramas de escurrimiento, debido a que los problemas más serios de la cuenca son puntuales: inundaciones periódicas. Además, las estaciones de medición de caudales y de precipitación permiten la aplicación del modelo HEC-1 en dos etapas. En el primer paso se calibra la cuenca para varias avenidas conocidas registradas y en el segundo se obtienen los hidrogramas para diferentes períodos de retorno, usando el método de Gumbel (Linsley *et al.*, 1982).

MODELACIÓN HIDRÁULICA

Con los caudales pico de los hidrogramas generados por HEC-1, se aplica el modelo hidráulico HEC-2 que permite calcular los niveles alcanzados por el río, revelándose las zonas inundables.

OBRAS DE MEJORA DEL CAUCE

La declaratoria de emergencia da cabida a la asignación de fondos para las acciones de mejora del cauce del río Turrialba. Con estos fondos se debe proceder a diseñar y ejecutar dichas obras ingenieriles. Cabe mencionar, sin embargo, que la problemática debe ser enfocada a nivel de cuenca. Los recursos deberían distribuirse entre la corrección de las causas y corrección de los efectos y no dedicarlos exclusivamente a los segundos.

Ya que el régimen de flujo es posiblemente supercrítico, se debe ser muy cuidadoso con la alteración del balance energético, para evitar la introducción de desajustes en el río que puedan desencadenar procesos de reajuste del cauce (Hey *et al.*, 1985).

PLAN DE EDUCACIÓN DEL MANEJO DE LA CUENCA

En una labor coordinada con las autoridades civiles, religiosas, educativas y cooperativistas de la cuenca, se debe iniciar un programa que concientice a la población sobre los errores que se cometen en la explotación de los recursos naturales y promover el uso de técnicas adecuadas de explotación. Esta acción es muy realizable, relativamente poco costosa, y es la base para lograr la transformación cultural necesaria en el manejo de cuencas.

MODELACION HIDROLOGICA CON HEC-1

Calibración del modelo

Se procedió a seleccionar los eventos extremos mejor definidos del registro de la estación limnigráfica Turrialba, número 9-26 del ICE. Esta estación inició su funcionamiento en el año hidrológico 1981-82. De los nueve eventos seleccionados se escogieron las avenidas del 1 de setiembre de 1983, el 24 de agosto de 1985 y el 27 de mayo de 1990. Estos eventos dieron los resultados más satisfactorios, en relación al ajuste de los valores observados y los valores calculados (Figs. 6, 7, 8, Anexo A). Los resultados se resumen en el Cuadro 10.

Analizando el Mapa de Asociaciones de Subgrupos de Suelos de Costa Rica (Acón, 1991), se verificó que los suelos de la cuenca del río Turrialba son predominantemente del grupo hidrológico de suelo C (franco arcilloso y arcilloso pedregoso). Para el tipo de cobertura vegetal actual, pastos, café y caña de azúcar que dan una protección adecuada al suelo, se tiene para una condición antecedente de humedad II, un valor CN=74 correspondiente a una buena condición hidrológica (Chow, 1964). Como se puede observar, los valores obtenidos por modelación tienden a coincidir con los estimados a partir de mapas.

La modelación hidrológica se basa en eventos de precipitación convectiva, que por su naturaleza tienden a ser aislados. Por este motivo, la condición antecedente de humedad II es adecuada.

