

CALCULO Y ANALISIS CRITICO DEL METODO DE LA CURVA NUMERO PARA CUENCAS DEL PAIS

CARLOS SAAVEDRA L. y LUDWIG STOWHAS B.
Ingeniero Civil, 4C Ingenieros Ltda, Ingeniero Civil, Profesor Depto. Obras
Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María.
2 Norte 1260, Viña del Mar, Chile.
Teléfono: 32-686262; Fax: 32-685366
e-mail: cuatroc@cuatroc.tie.cl

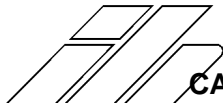
RESUMEN

Se analizó un total de 193 tormentas entre las cuencas del Río Huasco y Bio Bio, estableciendo valores de precipitación total y escorrentía directa, que permitió evaluar las pérdidas por infiltración y el valor de la Curva Número, de acuerdo al método propuesto por el Soil Conservation Service.

Del análisis de los resultados se estableció la existencia de una dependencia decreciente entre el valor de la Curva Número y la magnitud de la precipitación mientras ésta no alcance un valor umbral mínimo. La aparente variabilidad de la Curva Número se atribuye a la rigidez del método al establecer la no existencia de escorrentía para precipitaciones inferiores a un nivel de infiltración inicial constante, mientras en la realidad esta infiltración es variable en el caso de cuencas heterogéneas. Se propone una modificación a la aplicación del método, introduciendo un nivel de infiltración inicial variable dependiente de la precipitación, que extiende la aplicabilidad del método a tormentas de magnitud menor al valor umbral.

ABSTRACT

A total of 193 storms were analysed, for watersheds located between the Huasco and Bio-Bio basin, computing the total and effective precipitation, in order to establish the corresponding Curve Number of the basins, according to the S.C.S. Method. The results showed a decreasing relationship of the Curve Number figures in terms of the total precipitation magnitude, until a threshold value is achieved. This apparent variability is explained by the fact that the method renders no runoff for precipitation magnitudes less than a constant initial abstraction value, while in actual heterogeneous watersheds, this initial abstraction depends on the magnitude of the precipitation. A modification of the method is proposed, in order to extend its applicability to storms with precipitation magnitudes less than the threshold value.



CALCULO Y ANALISIS CRITICO DEL METODO DE LA CURVA NUMERO PARA CUENCAS DEL PAIS

1 Introducción

Uno de los métodos de uso más frecuente para la estimación de la precipitación efectiva o escorrentía directa, corresponde al denominado Método de la Curva Número, propuesto por el Soil Conservation Service de EE. UU.(1)

Este método se basa en postular una igualdad entre la fracción de la precipitación que escurre (Q) respecto a la total caída menos la abstracción inicial, ($P-I_o$), y la fracción entre la precipitación infiltrada en exceso a la abstracción inicial,(F), respecto a la máxima capacidad de infiltración del suelo (S).

Como la precipitación infiltrada en exceso sobre la precipitación inicial, F, se expresa por la relación,

$$F = P - I_o - Q \quad (1)$$

la igualdad entre estas fracciones se representa por la relación,

$$\frac{Q}{P - I_o} = \frac{P - I_o - Q}{S} \quad (2)$$

a partir de la cual se puede despejar la precipitación efectiva, según la ecuación,

$$Q = \frac{(P - I_o)^2}{P - I_o + S} \quad (3)$$

La abstracción inicial I_o es a su vez una fracción de la capacidad máxima de infiltración S,

$$I_o = m * S \quad (4)$$

Para el valor de m se ha propuesto el valor $m=0.2$, con lo que la fórmula (3) se expresa normalmente por la relación,

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (5)$$

En definitiva, conociendo la magnitud total de la tormenta, P, es posible estimar la precipitación efectiva o escorrentía directa, si se conoce la capacidad potencial máxima de infiltración del suelo S. Esta capacidad depende de las características de textura y estructura de los suelos y de las condiciones iniciales o antecedentes de humedad en la cuenca, cuantificándosele a través de un parámetro denominado la



Curva Número (CN), definido entre los valores 0 y 100, mediante la relación,

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (6)$$

con S expresado en (mm).

Una cuenca con CN=100, es en consecuencia una cuenca absolutamente impermeable, en que nada infiltra, mientras una cuenca con CN=0 es una cuenca que infiltra toda la precipitación que cae sobre ella, independientemente de su magnitud. Las cuencas reales, obviamente, se ubican entre ambos extremos.

De lo anteriormente expuesto se deduce que el éxito a lograr mediante la aplicación de este método depende del conocimiento que se tenga del Número de Curva que caracterice apropiadamente a una cuenca específica.

