

EFFECTO DE LA VARIACION DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTIA EN LA FRECUENCIA DE LAS AVENIDAS

*Agustín Rodríguez M.**

RESUMEN

Un hecho que pasa desapercibido para la mayoría de las personas, pero no para aquellas que viven cerca de las riberas de los ríos pequeños y quebradas, o para los ingenieros hidrológicos, es el aumento en la frecuencia y magnitud de las avenidas, especialmente cuando la cuenca de la corriente empieza a sufrir las consecuencias de la deforestación, para dar campo a la urbanización y expansión de la ciudad.

Este aumento en la frecuencia de las avenidas por causa de un desequilibrio ecológico natural o artificial, que a su vez es provocado cuando se elimina parcial o totalmente la cobertura vegetal en la cuenca, es investigado en este trabajo, en un caso, a partir de fórmulas matemáticas empíricas deducidas de pruebas experimentales y en otro caso, utilizando una expresión matemática definida cuya representación gráfica se asemeje al hidrograma de una avenida, tal y como un senoide.

* Instituto Costarricense de Electricidad.

De los resultados obtenidos en este trabajo, se infiere que cuando se dé una ecuación que represente la frecuencia probable de las avenidas en una corriente, debería indicarse que «tal ecuación es válida para las condiciones que se observan en la cuenca al momento que se ha hecho el análisis», puesto que sin dicha cuenca se experimentará un gran cambio en su cobertura vegetal, la frecuencia de las avenidas variaría de manera muy significativa, aumentando si hay deforestación o disminuyendo si se tiene un proceso de reforestación.

INTRODUCCION

El régimen hidroeléctrico de una cuenca en relación con la frecuencia de las avenidas está estrechamente ligada al tipo y densidad de la vegetación que la cubre, así como a las características meteorológicas de la zona.

Aunque recientemente se están haciendo experimentos meteorológicos tendientes a la modificación menor de las condiciones climatológicas de una región, como lo es, por ejemplo, la producción de lluvia artificial, se estima poco probable, al menos a corto plazo, que el hombre pueda modificar en forma apreciable las condiciones climatológicas naturales de una región, y menos aún en lo referente a los disturbios atmosféricos productores de precipitaciones intensas de gran extensión, no sólo porque estos fenómenos son bastante frecuentes en nuestras latitudes, sino también, porque la energía involucrada en estos procesos meteorológicos es cientos de veces más grande que la que el hombre ha podido llegar a obtener dentro de la tecnología actual, incluyendo las reacciones nucleares. Por ejemplo: la energía envuelta en el proceso de condensación del vapor de agua que origina un aguacero de 60 mm en una hora sobre una extensión de 25 km² (aproximadamente la extensión de la ciudad de San José), es equivalente a la energía que produjo Costa Rica en 1971 en el Sistema Nacional Interconectado (1.050 GWh).

Sin embargo, el hombre está alterando el régimen hidroeléctrico de las cuencas con la continua deforestación que se lleva a cabo en todas las regiones de la tierra, proceso que sí introduce cambios notables en las características hidroeléctricas naturales, especialmente en lo que se refiere a la frecuencia de las avenidas y producción de sedimentos por efecto de una mayor erosión.

La deforestación afecta en mayor grado a la magnitud de los picos de las avenidas y su tiempo de concentración, por la consecuente modificación del coeficiente de escorrentía, de manera que éste aumenta a medida que se elimina la vegetación. Este incremento en el coeficiente de escorrentía provoca un aumento en la frecuencia de las avenidas en forma extraordinaria debido a su variación potencial, relación que se tratará de determinar en este trabajo. Este problema actualmente se observa en la Ciudad de San José por las continuas inundaciones provocadas por los ríos Ocloro, María Aguilar, Negritos, etc.

Enfoque del problema

La relación existente entre el incremento en el coeficiente de escorrentía y el aumento en la frecuencia de las avenidas será investigada a través del método racional o fórmula racional y con base también en las fórmulas matemáticas que relacionan la intensidad de la lluvia con la duración y la frecuencia (IDF).

En este trabajo se parte de la hipótesis de que la relación IDF de la lluvia es una característica meteorológica de la cuenca que es independiente de las modificaciones que se puedan hacer en sus características fisiográficas tal como un cambio en su cubierta vegetal, o la remoción total o parcial de la misma, para cubrir el área de drenaje con materiales artificiales (tal es el caso de las ciudades).