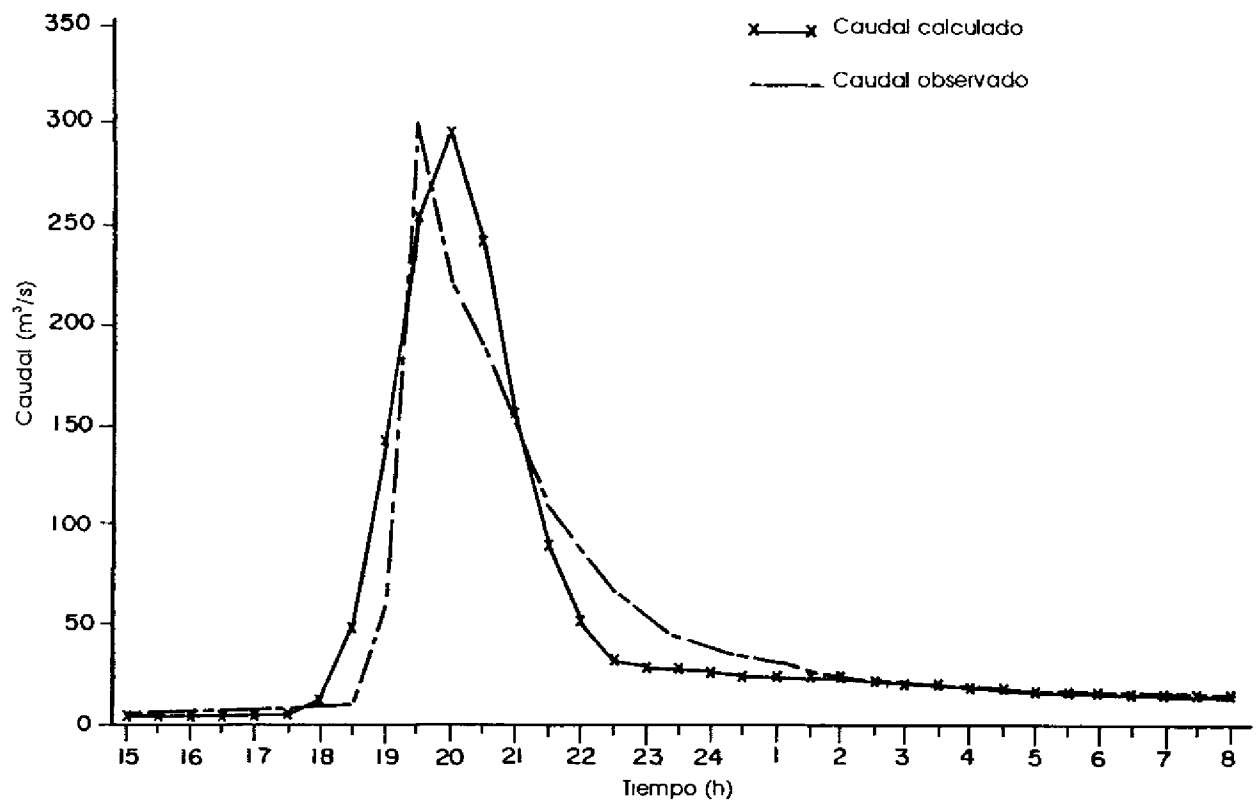


Fig. 6 Calibración del evento del 01/09/83

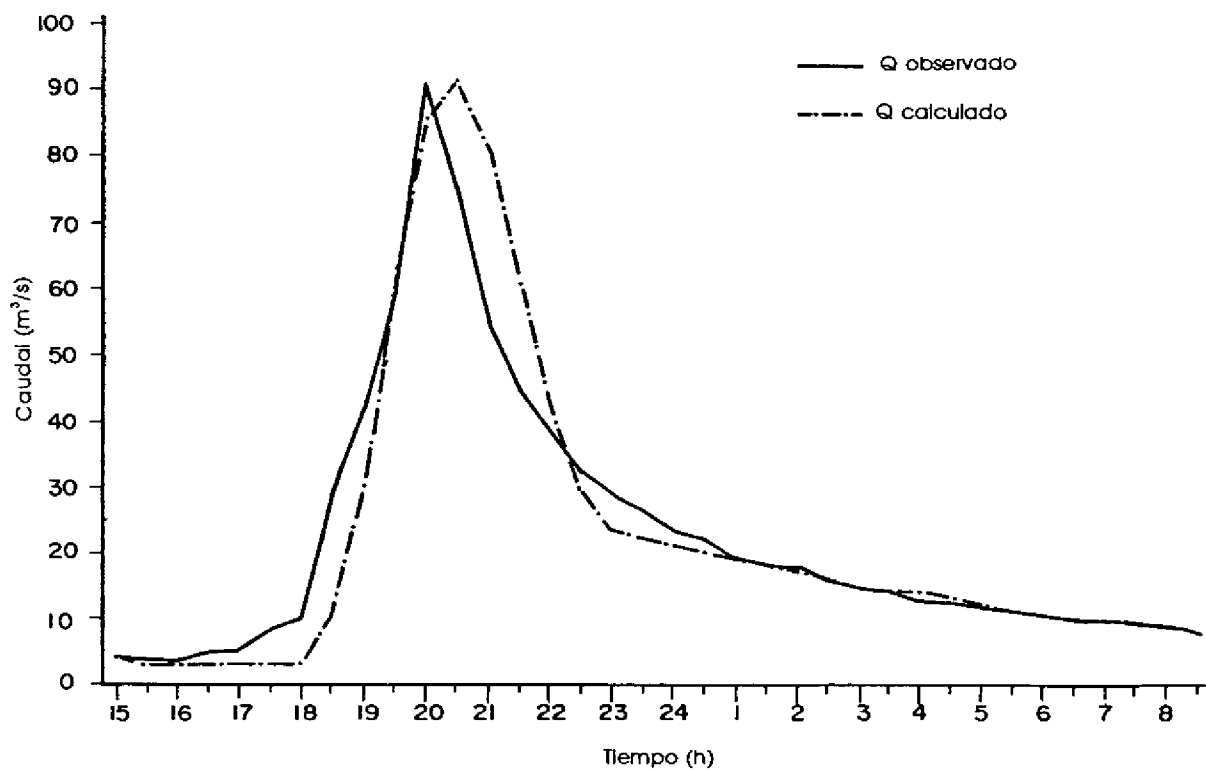


Fig. 7 Calibración del evento del 24/08/85

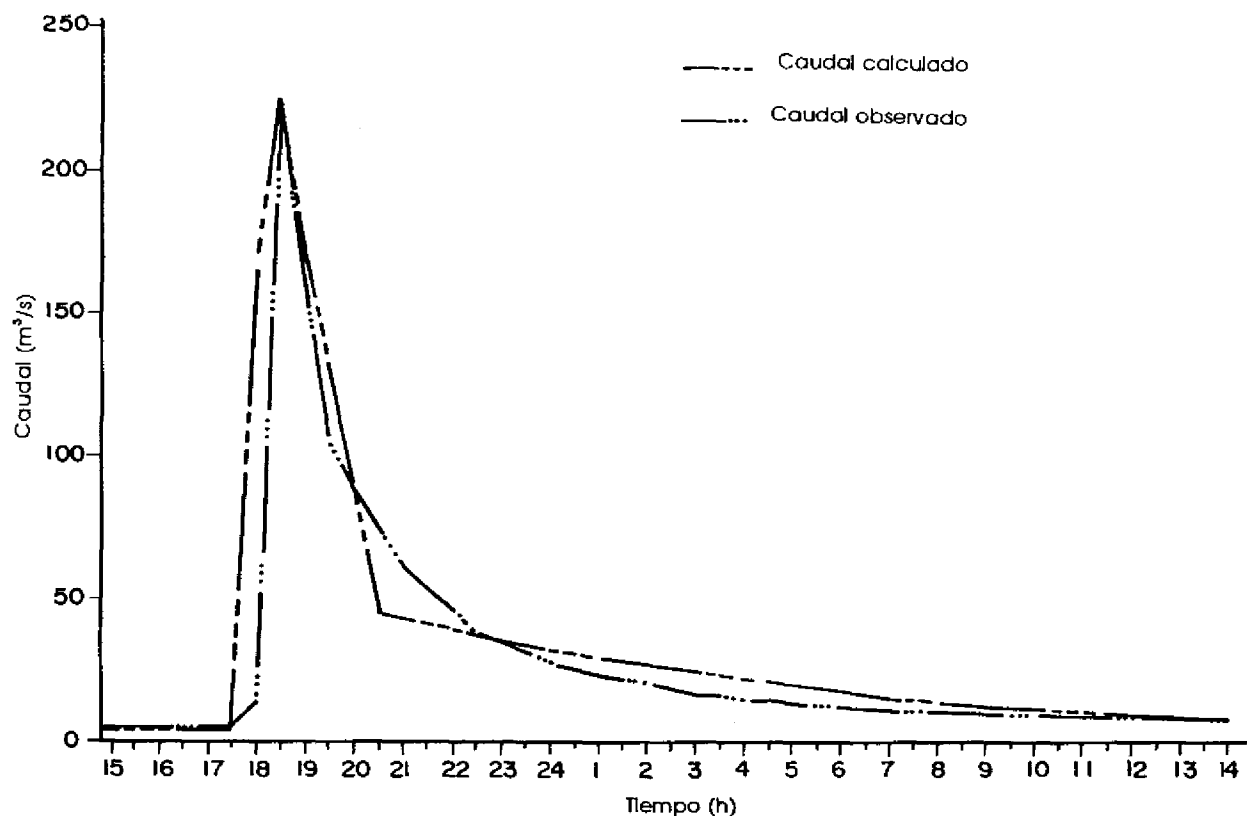


Fig. 8 Calibración del evento del 27/05/90

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA LLUVIA

La distribución espacial se obtuvo por medio de los polígonos de Thiessen, para las estaciones pluviométricas de Pacayas Irazú y Rosemont, y las estaciones pluviográficas de CATIE y San Antonio, tomadas como pluviómetros (Cuadro 11). La distribución temporal se calculó también con polígonos de Thiessen, para las estaciones pluviográficas de CATIE y San Antonio (Cuadro 12).

