

# IDENTIFICACIÓN DEL NÚMERO $N$ CON BASE EN EL MÉTODO DEL HUT, EN QUINCE CUENCAS RURALES DE DOS ZONAS GEOGRÁFICAS DE MÉXICO

## $N$ NUMBER IDENTIFICATION THROUGH THE TUH METHOD, IN FIFTEEN RURAL WATERSHEDS OF TWO GEOGRAPHICAL ZONES IN MÉXICO

Daniel F. Campos-Aranda\*

Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Genaro Codina # 240. 78280. San Luis Potosí, San Luis Potosí (campos\_aranda@hotmail.com)

### RESUMEN

En este estudio se destaca la importancia de las crecientes o avenidas de diseño en cuencas rurales, por ser la base del dimensionamiento de la infraestructura hidráulica que en ellas se construye o revisa. Después se describe la complejidad de los procesos hidrológicos que generan tales crecientes. Por lo anterior, la calibración de cualquier método de predicción de avenidas conducirá a su estimación más confiable. En seguida se describen con detalle el método del hidrograma unitario triangular (HUT), la estimación de su tormenta de diseño con base en la fórmula de Chen y la estrategia necesaria para la identificación del número  $N$ , asociado a cada uno de los seis periodos de retorno procesados. La identificación o calibración se realizó en ocho cuencas rurales de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa) y siete de la Región No. 12 Parcial (Río Santiago), cuyas áreas de cuenca variaron de 97 a 1645 km<sup>2</sup>. Posteriormente se citan los diferentes factores que influyen en los resultados. Por último, se formulan conclusiones que destacan la importancia de los resultados numéricos de este estudio y de su aplicación sistemática regional durante los procesos de estimación de crecientes en cuencas sin aforos.

**Palabras clave:** Hidrograma unitario triangular, fórmula de Chen, predicciones de lluvia diaria y de gastos máximos.

### INTRODUCCIÓN

La estimación de las crecientes o avenidas de diseño en cuencas rurales pequeñas y medianas es una de las aplicaciones más importantes de la hidrología superficial, debido a su gran

### ABSTRACT

This study highlights the importance of floods or design floods in rural watersheds, since they are the basis for dimensioning hydraulic infrastructure built or reviewed in them. Then, the complexity of hydrological processes that these floods generate is described. Because of this, calibration of any flood prediction method will lead to its most reliable estimation. Next, the triangular unit hydrograph (TUH) method is described in detail, as well as the estimation of its design storm based on Chen's formula, and the strategy necessary for identifying the  $N$  number associated to each of the six return periods processed. Identification or calibration was carried out in eight rural watersheds in the Hydrological Region No. 10 (Sinaloa), and seven in Partial Hydrological Region No. 12 (Río Santiago), whose watershed areas varied from 97 to 1645 km<sup>2</sup>. Later, various factors that influence the results are listed. Finally, conclusions are proposed which highlight the importance of this study's numerical results and their systematic regional application during processes of flood estimation in watersheds with no gauging.

**Key words:** Triangular unit hydrograph, Chen's formula, daily rain and maximum flow predictions.

### INTRODUCTION

Estimation of floods or flow designs in small and medium rural watersheds is one of the most important applications of superficial hydrology, due to its great economic impact, since these flows are necessary for dimensioning culverts and small bridges, aligning, embankment, and other drainage and protection works, as well as for the design of small dam spillways for use or control. All these hydraulic structures, although of a reduced size, are abundant in México.

\*Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Julio, 2008. Aprobado: Junio, 2009.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 43: 763-775. 2009.

impacto económico, pues tales gastos son necesarios en el dimensionamiento de alcantarillas y puentes pequeños, rectificaciones, encauzamientos y otros trabajos de drenaje y protección, así como el diseño de los vertedores de presas pequeñas de aprovechamiento o control. Todas estas estructuras hidráulicas, aunque de tamaño reducido, son numerosas en México.

La enorme complejidad presente en la génesis de las crecientes conduce a establecer que la mejor información que se puede obtener para realizar sus estimaciones es la que procede de los registros sistemáticos e históricos de las avenidas del pasado. El uso de esta información hidrométrica local para la calibración de cualquier modelo o método de estimación, es uno de los enfoques más seguros para obtener estimaciones confiables.

A finales de la década de los ochenta los métodos regionales de estimación de crecientes (Cunnane, 1988) se establecieron como técnicas confiables, debido a que se ha verificado que ciertas variables hidrológicas son prácticamente constantes dentro de una región clasificada como homogénea. Por tanto, la identificación o calibración de los valores del número  $N$  de la curva de escurrimiento será sumamente útil en los procesos de estimación de crecientes en cuencas rurales, ya sea con fórmulas empíricas (Laguna, 2005), o con métodos hidrológicos basados en la relación lluvia-escurrimiento. En este contexto, el método del hidrograma unitario triangular (HUT), que se describe con detalle posteriormente, es uno de los más confiables y difundidos.

El objetivo de este trabajo fue identificar o calibrar el número  $N$ , obtenido al igualar las predicciones de ocho cuencas rurales aforadas de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa) y siete de la Región No. 12 Parcial (Río Santiago), con las obtenidas a través del método del HUT, aplicado usando una aproximación al tiempo de concentración de cada cuenca y tormentas de diseño estimadas con la fórmula de Chen, que usa información pluviográfica y pluviométrica. Se citan además los factores que influyen en el proceso de calibración del número  $N$ . Por último, se formulan conclusiones que destacan la importancia de los resultados numéricos, así como de la aplicación sistemática de este proceso en otras zonas geográficas del país y en las estimaciones de crecientes en cuencas sin aforos, a través de métodos regionales.

