

ANEXO A

1. INFORMACIÓN BÁSICA

La información básica es esencial para poder utilizar cualquier metodología hidrológica. En la actualidad existen muchas metodologías que no pueden ser utilizada por carencia de información, en especial lo relacionado con registro de variables hidroclimáticas y características de las cuencas, en especial suelos y cobertura.

A continuación se hace un recuento de la información básica necesaria para estudios hidrológicos.

1.1. Precipitación.

La información de precipitación es la base de cualquier análisis en manejo de cuencas. La precipitación es el factor que condiciona la producción de agua de la cuenca, la erosión y el comportamiento de la flora y la fauna. La precipitación es medida como un valor puntual en estaciones con pluviómetros de cántaro o registradores. La precipitación se presenta en anuarios, que para el caso de Venezuela, se llama HIDROANAL, y se publica por regiones.

Los valores puntuales o valores medidos en una estación determinada pueden ser analizados a fin de producir **valores mensuales y anuales**. Los valores extremos pueden ser analizados a fin de obtener **curvas de profundidad-duración frecuencia**, tales como las presentadas en la figura A1 . El **análisis de tormentas** se utiliza para obtener información sobre el comportamiento de tormentas individuales y para obtener valores de erosividad de las lluvias.

Los valores puntuales pueden ser extrapolados mediante su presentación en mapas isoyéticos; de esa manera se pueden obtener **mapas de isoyetas medias**, tanto anuales como mensuales y/o estacionales. Es común presentar mapas de isoyetas para años húmedos y secos. Los valores extremos se presentan como mapas de profundidad-duración-frecuencia, tal como se presenta en la figura A1; las tormentas se presentan como mapas de tormentas, similares a la figura A5 . La erosividad puede ser presentada en tablas tal como aparece en el cuadro 5.1 del capítulo 5 o en mapas de **isoerodentas**, tal como se muestra en la figura A6 .

Un análisis posterior de la información sobre tormentas puede conducir a la confección de las relaciones área-porcentaje de precipitación puntual, tal como aparece en la figura A7 y relaciones precipitación-duración, P/PT vs D/DT , presentadas en la figura A8 . Estos dos últimos gráficos son utilizados en la estimación de la lluvia de diseño.

1.2 Evaporación.

La evaporación se utiliza directamente en aquellas metodologías que así lo requieren o puede utilizarse para la estimación de la evapotranspiración que es requerida para realizar balances hídricos o para los modelos hidrológicos.

La evaporación se mide con tanques de evaporación, siendo el tanque A, la metodología más generalizada. La evaporación se publica como valores diarios y por lo general se presenta en la forma de valores puntuales. En el análisis de la información ésta se presenta como valores mensuales y/o anuales. La variación espacial de la evaporación es relativamente pequeña y por lo tanto a veces no es necesario representarla como valores espaciales pudiendo ser extrapolada linealmente. La figura A9 presenta la variación de la evaporación media mesual/anual para varias estaciones.

1.3 Escorrentía.

La determinación de la escorrentía es por lo general el objeto de los estudios hidrológicos. Los datos de escorrentía pueden ser utilizados directamente en una cuenca o pueden analizarse y/o regionalizarse para ser extrapolados a otras cuencas. De la misma manera esta información puede ser utilizada para calibrar y/o validar modelos.

La escorrentía se mide en estaciones fluviométricas, las cuales registran los niveles del agua en los cauces y luego esta información es analizada para convertirla en valores de caudales. Los niveles pueden ser registrados mediante lectura directa de “miras” o puede ser grabada continuamente por medio de limnógrafos. La información se presenta como caudales diarios.

Por lo general en pequeñas cuencas no se cuenta con información de escorrentía. En el caso de existir, esta puede ser presentada como valores instantáneos, valores diarios o valores mensuales o por eventos de lluvia y escorrentía.

La información de escorrentía puede analizarse de diferentes formas para ser utilizada dentro de la misma cuenca o regionalmente. Entre las formas de presentación podemos señalar:

- curvas de frecuencia de caudales máximos
- curvas de frecuencia de caudales mínimos
- rendimiento de cuencas
- curvas regionales de frecuencia

1.4 Sedimentos.

La información sobre sedimentos se utiliza para determinar la producción de sedimentos de las cuencas. En las evaluaciones puede utilizarse para calibrar modelos hidrológicos. Los sedimentos son medidos en las estaciones fluvimétricas como valores esporádicos. La información se publica como valores mensuales.

1.5 Información fisiográfica

La información fisiográfica se refiere a las características de la cuenca y es requerida para utilizar metodologías para realizar evaluaciones. A continuación se detalla la información de mayor relevancia:

1.5.1 Suelos.

La información de suelo requerida en los estudios hidrológicos está relacionada con la determinación de la características físicas : textura, estructura, infiltración, retención de humedad, erodabilidad, permeabilidad ; y características químicas : capacidad de intercambio de cationes, nutrientes, pH, materia orgánica, contenido de sales, etc.

Las características de los suelos varían muy poco con el tiempo, sin embargo, por la acción del hombre, puede haber grandes variaciones. Generalmente la información de suelos se presenta espacialmente en forma de mapas. Para cada unidad de suelo se presentan tablas con los valores de las características físicas y químicas. El procesamiento de estos datos se refiere por lo general a la obtención de valores medios para toda la cuenca. Con la información de los estudios de suelos, se puede lograr clasificarlos hidrológicamente y por sus capacidades de uso. El cuadro A1 presenta algunas características físicas de las diferentes clases texturales. El cuadro B1.1 muestra la clasificación hidrológica de los suelos.

Clase Textural	Da	Granulometría			Porosidad		Retención H2O		Kc cm/h	Clas Hidr	
		arena	arcilla	limo	total	efectiva	CC	PMP			
Arena	a	1.62	88	5	7	0.437	0.417	0.091	0.033	21	A
Areno francoso	aF	1.64	83	13	4	0.437	0.401	0.125	0.055	6.11	A
Franco arenoso	Fa	1.55	62	8	30	0.453	0.412	0.207	0.095	2.59	A
Franco	F	1.26	51	15	34	0.463	0.434	0.27	0.117	1.32	A
Franco limoso	FL	1.31	17	13	70	0.501	0.486	0.33	0.133	0.68	B
Franco arcillo arenoso	FAa	1.64	58	28	14	0.398	0.33	0.255	0.148	0.43	B
Franco arcilloso	FA	1.34	33	34	33	0.464	0.39	0.318	0.197	0.23	C
Franco arcillo limoso	FAL	1.3	10	34	56	0.471	0.432	0.366	0.208	0.15	C
Arcillo arenoso	Aa	1.4	55	45	0	0.43	0.321	0.339	0.239	0.12	C
Arcillo limoso	AL	1.3	10	45	45	0.479	0.423	0.387	0.25	0.09	D
Arcilloso	A	1.22	10	70	20	0.475	0.385	0.396	0.272	0.06	D

1.5.2 Uso de la tierra.

El uso de la tierra se requiere en la mayoría de las metodologías ya que es éste el principal factor de modificación de las condiciones de las cuencas. El uso de la tierra influye sobre la escorrentía, la infiltración y la erosión.

El uso de la tierra no requiere procesamiento especial, excepto por su representación espacial y estimación de variaciones temporales. En el caso de la vegetación, ésta debe ser clasificada de acuerdo a los porcentajes de cobertura, porte y profundidad radical. La variación estacional de la cobertura de los cultivos anuales es importante en la determinación de los coeficientes de cultivo para la estimación de la evapotranspiración y erosión.

1.5.3 Topografía.

La información topográfica debe procesarse para determinar los rangos de pendientes y las longitudes de flujo, indispensables para la estimación de caudales máximos y erosión. Por otra parte se analizará la hidrografía a fin de determinar las densidades de drenaje y los índices relacionados con ella.

Hay diferentes fuentes de información topográfica. En Venezuela se pueden obtener mapas escala 1: 25.000, sin embargo la más frecuente se refiere a mapas 1: 100.000. Cuando se utilizan metodologías de SIG, se requiere un Modelo Digital del Terreno (MDT).

1.5.4 Geología.

Los estudios geológicos son necesarios para comprender la dinámica del agua subterránea. En algunos casos, los mapas geológicos son de mucha ayuda para mejorar la información de suelos.

2. ADECUACIÓN DE LA INFORMACIÓN Y ESTIMACIÓN DE DATOS

Es común que la información tenga problemas o no esté en el formato adecuado para poderla utilizar en algunas metodologías. Las situaciones más comunes son:

- Falta de información
- Información incompleta
- Formato no adecuado

A continuación se describirán algunas metodologías sencillas para la adecuación de la información y estimación de datos.

2.1 Estimación de la lluvia media sobre una cuenca.

Cuando se desea conocer la lluvia media sobre una cuenca para cualquier duración: año, mes, día, se pueden utilizar varias metodologías, de las cuales las más conocidas son:

- media aritmética
- método de las isoyetas
- polígonos de Thiessen.

La **media aritmética** consiste en obtener el promedio de los valores de las estaciones dentro de la cuenca y en áreas vecinas; este es el método más sencillo pero el menos preciso. El método de las isoyetas consiste en obtener el área de influencia de cada isoyeta dentro de la cuenca y luego obtener el promedio ponderado; es el mejor método, sin embargo es muy tedioso y no puede automatizarse. El método de los polígonos de Thiessen consiste en trazar los polígonos del área de influencia de cada estación y determinar el área de los mismos; la lluvia promedio se obtiene prorrateando los valores.

La figura A10 muestra la forma de utilizar esos tres métodos.

2.2 Estimación de la lluvia de diseño.

La lluvia de diseño, como su nombre lo indica, es el valor de la lluvia que se utiliza para un determinado diseño de: riego, drenaje, estructuras, balances hídricos, etc.

Para la estimación de la lluvia de diseño es necesario considerar ciertos parámetros que la definen: **duración y frecuencia**. Dependiendo de la utilización de esa lluvia de diseño se tendrían que considerar otros parámetros como: **variación espacial y variación temporal**.

La **duración** de la lluvia se refiere al tiempo de aplicación de la lluvia; así, por ejemplo, para la estimación de crecidas máximas, la duración se considera igual al tiempo de concentración. Para diseño de zanjas de retención se considera la lluvia diaria, para riego, los valores mensuales podrían ser suficientes.

La **frecuencia** de la lluvia se refiere a la probabilidad de ocurrencia de la misma. La escogencia de la frecuencia está determinada por factores socio-económicos y depende del grado de seguridad que se le quiera dar al diseño. De esa manera, para el diseño de un puente de una carretera rural, se pueden escoger frecuencias de 50 años, para diseño de obras de drenaje agrícola se escogen frecuencias de 10 años y para diseño de aliviaderos de represas aguas arriba de centros poblados la frecuencia puede ser de 1000 años.

La escogencia de la lluvia de diseño se puede hacer para una localidad para lo cual escogemos la lluvia puntual o para una cuenca en cuyo caso necesitamos la lluvia media. En cualquier caso, la lluvia es determinada a partir de curvas de profundidad-duración-frecuencia para la localidad en cuestión; si no existe información sobre el sitio, se puede utilizar información generalizada tales como los Atlas de Profundidad-Duración-Frecuencia como el que aparece en las figuras A1 a A4 del anexo.

La lluvia escogida, se refiere a un valor puntual para la duración escogida. Ese valor se puede aplicar directamente para áreas pequeñas y/o cuando sólo se requiera de la lluvia total. Por ejemplo, para el diseño de un tanque de almacenamiento para recoger el agua de lluvia del tejado de una casa.

Cuando la lluvia de diseño se aplica a un área mayor o una cuenca grande, ese valor puntual tiene que ser afectado por un **factor de reducción por área** tal como se muestra en la figura A7. En los casos de aplicación de la lluvia de diseño para metodologías que requieran la distribución de la lluvia en el tiempo, tal como en los modelos de eventos, es necesario estimar esa distribución y para ello hay que utilizar relaciones como las que aparecen en la figura A6.

2.3 Estimación de la lluvia de diseño utilizando Mapas y Curvas de Profundidad-duración-frecuencia.

Las curvas de profundidad-duración-frecuencia permiten escoger la lluvia de diseño para cualquier frecuencia ya que ésta se encuentra en una escala continua, sin embargo, las duraciones se presentan para valores muy reducidos. Las duraciones más comunes son: 5, 15 y 30, minutos y 1, 3, 6, 9, 12 y 24 horas.

Para el caso de duraciones intermedias, es necesario interpolar para obtener la lluvia para la duración deseada.