Cuadro 10. Resumen de parámetros de calibración

Fecha	Archivo	CN	IA (mm)
01-09-83	TURR112.DAT	79	25
24-08-95	TURR23.DAT	68	29
27-09-90	TURR53.DAT	75	30
Valor medio		74	28

CAUDAL BASE

Los parámetros iniciales del caudal base: caudal inicial (STRTO), caudal del inicio de recesión (QRCSN) y fase de abatimiento de la curva de recesión (RTIOR) se obtuvieron del hidrograma del 24 de agosto de 1985 (Fig. 9). Los valores empleados fueron los siguientes:

STRTO = 3,61 m³/s
 QPEAK = 90,5 m³/s
 QRCSN = 19,00 m³/s

QRCSN/QPEAK = 0,21
 STRTO/AREA = 0,047 m³/s/km²
 RTIOR = 0,117

Estos valores se adaptaron para las modelaciones subsiguientes.

TIEMPO DE DESFASE

El tiempo de desfase se calculó a partir de la lluvia del 24 de agosto de 1985.

$$T_{lag} = T_{pico} - T_{cm} \quad [1]$$

donde:

T_{lag} = tiempo de desfase

T_{pico} = tiempo del inicio del evento al caudal pico

T_{cm} = tiempo del inicio del evento al centroide de la precipitación total

Cuadro 11. Distribución espacial de la lluvia por polígonos de Thiessen en la cuenca del río Turrialba

	CATIE	San Antonio	Pacayas	Irazú	Rosemont
01-09-83					
Precipitación (mm)	60,3	34,2	52,5	24,8	132,0
Peso (%)	25	14	15	0	46
24-08-85					
Precipitación (mm)	76,6	100,9	27,8	15,7	90,2
Peso (%)	5	34	15	12	34
27-05-90					
Precipitación (mm)	26,9	57,4	1,8	0	125,0
Peso (%)	5	57	0	0	38