The enormous complexity found in flood genesis leads us to establish that the best information that can be obtained to estimate them is that which comes from systematic and historical registry of past floods. The use of this local hydrometric information for calibration of any model or estimation method is one of the most secure approaches to obtain reliable estimations.

At the end of the eighties, regional flood estimation methods (Cunnane, 1988) were established as reliable techniques, due to the fact that it has been verified that certain hydrologic variables are practically constant within a region classified as homogenous. Therefore, identification or calibration of  $N$  number values of the runoff curve will be extremely useful in flood estimation processes for rural watersheds, be they with empirical formulas (Laguna, 2005) or with hydrological methods based on the rainfall-runoff relation. In this context, the triangular unit hydrograph (TUH) method, which is later described in detail, is one of the most reliable and well-known.

The objective of this study was identifying or calibrating the  $N$  number, obtained by equating predictions from eight gauged rural watersheds in Hydrological Region No. 10 (Sinaloa), and seven in Partial Hydrological Region No. 12 (Río Santiago), with those obtained through the TUH method, applied by using an approximation to the time of concentration of each watershed and design storms estimated with Chen's formula, which uses pluviograph and pluviometric information. In addition, factors are cited which influence the  $N$  number calibration process. Finally, conclusions are drawn which highlight the importance of the numerical results, as well as the systematic application of this process in other geographical zones of the country and in estimations of floods in watersheds with no gauging, through regional methods.

## MATERIALS AND METHODS

### Triangular unit hydrograph method

The triangular unit hydrograph (TUH) method was proposed and made known in the US by the Bureau of Reclamation; in México, it was divulged since 1966 with the translation of the Design of Small Dams manual from 1960. The TUH concept

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Método del hidrograma unitario triangular

El método del hidrograma unitario triangular (HUT) fue propuesto y divulgado en EE.UU. por el Bureau of Reclamation; en México se difundió desde 1966 con la traducción del manual Design of Small Dams de 1960. El concepto HUT es una simplificación propuesta por el Soil Conservation Service (SCS) a principios de los años cincuenta (Snider, 1972), para la técnica de los hidrogramas unitarios sintéticos. En la Figura 1 se muestran los componentes geométricos del HUT y luego se describe con detalle su procedimiento de aplicación, donde se observa que los parámetros que determinan la magnitud de su predicción son el área de cuenca ( $A$ ), su tiempo de concentración ( $T_c$ ) y el valor del número  $N$  que define las lluvias en exceso.

El HUT es una esquematización muy simple para la respuesta de una cuenca a una tormenta aislada, en cuyo hidrograma tienden a reflejarse los errores involucrados en la medición del gasto directo y en la estimación de la lluvia en exceso. Sin embargo, su uso en el método hidrológico del Bureau of Reclamation ha demostrado ser consistente y aproximado.

El número  $N$  de la curva de escurrimiento del Natural Resources Conservation Service (NRCS), define un valor numérico adimensional en el intervalo 0 a 100 para el complejo hidrológico suelo-cobertura, depende del tipo de suelo, su uso, la práctica agrícola, la llamada condición hidrológica, la humedad antecedente y la pendiente. Por ello hay tabulaciones para estimación, por ponderación de las condiciones presentes, en cuencas rurales pequeñas y aún en las urbanas. Sin embargo, la estimación en el presente trabajo por calibración, lógicamente

is a simplification suggested by the Soil Conservation Service (SCS) at the beginning of the 1950s (Snider, 1972), for the technique of synthetic unit hydrographs. In Figure 1 it is shown TUH's geometrical components and their application procedure is then described in detail, in which is observed that the parameters which determine the magnitude of their prediction are the watershed area ( $A$ ), its concentration time ( $T_c$ ) and the  $N$  number value which defines excess rainfall.

TUH is a very simple schematization for the response of a watershed to an isolated storm, in whose hydrograph tend to be reflected the errors involved in measuring the direct flow and in estimating excess rainfall. However, its use in the hydrological method of the Bureau of Reclamation has proven to be consistent and approximate.

The  $N$  number of the runoff curve of the Natural Resources Conservation Service (NRCS) defines an dimensionless numerical value in the 0 to 100 interval for the soil-coverage hydrological complex, depends on the type of soil, its use, the agricultural practice, the so-called hydrological condition, the preceding moisture and the slope. Because of this, there are estimation tabulations, by pondering conditions present, in small rural watersheds and even in urban ones. However, the estimation in the present study through calibration logically leads to a global or representative value of the general conditions in the watershed, for generating its design floods.

The TUH method begins by establishing a design storm with six hourly increments, one of 12 h and another final one of 24 h. Thus, precipitation estimations are made for durations of 1, 2, 3, 4, 5, and 6 h, as well as for 12 and 24 h. The precipitation hour increments are found and these are arranged in the following order, to make a balanced storm design: 6, 4, 3, 1, 2 and 5, in addition to the two last increments of 6 and 12 h. Next, excess precipitations ( $P_e$ ) are found in millimeters through the SCS formula in function of the  $N$  number of the runoff curve and the accumulated precipitation ( $P$ ) in millimeters:

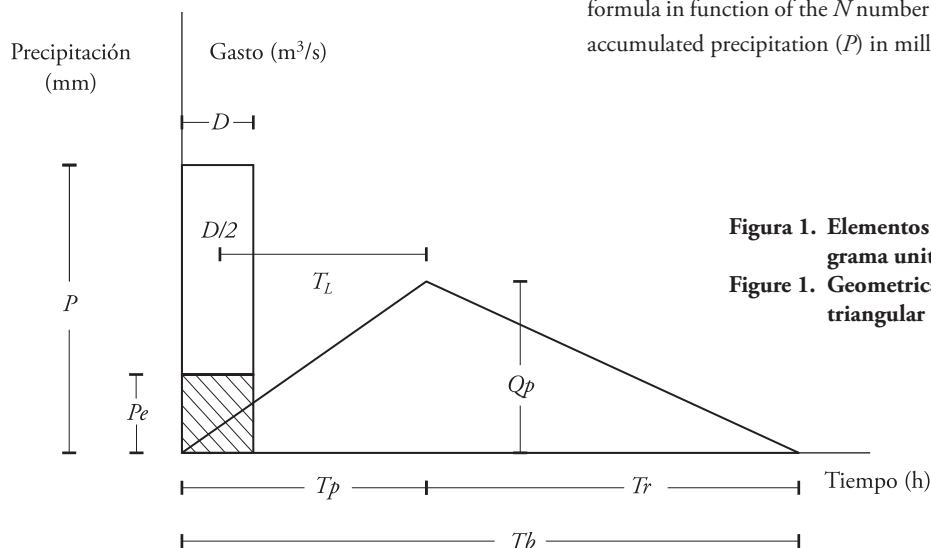


Figura 1. Elementos geométricos del hidrograma unitario triangular (HUT).

Figure 1. Geometrical elements of the triangular unit hydrograph (TUH).

conduce a un valor global o representativo de las condiciones generales de la cuenca, para la generación de sus crecientes de diseño.

En el método HUT se comienza por establecer una tormenta de diseño con seis incrementos horarios, uno de 12 h y otro final de 24 h. Por ello se realizan estimaciones de la precipitación de duración 1, 2, 3, 4, 5 y 6 h, así como de 12 y 24 h. Se obtienen los incrementos horarios de precipitación y éstos se acomodan con el siguiente orden para formar una tormenta de diseño balanceada: 6, 4, 3, 1, 2 y 5, además de los dos últimos incrementos de 6 y 12 h. En seguida se obtienen las precipitaciones en exceso ( $Pe$ ) en milímetros por medio de la fórmula del SCS en función del número  $N$  de la curva de escurrimiento y de la precipitación acumulada ( $P$ ) en milímetros:

$$Pe = \frac{(P - 0.2 \cdot S)^2}{(P + 0.8 \cdot S)} \quad \text{con } P > 0.20 \cdot S \quad (1)$$

$0.20 \cdot S$  son las pérdidas iniciales o precipitación que no produce escurrimiento.  $S$  es la retención máxima de humedad del suelo en milímetros y se estima con la expresión (Mishra *et al.*, 2008):

$$S = \frac{25400}{N} - 254 \quad (2)$$

Se debe considerar una pérdida mínima por infiltración, definida según el grupo hidrológico de suelos de la cuenca en la tabulación siguiente. Clasificación que se basa en el potencial de los suelos para absorber humedad y generar lluvia en exceso; entonces el grupo A tiene bajo potencial de escurrimiento son suelos arenosos. Por el contrario, el grupo D tiene alto potencial de escurrimiento, son suelos de arcillosos. Los grupos B y C son intermedios o de transición.

| Grupo hidrológico de suelo | Intervalo (mm h <sup>-1</sup> ) | Valor (mm h <sup>-1</sup> ) recomendado |
|----------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|
| A                          | 7.6 a 11.4                      | 10.2                                    |
| B                          | 3.8 a 7.6                       | 6.1                                     |
| C                          | 2.0 a 3.8                       | 3.0                                     |
| D                          | 0.5 a 2.0                       | 1.0                                     |

En seguida se aplican tres HUT, uno para los aumentos horarios de la tormenta de diseño y otros dos para sus aumentos finales. La forma geométrica de los HUT está definida en función de la duración unitaria ( $D$ ) de la lluvia en exceso ( $Pe$ ):

$$\text{Tiempo al pico } Tp = \frac{D}{2} + T_L = \frac{D}{2} + 0.60 \cdot Tc \quad (3)$$

$$\text{Tiempo base } Tb = Tp + Tr = Tp + 1.67 \cdot Tp = 2.67 \cdot Tp \quad (4)$$

$$Pe = \frac{(P - 0.2 \cdot S)^2}{(P + 0.8 \cdot S)} \quad \text{with } P > 0.20 \cdot S \quad (1)$$

$0.20 \cdot S$  are the initial losses or precipitation that does not produce runoff.  $S$  is the maximum moisture retention of the soil in millimeters, estimated with the expression (Mishra *et al.*, 2008):

$$S = \frac{25400}{N} - 254 \quad (2)$$

A minimum loss because of infiltration should be considered, defined according to the hydrologic group of soils in the watershed in the following tabulation. This classification is based on the soils' potential to absorb moisture and generate excess rainfall; therefore, group A has low runoff potential, they are sandy soils. On the contrary, group D has high runoff potential, they are clayey soils. Groups B and C are intermediate or transition.

| Hydrologic group of soil | Interval (mm h <sup>-1</sup> ) | Recommended value (mm h <sup>-1</sup> ) |
|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|
| A                        | 7.6 a 11.4                     | 10.2                                    |
| B                        | 3.8 a 7.6                      | 6.1                                     |
| C                        | 2.0 a 3.8                      | 3.0                                     |
| D                        | 0.5 a 2.0                      | 1.0                                     |