En el caso de los mapas, habría que tener un mapa para cualquier combinación de duración y frecuencia, lo cual resultaría en un número infinito de mapas o por lo menos de muchos mapas. Para obviar ese problema y aprovechando las relaciones existentes entre duraciones y frecuencias, se puede estimar la lluvia de diseño para cualquier frecuencia y duración preparando un gráfico general de interpolación con sólo 4 mapas de profundidad-duración-frecuencia. Los mapas necesarios son:

- 2 años 1 hora
- 2 años 6 horas
- 100 años 1 hora
- 100 años 6 horas

Las figuras A1 al A4 presentan esos cuatro mapas. La interpolación se hace utilizando un gráfico similar al que aparece en la figura A11. Para elaborar el gráfico se procede de la siguiente manera:

1. Se ubica en cada uno de los cuatro mapas el sitio en consideración y se lee el valor de la precipitación para las duraciones y frecuencias señaladas.
2. En papel semi-logarítmico de 5 ciclos, se marcan las frecuencias de 1 a 100 años en la escala logarítmica y comenzando desde el extremo izquierdo; en la escala normal se marca la precipitación, tal como aparece en la figura A11.
3. Se trazan los puntos correspondientes a la duración de una hora y para las frecuencias de 2 y 100 años. Se unen esos dos puntos con una recta. Esa recta se utiliza para interpolar valores de una hora y frecuencias entre 2 y 100 años.
4. De la misma manera se trazan los valores de la precipitación de 6 horas para 2 y 100 años e igualmente se unen los puntos con una recta; esa recta sirve para interpolar las duraciones de 6 horas.
5. Para interpolar entre duraciones de una hora y seis horas se debe escoger la frecuencia deseada. Luego en el extremo derecho del gráfico se marcan las duraciones entre una hora a seis horas, tal como aparece en la figura A11.
6. Con la frecuencia escogida, se leen los valores de lluvia para 1 y seis horas y estos son "transportados" al gráfico de duraciones marcando puntos en la intersección con las duraciones correspondientes. Se traza una recta entre esos puntos; con esa línea, se pueden interpolar los valores de precipitación para duraciones entre 1 y seis horas y para la frecuencia escogida.
7. El procedimiento anterior puede ser repetido para otras frecuencias y/u otras localidades. La figura A11 muestra un ejemplo para Barinas y Margarita para frecuencias de 10 y 50 años respectivamente.

Para estimaciones de la lluvia para duraciones menores de una hora, se puede utilizar una relación similar a la presentada por Rojas (1986):

$$P = P_{60} * \left(\frac{D_m}{60}\right)^{0.55}$$

en donde P es la precipitación deseada, P₆₀ es la lluvia de una hora y D_m es la duración deseada en minutos.

Método analítico de estimar la lluvia de diseño.

El procedimiento anterior puede realizarse analíticamente con la ventaja de obtener “ecuaciones de diseño” para una determinada localidad. Este tiene la ventaja de poder ser utilizados con metodologías que requieran el cálculo de la lluvia de diseño. El procedimiento es como sigue:

1. Se determinan los mismos valores del procedimiento anterior

2. Se calculan los coeficientes K1 y K6 :

$$K1 = 0.256 \left(P_{1,100} - P_{1,2} \right)$$

$$K6 = 0.256 \left(P_{6,100} - P_{6,2} \right)$$

en donde P_{1,100} y P_{1,2} son los valores de la lluvia de una hora para 100 y 2 años. P_{6,100} y P_{6,2} representan la lluvia de seis horas para 100 y 3 años.

3. Se calculan los valores de para TR=1 :

$$P_{1,1} = P_{1,2} - 0.69315 * K1$$

$$P_{6,1} = P_{6,2} - 0.69315 * K6$$

4. Se calculan los valores de P_{1,TR} y P_{6,TR} los cuales son los valores de la lluvia de 1 hora y 6 horas para el TR deseado:

$$P_{1,TR} = P_{1,1} + \ln(TR) * K1$$

$$P_{6,TR} = P_{6,1} + \ln(TR) * K6$$

4. Se calcula el coeficiente Ktr:

$$Ktr = 0.56 (P_{6,TR} - P_{1,TR})$$

5. Finalmente se obtiene la “ecuación de la lluvia de diseño” como:

$$P_{D,TR} = K_{tr} * \ln(D) + P_{1,TR}$$

Ejemplo: Con los datos del ejemplo anterior de la figura A11 y para TR=10 y D=3 obtenemos:

$$\begin{array}{ll} P_{1,2} = 45 \text{ mm} & P_{1,100} = 125 \\ P_{6,2} = 60 \text{ mm} & P_{6,100} = 160 \end{array}$$

$$\begin{aligned} K_1 &= 0.256 * (125 - 45) = 20.48 \\ K_6 &= 0.256 * (160 - 60) = 25.6 \\ P_{1,1} &= 45 - 0.69315 * 20.48 = 30.804 \\ P_{6,1} &= 60 - 0.69315 * 25.6 = 42.255 \\ P_{1,10} &= 30.804 + \ln(10) * 20.48 = 77.96 \\ P_{6,10} &= 42.255 + \ln(10) * 25.6 = 101.201 \\ K_3 &= 0.56 * (101.201 - 77.804) = 13.102 \end{aligned}$$

puede observarse que los valores de P_{1,10} y P_{6,10} son iguales a los que aparecen en la figura A11. Finalmente obtenemos la ecuación de diseño:

$$P_{D,10} = 13.102 * \ln(D) + 77.96$$

para la duración de 3 horas, la lluvia será:

$$P_{3,10} = 13.102 * \ln(3) + 77.96 = 92.35$$

valor que es igual al que aparece en la figura A11.

Este método se puede generalizar programándolo en una hoja de cálculo. El cuadro A2 muestra una hoja de cálculo con el ejemplo anterior.

2.4 Estimación de la evaporación.

Las estimaciones de la evaporación pueden hacerse de diferentes maneras dependiendo del uso que se le quiera dar a la información. El caso más sencillo lo constituye las estimaciones de datos mensuales los cuales son requeridos para estimación de demandas de agua y balances hídricos. En este caso se pueden hacer interpolaciones con estaciones existentes.

La figura A9 muestra la buena correlación entre estaciones de evaporación par localidades cercanas. En ese caso, se pueden hacer interpolaciones con suma facilidad.

Cuando no existen datos cercanos, se pueden utilizar relaciones entre la evaporación y la temperatura o la altitud. Rojas (1986) presenta una metodología propuesta por Christiansen y Hargreaves (1969) para Venezuela:

$$EVPA = CPMA * EVPL$$

en donde

EVPA= Evaporación de la Tina A (mm/año)
CPMA= $1.22 - 0.22 (PMA/1200)$
EVPL= $2340 - 650 (EL/1000) + 60 (EL/1000)^2$
EL= Elevación (metros)
PMA= Precipitación media anual (mm).

La variación temporal de la evaporación se puede hacer utilizando los patrones de variación de la zona.

2.5 Tiempo de concentración.

El tiempo de concentración se define como: el tiempo de viaje de una porción de agua desde el punto más distante de la cuenca hasta el sitio en consideración. El tiempo de concentración es muy importante ya que determina la duración de la lluvia de diseño en las estimaciones de los caudales máximos.

El tiempo de concentración se puede estimar por varios procedimientos entre los cuales podemos mencionar:

- en base a análisis de hidrogramas
- hidráulica fluvial
- métodos empíricos
- onda cinemática

Rojas (1978) presenta una comparación de diferentes métodos llegando a la conclusión de que el método de Kirpich (1940) presenta resultados aceptables y lo recomienda por su sencillez. La ecuación del método es:

$$T_c = 0.0195 L^{1.155} H^{-0.385}$$

en la cual T_c es el tiempo de concentración en minutos, L , la longitud del cauce en metros y H el desnivel en metros.

En el anexo B2 se presentan algunas metodologías para determinar el tiempo de concentración.

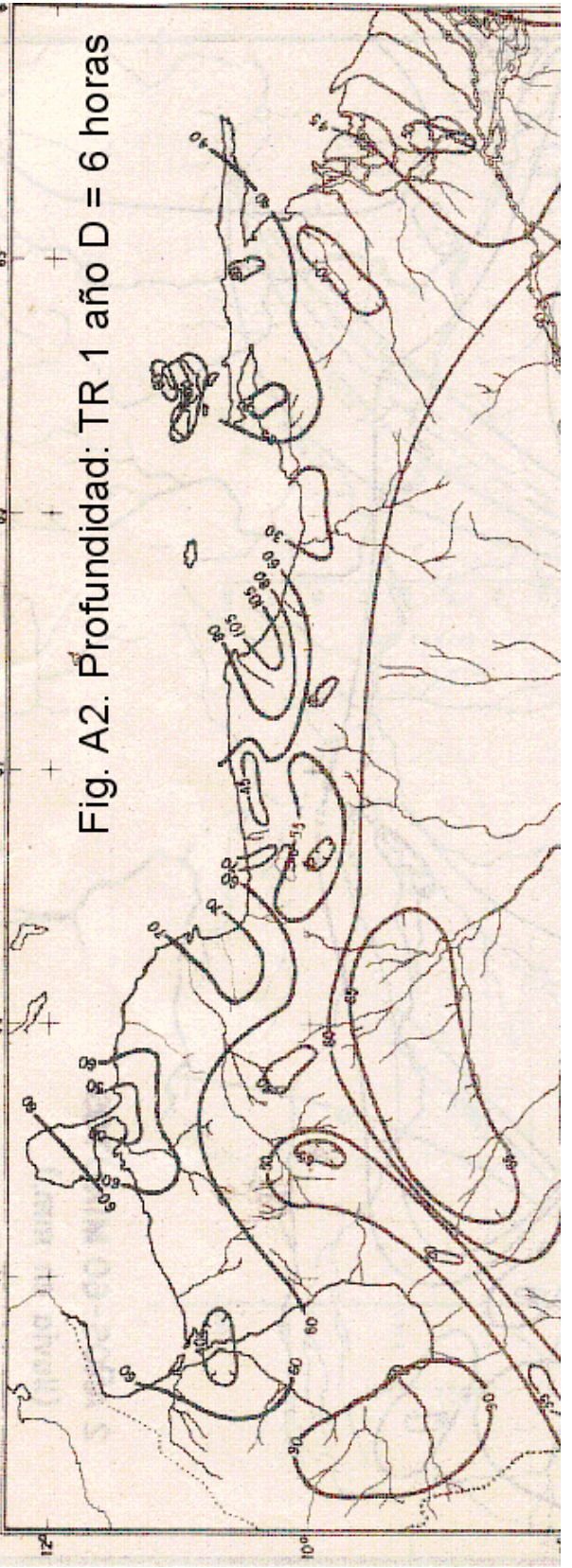
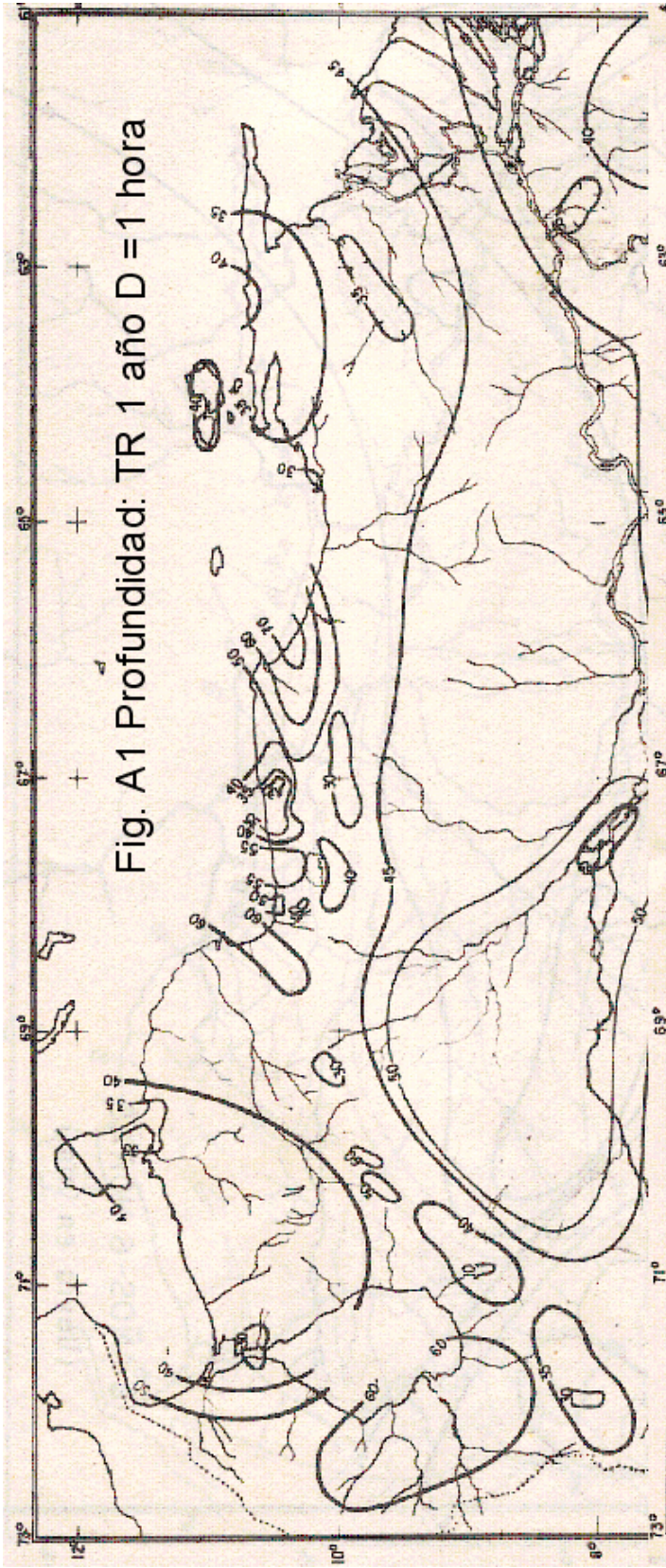
2.6 Infiltración.