Partiendo de la fórmula racional cuya forma general es:

$$Q = CIA$$

en donde:

Q = Caudal máximo o pico de la avenida

C = Coeficiente de escorrentía de la cuenca

I = Intensidad de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca

A = Área de la cuenca

El término «racional» sugiere que esta fórmula no es empírica, sin embargo, el coeficiente de escorrentía C, se determina en cierta manera empíricamente, puesto que es necesario recurrir a tablas que dan distintos valores de C, según sea el tipo de vegetación y la pendiente de la cuenca, valores que si bien han sido determinados experimentalmente en cuencas pequeñas destinadas para este propósito, sólo representan valores promedio o aproximados y dependen del juicio de cada individuo.

En la tabla N° 1 se da una lista de valores de C según el tipo de terreno. Puede observarse por los valores de esta tabla que el coeficiente de escorrentía puede aumentar varias veces si un terreno se urbaniza densamente. Por ejemplo, suponiendo que un terreno sin urbanizar tenga un coeficiente de escorrentía de 0.25, este valor puede cambiar de 0.50 ó 0.90 si se urbaniza completamente, es decir, aumenta de 2 a 4 veces al sustituir el terreno natural por materiales relativamente impermeables. Sin embargo, casi nunca se llega a «impermeabilizar» una cuenca en un ciento por ciento, ya que por pequeña que sea el área de drenaje de una corriente, siempre hay zonas verdes, de modo que en una zona urbana, el porcentaje del área impermeabilizada oscila entre 25% y 95% del área del drenaje.

TABLA N° 1
VALORES DE COEFICIENTE DE ESCORRENTIA

TIPO DE AREA DE DRENAJE	COEFICIENTE DE ESCORRENTIA «C»	
Terrenos:		
Suelo arenoso, plano	S = 2%	0.05 - 0.10
Suelo arenoso, escarpado	S = 7%	0.15 - 0.20
Suelo duro plano	S = 2%	0.13 - 0.17
Zonas residenciales:		
Areas familiares		0.30 - 0.50
Areas de apartamentos familiares		0.50 - 0.70
Zonas industrializadas:		
Poco densas		0.50 - 0.80
Muy densas		0.60 - 0.90
Otros:		
Calles de asfalto		0.70 - 0.95
Calles de hormigón		0.80 - 0.95
Techos		0.75 - 0.95

Si bajo las condiciones naturales de una cuenca se designa con:

Q_1 el caudal observado para una intensidad I^1 dada y un valor C_1 que representa las condiciones originales, se tiene que

$$Q_1 = C_1 I_1 A \tag{1}$$

Luego, si se designa con n el número de veces que aumenta el coeficiente de escorrentía C_1 por alguna de las causas indicadas anteriormente, hasta que adquiere un nuevo valor C_2 , es decir,

$$n = \frac{C_2}{C_1} \tag{2}$$

$$C_2 = nC_1 \tag{3}$$

Entonces si ocurriera un aguacero con intensidad I_1 , el caudal que se observaría en la cuenca es:

$$Q_2 = C_2 I_1 A \quad 4$$

$$Q_2 = n C_1 I_1 A \text{ o}$$

$$Q_2 = n Q_1 \quad 5$$

Igualando las fórmulas 4 y 5 se tiene:

$$n Q_1 = C_2 I_1 A \quad 6$$

que puede indicarse de la siguiente manera:

$$Q_1 = C_2 (I_1/n) A \quad 7$$

por lo tanto (I_1/n) es igual a la intensidad menor i_2 necesaria para producir el mismo caudal Q_1 en la cuenca modificada, esto es:

$$I_2 = I_1/n \quad 8$$

Del análisis realizado hasta este momento y por observación de las fórmulas 7 y 8, se concluye que en una cuenca alterada se puede producir una avenida de magnitud dada, con una intensidad de lluvia que varía inversamente proporcional al incremento del coeficiente de escorrentía.

Estrictamente hablando esta afirmación no es válida, ya que una variación en el valor de C afecta el tiempo de concentración de la cuenca t_c , y éste a su vez afecta el valor de I a usar en la fórmula racional. Este efecto será analizado a continuación.