Next, three TУHs are applied, one for the hourly increases of the design storm and two others for their final increases. The geometrical shape of the TУHs is defined in function of the unit duration ( $D$ ) of excess rainfall ( $Pe$ ):

$$\text{Time to peak } Tp = \frac{D}{2} + T_L = \frac{D}{2} + 0.60 \cdot Tc \quad (3)$$

$$\text{Base time } Tb = Tp + Tr = Tp + 1.67 \cdot Tp = 2.67 \cdot Tp \quad (4)$$

$$\text{Peak flow } Qp = \frac{0.208 \cdot A \cdot Pe}{Tp} \quad (5)$$

where  $T_L$  and  $T_r$  are the times of lag and recession,  $Tc$  is the time of concentration of the watershed in hours, and  $A$  is its area in km<sup>2</sup>.  $Qp$  has units of m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. The  $D$  value will be assigned in function of the magnitude of the  $Tc$ , according to the following tabulation.

| $Tc$ (h) | First six TУH | Second TУH | Third TУH |
|----------|---------------|------------|-----------|
| <3       | 0.5           | 3.0        | 6.0       |
| 3 a 10   | 1.0           | 6.0        | 12.0      |
| 10 a 15  | 2.0           | 12.0       | 24.0      |
| 15 a 30  | 3.0           | 18.0       | 36.0      |

$$\text{Gasto pico } Q_p = \frac{0.208 \cdot A \cdot P_e}{T_p} \quad (5)$$

donde,  $T_L$  y  $T_r$  son los tiempos de retraso y recesión,  $T_c$  es el tiempo de concentración de la cuenca en horas, y  $A$  es su área en  $\text{km}^2$ .  $Q_p$  tiene unidades de  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ . El valor de  $D$  será asignado en función de la magnitud del  $T_c$ , de acuerdo con la tabulación siguiente.

| $T_c$<br>(h) | Primeros<br>seis HUT | Segundo<br>HUT | Tercer<br>HUT |
|--------------|----------------------|----------------|---------------|
| <3           | 0.5                  | 3.0            | 6.0           |
| 3 a 10       | 1.0                  | 6.0            | 12.0          |
| 10 a 15      | 2.0                  | 12.0           | 24.0          |
| 15 a 30      | 3.0                  | 18.0           | 36.0          |

Por último, se suman las ordenadas en el inicio, pico y final de cada uno de los HUT parciales para definir el hidrograma total, cuyo gasto pico corresponde a la predicción buscada. Detalles del procedimiento y ejemplos numéricos se pueden consultar en Miller y Clark (1966), Miller *et al.* (1977) y Campos (1982, 1991).

### Cuencas procesadas

La primera zona geográfica estudiada corresponde a la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa), que ha sido analizada para verificar su homogeneidad hidrológica (Campos, 1994; Escalante, 1998; Gutiérrez *et al.*, 2004). En dicha región hay 42 estaciones hidrométricas (Escalante, 1999), pero sólo ocho registran escurrimiento virgen, tienen tamaños de cuenca menores de  $2000 \text{ km}^2$  y su registro puede ser considerado estadísticamente aceptable para los análisis probabilísticos. En el Cuadro 1 se muestran las características generales de estas ocho estaciones de aforos, incluyendo las propiedades físicas de sus cuencas tomadas de Escalante (1999) y las coordenadas estimadas para su centro de gravedad según plano general de la Región Hidrológica No. 10 (SRH, 1975).

La segunda zona geográfica analizada está en la Región Hidrológica No. 12 Parcial (Río Santiago) e incluye siete estaciones hidrométricas, cuyas características generales y físicas se presentan en el Cuadro 2. La Región Hidrológica No. 12 ha sido considerada hidrológicamente homogénea por Santillán (2000). Las propiedades físicas de las cuencas de estas siete estaciones hidrométricas fueron calculadas por Martínez (2008)<sup>[1]</sup>.

### Estimación del tiempo de concentración

El  $T_c$  es el lapso desde que comienza la lluvia en exceso hasta que todas las porciones de la cuenca de drenaje contribuyen

Lastly, the flow ordinates at the beginning, peak and end of each partial TUH are added in order to define the total hydrograph, whose peak flow corresponds to the prediction sought. Details of procedure and numerical examples can be consulted in Miller and Clark (1966), Miller *et al.* (1977) and Campos (1982, 1991).

### Processed watersheds

The first geographical zone studied corresponds to Hydrological Region No. 10 (Sinaloa), which has been analyzed to verify its hydrological homogeneity (Campos, 1994; Escalante, 1998; Gutiérrez *et al.*, 2004). In this region there are 42 hydrometric stations (Escalante, 1999), but only eight of them register virgin runoff, have watershed sizes of less than  $2000 \text{ km}^2$  and their records can be considered statistically acceptable for probabilistic analyses. In Table 1 it is shown the general characteristics of these eight gauging stations, including the physical properties of their watersheds taken from Escalante (1999) and the coordinates estimated for their gravity centers according to the general map of Hydrological Region No. 10 (SRH, 1975).

The second geographical zone analyzed is in the Partial Hydrological Region No. 12 (Río Santiago) and includes seven hydrometric stations whose general and physical characteristics are presented in Table 2. The Hydrological Region No. 12 has been considered hydrologically homogenous by Santillán (2000). The physical properties of the watersheds in these seven hydrometric stations were calculated by Martínez (2008)<sup>[1]</sup>.