Por depender de las condiciones iniciales de humedad, el Número de Curva de una cuenca no es constante, estableciendo el método tres valores en función de condiciones antecedentes calificadas como secas, normales o húmedas, en función de un índice basado en la precipitación ocurrida en los 5 días anteriores a la tormenta. En general, la cuenca se clasifica según su CN para la condición normal, existiendo tablas o ecuaciones de ajuste, para pasar a los otros dos estados de humedad.(2)

En Chile, aún cuando hay recomendaciones oficiales para la asignación de Números de Curva (3), no existe la información empírica suficiente para la adecuada caracterización de las cuencas, lo que significa una gran incertidumbre en la asignación de este parámetro.

En el presenta trabajo se resumen los resultados de esfuerzos realizados para caracterizar diversas cuencas de Chile (4,5), determinando empíricamente su CN a través del análisis de tormentas históricas para las que se determinó su precipitación total y su escorrentía directa o precipitación efectiva.

El trabajo comprendió principalmente a las cuencas de la zona del Norte Chico y Centro Sur del país, básicamente las comprendidas entre las cuencas del Río Huasco y Río Choapa por una parte y del Río Maule y Río Bio Bío por la otra; teniendo especial cuidado con aquellas cuencas que estuviesen afectadas por regulaciones artificiales como embalses, centrales hidroeléctricas, etc.

Se eligieron estas zonas de estudio debido a que, en el caso del Norte Chico, por ser una zona semiárida, la infiltración, parámetro básico en el método de la Curva Número, cobra una vital importancia en cualquier cálculo hidrológico que se quiera realizar. En el caso de las cuencas del Centro Sur, se eligieron básicamente por la cantidad de información disponible en comparación con otras zonas del país.



Aplicando ese criterio de selección, se consideraron las siguientes cuencas para analizarlas en este estudio: Cuenca del Río Huasco, Cuenca del Río Elqui, Cuenca del Río Limarí, Cuenca del Río Choapa, Cuenca del Río Maule, Cuenca del Río Itata, Cuenca del Río Bio Bio.

2 Metodología Utilizada

La metodología utilizada se resume de la siguiente forma:

i). Recopilación de Información respecto a estadística fluviométrica y pluviométrica fundamentalmente caudales horarios, precipitaciones máximas diarias y en lo posible, precipitaciones horarias para todas las cuencas analizadas, la que se obtuvo de diversas fuentes (BNA, DMC, privadas).

ii) Se seleccionaron tormentas y crecidas de origen pluvial en las que se pudiera asociar claramente crecidas con precipitaciones. De esa forma, dependiendo de la estación fluviométrica utilizada, se establecieron subcuencas en las cuales se tuvo los elementos para fabricar los hidrogramas de crecida y la precipitación asociada.

iii) Se calcularon las precipitaciones medias de cada cuenca y subcuenca mediante métodos tradicionales como Polígonos de Thiessen y Promedios Aritméticos.

iv) Se analizaron las características que presentaban los hidrogramas de crecida, separando el flujo base de la escorrentía directa.

v) En cuencas mixtas se calculó el área pluvial de cada cuenca seleccionada, determinando la cota de la línea de nieves según lo propuesto por la DGA (6).

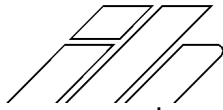
vi) Conociendo la precipitación media (P) de cada subcuenca analizada y el volumen de escorrentía directa o Precipitación Efectiva (P_e), se calculó la capacidad potencial de infiltración y la CN para esa tormenta en esa subcuenca, a partir de las ecuaciones (5) y (6).

vii) Para cada tormenta se establecieron además las condiciones antecedentes de humedad, siguiendo los procedimientos del método.

3 Aplicación del Método

Se aplicó la metodología descrita en el punto anterior para las siete cuencas seleccionadas. En total se analizaron cerca de 190 tormentas con sus hidrogramas de crecida asociado, obteniendo para cada una de las tormentas el vector P v/s Q requerido para el cálculo de la Curva Número, en distintas secciones de aforo dentro de cada una de las cuencas.

De los resultados obtenidos se observa que para todas las cuencas no existe un valor único de Curva Número, independientemente de las condiciones iniciales de humedad, sino que la variación de los valores de Curva Número decrece en forma exponencial a medida que aumenta la precipitación.



Lo anterior se explica por la restricción del método, que supone cuencas homogéneas, no generando escorrentía para valores de precipitación menores a ($lo = 0.2 * S$) y es consistente con la demostración (7) de que en cuencas heterogéneas la CN equivalente es decreciente con la magnitud de la precipitación. También se observa de los resultados obtenidos, que el valor de CN se estabiliza a medida que se incrementa la precipitación, nuevamente en forma concordante con la teoría.