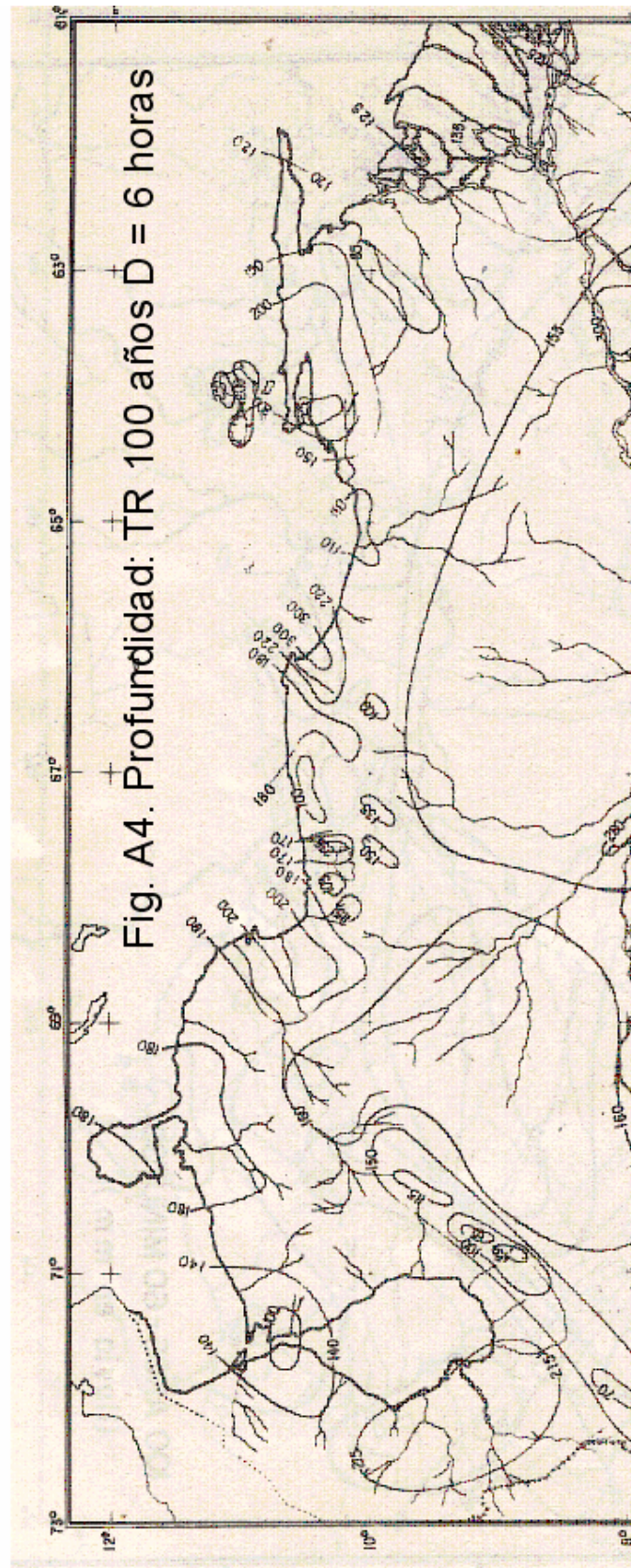
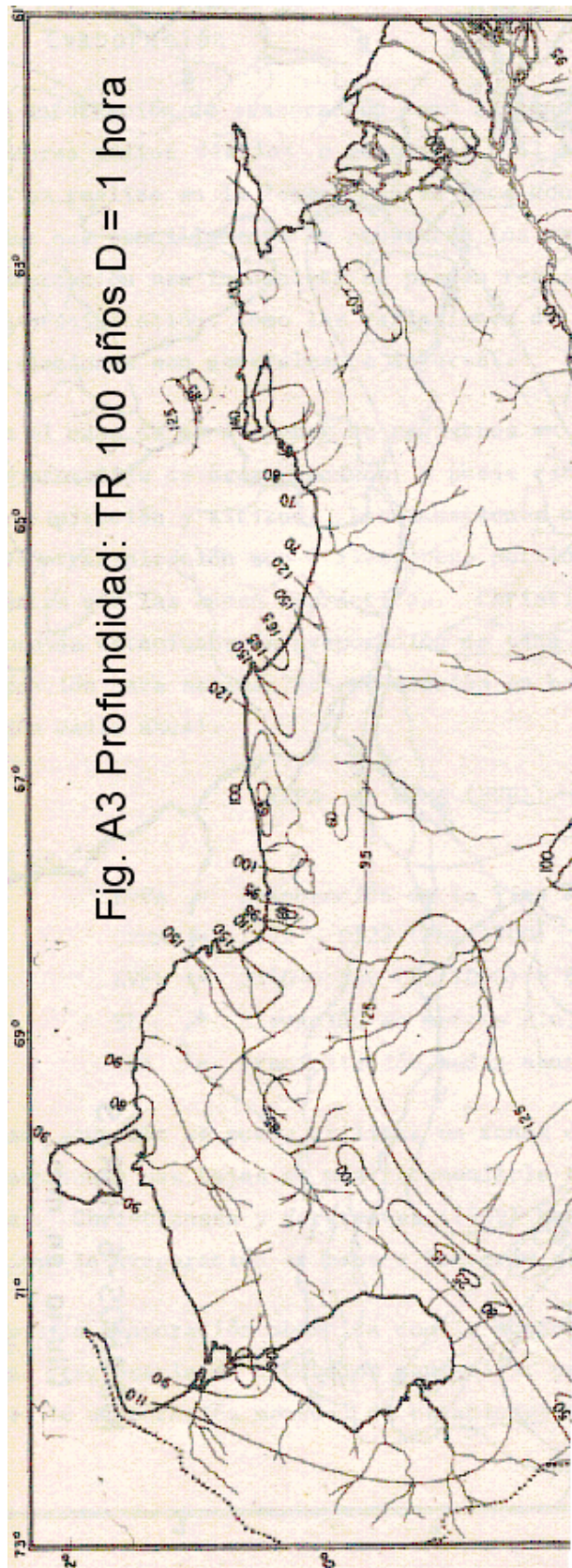
La infiltración es una de las variables más importantes en el proceso precipitación-escorrentía. Existen varios métodos de medir y/o estimar la infiltración. Para la medición se puede utilizar los siguientes métodos : cilindros de infiltración, pozas, simuladores de lluvia, análisis de tormentas.

Cuando no se cuenta con información de infiltración, se pueden realizar estimaciones en base a la textura del suelo. Los valores de conductividad hidráulica saturada que aparecen en el cuadro A1

pueden tomarse como iguales a la **infiltración básica**. Esos valores pueden tomarse como preliminares, sin embargo, para diseño de obras de riego es necesario realizar mediciones.

El método del número de curva del Soil Conservation Service es hasta ahora el mejor método para estimación de la infiltración para las estimaciones de escorrentía. En el anexo B1 se detalla en método.





