

El tiempo de concentración y el número de la curva para obtener el hidrógrafo de una cuenca

INTRODUCCIÓN

El tiempo de concentración es un concepto que en la Hidrología se utiliza desde hace muchos años; sin embargo, todavía en la actualidad se continúa trabajando en el tema y se presentan nuevas formulaciones y métodos para su cálculo.

Algunos métodos son más sencillos que los otros, basándose principalmente en la simplificación de la formulación al no tomar en cuenta algunos criterios que otros métodos sí consideran. En el presente trabajo se hacen algunas reflexiones sobre el asunto, pero sin pretender agotar el tema y mucho menos dejar establecida la veracidad de unos u otros criterios.

En cuanto al Número de la Curva, que a diferencia del tiempo de concentración es un concepto mucho más reciente, básicamente lo que se hace en el presente trabajo es comentar acerca de una herramienta que los autores consideran de alto valor práctico y que está disponible en Internet.

TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Todos los autores coinciden en definir el tiempo de concentración como aquel transcurrido desde que una gota de lluvia que cae en el punto más alejado (demorado) de la cuenca objeto de estudio llega a la sección o punto donde interesa cuantificar el escurrimiento producido. La formulación más completa al alcance de los autores (Manual Técnico de Referencia del HEC – HMS, 2000) establece que el tiempo de concentración se obtiene a partir de la expresión siguiente

$$t_c = t_s + t_{sc} + t_{ct} \quad (1)$$

en la que:

Resumen / Abstract

El tiempo de concentración y el Número de la Curva son dos parámetros determinantes en el proceso de obtención del hidrógrafo en un punto cualquiera de una corriente fluvial de una cuenca a partir de los datos de lluvia; el primero de ellos es habitualmente calculado en Cuba considerando dos componentes (escurrimiento superficial y escurrimiento en el cauce) y en no pocas ocasiones tomando en cuenta un solo componente (escurrimiento en el cauce), cuestión que introduce errores para nada despreciables en algunos casos al no considerar los tres componentes que la literatura actualizada reconoce, esto es, tiempo superficial, tiempo superficial concentrado y tiempo en el cauce. Para el Número de la Curva hay bastante coincidencia en la literatura en cuanto a su concepción y forma de obtener su valor; sin embargo, el procedimiento se puede tornar muy engorroso cuando se trata de cuencas con varios tipos de suelos y con diversos usos. Para ambos aspectos en el presente trabajo se muestran criterios y herramientas que contribuyen a la solución adecuada de los mismos.
Palabras claves: tiempo de concentración, Número de la Curva.

The time of concentration and the so called Curve Number are two important parameters for obtaining runoff hydrographs at any point of a natural river system in a watershed from rainfall data; in Cuba, the time of concentration is usually calculated considering two time components (sheet flow time and channel flow time). In some other cases the time of concentration is calculated using only one component (channel flow time). Some mistakes could arise due to this simplification, because according to updated bibliography three components must be taking into account to compute the time of concentration: travel time in sheet flow segments over the watershed land surface, travel time in shallow flow segments and travel time in channel segments. For the Curve Number determination, a general coincidence exists about its definition and the procedure to calculate its values. Nevertheless, the procedure can become bothersome in the case of a watershed with several soil types and soil uses. Criteria and procedures for both parameters are shown in this paper, which contribute to an adequate solution to estimate their values.

Keywords: time of concentration, Curve Number.

Dr. Rafael Pardo Gómez, Centro de Investigaciones Hidráulicas. CUJAE, rpardo@cih.cujae.edu.cu

Dr. Norberto Marrero de León, Centro de Investigaciones Hidráulicas. CUJAE, marrero@cih.cujae.edu.cu

t_c : tiempo de concentración
 t_s : tiempo de escurrimiento superficial
 t_{sc} : tiempo de escurrimiento superficial concentrado
 t_{c1} : tiempo de escurrimiento por el cauce

Tiempo de escurrimiento superficial.

Se entiende por escurrimiento superficial aquel que tiene lugar a lo largo de la superficie del terreno de la cuenca, se produce en capas de agua muy finas y sin llegar a formar pequeños cauces o corrientes de flujo, de ahí que las distancias recorridas en esta forma no son superiores a los 100 m aunque el reporte *Hidrología urbana para pequeñas cuencas* del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS por sus siglas en inglés y ante conocido por SCS) toma como valor práctico máximo en sus cálculos el de 30 m.

El NRCS propone para el cálculo de t_s la expresión

$$t_s = \frac{0,007(n_s L_s)^{0,8}}{(P_2)^{0,5} S_s^{0,4}} \quad (2)$$

donde:

t_s : tiempo de escurrimiento superficial, horas
 n_s : coeficiente de rugosidad del terreno
 L_s : longitud del flujo, pies.
 P_2 : lámina de agua de una lluvia de 24 horas con 2 años de período de retorno, pulgadas.
 S_s : pendiente de la rasante de energía (pendiente del terreno), adim.