Como ejemplo, en las figuras N°.1 y N°2 se muestra lo anteriormente mencionado para el caso de las cuencas del Río Huayco y Río Maule.

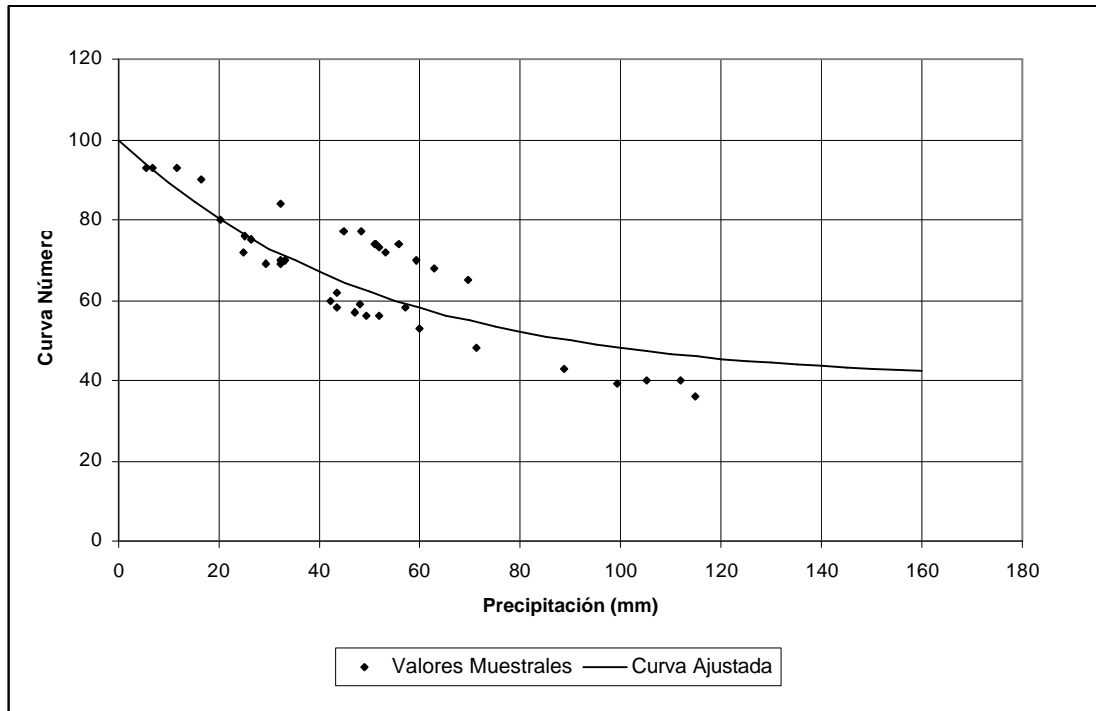


Figura 1 Curva Número v/s Precipitación – Cuenca Río Huasco.

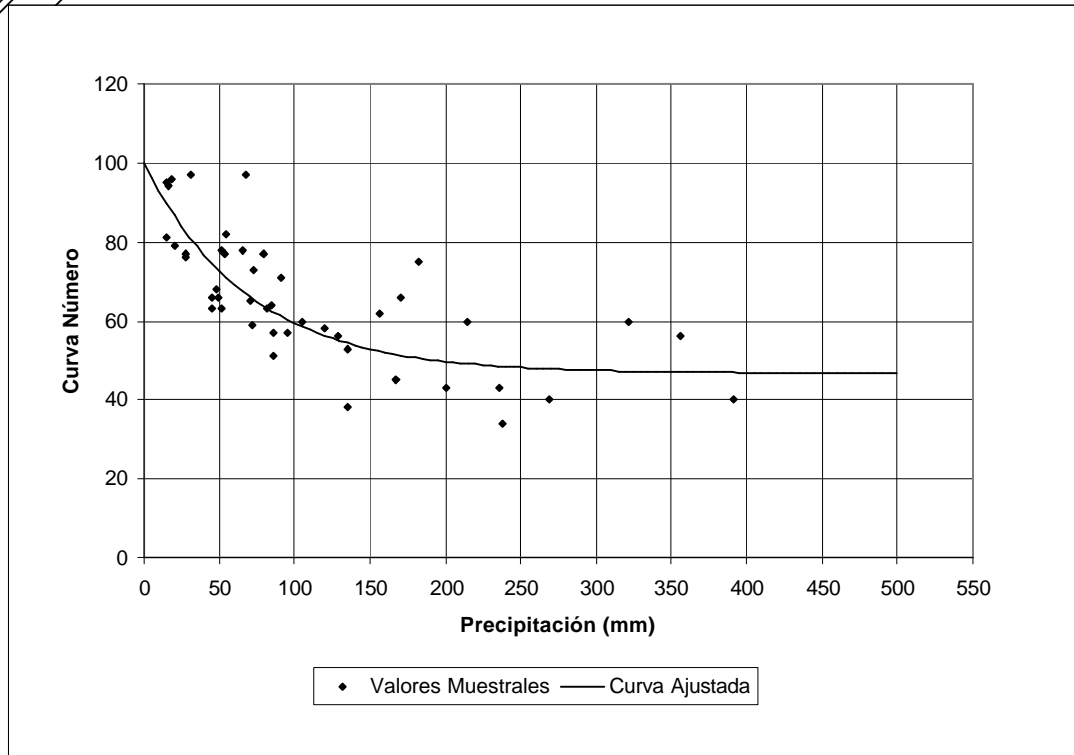
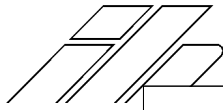