En el Cuadro 13 se muestran los cálculos correspondientes para el evento del 24/10/85, de modo que el $T_{lag} = 1,78$ h (Solís *et al.*, 1992). Para efectos comparativos se calcula el T_{lag} por medio de la fórmula de Kirpich (Linsley *et al.*, 1982):

$$T_{lag} = 0,6 * T_c \quad [2]$$

$$T_{lag} = 0,6 * L^{1,15} / (3080 H^{0,38}) \quad [3]$$

donde:

T_c = tiempo de concentración

L = longitud máxima de recorrido del agua, en metros (22370 m)

H = diferencia de elevación entre el inicio y el final de L (2175 m)

En el caso del río Turrialba:

$$T_{lag} = 0,6 * 22370^{1,15} / (3080 * 2175^{0,38})$$

$$T_{lag} = 1,05 \text{ horas}$$

Se adopta el valor obtenido a partir del evento del 24 de agosto de 1985 por considerarse el más representativo de la cuenca del río Turrialba y estar basado en un evento que realmente se presentó en la cuenca.

El tiempo de desfase de la tormenta mencionada se utilizó para calibrar la ecuación de Snyder (Chow *et al.*, 1988):

$$T_{lag} = Ct * (L * Lc)^{0,3} \quad [4]$$

donde:

Cuadro 12. Distribución temporal de la lluvia en la cuenca del río Turrialba

Tiempo (h)	01-09-83		24-08-85		27-05-90	
	CATIE (mm)	S. Antonio (mm)	CATIE (mm)	S. Antonio (mm)	CATIE (mm)	S. Antonio (mm)
Peso polígonos Thiessen	100 %	0 %	14 %	86 %	14 %	86 %
13:30			0,0			
14:00	0,0		1,2			
14:30	0,1		1,4			
15:00	0,5	0,0	6,4	0,0	0,0	
15:30	2,3	1,1	6,4	7,2	0,2	
16:00	3,1	1,1	6,5	8,6	0,6	
16:30	4,2	9,7	14,2	10,0	0,7	
17:00	16,0	14,4	18,6	14,5	0,7	0,0
17:30	21,6	14,7	22,6	40,0	2,8	21,0
18:00	25,2	21,8	42,3	84,0	16,5	42,0
18:30	40,0	27,5	53,5	92,9	19,0	49,3
19:00	53,8	34,2	66,6	98,0	23,8	52,2
19:30	60,3		72,4	98,3	24,9	55,5
20:00			72,5		26,9	56,6
20:30			72,5		27,3	56,8
21:00			72,7		27,4	57,2
21:30			73,5			
22:00			74,2			
22:30			75,2			
23:00			76,4			
23:30			76,6			

Ct = coeficiente

L = longitud máxima de recorrido del agua, en km

Lc = longitud de la salida de la cuenca, al punto del río más cercano del centroide de la cuenca, en km

$$Ct = T_{lag} / (L * Lc)^{0.3} \quad [5]$$

En el caso del río Turrialba se tiene:

$$T_{lag} = 1,78 \text{ horas}$$

$$L = 21,67 \text{ km}$$

$$L_c = 10,32 \text{ km}$$

Se procede a calcular un coeficiente C_t propio de la cuenca del río Turrialba (Solís *et al.*, 1992):

$$C_t = 1,78 / (21,67 * 10,32)^{0,3} = 0,35$$

Este coeficiente se utilizará en la modelación de la cuenca para eventos extremos. La ecuación utilizada para calcular el tiempo de desfase en las subcuencas será, en consecuencia

$$T_{lag} = 0,35 (L * L_c)^{0,3} \quad [6]$$

Modelación para el evento extremo de diseño

Utilizando los parámetros obtenidos en la calibración del modelo, se procedió a modelar la cuenca para el evento extremo correspondiente a un período de retorno de 100 años. Este período de retorno se recomienda por tratarse de una cuenca con un importante componente urbano.