La relación IDF queda expresada por la fórmula general 2:

$$I = \frac{KT^a}{(t_c+d)^b} \quad 9$$

en donde:

I = Intensidad de la lluvia en mm/h

T = Período de retorno en años (inverso de la frecuencia)

t_c = Tiempo de concentración en minutos

d = Corrección de alineación gráfica (en minutos) a y b y K son constantes

Como el coeficiente de escorrentía C representa el porcentaje que escurre del volumen de precipitación en un tiempo dado, es evidente que al aumentar este valor de C , los volúmenes evacuados por los canales de drenaje serán mayores y, por lo tanto, la eficiencia hidráulica de estos canales mejora, aumentando a su vez la velocidad del escurrimiento, lo que trae como consecuencia una disminución en el tiempo de concentración t_c . Ahora bien, la ecuación (9) muestra que para una frecuencia dada, la intensidad de lluvia a aplicar en la fórmula racional aumenta si t_c disminuye.

Si se considera que el tiempo de concentración no varía en condición alterada e inalterada de la cuenca y si además se despreciara el término de la fórmula 9, debido a que generalmente es posible encontrar una ecuación para IDF en que d sea nulo para un rango de duraciones cercano a t_c , esta fórmula sería para cada caso:

$$I_1 = KT_1^a / (t_c)^b$$

$$I_2 = KT_2^a / (t_c)^b$$

Como $I_2 = I_1/n$ este valor se puede sustituir en la segunda.

Dividiendo estas expresiones tenemos:

$$I_1 = KT_1^a / (t_c)^b$$

$$I_1/n = KT_2^a / (t_c)^b$$

$$n = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^a$$

por lo tanto:

$$T_1 = (n)^{1/a}$$

10

$$T_2$$

Sin embargo, esta expresión da valores muy diferentes de los obtenidos con fórmulas que sí toman en cuenta la variación en el tiempo de concentración. Esta variación será objeto del siguiente análisis.

Algunos investigadores especialmente de Europa y Estados Unidos, han realizado experimentos en cuencas pequeñas, generalmente menores que 1 km² de superficie, con el objeto de determinar el efecto de la vegetación en la escorrentía de lluvias internas. Harrold publicó un interesante trabajo sobre este efecto, con distintas condiciones de suelo y cubierta vegetal.

Desafortunadamente este investigador no da ninguna relación matemática entre C y t_c , limitándose sólo a indicar que por efecto del incremento de C , el tiempo de concentración y el caudal pico aumenta en forma notoria.

En este mismo trabajo se da a conocer los resultados obtenidos por el TVA de Estados Unidos, en una cuenca experimental de 36 Ha que fue sometida a una reforestación controlada durante un período de 20 años, de modo que al final del período la cuenca tenía un 97% del área cubierta de vegetación. Los períodos parciales de control son:

Período N° 1	1941-1945	calibración
Período N° 2	1946-1950	reforestación
Período N° 3	1951-1955	reforestación
Período N° 4	1956-1960	reforestación

El efecto de una lluvia de una intensidad dada se reproduce en la figura N° 1, donde se puede apreciar la enorme influencia de la cubierta vegetal. En esta misma figura se ha determinado gráficamente el tiempo al pico t_p de la avenida en cada caso, siendo t_p en la cuenca sin vegetación 3.7 veces menor que en la cuenca con vegetación.

Issard realizó numerosos ensayos en parcelas pequeñas sin cauces definidos y de hasta 2 Ha, y encontró que el tiempo de concentración t_c en minutos, de la superficie, tiene la siguiente expresión:

$$t_c = \frac{KBL^{1/3}}{(CI)^{2/3}} \quad 11$$

donde:

L = es la longitud de la superficie

I = la intensidad de la lluvia

C = el coeficiente de escorrentía

K = es una constante

El término B en el sistema métrico está dado por la siguiente expresión:

$$B = \frac{0.0000186I + C_r}{S^{1/3}}$$

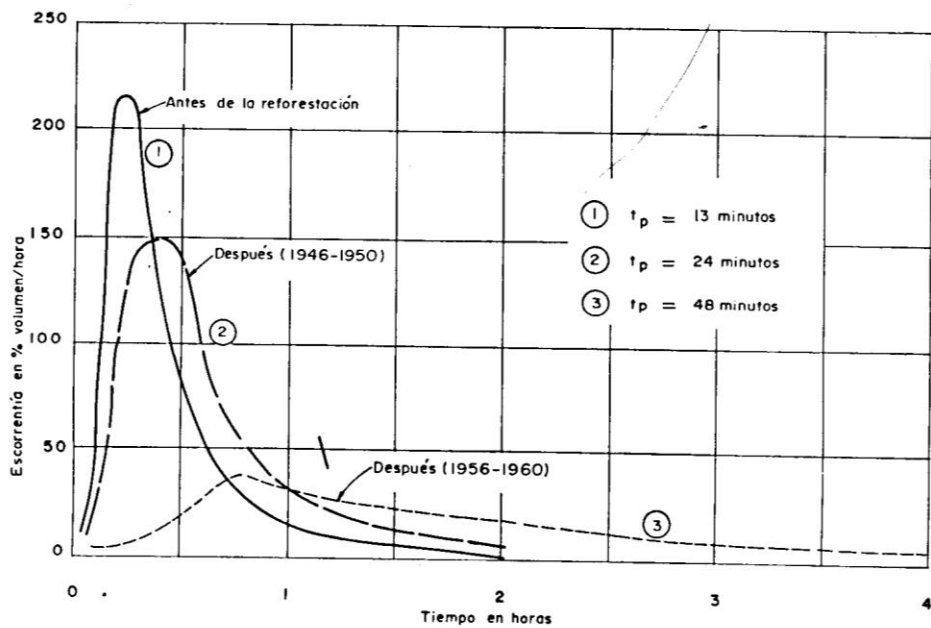


FIGURA N° 1
EFFECTO DE LA REFORESTACION DE UNA CUENCA EN LOS
HIDROGRAMAS DE AVENIDAS

donde:

$S =$ es la pendiente de la superficie y

$C_r =$ es un coeficiente de retardo, cuyo valor depende del tipo de cubierta; este valor se da en la siguiente tabla:

COEFICIENTE DE RETARDO	(Sist. métrico)
Pavimento asfáltico liso	0,0047
Pavimento de hormigón	0,0081
Pavimento de alquitrán y grava	0,0115-
Césped muy tupido	0,0309
Pasto azul denso	0,0405

De esta tabla y de las fórmulas 11 y 12 se deduce que el t_c disminuye a medida que la superficie es menos permeable, o bien el efecto de retención del agua superficial es menor.

Si se considera que t_{c1} es el tiempo de concentración de una cuenca en su condición inicial inalterada, y t_{c2} el tiempo de concentración de la cuenca alterada, se tiene que para la misma intensidad de lluvia.

$$t_{c1} = \frac{KB_1 L^{1/3}}{(C_1 I)^{2/3}} \quad y \quad 13$$

$$t_{c2} = \frac{KB_2 L^{1/3}}{C_2 I)^{2/3}} \quad 14$$

Dividiendo la expresión 13 por la 14 tenemos:

$$\frac{t_{c1}}{t_{c2}} = \frac{B_1}{B_2} \left(\frac{C_2}{C_1} \right)^{2/3} \quad 15$$

Como $C_2 = n C_1$ (fórmula 3)

sustituyendo en 15

$$\frac{t_{c1}}{t_{c2}} = \frac{B_1}{B_2} \left(\frac{n C_1}{C_1} \right)^{2/3} = \frac{B_1}{B_2} n^{2/3}$$

luego:

$$t_{c1} = \left(\frac{B_1}{B_2} n^{2/3} \right) t_{c2} \quad 16$$

sustituyendo en 16 los valores de B_1 y B_2 según la expresión 12

$$t_{c1} = \left(\frac{0,0000186 I + C_{c1}}{0,0000186 I + C_{c2}} n^{2/3} \right) t_{c2} \quad 17$$

ecuación que nos indica que t_{c1} es mayor que t_{c2} . De la expresión 9

$$I_1 = \frac{KT_1^a}{(t_{c1} + d)^b} \quad y \quad 18$$

$$I_2 = \frac{KT_2^a}{(t_{c1} + d)^b}$$

19

donde los subíndices 1 y 2 denotan como en los casos anteriores la condición inalterada y alterada de la cuenca respectivamente. Dividiendo la expresión 18 por la 19 y tomando en cuenta que

$$I_1 = n I_2 \text{ (ecuación 8)}$$

se tiene

$$\frac{n I_2}{I_2} = \frac{KT_1^a / (t_{c1} + d)^b}{KT_2^a / (t_{c2} + d)^b}$$

por lo tanto

$$\frac{T_1}{T_2} = n \left(\frac{t_{c1} + d}{t_{c2} + d} \right)^{1/a} \quad 20$$

El valor de alineación gráfica d, en la mayoría de las ecuaciones de IDF es pequeño en comparación a t_c o bien puede hacerse nulo para un determinado rango de duraciones entonces, si se considera que d es igual a cero, y utilizando la fórmula 17, se tiene que

$$\frac{T_1}{T_2} = n \left(\frac{0,0000186 I + Cr_1}{0,0000186 I + Cr_2 n^{2/3} t_{c2}} \right)^{1/a}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{0,0000186 I + Cr_1}{0,0000186 I + Cr_2} (n)^{\frac{2b+3}{3b} \frac{b}{a}} \quad 21$$

El término encerrado por los paréntesis exteriores es siempre mayor que la unidad y como b/a es mayor también que uno, el valor absoluto de esa expresión es muy alto, como será ilustrado más adelante con un ejemplo.