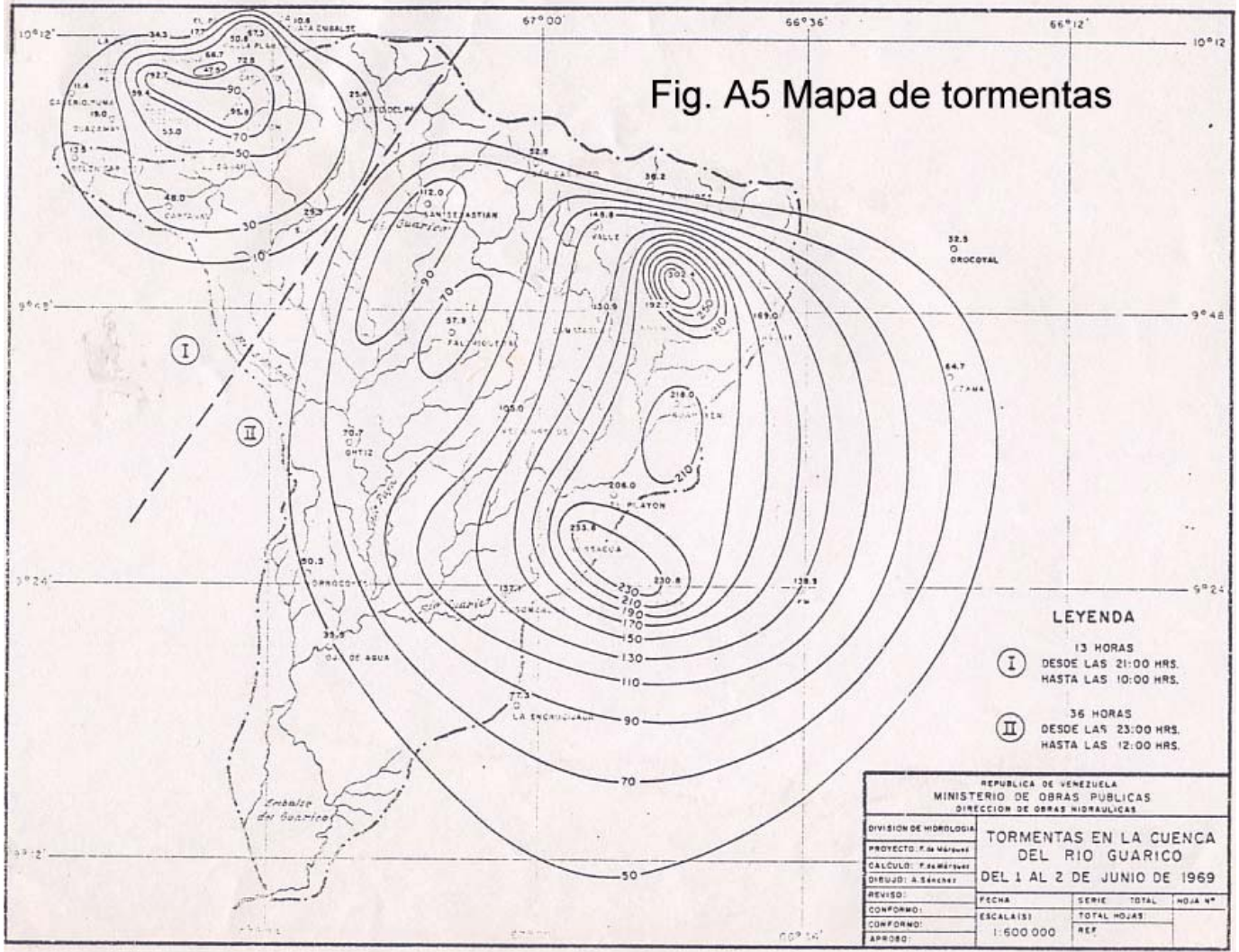


Fig. A6 Mapa de isoerodentas. Cuenca Humuya Honduras

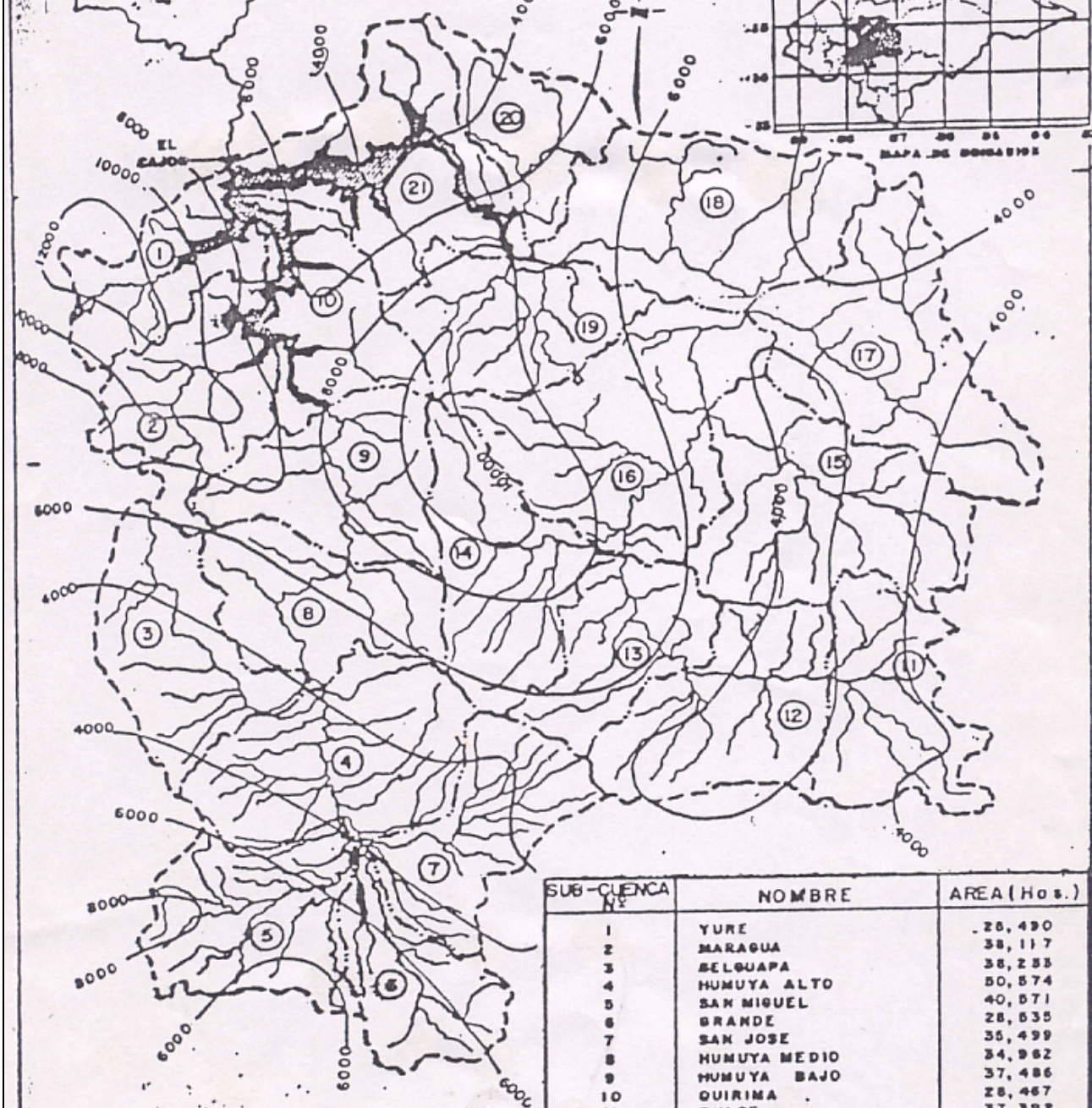


FIGURA N° 01-10
ESC. 1:769,000

MANEJO INTEGRAL DE LA CUENCA EL CAJON
MAPA DE ISOERODENTAS
MEGAJOULE .MILIMETRO
HECTAREA. HORA: AÑO

SUB-CUENCA N°	NOMBRE	AREA (Hos.)
1	YURE	28,490
2	MARAGUA	38,117
3	BELGUAPA	38,233
4	HUMUYA ALTO	50,574
5	SAN MIGUEL	40,571
6	GRANDE	28,535
7	SAN JOSE	35,499
8	HUMUYA MEDIO	34,962
9	HUMUYA BAJO	37,486
10	QUIRIMA	28,467
11	DULCE	37,392
12	TALANGA	42,417
13	TULIAPA	29,506
14	METAPA	41,880
15	PLAYAS	56,324
16	AGUA CALIENTE	61,348
17	SIALE	60,319
18	SULACO	55,763
19	JICARO	36,948
20	JACAGUA	25,430
21	CHILISTAGUA	43,819
TOTAL		851,880

Fig. A7. Relaciones Area-Porcentaje de lluvia puntual

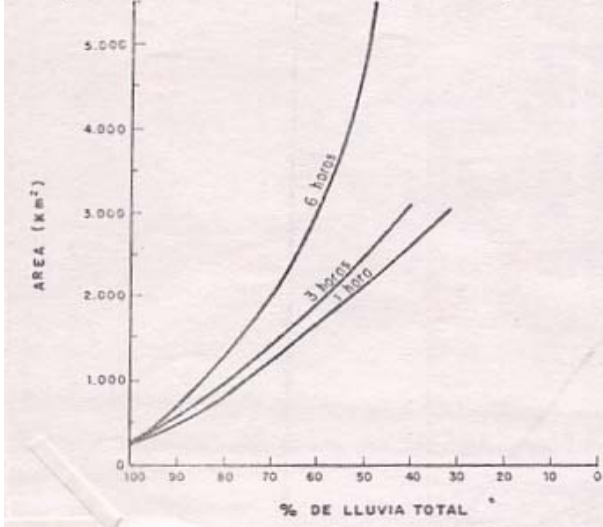


Fig. A8. Relaciones Precipitación total-Duración (P/PT vs D/DT)

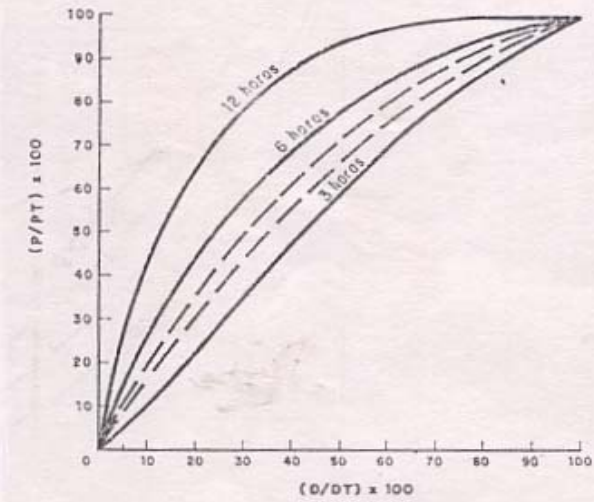


Fig. A9. Relación Evmes/Evaño : Estacionews Barinas (1960-70)

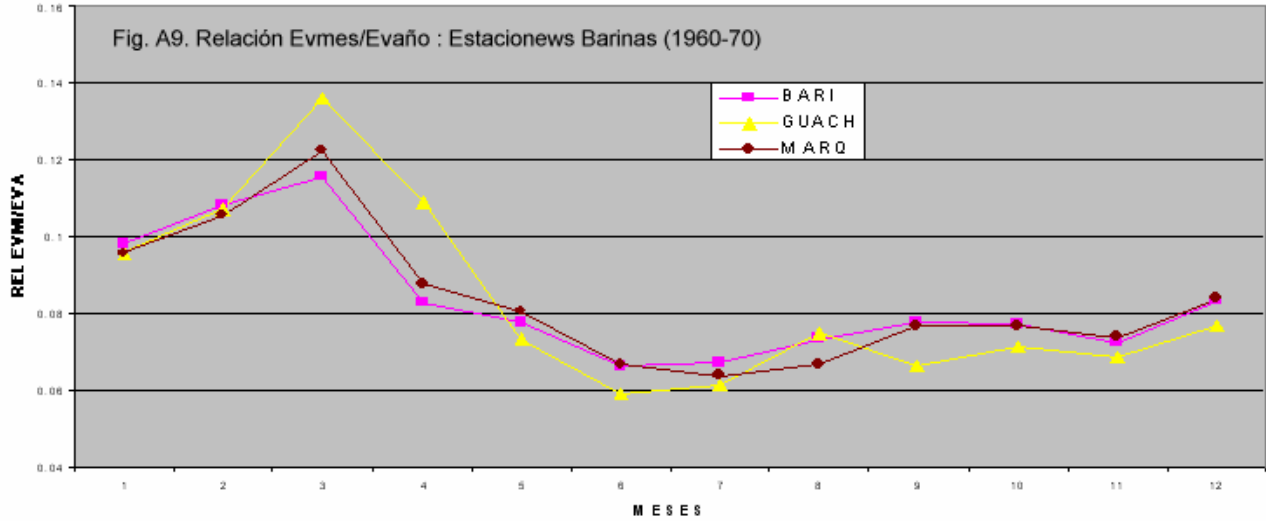
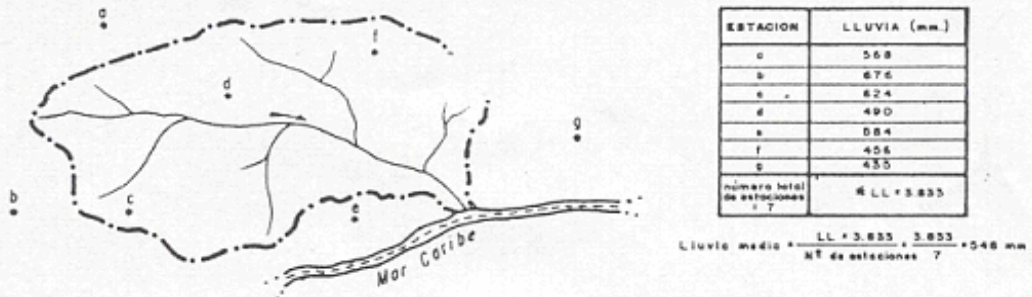


Figura A 10. Estimación de la lluvia media sobre una cuenca



a) METODO MEDIA ARITMETICA

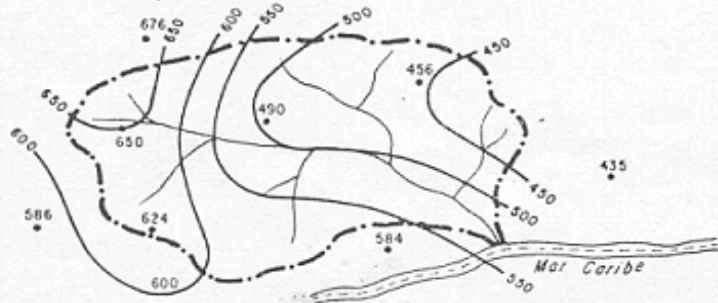


CALCULO DE LA LLUVIA MEDIA

SEGMENTO	AREA (Km ²)	ESTACION Representativa	LLUVIA (mm.)	Area Influencia x lluvia (Km ² x mm.)
A	70	a	568	39.760
B	237	b	676	160.212
C	766	c	624	477.984
D	1.017	d	490	498.330
E	585	e	584	341.640
F	780	f	456	355.680
G	30	g	435	21.750
Σ Areas = 3.505 Km ²				1.895.356

$$\text{Lluvia media} = \frac{\Sigma A \cdot LL}{\Sigma A} = \frac{1.895.356}{3.505} = 541 \text{ mm.}$$

b) POLIGONOS DE THIESEN



ISOYETA (mm.)	LLUVIA MEDIA (mm.)	AREA PARCIAL (Km ²)	AREA ACUMULADA (Km ²)	Area parcial x lluvia media (Km ² x mm.)
650	665	157	157	104.405
600	625	633	790	395.625
550	575	672	1.462	386.400
500	525	866	2.350	455.700
450	475	860	3.198	412.300
450	440	307	3.505	155.080
Σ Area parcial x lluvia media				1.889.510

$$\text{Lluvia media} = \frac{\Sigma A \cdot LL}{\Sigma A} = \frac{1.889.510}{3.505} = 539 \text{ mm}$$