Figura 2 Curva Número v/s Precipitación – Cuenca Río Maule.

A los puntos calculados, llevados todos a una misma condición antecedente de humedad, se les ajustó una función analítica del tipo:

$$CN = CNo + (CNc - CNo) * \exp(-a * P) \quad (7)$$

donde :

CNo = Valor de CN en el cual se estabiliza.

P = Precipitación total de cada tormenta en milímetros.

CNc = Valor máximo posible de CN (CN=100).

a = constante.

A continuación se presentan las ecuaciones ajustadas para cada una de las cuencas estudiadas:

Tabla N° 1 Curva Número equivalente en función de la precipitación



CUENCA	EXPRESIÓN	CONDIC. ANTECEDENTE DE HUMEDAD
Río Huasco	$CN=40.0+60.0 * EXP(-0.0200 * P):$	II Normal
Río Elqui	$CN=64.0+36.0 * EXP(-0.0280 * P)$	II Normal
Río Limarí	$CN=70.0+30.0 * EXP(-0.0240 * P)$	II Normal
Río Choapa	$CN=68.0+32.0 * EXP(-0.0448 * P):$	II Normal
Río Maule	$CN=46.7+53.3 * EXP(-0.0144 * P)$	I Seca
Río Itata	$CN=41.0+59.0 * EXP(-0.0083 * P)$	I Seca
Río Bio Bio	$CN=49.4+50.6 * EXP(-0.0107 * P):$	I Seca

La tendencia observada revela un déficit en el método tradicional de la Curva Número, el cual no considera crecidas para precipitaciones menores a $(0.2 * S)$.

Esto, en la realidad no ocurre debido a que las cuencas reales son heterogéneas, existiendo incluso áreas impermeables (cauces, ciudades, etc.) cuyo escurrimiento siempre va a llegar al río produciendo crecidas por más pequeñas que éstas sean.

Con el propósito de corregir esta deficiencia, sin violar la hipótesis del método de que el valor de la CN debe permanecer constante, se propone una alternativa al método tradicional, que lo haga aplicable a cualquier magnitud de precipitación, por la vía de levantar la imposición de que $I_0=0.2S$.

La modificación propuesta considera un modelo en que el valor equivalente de I_0 varía linealmente con la magnitud de la precipitación mientras ésta sea menor a una Precipitación Umbral correspondiente al valor a partir del cual toda la superficie de la cuenca heterogénea está aportando a la escorrentía. Para precipitaciones mayores, I_0 vuelve a su expresión original, es decir, una constante (m), no necesariamente 0.2, multiplicada por la infiltración potencial máxima (S). De esa forma, la expresión general del método vuelve a su forma general dada por la ecuación (3), pero en la cual I_0 toma los valores:

$$I_0 = k * P * S \quad \text{para } (kPS) < (mS) \quad (8)$$

$$I_0 = m * S \quad \text{para } (kPS) > (mS) \quad (9)$$

Consecuentemente con lo anterior, la precipitación umbral queda dada por la expresión,

$$P_{lim} = m/k \quad (10)$$



4 Modificación Propuesta

Para materializar la modificación propuesta, se procedió a calibrar los parámetros de la ecuación de la Curva Número de tal manera de maximizar el coeficiente de correlación entre la precipitación efectiva medida para cada una de las tormentas analizadas y las calculadas a partir de los parámetros calibrados.