Tiempo de escurrimiento superficial concentrado.

Las gotas de agua escurriendo superficialmente según se expresara arriba recorren distancias relativamente cortas y se comienzan a concentrar formando pequeños cursos de agua aún antes de llegar al cauce, a ese escurrimiento es al que se le denomina superficial concentrado y se calcula por la expresión propuesta por el NRCS:

$$t_{sc} = \frac{L_{sc}}{3600V} \quad (3)$$

en la que:

t_{sc} : tiempo de escurrimiento superficial concentrado, horas.
 L_{sc} : longitud del flujo concentrado, pies.
 V : velocidad media del flujo, pie/s.
 Se calcula mediante:

$$V = 16,1345\sqrt{S} \quad (4.1)$$

para superficie no pavimentada

$$V = 20,3282\sqrt{S} \quad (4.2)$$

para superficie pavimentada

Las expresiones 4.1 y 4.2 son obtenidas a partir de la ecuación de Manning considerando $n = 0,05$ y $R = 0,4$ pies para superficies no pavimentadas y $n = 0,025$ y $R = 0,2$ pies para superficies pavimentadas.

Tiempo de escurrimiento por el cauce.

Se obtiene también según el NRCS por

$$t_{c1} = \frac{L_{c1}}{3600V} \quad (5)$$

donde:

t_{c1} : tiempo de escurrimiento por el cauce, horas.
 L_{c1} : longitud del cauce
 V_{c1} : velocidad media del flujo en el cauce que se obtiene a partir de la ecuación de Manning

$$V_{c1} = \frac{CR^{2/3} S^{1/2}}{n} \quad (6)$$

en la que:

V_{c1} : velocidad media
 R : radio hidráulico
 S : pendiente de la rasante de energía (aproximadamente igual a la del terreno)
 C : coeficiente de conversión igual a 1,0 para el SI y a 1,49 para el Sistema inglés.

No son pocas las ocasiones en que diversos especialistas para determinar el valor del tiempo de concentración en cuencas consideran solamente el escurrimiento en las laderas (superficial) y en el cauce e inclusive otros solo consideran el tiempo de escurrimiento en el cauce, pues consideran los otros términos lo suficientemente pequeños como para llegar a despreciarlos.

Ejemplos de cálculo del tiempo de concentración.

Con el fin de reflexionar acerca de la validez de simplificar el cálculo del tiempo de concentración en la forma que se expresa en el párrafo anterior, a continuación se presenta la Tabla I consistente en 20 variantes teóricas que se diferencian entre sí por el tipo de terreno en las partes correspondientes a los flujos superficial y superficial concentrado, mientras que el resto de los parámetros permanecen constantes o comunes.

Las variables comunes para la Tabla I son:

- Longitud del cauce, $L_{c1} = 5\ 000$ m
- Velocidad media del flujo en el cauce, $V_{c1} = 1,5$ m/s
- A partir de las dos anteriores, resulta $t_{c1} = 0,926$ hrs
- Longitud de escurrimiento superficial, $L_s = 30$ m
- Pendiente del tramo superficial, $S_s = 0,2$
- Longitud del tramo superficial concentrado, $L_{sc} = 150$ m

- Pendiente del tramo superficial concentrado, $S_{sc} = 0,1$
- Lámina de agua para una lluvia de 24 horas y período de retorno de dos años, $P_2 = 80$ mm

De la Tabla I es fácil resumir que el tiempo de concentración del flujo superficial oscila entre valores de 0,8 a 21% del tiempo total con valor medio de 8,17%, el tiempo

NÚMERO DE LA CURVA

Para determinar el caudal de escurrimiento Q en una cuenca de área A sobre la cual se produce una lluvia de intensidad I, desde 1929 en los Estados Unidos se comenzó a utilizar la «fórmula racional», que posteriormente