c) METODO DE ISOYETAS

Figura A11 Interpolación de lluvias máximas : Frecuencias y Duración

Semi-Logarítmico
5 x 70 Divisiones

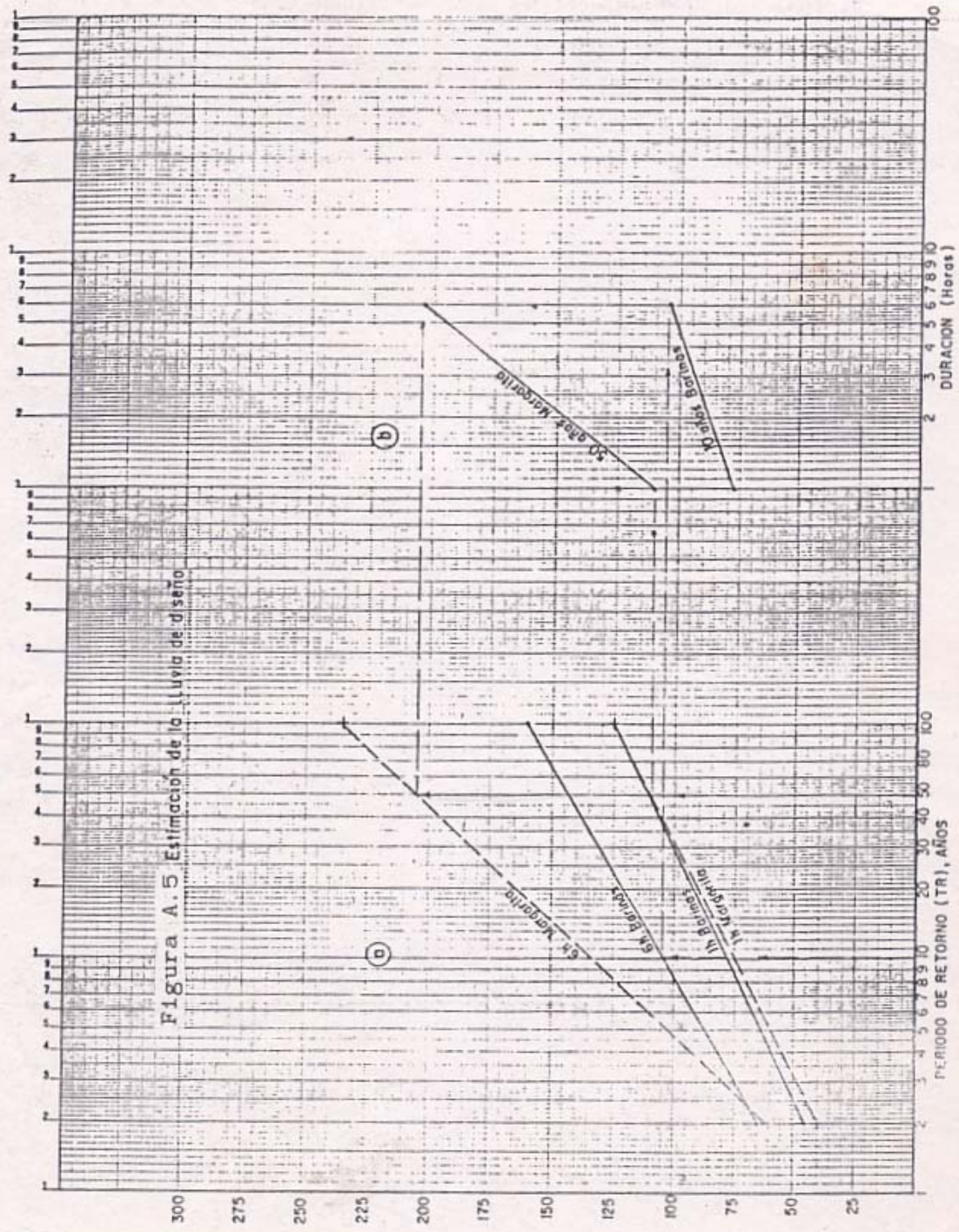
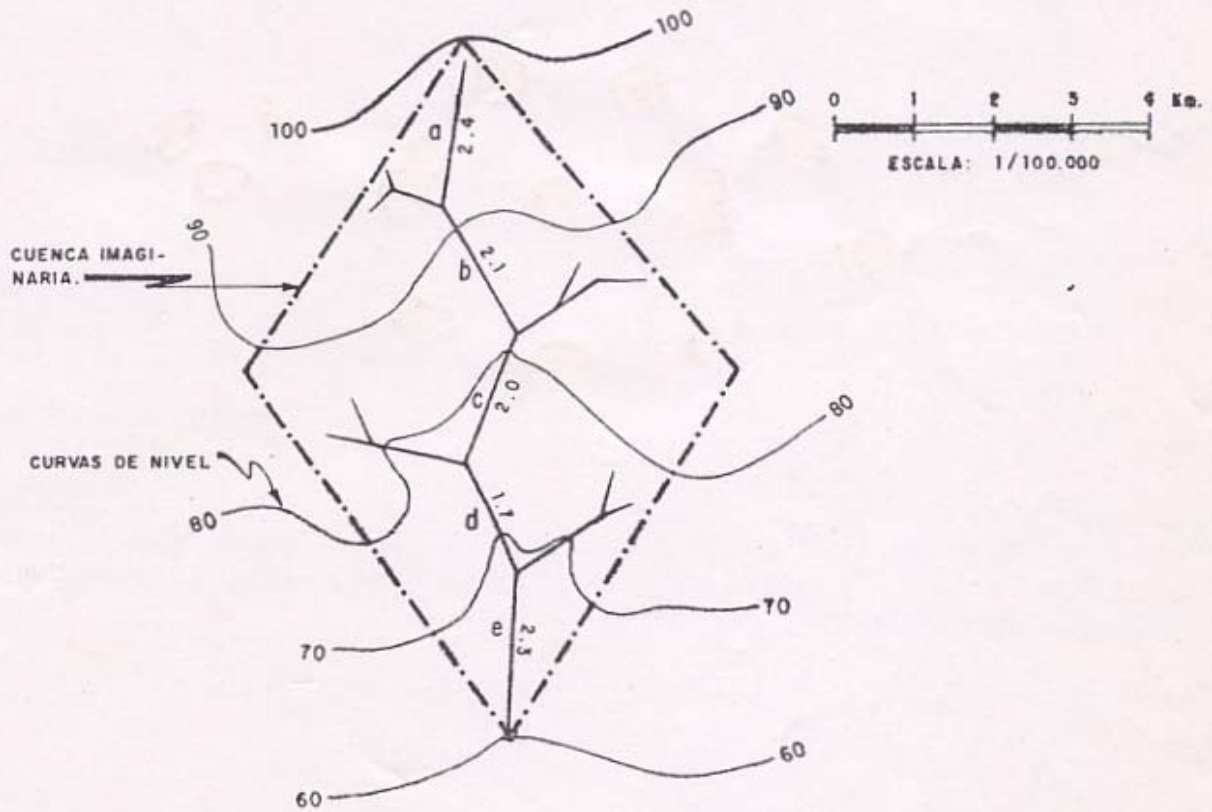


Figura A 12. Algunas características de las cuencas.



$$L = a + b + c + d + e = 10.5 \text{ Km}$$

$$A = 60.76 \text{ Km}^2$$

$$\Delta H = 40 \text{ m}$$

$$W_{\text{max}} = 6.2 \text{ Km}$$

$$I_f = \frac{L}{A} = \frac{(10.5)^2}{60.76} = 1.815$$

$$\text{Pendiente} = \frac{\Delta H}{L} = \frac{40}{10500} = 0.00381 \approx 0.38\%$$

$$t_c = 0.0195(10500)^{1.155}(40)^{-0.385} = 207.8 \text{ min} = 3.46 \text{ hr}$$

ANEXO B1

METODO DEL NÚMERO DE CURVA

1 Reseña histórica.

El Método del Número de Curva fue desarrollado por el SCS¹ como una metodología para determinar la escorrentía producida por un evento de precipitación, sin embargo, esto lo convierte indirectamente en un método de infiltración. Mockus (1964) hace una descripción de la metodología en el capítulo: Hydrology of Agricultural Lands del Handbook of Applied Hydrology (Chow, 1964) y es por ello que algunos autores le atribuyen la autoría del método, sin embargo, de acuerdo a Ponce(1996) el propio Mockus aclara que algunos aspectos de la metodología, como la clasificación hidrológica de los suelos, fueron desarrollados por Musgrave quien formaba parte del personal del SCS.

De la conversación de Ponce(1996) con Mockus, se aclara que:

- El método fue desarrollado para cuencas menores de 400 mi² .
- El objetivo de la metodología era determinar los eventos de escorrentía “ antes y después” de acciones.
- El método fue desarrollado con una base de datos de pequeñas cuencas con registros de entre 10 y 20 años y áreas de entre 0.1 acres (.04has) y 10 mi² (2560 has).
- Se utilizaron lluvias diarias por ser la información más abundante.
- La metodología se supone que indica una tendencia promedio.

2 Usos de la Metodología del Número de Curva.

La Metodología del Hidrograma Triangular, ha sido la primera utilización del método. Mockus (1964) presenta el método y el US SCS (1972) lo incluye en su Manual de Ingeniería. El mismo SCS (1973) lo incluye como práctica para diseño de drenaje superficial. Rojas (1976) desarrolla un modelo hidrológico para drenaje superficial, basado en la metodología. Overton (1976) describe el método como una metodología para estimar la infiltración. El modelo EPIC (Williams, 1995), iniciado en los años 80, es posiblemente el primero en su categoría en utilizar la metodología del CN. En la actualidad muchos modelos hidrológicos (SWRRB, SWAT, APEX, SPAW, Hec-Hms, caudal3 y otros) usan el CN como método de infiltración.

A manera de encuesta se buscó en Internet (año 2005) el uso de métodos de infiltración en modelos de simulación y como resultado se obtuvo: CN = 1210, Philips = 531, Horton = 417, Green Ampt = 296 y Holtan= 30, indicando la preferencia del método. Cuando se solicitó: “infiltration curve number” aparecieron 46.500 referencias. Esto indica que la metodología es muy popular, sin embargo, de la revisión de algunos de esos artículos se desprende que la metodología no se está utilizando adecuadamente, en especial lo referente a la clasificación hidrológica de los suelos.

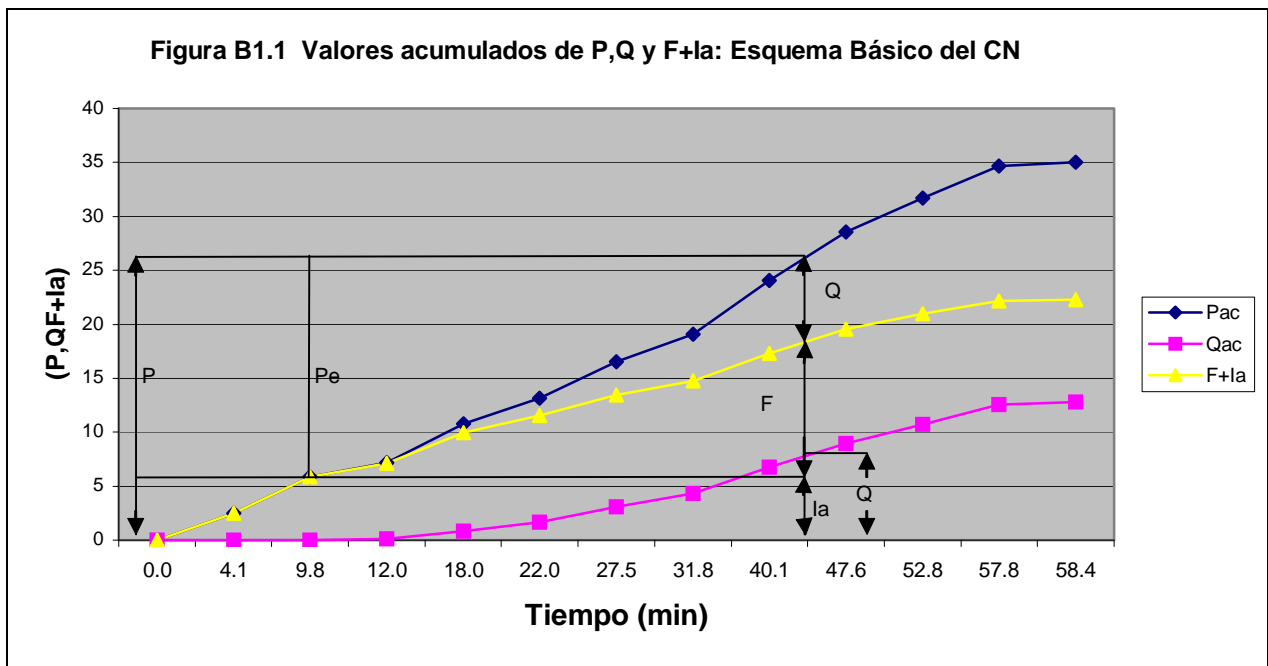
¹ Soil Conservation Service (ahora NRCS)

Por la importancia del método, El Natural Resources Conservation Service (NRCS) y el Agricultural Research Service (ARS) de USA han iniciado trabajos para mejorar la metodología (Hjelmfelt, 2004).