Los parámetros calibrados fueron la infiltración potencial máxima (S) definida como valor constante para tener un valor único de curva número, la abstracción inicial máxima ($I_0 = m \cdot S$) y la constante de proporcionalidad k. Con esto, para el uso posterior del método, el número de parámetros aumenta de dos a tres; k, m y S.

5 Resultados Obtenidos

Definida como función objetivo la maximización del coeficiente de correlación entre la precipitación efectiva medida para cada una de las tormentas analizadas y las calculadas a partir de los parámetros calibrados, se utilizó un algoritmo simple de búsqueda por barrido lineal, que va variando los parámetros y calculando el coeficiente de correlación para cada tormenta, quedándose, finalmente, con el mayor coeficiente calculado y definiendo los parámetros asociados a ese coeficiente de correlación como los óptimos.

Además se determinó el valor de la precipitación límite (Plim) para la cual son válidas las distintas expresiones de la infiltración inicial (I_0). Todas las variables involucradas en el análisis, precipitación media sobre la cuenca, volumen de escorrentía directa durante crecidas y cota de la línea de nieves en cuencas mixtas, involucran una gran incertidumbre asociada a errores tanto de medición como de estimación, lo que implica poca precisión en los resultados. De hecho, el procedimiento propuesto no logró resultados adecuados en las cuencas de Itata y Bio Bio. Para el resto de las cuencas se lograron resultados que se estiman aceptables, los que se presentan en la Tabla N°2.

Tabla N°2
Resultados obtenidos de la calibración

Cuenca	Parámetros					
	K (1/mm)	m	S (mm)	R	Plim	CN
Río Huasco	$2.72 \cdot 10^{-3}$	0.30	476	0.85	110	35
Río Elqui	$2.40 \cdot 10^{-3}$	0.26	337	0.85	108	43
Río Limarí	$1.97 \cdot 10^{-3}$	0.12	267	0.83	61	49
Río Choapa	$2.56 \cdot 10^{-3}$	0.22	292	0.95	86	47
Río Maule	$1.10 \cdot 10^{-3}$	0.26	244	0.89	238	51

De los resultados obtenidos se observa que el coeficiente (m) postulado con un valor igual a (0.2) por el método tradicional resulta para las cuencas analizadas con un valor promedio de (0.23) y una desviación estándar de (0.069) sin un aparente efecto regional. Cabe señalar, que los valores de correlación obtenidos en estas cuencas son



aceptables a pesar de la fuerte incertidumbre respecto de las estimaciones efectuadas, anteriormente señaladas.

En cuanto al coeficiente (k), se observa una cierta dependencia regional con un promedio de $(2.4 \cdot 10^{-3})$ en la zona norte y un valor de $(1.10 \cdot 10^{-3})$ en la cuenca del Maule. Con respecto a la infiltración potencial máxima (S), se obtiene un promedio de 323 (mm) con un rango de variación de 244 a 476 (mm), lo que es equivalente a un rango de variación de la CN, entre 35 y 51, con un promedio de CN=45.

Este valor que aparece sorprendentemente bajo se explica porque en la gran mayoría de las ocasiones las Condiciones Antecedente de Humedad eran del Tipo I o seco, lo que corrobora los resultados obtenidos por Barrientos (8). Al llevar la Curva Número a condición "normal" se obtiene el valor CN=66.

En el caso de las cuencas de Itata y Bio Bio resulta mas preciso utilizar una Curva Número equivalente variable con la magnitud de la precipitación, según las expresiones presentadas en la Tabla N°1.

6 Referencias

- 1.- BUREAU OF RECLAMATION, Diseño de Presas Pequeñas, United States Department of the Interior, 1972.
- 2.- CHOW, V., MAIDMENT, D., MAYS, L. (1993). Hidrología Aplicada. Ed. McGraw-Hill, Colombia.
- 3.- MOP, Dirección de Vialidad, (2001) "Manual de Carreteras, Volumen 2.
- 4.- SAAVEDRA, C., (1999). Cálculo y análisis crítico del Método de la Curva Número para cuencas semiáridas de Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil.
- 5.- GONZALEZ, A., (2000). Cálculo y análisis crítico del Método de la Curva Número para cuencas semi-húmedas de Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil.
- 6.- DIRECCION GENERAL DE AGUAS (1995). Manual de cálculos de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.
- 7.- STOWHAS, L., (2003), Uso del Método de la Curva Número en Cuencas Heterogéneas, XVI Congreso Chileno Hidráulica, Santiago
- 8.- BARRIENTOS, M., STOWHAS, L. (2001). Condiciones Antecedentes de Humedad de Tormentas Chilenas, XV Congreso Chileno Hidráulica, Concepción.