Si I es menor que 60 mm/hora, no se incurre en un error apreciable si se desprecia el término 0.0000186 I, de modo que la expresión 21 se puede escribir como sigue:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{Cr_1}{Cr_2} \left(\frac{2b+3}{3b} \right)^n, \quad n = \frac{b}{a} \quad 22$$

ANÁLISIS POR SIMULACION CON UNA FUNCION MATEMATICA

Hasta aquí, la relación entre la variación en el tiempo de concentración con el cambio en el coeficiente de escorrentía, se analizó a partir de fórmulas experimentales, sin embargo, cabe la posibilidad de encontrar dicha relación haciendo uso de alguna expresión matemática, cuya representación gráfica se asemeja al hidrograma de una avenida.

El hidrograma de una avenida se puede suponer que se asemeja a un senoide de la forma (figura N° 2):

$$y = \text{sen}^2 X$$

Si se llama con Q el caudal de la avenida en un tiempo t la expresión anterior toma la siguiente forma:

$$Q = Q_m \text{sen}^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{t}{t_c} \right) \quad 23$$

en donde:

Q: es el caudal en tiempo t

Q_m : es el caudal pico de la avenida

t_c : es el tiempo de concentración que se ha supuesto aquí igual al tiempo al pico de la avenida

$2t_c$: período de la oscilación completa (ver figura N° 2).

Como ya ha sido indicado, experimentalmente se ha encontrado que al aumentar el coeficiente de escorrentía de una cuenca disminuye el tiempo de concentración de la misma, y como lo que se busca es la nueva intensidad de lluvia que va a producir el mismo caudal pico dado, para conservar las relaciones matemáticas del senoide,

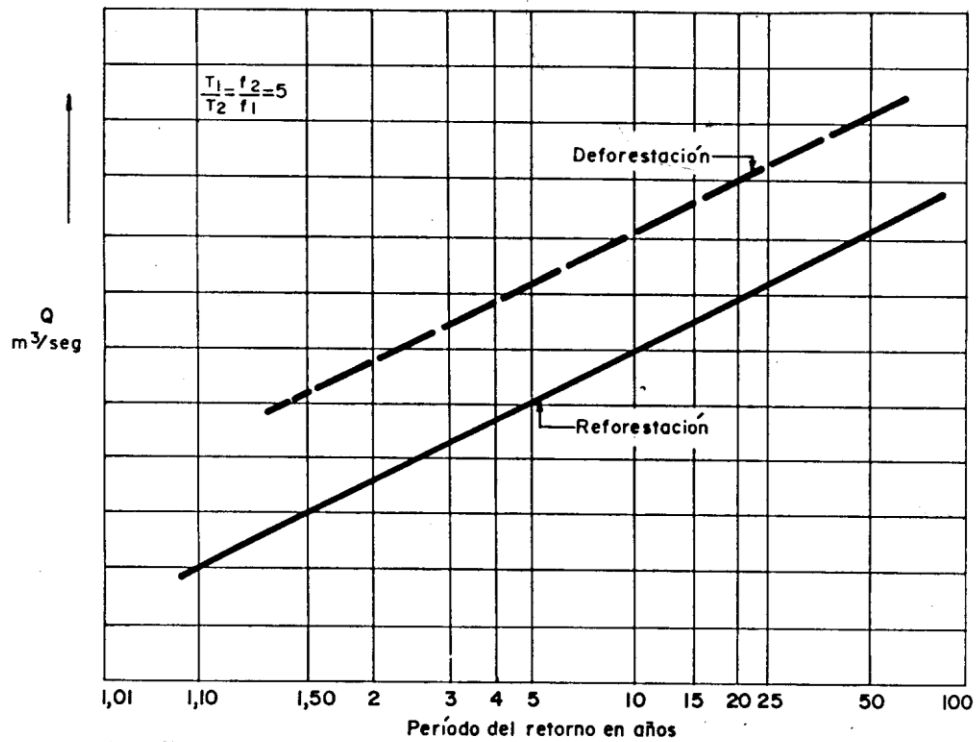


FIGURA N° 2
AUMENTO EN LA FRECUENCIA DE LAS AVENIDAS POR CAUSA
DE LA DEFORESTACION O URBANIZACION

necesariamente el volumen total de esta avenida tendrá que ser menor que la producida en condiciones inalteradas.