2. EL MÉTODO

2.1 Desarrollo del Método.

El método se basa en la suposición de que en un evento de lluvia, toda la precipitación ocurrida antes del inicio del escurrimiento representa la abstracciones iniciales, I_a . De esa manera, la precipitación total se distribuye entre las abstracciones iniciales, I_a , la escorrentía, Q y la infiltración, F . La figura 1 presenta valores acumulados de la precipitación (Pac), Escorrentía (Qac) y $F+I_a$, para una prueba con simuladores de lluvia.



Según Ogrosky y Mockus (1964) la base conceptual del método es:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{Pe} \quad (1)$$

en donde F es la infiltración acumulada real (mm), excluyendo I_a , S es la infiltración potencial (mm), Q es la escorrentía real y Pe es la precipitación efectiva.

Considerando que $F = Pe - Q$, la ecuación 1 puede ser transformada en:

$$Q = \frac{Pe^2}{Pe + S} \quad (2)$$

Los autores del método, basados en datos de pequeñas cuencas, encontraron que $I_a = 0.2 S$ y en consecuencia:

$$P_e = P - I_a = P - 0.2 S \quad (3)$$

En donde P es la lluvia total del evento. Sustituyendo la ecuación (3) en la ecuación (2), se obtiene:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (4)$$

la cual es la ecuación principal del método. La infiltración potencial, S , en milímetros, se obtiene de:

$$S = \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) * 25.4 \quad (5)$$

en donde CN es el Número de Curva obtenido de cuadros similares al Cuadro B1.2. En ese cuadro se presentan los valores de CN para condiciones de humedad antecedente **II**, la cual es la condición promedio. Para condiciones diferentes se deben corregir los valores con el cuadro B1.3. Las condiciones de humedad antecedente son:

Condición	Lluvia de los 5 días previos al evento
I	0 a 36 mm
II	36 a 53 mm
III	mayor de 53 mm

El cuadro B1.2 presenta los números de curva en función de: a) uso de la tierra, b) tratamiento o práctica, c) condición hidrológica y d) clase de suelo.

El **uso de la tierra** se refiere a la cobertura del área. El **tratamiento o práctica** considera las medidas conservacionista adoptadas, tales como cultivos en curvas de nivel, terrazas y labranza conservacionista. La **condición hidrológica** indica el grado de cobertura del terreno que por lo general es:

cobertura < 50%	mala
cobertura entre 50 y 75	regular
cobertura > 75%	bueno

La clase de suelo se refiere a la clasificación hidrológica la cual indica el potencial de producción de escorrentía de los suelos. Existen cuatro clases de suelos A, B, C y D siendo que los suelos de la clase A producen menos escorrentía y los suelos de la clase D producen el máximo de

escorrentía. El cuadro B1.1 puede ser utilizado para clasificar los suelos y el cuadro B1.3 se utiliza para estimar los valores de CN1 y CN3, a partir de los valores de CN2.

3 Ventajas, desventajas, problemas y soluciones.

3.1 Aspectos Generales

Como se mencionó anteriormente, la metodología del Número de Curva es ampliamente utilizada en hidrología, sin embargo, poco se ha publicado sobre el mejoramiento de la misma. Por general hay más detractores que innovadores pues es más fácil criticar que aportar soluciones. Posiblemente los mejores aportes han sido los de Hawkins (1979,1993) quien posee la mayor colección de datos de CN del mundo y actualmente forma parte del comité para mejorar la metodología. Como se mencionó anteriormente ya se han iniciado trabajos para mejorar el método, sin embargo aún no hay resultados publicados.

Entre las ventajas del método original se pueden mencionar:

- Facilidad de uso
- Poca información requerida
- Considera influencia de la cobertura, prácticas y tratamientos conservacionistas
- Puede simular cambios de uso de la tierra
- Base de datos se puede actualizar

Las desventajas son

- No considera cambios de humedad del suelo
- No simula infiltración instantánea
- No considera estratificación del suelo
- Agrupa los suelos en sólo 4 clases

3.2 Problemática de la humedad del suelo.

Al no considerar los cambios de humedad del suelo, se producen errores en los balances hídricos de modelos diarios pues la humedad antecedente no funciona bien en esos casos. En los modelos de simulación se corrige este problema calculando un CN diario basado en la humedad del suelo antes del evento, sin embargo no existe una metodología oficial del método y de esa manera, cada modelo utiliza su propia metodología. Un ejemplo de ello lo constituye el modelo EPIC.

3.3 Infiltración instantánea.

La ecuación (4) calcula la escorrentía total de un evento de precipitación. Ese valor es suficiente para metodologías como el Hidrograma Triangular, para la cual fue desarrollado. En el caso de modelos de eventos que requieran valores instantáneos de escorrentía, no es posible su utilización, lo cual implica la utilización otras metodologías para corregir el problema. Rojas (1976) utilizó el método, en un modelo de eventos, para calcular la escorrentía acumulada en función del tiempo y luego

realizando un transito de cada incremento de escorrentía.. El modelo Hec-hms (1990) utiliza una metodología similar.

Ahora bien, el método, aunque calcula escorrentía, está siendo utilizado como método de infiltración. Hawkins(1979) propuso una metodología para transformar el CN en infiltración instantánea.

3.4 Estratigrafía.

Algunos elementos como la estratigrafía, y en especial la profundidad del suelo, no son considerados en la metodología y sin embargo afectan la infiltración y consecuentemente la el escurrimiento. El US SCS (1972) mejoró la definición de la clasificación de hidrológica de los suelos, la cual fue traducido por Rojas (1976) y se presenta en el cuadro A2 del anexo, sin embargo esos criterios no se utilizan.

Por ejemplo, los suelos con harpans producen más escorrentía que los no lo tienen. De acuerdo al cuadro B1.1, todos los suelos con nivel freático alto son suelos D.

3.5 Sólo 4 clases de suelos.

Otra de las crítica al método es que sólo tiene 4 clases existiendo 12 clases texturales. El cuadro A1 del anexo A, presenta las características de las clases texturales y su correspondiente clasificación hidrológica. Los rangos de infiltración para las clases hidrológicas se presentan en el cuadro siguiente. Puede observarse que un suelo con $K_s=0.381$ es considerado como C y uno con $K_s=0.382$ como suelo B, indicando una división muy estricta.

Clases Hidrológicas: K_s cm/h			
A	$K_s >$	0.762	
B	$K_s >$	0.381	$K_s <$ 0.762
C	$K_s >$	0.127	$K_s <$ 0.381
D	$K_s <$	0.127	

A manera de ejemplo, se hará un cálculo de Q para el caso antes mencionado. Suponiendo una cobertura de pasto natural pastoreado con condición hidrológica mala (cobertura < 25%), del cuadro A1 obtenemos un $CN_2=79$ para el suelo B y un $CN_2=86$ para suelo C. Para una lluvia de una hora con frecuencia de 2 años $P_{X_2}= 50\text{mm}$, una cuenca de 100 Km^2 y tiempo de concentración de 1 hora, obtenemos:

K_s	suelo	CN_2	P(mm)	S(mm)	Q(mm)	Qp(m3s)	error	
0.382	B	79	50	67.52	12.81	222.35	63.688%	
0.381	C	86	50	41.35	20.96	363.96		

Eso indica que si se sigue estrictamente el método y no se utiliza el criterio de la experiencia, se comete un error de 63.7 %. Lo ideal sería modificar la metodología para que el valor de CN más flexible. Más adelante se regresará a este caso.

Algunos investigadores (Chiang, 1971, Hawkings, 1979) han propuesto aumentar las clases y así aparecen casos de utilizar clases extras como: B+,C+ y D+ o A/B, B/C y C/D para indicar que esos son suelos intermedios. En el punto 4.4 se propone una metodología para prorratear los valores de CN de acuerdo a la infiltración básica.

3.6 Consideraciones sobre la aplicación del método.

Ha habido mucha controversia sobre la utilización de la metodología en Hidrología, especialmente por su carácter empírico, sin embargo, cada día se utiliza más. Parece contradictorio, pero resulta que las metodologías que lo pudieran reemplazar, no han sido perfeccionadas aún y lo que es peor, no pueden sustituir la parte sustancial del método la cual es su capacidad de predecir el efecto de cambios en el uso de la tierra. Un ejemplo es la utilización de la ecuación de Green-Ampt, desarrollada en 1900 y que desafortunadamente no puede sustituir al CN. Parece ser que la investigación en el campo de la física de suelos está estancada.

En términos generales, la metodología cumple cabalmente con los objetivos para los cuales fue creada. Las críticas sobre la misma son hechas por aquellos que no conocen bien la metodología o porque la aplican en situaciones fuera de los alcances del método. Se pudieran señalar los problemas encontrados en la aplicación del método de la siguiente manera.

- Pretender utilizar el método como ecuación de infiltración instantánea.
- Errores en la clasificación del suelo al no considerar los factores limitantes como profundidad, estratos limitantes, pedregosidad, pendiente, nivel freático, etc.
- Utilización de cuadros de CN no actualizados.
- Calidad de los datos utilizados

4. Algunas correcciones, recomendaciones y actualizaciones del método.

La experiencia adquirida con el método mediante su utilización en modelos diarios y de eventos, así como lo encontrado en la literatura, indica que la mayoría de los modelos, como por ejemplo: EPIC, SWAT ,MODIA ,Hec-hms, son muy sensibles al CN. La lluvia antecedente no funciona bien en modelos diarios por lo tanto se debe utilizar la humedad del suelo para estimar el CN diario. Lo anterior indica que es necesario refinar la metodología.

A continuación se presentan algunas actualizaciones y se proponen otras para mejorar las predicciones.

4.1 Modificaciones en el modelo EPIC.

En el modelo EPIC (Williams,1985) se ha mejorado la metodología para calcular los valores diarios en función de la humedad y de los cambios de cobertura. Además de ello, se corrige el valor de CN para pendientes mayores de 5%, utilizando la ecuación:

$$CN_{2s} = \frac{1}{3} (CN_3 - CN_2) [1 - 2 \exp(-13.86 S)] + CN_2$$

en donde:

CN_{2s} = CN2 corregido por pendiente
 S = Pendiente (m/m)

4.2 Modificaciones del modelo MODIA.

Rojas (1984) utiliza una modificación para el cálculo del CN diario en función de la humedad del suelo, similar al presentado en la figura B1.2. Se calcula el valor de S como:

$$SC = NS * \ln(FH) + S3$$

Y en donde SC es el valor de S diario (mm), $FH = HS/AU$ y $NS = S1 - S3 / \ln(0.5)$

FIGURA B1.2
ESTIMACIÓN DE "S" DEL SCS EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO

			S(mm)
CN1	63	S1	149.17
CN2	80	S2	63.50
CN3	91	S3	25.12

NS = -179

$$NS = S1 - S3 / \ln(.5)$$

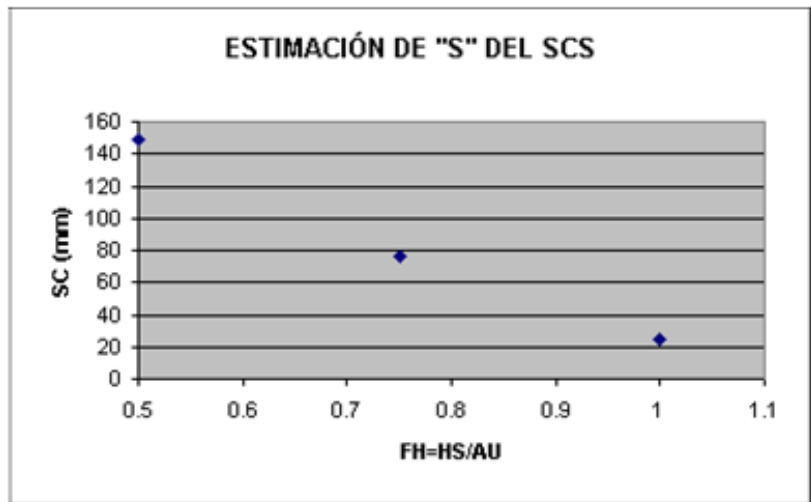
HS	FH*	SC
100	1	24.45
75	0.75	75.93
50	0.5	148.50