### Time of concentration estimation

The  $T_c$  is the lapse that begins with excess rainfall until all the portions of the drainage watershed contribute simultaneously to the flow at the exit. In order to estimate the  $T_c$ , a recompilation of empirical formulas for rural watersheds were used (Campos, 1982), which utilize their physical characteristics; the magnitudes adopted for this parameter are shown in column 7 of Table 1; these values are very similar to those obtained by Escalante (1999). On Table 2, estimations of the  $T_c$  are presented for the seven watersheds in Partial Hydrological Region No. 12 (Río Santiago).

### Predictions of maximum flow

The 15 series of maximum annual flows, which correspond to the hydrometric stations that will be processed, come from the BANDAS system (IMTA, 2003). Taking into account that

<sup>1</sup> Martínez M., S. I. 2008. Algoritmos y software para estimar propiedades físicas en cuencas rurales. Comunicación personal. 30 p.

**Cuadro 1. Características físicas y de tormentas (mm) en las cuencas de las estaciones hidrométricas indicadas de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa) y sus respectivas estaciones pluviométricas base utilizadas.****Table 1. Physical and storm (mm) characteristics in the watersheds of hydrometric stations indicated in the Hydrological Region No. 10 (Sinaloa) and their corresponding base pluviometric stations used.**

| Hidrométrica y pluviométrica | Clave | Periodo de registro<br>(Núm. años) | $A^{\dagger}$<br>(km <sup>2</sup> ) | $Lc^{\S}$<br>(km) | $Sc^{\S}$<br>(adim.) | $Tc^b$<br>(h) | Centro de gravedad |          | $P_1^{10}$ | $P_1^{25}$ | $P_1^{50}$ | -           |
|------------------------------|-------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|----------------------|---------------|--------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
|                              |       |                                    |                                     |                   |                      |               | Latitud            | Longitud |            |            |            |             |
|                              |       |                                    |                                     |                   |                      |               |                    |          | $P_D^{10}$ | $P_D^{25}$ | $P_D^{50}$ | $P_D^{100}$ |
| 1. Bamícori                  | 10057 | 1951-1983(33)                      | 223                                 | 20.2              | 0.00490              | 5.0           | 26° 22'            | 108° 23' | 63         | 75         | 81         | -           |
| Bamícori                     | 25007 | 1961-1985(25)                      |                                     |                   |                      |               | 26° 21'            | 108° 29' | 110        | 139        | 168        | 198         |
| 2. La Tina                   | 10078 | 1960-1984(25)                      | 275                                 | 30.3              | 0.00413              | 8.0           | 26° 11'            | 108° 31' | 64         | 76         | 81         | -           |
| La Tina                      | 25053 | 1961-1985(25)                      |                                     |                   |                      |               | 26° 13'            | 108° 36' | 129        | 166        | 196        | 231         |
| 3. El Bledal                 | 10027 | 1937-1995(59)                      | 371                                 | 31.0              | 0.00799              | 5.0           | 24° 43'            | 107° 01' | 82         | 98         | 106        | -           |
| Sanalona                     | 25081 | 1961-1998(38)                      |                                     |                   |                      |               | 24° 48'            | 107° 09' | 138        | 174        | 204        | 239         |
| 4. Zopilote                  | 10034 | 1939-2001(58)                      | 666                                 | 68.0              | 0.00690              | 11.0          | 25° 58'            | 108° 13' | 63         | 75         | 80         | -           |
| La Vainilla                  | 25054 | 1961-1983(23)                      |                                     |                   |                      |               | 26° 04'            | 108° 16' | 121        | 140        | 153        | 167         |
| 5. El Quelite                | 10083 | 1960-2001(34)                      | 835                                 | 42.0              | 0.00579              | 8.0           | 23° 39'            | 106° 21' | 67         | 76         | 82         | -           |
| El Quelite                   | 25031 | 1961-1990(30)                      |                                     |                   |                      |               | 23° 33'            | 106° 28' | 151        | 193        | 229        | 270         |
| 6. Badiraguato               | 10079 | 1959-1999(41)                      | 1018                                | 59.0              | 0.02118              | 6.0           | 25° 36'            | 107° 31' | 76         | 97         | 120        | -           |
| Badiraguato                  | 25110 | 1961-1997(36)                      |                                     |                   |                      |               | 25° 22'            | 107° 32' | 153        | 196        | 236        | 273         |
| Surutato                     | 25093 | 1961-1985(25)                      |                                     |                   |                      |               | 25° 48'            | 107° 33' | 204        | 285        | 359        | 459         |
| cuenca                       | -     | -                                  |                                     |                   |                      |               | -                  | -        | 179        | 241        | 298        | 366         |
| 7. Choix                     | 10066 | 1955-2002(47)                      | 1403                                | 82.0              | 0.00234              | 18.0          | 26° 38'            | 108° 05' | 61         | 73         | 81         | -           |
| Choix                        | 25019 | 1961-1998(38)                      |                                     |                   |                      |               | 26° 44'            | 108° 20' | 99         | 118        | 133        | 149         |
| 8. Guamuchil                 | 10031 | 1939-1971(33)                      | 1645                                | 65.0              | 0.00698              | 10.0          | 25° 31'            | 107° 49' | 68         | 82         | 90         | -           |
| Mocorito                     | 25117 | 1961-1985(25)                      |                                     |                   |                      |               | 25° 29'            | 107° 55' | 113        | 128        | 138        | 147         |

<sup>†</sup> Área de cuenca; <sup>§</sup> Longitud del colector principal; <sup>§</sup> Pendiente promedio del colector principal; <sup>b</sup> Tiempo de concentración.