Este efecto se ha representado en la figura N° 3 y será analizado a continuación:

La fórmula 23 se puede transformar así:

$$Q = \frac{Q_m}{2} \left(1 - \cos \pi \frac{t}{t_c} \right) \quad 24$$

de más fácil manejo.

El volumen total de escorrentía E de la avenida se halla integrando la anterior expresión, entonces:

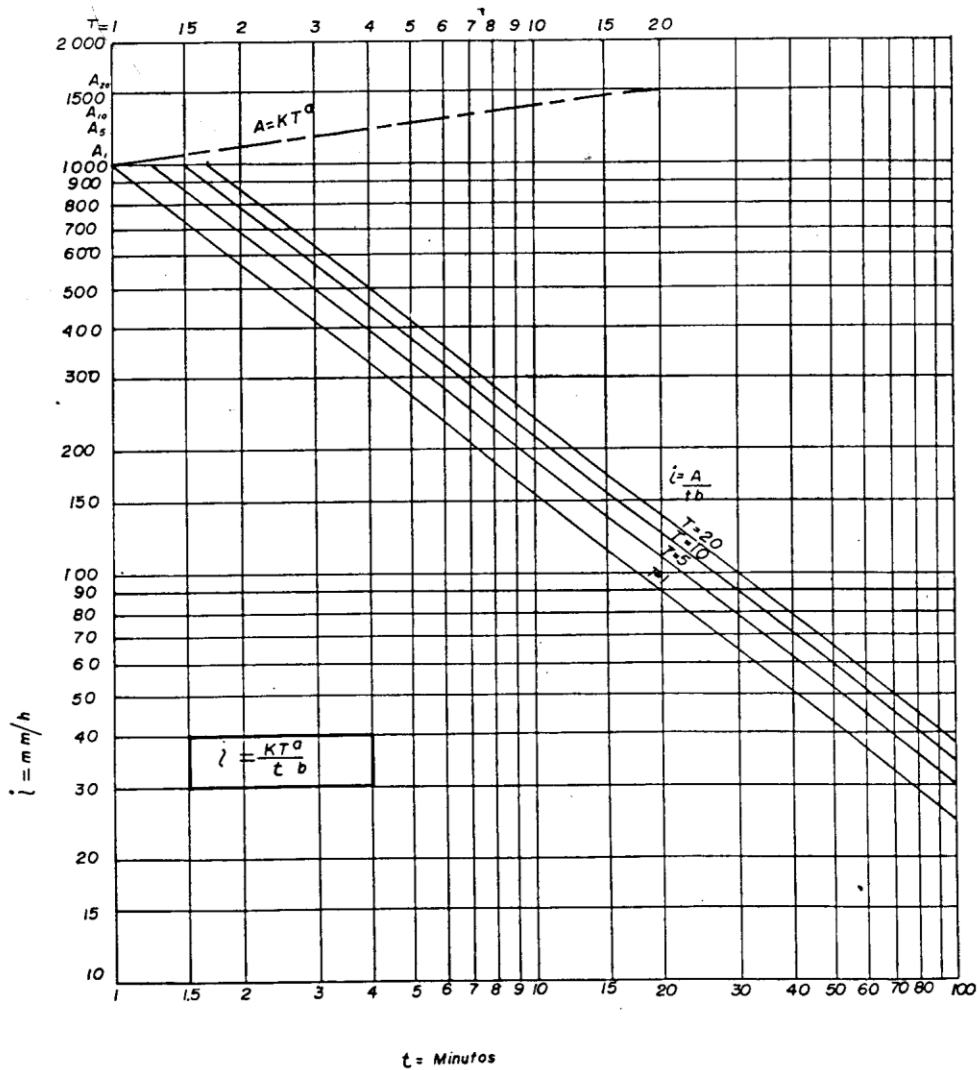


FIGURA N° 3
DERIVACION DE LA ECUACION DE
INTENSIDAD-DURACION-FRECUENCIA: IDF DE LA LLUVIA
(i = mm/h, t = minutos, T = años)

$$E_1 = \int_0^{2t_{cl}} \frac{Q_m}{2} \left(1 - \cos \pi \frac{t}{t_{cl}}\right) dt \quad 24$$

$$E_1 = Q_m t_{cl}$$

luego, para el senoide que representa el nuevo hidrograma correspondiente a t_{c2} , el volumen de escorrentía será:

$$E_2 = Q_m t_{c2}$$

Además por la fórmula 8 se deduce que para producir un mismo caudal Q_m , en la cuenca alterada, la intensidad necesaria es «n» veces menor, y como el volumen de escorrentía es directamente proporcional a la intensidad se tiene que:

$$E_1 = n E_2 \quad 25$$

de donde:

$$Q_m t_{c1} = n Q_m t_{c2} \quad y$$

$$t_{c1} = n t_{c2}$$

sustituyendo esta expresión en la fórmula 20 y despreciando el término d se obtiene:

$$\frac{T_1}{T_2} = n \left(\frac{n t_{c2} b^{1/a}}{t_{c2}} \right) = (n^{b+1})^{1/a}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{b+1}{n^a} \quad 27$$

Como el período de retorno T es igual al inverso de la frecuencia f, es decir $t = 1/f$, en las fórmulas N° 21, 22 y 27 puede sustituirse

$$\frac{T_1}{T_2} \quad \text{por} \quad \frac{f_2}{f_1}$$

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos por las distintas fórmulas, todas ellas de forma potencial, se infiere que cuando se dé una ecuación que represente la frecuencia probable de las avenidas en un río, especialmente si su cuenca es pequeña, debería indicarse que «tal ecuación es válida para las condiciones que se observan en la cuenca al momento de hacer el análisis», puesto que si en dicha cuenca se experimentara un cambio en su cobertura vegetal, la frecuencia de las avenidas variará de manera muy significativa, concepto que se aclara con la figura N° 4, la cual representa una situación en la que:

EJEMPLO HIPOTETICO

Determinar el cambio en la frecuencia de las avenidas en una pequeña cuenca que se urbaniza gradualmente.

Las condiciones iniciales son $C_1 = 0,25$ y la ecuación de IDF es

$$i = \frac{KT^{0,20}}{t^{0,80}}$$

Calcular la variación en la frecuencia para incrementos del 10% en el área urbanizada y los coeficientes indicados.

% Urb.	C_u	C_n	C_2	C_{r2}	$n = C_2/C_1$	Soluc. Form. 10	Soluc. Form. 22 C_{r1}/C_{r2}	F_2/F_1
0	—	—	0.250	—	1.00	1.00	1.00	1.00
10	0.30	0.028	0.255	0.0298	1.02	1.10	1.007	1.20
20	0.40	0.025	0.280	0.0290	1.12	1.76	1.030	2.68
30	0.45	0.023	0.310	0.0279	1.24	2.93	1.075	6.95
40	0.55	0.020	0.370	0.0260	1.48	7.10	1.150	35.30
50	0.60	0.020	0.425	0.0250	1.70	14.20	1.200	121

Fórmula N° 10 $F_2/F_1 = (n)^{1/a} = (n)^5$

Fórmula N° 22 $F_2/F_1 = (C_{r1}/C_{r2}) \cdot n^{(2b+3)/3a}$

$$F_2/F_1 = (C_{r1}/C_{r2}) \cdot n^{1.917^4}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{f_2}{f_1} = 5$$

es decir, que la frecuencia de las avenidas aumentó 5 veces al deforestar (o urbanizar) la cuenca.

Esta es la situación que se observa actualmente en la ciudad de San José con las continuas inundaciones provocadas por los ríos Ocloro, María Aguilar y Negritos,