* para AU=100 mm

AU AGUA ÚTIL mm

FUNCION DE

FH HUMEDAD



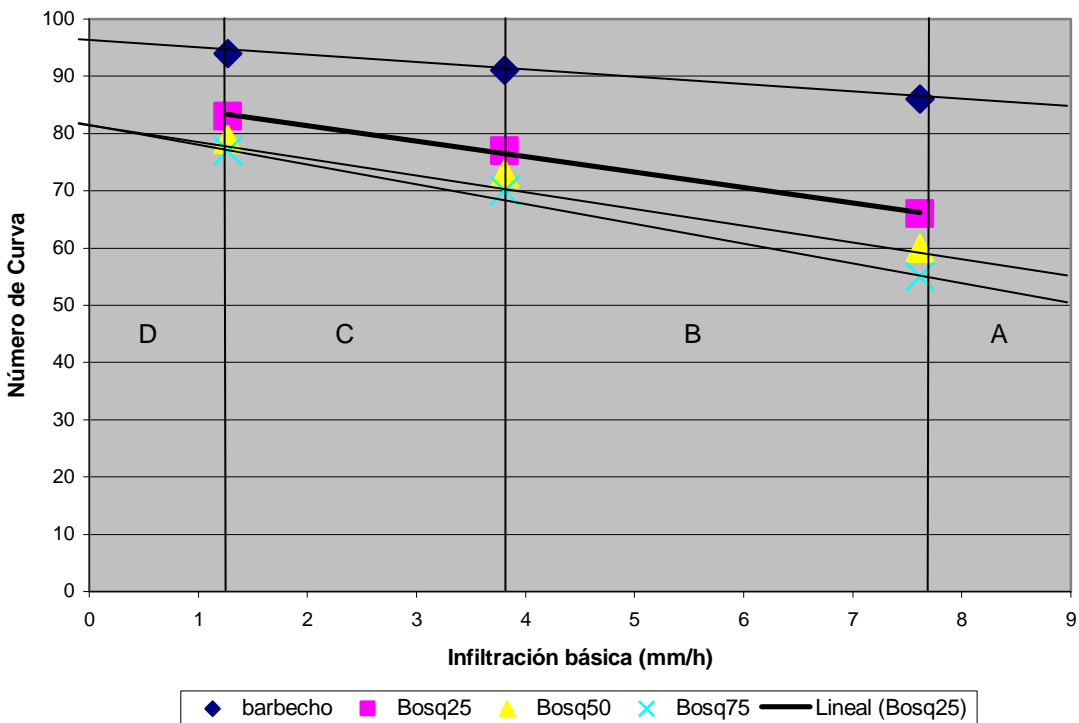
4.3 Modificaciones del programa BALDIA

El programa BALDIA, desarrollado por Rojas(1986) sirve para calcular balances hídricos diarios para programación de riego y drenaje. Cuando se desarrolló, no se conocían las metodologías utilizadas actualmente y en consecuencia se utilizó una metodología simple de calcular el CN para, además de la humedad, considerar el efecto de la cobertura en cultivos anuales.

4.4 Mejoramiento de los valores de CN considerando la infiltración básica.

A pesar de que el método se desarrolló para determinar la escorrentía, el mismo es, indirectamente, un método de infiltración. Cuando se cuenta con valores medidos de infiltración o se estima de tablas u otros métodos, se puede prorratear el valor del CN para considerar la infiltración y evitar los errores mencionados en el punto 3.6. La figura B1.3 muestra las variaciones de CN e indica los valores de la infiltración. Se puede notar que entrando con el valor de infiltración, se puede definir el valor del CN. Por ejemplo, un suelo con $K_s=4$ mm/día se clasifica como B. Para bosque con 75% de cobertura (buena), el cuadro B1.2 da un valor de $CN=55$. Si interpolamos de la figura, obtenemos un valor de $CN=67$, el cual sería un valor más real. Para lograr la interpolación se realizan los siguientes pasos:

Fig. B1.3 Representación gráfica del Número de Curva, infiltración básica y clases hidrológicas de suelo



- Se define la clase de suelo y se obtiene el valor de CN del cuadro B1.2
- Se calcula la diferencia del rango de valores de que definen la clase de suelo
- Se calcula la diferencia de valores de CN
- Se obtiene un factor de corrección o prorrateo
- Se estima el nuevo valor de CN

Ejemplo:

Para el caso anterior, se calcula la diferencia de rango como $Dif = 7.62 - 3.81 = 0.81$. La diferencia de CN $= 70 - 55 = 15$. El factor será $15 / 0.81 = 18.52$.

$$CN = 70 - (4 - 3.81) * 18.52 = \mathbf{66.48}$$

4.5 Ejemplo de aplicación del método.

Ejemplo. Calcule la lámina de escorrentía directa que producirá una lluvia de 100 mm. sobre una cuenca con las siguientes características:

- suelo C
- 50% bosque en buenas condiciones
- 25% pasto de pastoreo en condiciones regulares
- 25% en cultivos en hileras rectas en condiciones malas
- condición de humedad III

De acuerdo al cuadro B1.2, los valores para CN-II son los siguientes:

- bosque CN = 70
- pasto CN = 79
- cultivos CN = 88

el CN ponderado será:

$$CN-II = 70 * 0.5 + 79 * 0.25 + 88 * 0.25 = \mathbf{76.75}$$

entrando con ese valor en el cuadro B2.3 se obtiene un CN-III = 89; el valor de S será:

$$S = (1000 / 89 - 10) * 25.4 = \mathbf{31.39 \text{ mm.}}$$

reemplazando valores en la ecuación B1.1 obtenemos:

$$Q = (100 - 0.2 * S)^5 / (100 + 0.8 * S) = \mathbf{70.21 \text{ mm.}}$$

Que será el valor de la escorrentía directa para el evento.

Cuadro Bl.1 Clasificación Hidrológica de los Suelos(Soil Conservation Service, 1972)

Los grupos hidrológicos en que se pueden dividir los suelos son Utilizados en planeamiento de cuencas para la estimación de la escorrentía a partir de la precipitación. Las propiedades de los suelos que son considerados para estimar la tasa mínima de infiltración para suelos "desnudos" Luego de un humedecimiento prolongado son: profundidad del nivel freático de invierno, infiltración y permeabilidad del suelo luego de humedecimiento prolongado y profundidad hasta un estrato de permeabilidad muy lenta. La influencia de la cobertura vegetal es tratada independientemente.

Los suelos han sido clasificados en cuatro grupos A, B, C y D de acuerdo al potencial de escorrentía.

A: (Bajo potencial de escorrentía). Suelos que tienen alta tasa de infiltración aún cuando muy húmedos. Consisten de arenas o gravas profundas bien o excesivamente drenados. Estos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua. (Incluyen: Psammmentsl excepto por aquellas en los subgrupos, Aquicos o Aquodicos; suelos que no están en los grupos C o D y que pertenezcan a las familias: fragmentarias, esqueleto-arenosas o arenosas; suelos grosarénicos de Udults y Udalfs; y suelos en Sub-grupos Arénicos de Udults y Udalfs excepto por aquellas en familias arcillosas o finas.

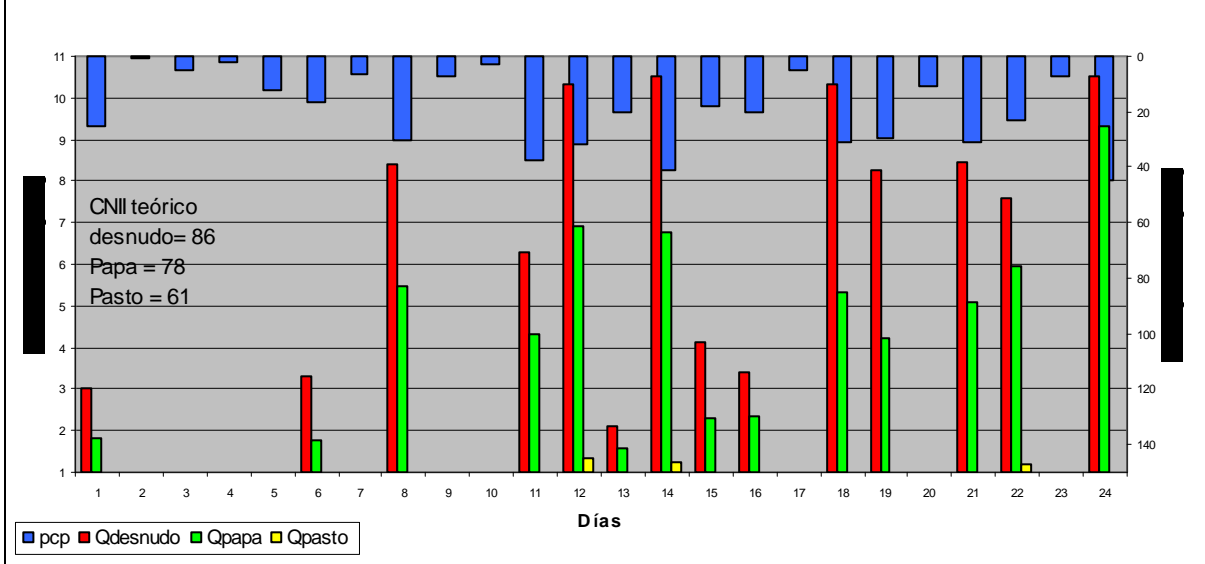
B: (Moderadamente bajo potencial de escorrentía). Suelos con tasas de infiltración moderadas cuando muy húmedos. Suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados. Suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas y permeabilidad moderadamente lenta a moderadamente rápida. Son suelos con tasas de transmisión de agua moderadas (suelos que no estén en los grupos A, C o D.).

C: (Moderadamente alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración lenta cuando muy húmedos. Consiste de suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo: Suelos de textura moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a sales o alkali o suelos con nivel freático moderado. Estos suelos pueden ser pobremente drenados o bien moderadamente bien drenados con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta (fragipan, hardpan, sobre roca dura) a poca profundidad (50-100 cm) (comprende suelos en sub-grupos albicos o aquicos; suelos en sub-grupos arénicos de aquents, aquepts, aquolls, aqualfs y aquults en familias francas; suelos que no estén en el grupo D y que pertenecen a las familias finas, muy finas o arcillosas excepto aquellas con mineralogía caolinítica, oxídica o halosítica; humods y orthods, suelos con fragipanes de horizontes petrocálicicos; suelos en familias "poco profundas" que tienen substratos permeables; suelos en subgrupos líticos con roca permeable o fracturada que permita la penetración del agua).

D: (Alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración muy lenta cuando muy húmedos. Consiste de suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente; suelos con "Claypan" o estrato arcilloso superficial; suelos con infiltración muy lenta debido a sales o alkali y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua muy lenta (incluye: todos los vertisoles y Aquods; suelos en Aquents, Aquepts, Aquolls, Aqualfs y Aquults, excepto los subgrupos arénicos en familias francas, suelos con horizontes nátricos, suelos en subgrupos líticos con substratos impermeables; y suelos en familias poco profundas que tienen un substrato impermeable).

Nota Clasificación ampliada. Algunas traducciones del término en inglés han sido tomadas de : Fausto Maldonado P., "La Adaptación al castellano de los nombres usados en la 7ma. Aproximación". IICA, Costa Rica, 1971.