**Cuadro 2. Características físicas y de tormentas (mm) en las cuencas de las estaciones hidrométricas indicadas de la Región Hidrológica No. 12 Parcial (Río Santiago) y sus respectivas estaciones pluviométricas base utilizadas.****Table 2. Physical and storm (mm) characteristics in the watersheds of hydrometric stations indicated in the Partial Hydrological Region No. 12 (Río Santiago) and their corresponding base pluviometric stations used.**

| Hidrométrica y pluviométrica | Clave | Periodo de registro<br>(Núm. años) | $A^{\dagger}$<br>(km <sup>2</sup> ) | $Lc^{\S}$<br>(km) | $Sc^{\S}$<br>(adim.) | $Tc^b$<br>(h) | Centro de gravedad |          | $P_1^{10}$ | $P_1^{25}$ | $P_1^{50}$ | -           |
|------------------------------|-------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|----------------------|---------------|--------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
|                              |       |                                    |                                     |                   |                      |               | Latitud            | Longitud |            |            |            |             |
|                              |       |                                    |                                     |                   |                      |               |                    |          | $P_D^{10}$ | $P_D^{25}$ | $P_D^{50}$ | $P_D^{100}$ |
| 1. San Juanico               | 12563 | 1972-1976(5)                       | 97.0                                | 18.9              | 0.00808              | 4.0           | 21° 44'            | 102° 38' | 38         | 44         | 48         | -           |
| San Juanico                  | 14127 | 1962-1987(25)                      |                                     |                   |                      |               | 21° 43'            | 102° 34' | 76         | 91         | 103        | 114         |
| 2. Calerita                  | 12585 | 1965-2002(37)                      | 284.9                               | 46.6              | 0.01303              | 7.0           | 21° 37'            | 102° 39' | 39         | 42         | 45         | -           |
| Calera                       | 14025 | 1961-1991(28)                      |                                     |                   |                      |               | 25° 05'            | 107° 41' | 76         | 91         | 103        | 115         |
| 3. Huascato                  | 12589 | 1965-1987(23)                      | 312.5                               | 51.6              | 0.01095              | 8.0           | 20° 35'            | 102° 08' | 49         | 64         | 74         | -           |
| Huascato                     | 14070 | 1964-1991(25)                      |                                     |                   |                      |               | 20° 30'            | 102° 17' | 73         | 79         | 83         | 86          |
| 4. Agostadero                | 12355 | 1941-1978(38)                      | 353.4                               | 50.9              | 0.00648              | 10.0          | 21° 28'            | 102° 10' | 40         | 46         | 53         | -           |
| Agostadero                   | 14004 | 1961-1987(27)                      |                                     |                   |                      |               | 21° 25'            | 102° 18' | 75         | 86         | 93         | 99          |
| 5. Valle de Gpe.             | 12371 | 1941-1987(47)                      | 394.6                               | 39.1              | 0.00639              | 8.0           | 20° 53'            | 102° 33' | 52         | 61         | 69         | -           |
| Valle de Gpe.                | 14159 | 1961-1987(27)                      |                                     |                   |                      |               | 21° 00'            | 102° 37' | 79         | 95         | 107        | 120         |
| 6. La Yerbabuena             | 12607 | 1965-1995(30)                      | 487.3                               | 41.4              | 0.01036              | 7.0           | 20° 40'            | 102° 38' | 54         | 65         | 74         | -           |
| La Yerbabuena                | 14090 | 1969-1991(16)                      |                                     |                   |                      |               | 20° 34'            | 102° 48' | 76         | 88         | 97         | 106         |
| 7. Cuixtla                   | 12469 | 1951-2002(51)                      | 856.7                               | 77.0              | 0.01762              | 9.0           | 21° 15'            | 103° 32' | 54         | 65         | 70         | -           |
| Cuixtla                      | 14038 | 1961-1991(27)                      |                                     |                   |                      |               | 21° 04'            | 103° 27' | 74         | 81         | 85         | 89          |

<sup>†</sup> Área de cuenca; <sup>§</sup> Longitud del colector principal; <sup>§</sup> Pendiente promedio del colector principal; <sup>b</sup> Tiempo de concentración.

simultáneamente al gasto en la salida. Para estimar el  $T_c$  se usó una recopilación de fórmulas empíricas para cuencas rurales (Campos, 1982), las cuales usan sus características físicas; las magnitudes adoptadas para dicho parámetro se exponen en la columna 7 del Cuadro 1; tales valores son muy similares a los obtenidos por Escalante (1999). En el Cuadro 2 se presentan las estimaciones del  $T_c$  en las siete cuencas de la Región Hidrológica No. 12 Parcial.

### Predicciones de gastos máximos

Las 15 series de gastos máximos anuales, que corresponden a las estaciones hidrométricas que serán procesadas, proceden del sistema BANDAS (IMTA, 2003). Considerando que las predicciones necesarias corresponden a periodos de retorno relativamente bajos ( $T_r < 100$  años), se espera que éstas sean muy semejantes, y por ello se adoptaron como predicciones buscadas los valores medianos obtenidos a través de la aplicación de cinco criterios del análisis probabilístico: 1) la transformación SMEMAX (Bethlahmy, 1977); 2) la transformación Potencial (Chander *et al.*, 1978); 3) la distribución Log-Normal (Stedinger *et al.*, 1993); 4) la distribución Log-Pearson tipo III (Bobée y Ashkar, 1991); 5) la distribución GVE (Stedinger *et al.*, 1993).