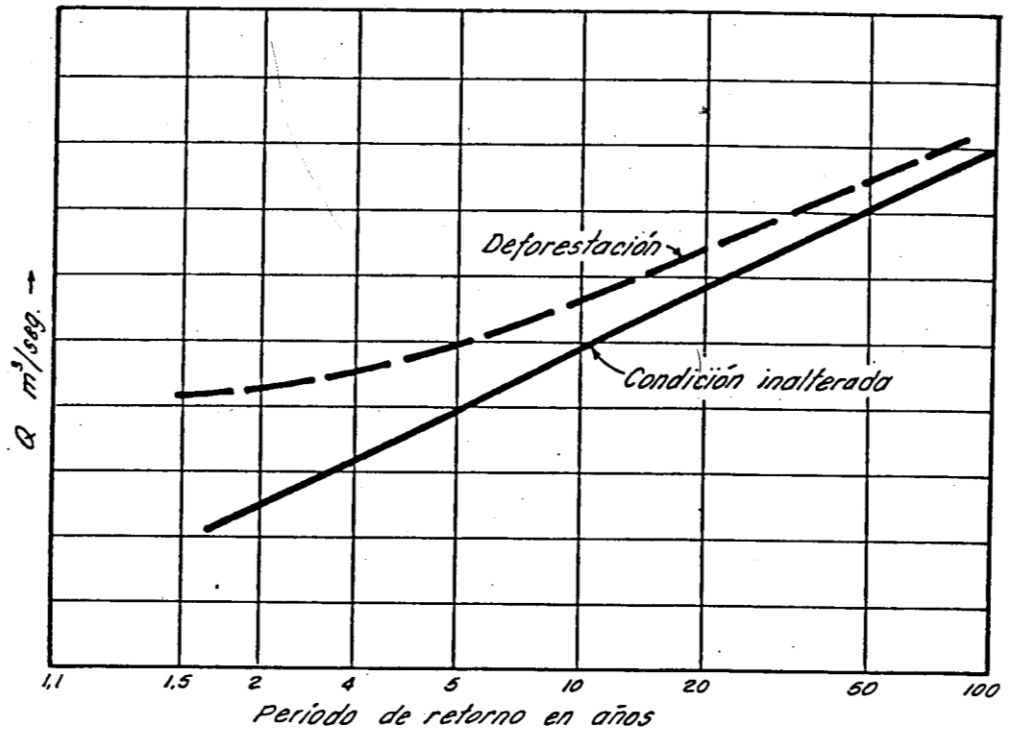
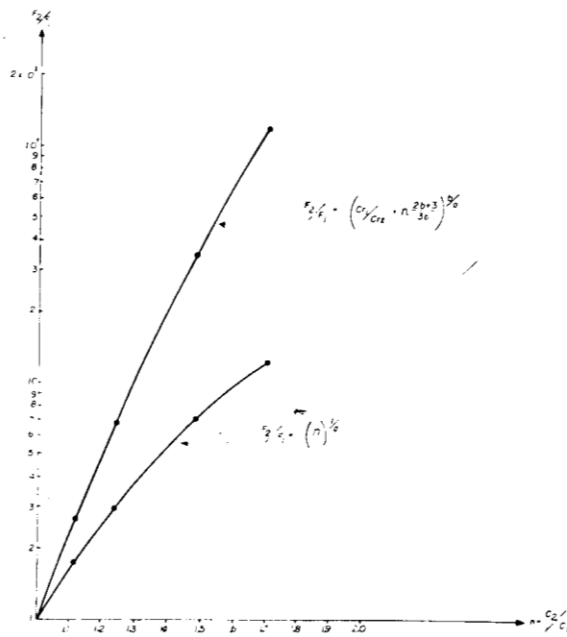


FIGURA N° 4
AVENIDAS MAXIMAS. VARIACION DE LA FRECUENCIA
EN CUENCAS ALTERADAS.
RESULTADOS CON MODELOS DE SIMULACION HIDROLOGICA



VARIACION DE
LA FRECUENCIA CON "n"

principalmente, en cuyas cuencas se lleva a cabo un proceso de «impermeabilización» desde hace varios años, por causa principal de la urbanización de los terrenos aledaños a esta ciudad en rápida expansión como es nuestra capital.

Las fórmulas derivadas serían también válidas para toda cuenca, cualquiera que sea su extensión, pero la magnitud o importancia de este aumento dependerá del porcentaje de incremento que se tenga en el coeficiente de escorrentía, ya sea por causas artificiales o naturales. Por ejemplo, una situación como la representada en la figura N° 4, se tendría en una cuenca en donde el coeficiente de escorrentía aumente sólo un 15% o un 20%.

Este hecho también se ha notado en Costa Rica provocado por causas naturales. Tal es el caso que se observó en el Río Reventado, cuando su cuenca superior sufrió las consecuencias de una intensa deforestación natural, ocasionada por la ceniza eruptada por el Volcán Irazú en sus diferentes períodos de actividad, en particular la de los años 1963 a 1965, que de una manera u otra ha sido mencionado en varios estudios relacionados con los diversos aspectos del fenómeno, especialmente en lo que se refiere al aumento extraordinario en la frecuencia de las avenidas de este río, y que provocó muchos y muy serios problemas, y que fueron objeto de un interesante estudio llevado a cabo por el ICE, en el cual el fenómeno se trata en detalle.

Cuando se despoja a los terrenos de su vegetación, no sólo se tendrá un aumento en la frecuencia y magnitud de las crecidas, sino que los problemas involucrados son muy serios y de diferente tipo, máxime si no se toman las previsiones sobre lo que ha de suceder con el paso de los años.