Fig. B.1.1 Escorrentía en parcelas de erosión: Santa Rosa, Mérida

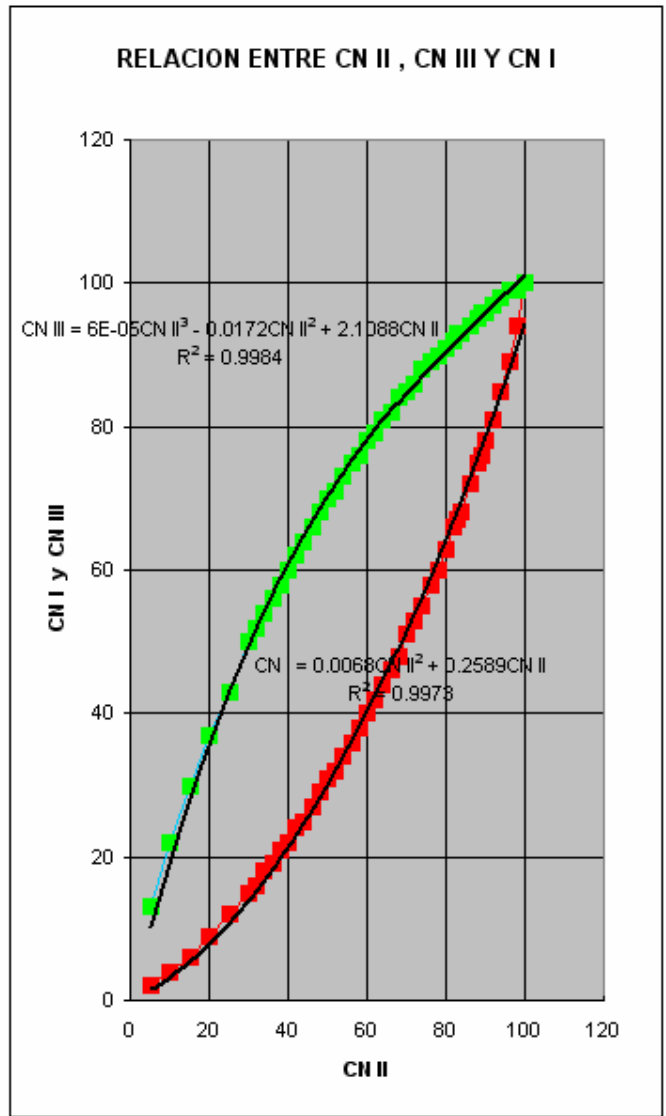


Cuadro B1.2						
Numero de Curva, CN, para condición promedio (Ia= 0.2 S)						
USO DE LA TIERRA	TRATAMIENTO O PRACTICA	CONDICION HIDROLOGICA	NUMERO DE CURVA PARA GRUPOS DE SUELOS			
			A	B	C	D
Tierras Agrícolas Cultivadas						
Barbecho	Hileras rectas		77	86	91	94
	Labranza Conservacionista(LC)	mala	76	85	90	93
	Labranza Conservacionista(LC)	buena	74	83	88	90
Cultivos en hileras anchas (Ej:maíz)	hileras rectas	mala	72	81	88	91
	hileras rectas	buena	67	78	85	89
	Labranza Conservacionista(LC)	mala	71	80	87	90
	Labranza Conservacionista(LC)	buena	64	75	82	85
	Curvas de Nivel (CN)	mala	70	79	84	88
	Curvas de Nivel (CN)	buena	65	75	82	86
	Curvas de Nivel (CN)& LC	mala	69	78	83	87
	Curvas de Nivel (CN)& LC	buena	64	74	81	85
	CN & Terrazas	mala	66	74	80	82
	CN & Terrazas	buena	62	71	78	81
	CN & Terrazas & LC	mala	65	73	79	81
	CN & Terrazas & LC	buena	61	70	77	80
Cultivos en hileras estrechas (granos peg) (Ej:trigo)	hileras rectas	mala	65	76	84	88
	hileras rectas	buena	63	75	83	87
	Labranza Conservacionista(LC)	mala	64	75	83	86
	Labranza Conservacionista(LC)	buena	60	72	80	84
	Curvas de Nivel (CN)	mala	63	74	82	85
	Curvas de Nivel (CN)	buena	61	73	81	84
	Curvas de Nivel (CN)& LC	mala	62	73	81	84
	Curvas de Nivel (CN)& LC	buena	60	72	80	83
	CN & Terrazas	mala	61	72	79	82
	CN & Terrazas	buena	59	70	78	81
	CN & Terrazas & LC	mala	60	71	78	81
	CN & Terrazas & LC	buena	58	69	77	80
hileras continuas, voleo pastos en rotación (Ej: alfalfa)	hileras rectas	mala	66	77	85	89
	hileras rectas	buena	58	72	81	85
	Curvas de Nivel (CN)	mala	64	75	83	85
	Curvas de Nivel (CN)	buena	55	69	78	83
	CN & Terrazas	mala	63	73	80	83
	CN & Terrazas	buena	51	67	76	80
Tierras Agrícolas No Cultivadas						
Pastos sembrados o pastos naturales (pastoreo)	Sin tratamiento mecánico	mala	68	79	86	89
	Sin tratamiento mecánico	regular	49	69	79	84
	Sin tratamiento mecánico	buena	39	61	74	80
	Curvas de Nivel (CN)	mala	47	67	81	88
	Curvas de Nivel (CN)	regular	25	59	75	83
	Curvas de Nivel (CN)	buena	6	35	70	79

Cuadro B1.2 (cont)						
USO DE LA TIERRA	TRATAMIENTO O PRACTICA	CONDICION HIDROLOGICA	NUMERO DE CURVA PARA GRUPOS DE SUELOS			
			A	B	C	D
Pastos de Corte		-	30	58	71	78
Plantaciones forestales huertas, coníferas o deciduos		mala	55	73	82	86
		regular	44	65	76	82
		buena	32	58	72	79
Malezas		mala	48	67	77	83
		buena	20	48	65	73
Bosques		mala	45	66	77	83
		regular	36	60	73	79
		buena	25	55	70	77
Bosque-malezas hierbas		mala		79	86	92
		regular		71	80	89
		buena		61	74	84
Cultivos Permanentes tropicales						
Café	sin cobertura superficial		48	68	79	83
	cobertura superficial+terrazas		22	52	68	75
Caña de azúcar	quema- residuos,hileras rectas		43	65	77	82
	mulch-residuos,hileras rectas		45	66	77	83
	en hoyos, en contorno		24	53	69	76
	en surcos, en contorno		32	58	72	79
Terrenos urbanizados con vegetación establecida						
Gramados, parques, ce- menterios, etc	Mas de 75% cobertura	buena	39	61	74	80
	50 a 75 % cobertura	regular	49	69	79	84
	menos de 50% cobertura	mala	68	79	86	89
estacionamientos, techos, etc			98	98	98	98
Calles y carreteras	Pavimentadas con cunetas y cloacas		98	98	98	98
	engranzonadas		76	85	89	91
	tierra		72	82	87	89
	pavimentadas con zanjas		83	89	92	93
Áreas residenciales, co- merciales e industriales	85 %impermeable		89	92	94	95
	72% impermeable		81	88	91	93
	65% impermeable		77	85	90	92
Áreas recién niveladas			72	86	91	94

Cuadro B1.3 Número de Curva para condiciones de humedad I y III
 RELACIONES ENTRE CN2, CN3 Y CN1

CNII	CNI	CNIII
100	100	100
98	94	99
96	89	99
94	85	98
92	81	97
90	78	96
89	76	96
88	75	95
86	72	94
84	68	93
83	67	93
82	66	92
80	63	91
78	60	90
76	58	89
74	55	88
72	53	86
70	51	85
68	48	84
66	46	82
64	44	81
62	42	79
60	40	78
58	38	76
56	36	75
54	34	73
52	32	71
50	31	70
48	29	68
46	27	66
44	25	64
42	24	62
40	22	60
38	21	58
36	19	56
34	18	54
32	16	52
30	15	50
25	12	43
20	9	37
15	6	30
10	4	22
5	2	13



ANEXO B2.

ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

El tiempo de concentración se define como el tiempo de viaje del agua desde el punto más remoto de la cuenca hasta un punto de interés en la misma. El tiempo de concentración se calcula mediante la suma de los tiempos de viaje del agua dentro de las diferentes secciones del sistema de drenaje principal de la misma.

El tiempo de concentración afecta la forma y pico del hidrograma de escorrentía. La urbanización y canalización disminuyen el tiempo de concentración, aumentando los picos. El tiempo de concentración puede ser aumentado mediante obras en el cauce, como diques y por modificaciones de la topografía como terrazas o por nivelación.

Los factores que afectan el tiempo de concentración son: a) rugosidad, b) sección del cauce y patrones de flujo y c) pendiente.

Cálculo del tiempo de concentración, t_c , y tiempo de viaje, t_v .

Existen varias metodologías para el cálculo de t_c , sin embargo para fines de esta publicación sólo haremos referencia al método presentado en el TR-55². El método considera que el agua fluye sobre la cuenca como flujo laminar (sheet flow), flujo bajo concentrado (concentrated shallow flow), como flujo de canales abiertos (open channel flow) o como una combinación de los anteriores.

El tiempo de viaje, t_v , es la relación entre la longitud de flujo y la velocidad del mismo:

$$t_v = \frac{L}{3600 * V} \quad (B.2.1)$$

en donde:

t_v = tiempo de viaje (horas)
 L = longitud de flujo (metros)
 V = velocidad de flujo (m/s)

El tiempo de concentración, t_c , es la suma de los valores de t_v , de varios segmentos consecutivos:

$$t_c = t_{v1} + t_{v2} + \dots t_{vn} \quad (B.2.2)$$

en donde:

² USDA, Soil Conservation Service (1986)

t_c = tiempo de concentración en horas
 m = número de segmentos de flujo.

Tiempo de viaje para flujo laminar:

El tiempo de viaje para flujo laminar en longitudes menores de 100 metros puede ser calculada por:

$$t_v = \frac{0.0135(nL)^{0.8}}{(P_2)^{0.5} s^{0.4}} \quad (B.2.3)$$

en donde:

t_v = tiempo de viaje (h)
 n = coeficiente de rugosidad de Manning (cuadro B2.1)
 L = longitud de flujo
 P_2 = lluvia de 2 años y 24 horas (mm) (figura B2.1)
 s = pendiente (m/m)

Tiempo de viaje para flujo bajo concentrado

Para longitudes de más de 100 metros, el flujo por lo general pasa a ser **flujo bajo concentrado**, en cuyo caso se puede utilizar la figura B2.2 , en la cual la velocidad de flujo es una función de la pendiente del curso de agua y del tipo de canal. Para pendientes menores de 0.005 m/m se deben utilizar la siguiente ecuación:

$$V = C_v s^{0.5} \quad (B.2.4)$$

en donde:

V = velocidad de la sección (m/seg)
 C_v = coeficiente para el tipo de superficie: Sin pavimentar $C_v= 4.84$; Pavimentada: $C_v= 6.1$

La ecuación anterior puede usarse también en vez de la figura B2.2 . Luego de obtener la velocidad del tramo, se utiliza la ecuación B2.1 para obtener el tiempo de viaje.

Tiempo de viaje para canales abiertos

Se utiliza para aquellos trechos bien definidos en mapas o fotos aéreas. Se calcula con la ecuación de Manning para la sección completa.

$$V = \frac{r^{0.67} s^{0.5}}{n} \quad (B.2.5)$$

en donde:

V= velocidad (m/seg)

r = radio hidráulico

n = coeficiente de rugosidad de Manning

Una vez estimado el valor de la velocidad, se utiliza la ecuación B2.1 para obtener el tiempo de viaje.

Cuadro B2.1 Coeficientes de rugosidad para flujo laminar (Manning)

Tipo de superficie	n
Superficies suaves (concreto, asfalto, granzón o suelo desnudo)	.011
Rastrojo (sin residuos)	0.05
Suelos cultivados c/menos de 20% residuos	.06
Suelos cultivados c/mas de 20% residuos	0.17
Praderas de pastos cortos	0.15
Pastos densos	0.24
Pasto Bermuda	0.41
Praderas/Pastos naturales	0.13
Bosques ³ con cobertura superficial rala	0.4
Bosques con cobertura superficial densa	0.8

³ cobertura menor de 3 cm

ANEXO B3

METODO DEL HIDROGRAMA TRIANGULAR

El método del Hidrograma Triangular se basa en un hidrograma unitario de duración igual al tiempo de concentración, t_c . La figura B3.1 presenta las características del mencionado hidrograma. A partir de la figura B3.1, se puede deducir una ecuación para estimar el pico del hidrograma:

$$q_p = \frac{0.75 Q}{t_p} \quad (B3.1)$$

en donde q_p es el pico del hidrograma unitario triangular, Q es el volumen de escorrentía directa, calculado con la ecuación B1.1 del método del Número de Curva y t_p es el tiempo al pico.

Para utilizar el método para eventos extremos, se selecciona el CN para el evento considerando la condición de humedad III. El tiempo al pico se considera como:

$$t_p = D/2 + t_L \quad (B3.2)$$

en donde D es la duración del evento y t_L es el tiempo de retardo, de acuerdo a la figura B3.1. Para fines prácticos, $t_L = 0.6 t_c$. El método considera $D=t_c$; bajo esa suposición, entonces $t_p = 1.1 t_c$. Considerando lo anterior e introduciendo el área de la cuenca, se puede obtener una nueva ecuación que para el sistema métrico será:

$$q_p = \frac{1.91 Q A}{t_c} \quad (B3.3)$$

en la cual Q es la escorrentía directa en milímetros, A es el área en hectáreas, t_c , el tiempo de concentración en horas y q_p el caudal máximo en litros por segundo.

Ejemplo. Calcule el caudal máximo para la cuenca mencionada en el ejemplo anterior y considerando que la cuenca tiene un área de 100 has y un tiempo de concentración de 15 minutos. La información entonces será:

$$Q = 70.21 \text{ mm.}$$

$$t_c = 15 \text{ minutos} = 0.25 \text{ horas}$$

$$A = 100 \text{ has.}$$

entonces:

$$q_p = 1.91 * 70.21 * 100 / 0.25 = 53,640 \text{ lps} = \mathbf{53.64 \text{ m}^3/\text{seg}}$$

Figura B.3.1