En el Cuadro 3 se muestran los resultados de los cinco métodos probabilísticos aplicados, en la primera y última estaciones hidrométricas procesadas (Bamícori y Cuixtla); en el resto sólo se indican los valores mediados obtenidos. El registro disponible en la estación hidrométrica San Juanico, fue procesado como serie de duración parcial (NERC, 1975; Campos, 2006), debido al reducido número de años disponibles, cinco según Cuadro 2.

### Predicciones de lluvias máximas diarias

Con base en el plano general de la Región Hidrológica No. 10 (SRH, 1975) se seleccionaron las estaciones pluviométricas base para cada una de las ocho cuencas seleccionadas (Cuadro 1). Se buscó que la estación base se localizara dentro de la cuenca, lo que sólo ocurrió en las cuencas de Zopilote, Badiraguato y Guamuchil, en el resto se localiza cerca o en el sitio de la estación hidrométrica. Para cada estación pluviométrica base se obtuvieron, del sistema ERIC II (IMTA, 2000), sus características generales (Cuadro 1) y sus series de lluvias máximas diarias anuales. Se aplicó el mismo criterio en las siete cuencas de la Región Hidrológica No. 12 Parcial (Cuadro 2).

Con excepción del registro de lluvias máximas diarias anuales de la estación pluviométrica La Yerbabuena, que fue procesado mediante excedencias (NERC, 1975; Campos,

the necessary predictions correspond to relatively low return periods ( $T_r < 100$  years), it is expected for these to be very similar, and therefore were adopted as predictions that seek the median values obtained through applying five probabilistic analysis criteria: 1) SMEMAX transformation (Bethlahmy, 1977); 2) Potential transformation (Chander *et al.*, 1978); 3) Log-Normal distribution (Stedinger *et al.*, 1993); 4) Log-Pearson type III distribution (Bobée and Ashkar, 1991); 5) GVE distribution (Stedinger *et al.*, 1993).

On Table 3, results from the five probabilistic methods employed are shown, in the first and last hydrometric stations processed (Bamícori and Cuixtla); for the rest, only median values obtained are indicated. The record available for the San Juanico hydrometric station were processed as a partial duration series (NERC, 1975; Campos, 2006), due to the reduced number of years available, five according to Table 2.

### Daily maximum rainfall predictions

Based on the general map of Hydrological Region No. 10 (SRH, 1975), base pluviometric stations were selected for each of the eight watersheds selected (Table 1). We sought for the base station to be located within the watershed, which only happened in Zopilote, Badiraguato and Guamuchil watersheds, while for the rest, they are located nearby or in the site of the hydrometric station. For each base pluviometric station, its general characteristics were obtained (Table 1), and its series of annual maximum daily rainfall, from the ERIC II system (IMTA, 2000). The same criteria were applied in the seven watersheds of the Partial Hydrological Region No. 12 (Río Santiago) (Table 2).

With the exception of the records of annual maximum daily rainfall of the La Yerbabuena pluviometric station, which was processed through exceedances (NERC, 1975; Campos, 2006), the rest of the records of this type from base pluviometric stations adopted were processed probabilistically in a similar manner as the records of annual maximum flow, in order to obtain the median daily predictions from the return periods 10, 25, 50 and 100 years ( $P_D^{T_r}$ ) shown in Tables 1 and 2.

### Design rainfalls

Hourly precipitations during the first 6 h and those at 12 and 24 h, necessary for the TUH method to build the storm design, all of them associated with the return period analyzed, were estimated based on Chen's formula using the pluviograph and pluviometric information available in México, based on the procedure and equations exposed by Campos (2008), for values of the rainfall-duration quotient ( $R$ ) that vary from 0.10 to 0.60. Next, their extrapolation is described for  $R$  values up to 0.70, in

**Cuadro 3. Predicciones ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) estimadas en las estaciones hidrométricas indicadas de las Regiones Hidrológicas No. 10 (Sinaloa) y 12 Parcial (Río Santiago).****Table 3. Predictions ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) estimated in the hydrometric stations indicated in Hydrological Regions No. 12 (Sinaloa) and Partial No. 12 (Río Santiago).**