Tabla I – Tiempo de concentración para casos teóricos

Variante	Superficie para el flujo superficial	Tipo de superficie para superficial concentrado	t_s hrs	t_{sc} hrs	t_{c1} hrs	t_c hrs	t_c %	t_{sc} %	t_{c1} %	t_c %
1	Lisa, suave, n = 0,011	No pavimentada, Np	0,008	0,027	0,926	0,961	0,83	2,81	96,4	100
2	Lisa, suave, n = 0,011	Pavimentada, P	0,008	0,021	0,926	0,955	0,84	2,20	96,7	100
3	Terreno baldío, n = 0,05	Np	0,027	0,027	0,926	0,980	2,76	2,76	94,5	100
4	Terreno baldío, n = 0,05	P	0,027	0,021	0,926	0,974	2,78	2,77	95,1	100
5	Cultivada ≤ 20% residuos, n = 0,06	Np	0,031	0,027	0,926	0,984	3,15	2,74	94,1	100
6	Cultivada ≤ 20% residuos, n = 0,06	P	0,031	0,021	0,926	0,978	3,17	2,15	94,7	100
7	Cultivada > 20% residuos, n = 0,06	Np	0,072	0,027	0,926	1,025	7,02	2,63	90,3	100
8	Cultivada > 20% residuos, n = 0,06	P	0,072	0,021	0,926	1,019	7,06	2,06	90,9	100
9	Pasto ligero, n = 0,15	Np	0,064	0,027	0,926	1,017	6,29	2,65	91,0	100
10	Pasto ligero, n = 0,15	P	0,064	0,021	0,926	1,011	6,33	2,08	91,6	100
11	Pasto denso, n = 0,24	Np	0,094	0,027	0,926	1,047	8,98	2,58	88,4	100
12	Pasto denso, n = 0,24	P	0,094	0,021	0,926	1,041	9,03	2,02	89,0	100
13	Pasto Bermuda, n = 0,41	Np	0,144	0,027	0,926	1,097	13,1	2,46	84,4	100
14	Pasto Bermuda, n = 0,41	P	0,144	0,021	0,926	1,091	13,2	1,92	84,9	100
15	Bosque ligero, n = 0,40	Np	0,142	0,027	0,926	1,095	13,0	2,46	84,6	100
16	Bosque ligero, n = 0,40	P	0,142	0,021	0,926	1,089	13,0	1,93	85,0	100
17	Bosque denso, n = 0,80	Np	0,247	0,027	0,926	1,200	20,6	2,25	77,2	100
18	Bosque denso, n = 0,80	P	0,247	0,021	0,926	1,194	20,7	1,76	77,6	100
19	Pasto natural, n = 0,115	Np	0,058	0,027	0,926	1,011	5,74	2,67	91,6	100
20	Pasto natural, n = 0,115	P	0,058	0,021	0,926	1,005	5,77	2,09	92,1	100

Nota: Los cálculos fueron realizados mediante el software Win TR - 55 del NRCS.

de concentración del flujo superficial concentrado oscila entre 1,7 y 2,8% y valor medio de 2,58% y finalmente el tiempo de concentración en el cauce oscila entre 77 y 97% con valor medio de 89,5%; con ello queda evidenciado el orden de magnitud del error que se introduciría al despreciar alguno de los términos.

por los buenos resultados de la misma ha extendido su empleo a numerosos países. Su expresión es

$$Q = CIA \tag{7}$$

En la que C es el coeficiente de escurrimiento, adimensional. Este representa la fracción de la lluvia que escurre, ya que una parte de ella se infiltra, otra queda retenida en la superficie del suelo y otra parte es interceptada

tada por la vegetación; de ahí que al coeficiente de escurrimiento también se le conoce por «coeficiente de impermeabilidad de la superficie del terreno».

De lo anterior resulta evidente la necesidad de determinar con la mayor exactitud posible el valor de C. Las primeras herramientas para determinar el valor de C venían dadas en función de las condiciones topográficas, suelo y vegetación; sin embargo, se ha comprobado que el valor de C para las mismas condiciones de suelo, topografía y vegetación no es constante, sino que varía con la magnitud de la lluvia, aumentando en la medida que lo hace ésta.

Para tomar en consideración dicha variación, el Servicio de Conservación de Suelos SCS (actualmente NRCS) elaboró el denominado Método del Número de la Curva (CN por sus siglas en inglés), válido para regiones con pendientes iguales o menores al 3% y que de forma resumida se presenta a continuación.

El NRCS plantea que el valor de CN varía desde 100 para cuerpos de agua hasta 30 para suelos permeables con alta capacidad de infiltración.

$$C = \frac{(L - nS)^2}{L^2 + LS(1 - n)} \tag{8}$$

en la que:

C: coeficiente de escurrimiento de la fórmula racional.

L: Lámina de lluvia caída.

S: Capacidad potencial de lluvia a retener por la cuenca.

n: se toma igual a 0,1 para suelos poco permeables y 0,3 para el resto de los suelos. El NRCS toma un valor fijo igual a 0,2.

S se calcula por la expresión:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \tag{9}$$

Los valores de CN se obtienen a partir de tablas II a V que se presentan a continuación.