En la Fig. 10 se muestra la subdivisión de la cuenca del Río Turrialba en subcuencas: Coliblanco, Playas, Jesús María, Esmeralda, Roncha y Colorado.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA LLUVIA

En Cuadro 14 se presenta la distribución espacial de la lluvia, calculada utilizando los polígonos de Thiessen para cada subcuenca. Para garantizar la escogencia de eventos de precipitación de corta duración y alta intensidad, se descartaron los valores de precipitación diaria antecendidos o seguidos por eventos de precipitación diaria mayor de 50 mm. Este procedimiento pretende eliminar los eventos de temporal de larga duración y baja intensidad, que son menos destructivos.

Cuadro 13. Cálculo de centro de masa de la lluvia del 24 de agosto 1985 en la cuenca del río Turrialba

Hora	Tiempo (h)	Precipitación (mm)	T*P
14:30	0,00	0,00	0,00
15:00	0,50	0,55	0,28
15:30	1,00	4,88	4,88
16:00	1,50	0,96	1,44
16:30	2,00	1,80	3,60
17:00	2,50	3,53	8,83
17:30	3,00	17,71	53,13
18:00	3,50	31,97	111,90
18:30	4,00	7,26	29,04
19:00	4,50	4,90	22,05
19:30	5,00	0,84	4,20
Sumatoria		74,40	239,34

$$\text{Centro de masa} = 239,34 / 74,40 = 3,22 \text{ horas}$$

$$\text{Tiempo al pico} = 19,50 - 14,50 = 5 \text{ horas}$$

$$T_{lag} = T_{pico} - T_{cm} = 5,00 - 3,22 = 1,78 \text{ horas}$$

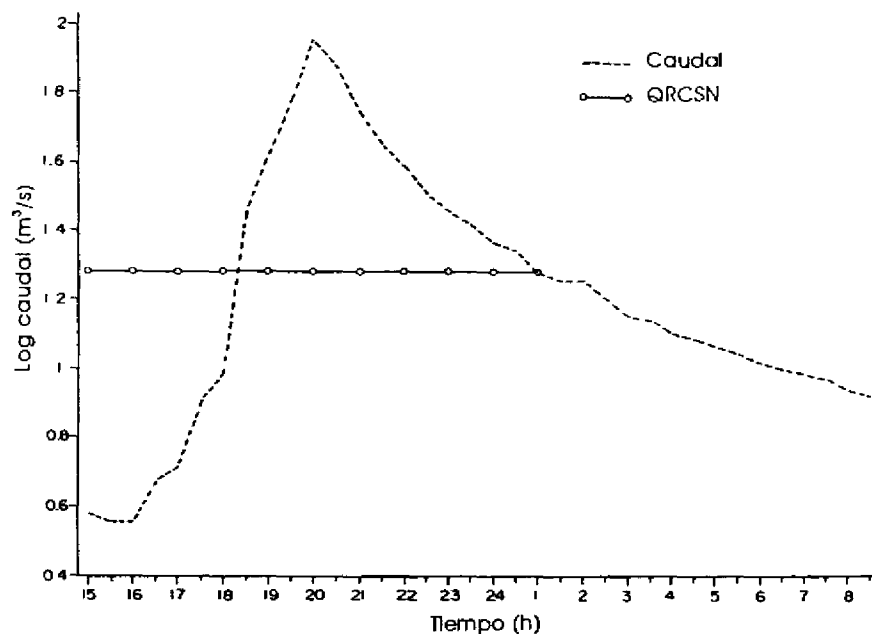


Fig. 9 Parámetros QBase del 24/08/85

En resumen, se utilizan los siguientes valores de precipitación para un período de retorno de 100 años:

Estación CATIE	P = 174 mm
Estación Irazú	P = 292 mm
Estación Pacayas	P = 191 mm
Estación Rosemont	P = 310 mm
Estación San Antonio	P = 251 mm

Del registro histórico de las estaciones San Antonio y CATIE, se escogió la tormenta del 20 de diciembre de 1987 del CATIE para ser utilizada como distribución temporal de diseño. Esta tormenta, de gran intensidad en un tiempo relativamente corto, es típica de los eventos catastróficos de la región. Ese día la ciudad de Turrialba fue afectada por una severa inundación. En el Cuadro 15 se muestran los datos del pluviograma de la lluvia mencionada.

TIEMPOS DE DESFASE

Con la ecuación [6], se obtuvo el tiempo de desfase de las diferentes subcuencas del río Turrialba. En el Cuadro 16 se indican los tiempos de desfase para cada subcuenca.

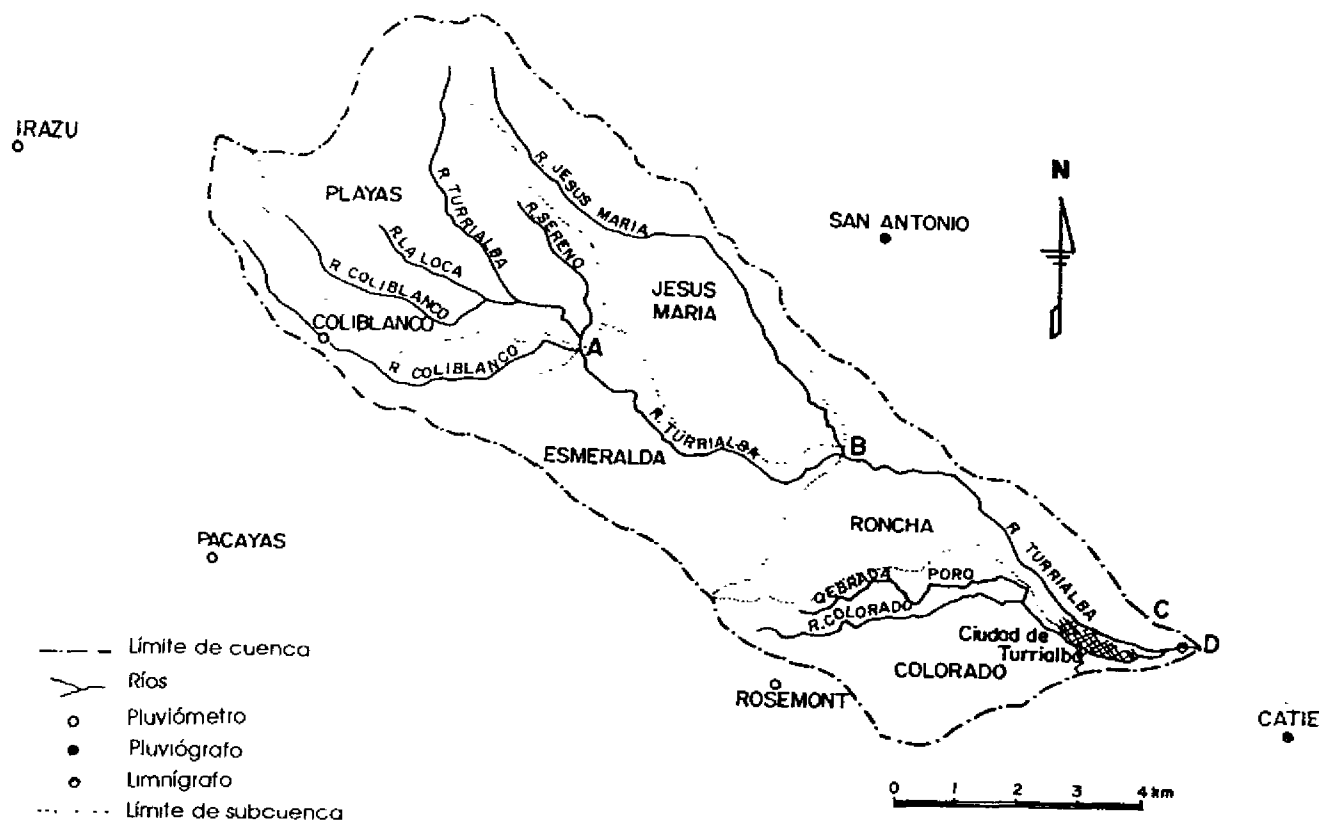


Fig. 10 Cuenca del río Turrialba

TRÁNSITO DE AVENIDAS

Se escogió el método de Muskingum (Dunne y Leopold, 1978) para simular el desplazamiento de las ondas de flujo, para lo cual se requiere conocer el tiempo de recorrido de la onda en los diferentes sectores del río. Dado el relativo corto tiempo de recorrido de la onda, debido a las cortas distancias y a las altas velocidades, el abatimiento de los hidrogramas ocasionado por el tránsito de avenidas es de poca magnitud.

El río se aproxima geométricamente a una parábola ancha; entonces, se tiene, según Chow (1964):

$$V_o = 11 \cdot V / 9 \quad [7]$$

donde:

V_o = velocidad de onda (m/s)

V = velocidad media del río (m/s)

El caudal máximo unitario de la cuenca es de:

$$Q_u = Q_T / A = 845 / 76,29 = 11,08 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$$

Para efectuar el tránsito de avenidas, se dividió el río en dos sectores. El sector A-B va de la confluencia de los ríos Turrialba y Coliblanco a la confluencia del Turrialba y Jesús María (Fig. 10). En este sector se estima un ancho de fondo $B = 20$ m. El sector B-C va de la confluencia de los ríos Turrialba y Jesús María a la confluencia de los ríos Turrialba y Colorado. En este sector se estima $B = 30$ m.

Cuadro 14. Distribución espacial de la lluvia por subcuencas en el río Turrialba