Tabla II- Clasificación de los suelos según la clase hidrológica

Características	Grupos			
	A	B	C	D
Velocidad de infiltración	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Transmisibilidad	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Profundidad	Muy profundos	Profundos	Moderada	Poco profundos
Drenaje interno	Muy bueno	Bueno	Moderado	Malo
Textura	Arenas y gravas	Medio arenosa	Medio arcillosa	Arcillas pesadas
Potencial de escurrimiento	Bajo	Moderado bajo	Moderado alto	Alto
Nivel freático	-	-	-	Permanente alto

Tabla III-Humedad previa en el suelo

Lluvia caída durante 5 días antes, mm		Condición
Terreno cultivado	Terreno sin cultivar	
Menos de 35	Menos de 12,5	I (seco)
52,5	27,5	II (medio)
Más de 52,5	Más de 27,5	III (húmedo)

Tabla IV - Valores de CN para suelos de categoría II

Tipo de vegetación	Forma de cultivo	Estado	Clase hidrológica del suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	Surcos rectos	Malo	77	86	91	94
Cultivos en surcos (viandas y hortalizas)	Surcos rectos	Bueno	72	81	88	91
		Malo	67	78	85	89
	Curvas de nivel y bancales	Bueno	70	79	84	88
		Malo	65	75	82	86
		Bueno	66	74	80	82
Cereales finos (maíz, caña)	Surcos rectos	Bueno	65	76	84	88
		Malo	63	75	83	87
	Curvas de nivel y bancales	Bueno	63	74	82	85
		Malo	61	73	81	84
		Bueno	61	72	79	82
Leguminosas de siembra densa o prados en rotación (frijoles)	Surcos rectos	Bueno	66	77	85	89
		Malo	58	72	81	85
	Curvas de nivel y bancales	Bueno	64	75	83	85
		Malo	55	69	78	83
		Bueno	63	73	80	83
Pastos o pastizales	Curvas de nivel	Malo	51	67	76	80
		Bueno	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
	Curvas de nivel	Malo	39	61	74	80
		Bueno	47	67	81	88
Prado (permanente)	Curvas de nivel	Regular	25	59	75	83
		Malo	6	35	70	79
Bosques (fincas boscosas)	Curvas de nivel	Bueno	30	58	71	78
		Malo	45	66	77	83
Bosques (fincas boscosas)	Curvas de nivel	Regular	36	60	73	79
		Malo	25	55	70	77

Es frecuente que en una misma cuenca se encuentren varios tipos de suelos e inclusive en un mismo tipo de suelo se tengan diferentes cultivos o usos del suelo, en ese caso el valor del CN de la cuenca se calcula según:

$$CN_{compuesto} = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i} \tag{10}$$

en la que:

$CN_{compuesto}$: es el CN correspondiente a la cuenca.

i: es el número de subdivisiones hechos a la cuenca en función del tipo y uso de los suelos.

A_i : el área de drenaje de cada subdivisión i.

Como se puede apreciar la obtención de CN puede resultar engorrosa cuando se tienen cuencas con varios tipos y

Tabla V - Valores de CN para las categorías I y III a partir de la II

Categoría			Categoría		
II	I	III	II	I	III
100	100	100	58	38	76
98	94	99	56	36	75
96	89	99	54	34	73
94	85	98	52	32	71
92	81	97	50	31	70
90	78	96	48	29	68
88	75	95	46	27	66
86	72	94	44	25	64
84	68	93	42	24	62
82	66	92	40	22	60
80	63	91	38	21	58
78	60	90	36	19	56
76	58	89	34	18	54
74	55	88	32	16	52
72	53	86	30	15	50
70	51	85	25	12	43
68	48	84	20	9	37
66	46	82	15	6	30
64	44	81	10	4	22
62	42	79	5	2	13
60	40	78	0	0	0

usos del suelo, en los que para cada subdivisión habría que hacer uso de las tablas II a V; para facilitar este trabajo, los autores sugieren el empleo de la herramienta computacional *Win TR - 55* de acceso libre en Internet.

El *Win TR - 55* es válido para cuencas pequeñas de hasta 65 km², con un número de subcuencas y de tramos de cauce de hasta 10 para cada una y tiempo de concentración de 0,1 a 10 horas.

El *Win TR - 55* también es muy útil para el cálculo del tiempo de concentración de cada subcuenca, para cada una admite hasta un segmento de flujo superficial, dos de flujo concentrado y dos de flujo en cauce.

CONCLUSIONES

1. El tiempo de concentración sigue siendo un parámetro objeto de estudio, de ahí que no resulte ocioso mantenerse al tanto de los criterios de más reciente introducción para su adecuada determinación y en consecuencia deben evitarse simplificaciones que con su justificación alegando aspectos prácticos pueden introducir errores inaceptables.

2. El *Win TR - 55* es un instrumento muy útil para la obtención del Número de la Curva, ya que su realización de forma manual es engorrosa y por ende susceptible de introducir errores en los cálculos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Manual Técnico de Referencia del Hydrological Modeling System HEC - HMS. US Army Corps of Engineering. Marzo de 2000.
2. Manual de usuario del Win TR - 55. Natural Resources Conservation Service. Febrero de 2004.
3. Rafael Vigoa Hernández. Drenaje Agrícola. Editorial Félix Varela. 1999.