Subcuenca	Estación	Area (km ²)	% área
Coliblanco	Irazú	1,91	31
	Pacayas	3,95	63
	San Antonio	0,38	6
Playas	Irazú	7,23	39
	Pacayas	5,75	31
	San Antonio	5,64	30
Jesús María	San Antonio	14,98	97
	Rosemont	0,39	3
Esmeralda	Rosemont	8	70
	San Antonio	1,83	16
	Pacayas	1,64	14
Roncha	Rosemont	6,64	57
	CATIE	2,28	19
	San Antonio	2,81	24
Colorado	Rosemont	9,93	88
	CATIE	1,32	12

En el Cuadro 17 se presenta el cálculo del tiempo de recorrido de la onda en los sectores mencionados. Se considera una n de Manning de 0,07. El procedimiento consiste en calcular de manera aproximada la velocidad media del río, y a continuación la velocidad de onda, utilizando la ecuación [7]. La velocidad media del río se calculó utilizando un programa BASIC.

INFORMACIÓN DE ENTRADA Y DE SALIDA

En el Anexo B se muestran los archivos TU7.DAT y TU7.OUT de la modelación por subcuencas del río Turrialba. En el Cuadro 18 se presenta un resumen de los caudales

Cuadro 15. Pluvlograma del 29-12-87 en la estación CATIE

Hora	Lectura (mm)	Hora	Lectura (mm)
7:00	0,0	19:30	36,0
7:30	0,1	20:00	39,9
8:00	0,2	20:30	41,4
8:30	0,4	21:00	48,6
9:00	1,1	21:30	60,1
9:30	1,6	22:00	76,7
10:00	1,9	22:30	77,0
10:30	3,0	23:00	81,8
11:00	3,9	23:30	86,2
11:30	4,0	24:00	116,7
12:00	4,0	0:30	113,7
12:30	4,1	1:00	137,1
13:00	5,1	1:30	146,4
13:30	6,1	2:00	151,7
14:00	6,8	2:30	154,4
14:30	7,5	3:00	154,7
15:00	7,6	3:30	156,8
15:30	11,5	4:00	157,1
16:00	21,9	4:30	157,8
16:30	22,5	5:00	159,1
17:00	22,7	5:30	159,6
17:30	29,5	6:00	162,7
18:00	29,7	6:30	165,8
18:30	33,7	7:00	165,8
19:00	35,3		