| Estación hidrométrica<br>Método de ajuste | Periodos de retorno en años |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|
|                                           | 2                           | 5    | 10   | 25   | 50   | 100  |
| 1. Bamícori                               |                             |      |      |      |      |      |
| Transformación SMEMAX                     | 115                         | 318  | 444  | 578  | 665  | 743  |
| Transformación Potencial                  | 126                         | 276  | 417  | 651  | 871  | 1132 |
| Distribución Log–Normal                   | 127                         | 273  | 407  | 624  | 823  | 1054 |
| Distribución Log–Pearson tipo III         | 126                         | 275  | 416  | 649  | 866  | 1123 |
| Distribución GVE                          | 134                         | 270  | 391  | 591  | 783  | 1020 |
| Valores medianos                          | 126                         | 275  | 416  | 624  | 823  | 1054 |
| 2. La Tina                                |                             |      |      |      |      |      |
| Valores medianos                          | 66                          | 173  | 267  | 415  | 548  | 712  |
| 3. El Bledal                              |                             |      |      |      |      |      |
| Valores medianos                          | 206                         | 404  | 575  | 837  | 1067 | 1325 |
| 4. Zopilote                               |                             |      |      |      |      |      |
| Valores medianos                          | 279                         | 553  | 728  | 967  | 1079 | 1194 |
| 5. El Quelite                             |                             |      |      |      |      |      |
| Valores medianos                          | 330                         | 701  | 1026 | 1497 | 1906 | 2360 |
| 6. Badiraguato                            |                             |      |      |      |      |      |
| Valores medianos                          | 506                         | 1181 | 1980 | 3702 | 5846 | 8515 |
| 7. Choix                                  |                             |      |      |      |      |      |
| Valores medianos                          | 226                         | 422  | 608  | 939  | 1262 | 1590 |
| 8. Guamuchil                              |                             |      |      |      |      |      |
| Valores medianos                          | 470                         | 927  | 1322 | 1935 | 2527 | 3102 |
| 1. San Juanico                            |                             |      |      |      |      |      |
| Valores medianos                          | 27                          | 45   | 59   | 77   | 90   | 104  |
| 2. Calerita                               |                             |      |      |      |      |      |
| Valores medianos                          | 30                          | 85   | 132  | 199  | 252  | 307  |
| 3. Huascato                               |                             |      |      |      |      |      |
| Valores medianos                          | 144                         | 237  | 295  | 374  | 417  | 465  |
| 4. Agostadero                             |                             |      |      |      |      |      |
| Valores medianos                          | 58                          | 97   | 123  | 156  | 181  | 207  |
| 5. Valle de Guadalupe                     |                             |      |      |      |      |      |
| Valores medianos                          | 63                          | 125  | 171  | 239  | 302  | 362  |
| 6. La Yerbabuena                          |                             |      |      |      |      |      |
| Valores medianos                          | 103                         | 146  | 168  | 192  | 204  | 216  |
| 7. Cuixtla                                |                             |      |      |      |      |      |
| Transformación SMEMAX                     | 242                         | 472  | 622  | 780  | 883  | 976  |
| Transformación Potencial                  | 265                         | 461  | 593  | 758  | 880  | 999  |
| Distribución Log–Normal                   | 278                         | 459  | 574  | 717  | 821  | 924  |
| Distribución Log–Pearson tipo III         | 265                         | 467  | 599  | 756  | 863  | 961  |
| Distribución GVE <sup>§</sup>             | 269                         | 456  | 587  | 761  | 896  | 1038 |
| Valores medianos                          | 265                         | 461  | 593  | 758  | 880  | 976  |

2006), el resto de registros de este tipo de las estaciones pluviométricas base adoptadas se procesaron probabilísticamente de manera similar a los registros de gasto máximo anual, para obtener las predicciones diarias medianas de periodos de retorno 10, 25, 50 y 100 años ( $p_D^{Tr}$ ) mostradas en los Cuadros 1 y 2.

order to process three watersheds of Hydrological Region No. 12 (Table 5).

In Table 4, the six original pairs of data groups are shown, according to Chen (1983), and two more, one interpolated ( $R=0.50$ ) and another extrapolated ( $R=0.70$ ) from Chen's original curves. The following expressions were each calculated

**Lluvias de diseño**

Las precipitaciones horarias durante las primeras 6 h y las de 12 y 24 h, necesarias en el método del HUT para construir su tormenta de diseño, asociadas todas ellas al periodo de retorno que se analiza, se estimaron con base en la fórmula de Chen usando la información pluviográfica y pluviométrica disponible en México, con base en el procedimiento y ecuaciones expuestas por Campos (2008), para valores del cociente lluvia-duración ( $R$ ) que varían de 0.10 a 0.60. A continuación se describe su extrapolación para valores de  $R$  de hasta 0.70, para poder procesar tres cuencas de la Región Hidrológica No. 12 (Cuadro 5).

En el Cuadro 4 se presentan las seis parejas originales de ternas de datos según Chen (1983) y dos más, una interpolada ( $R=0.50$ ) y otra extrapolada ( $R=0.70$ ) en las curvas originales de Chen. Las expresiones siguientes fueron calculadas cada una con seis parejas de datos para  $0.20 \leq R \leq 0.70$  y son válidas en tal intervalo:

$$a = 21.03453 - 186.4683 \cdot R + 825.4915 \cdot R^2 - 1084.846 \cdot R^3 + 524.06 \cdot R^4 \quad (6)$$

$$b = 3.487775 - 68.13976 \cdot R + 389.4625 \cdot R^2 - 612.4041 \cdot R^3 + 315.8721 \cdot R^4 \quad (7)$$

$$c = 0.2677553 + 0.9481759 \cdot R + 2.109415 \cdot R^2 - 4.827012 \cdot R^3 + 2.459584 \cdot R^4 \quad (8)$$

La fórmula de Chen es la siguiente:

$$P_t^{Tr} = \frac{a \cdot P_1^{10} \cdot \log(10^{2-F} Tr^{F-1}) \cdot t}{60 \cdot (t + b)^c} \quad (9)$$

with six pairs of data for  $0.20 \leq R \leq 0.70$  and they are valid in such an interval:

$$a = 21.03453 - 186.4683 \cdot R + 825.4915 \cdot R^2 - 1084.846 \cdot R^3 + 524.06 \cdot R^4 \quad (6)$$

$$b = 3.487775 - 68.13976 \cdot R + 389.4625 \cdot R^2 - 612.4041 \cdot R^3 + 315.8721 \cdot R^4 \quad (7)$$

$$c = 0.2677553 + 0.9481759 \cdot R + 2.109415 \cdot R^2 - 4.827012 \cdot R^3 + 2.459584 \cdot R^4 \quad (8)$$

Chen's formula is the following:

$$P_t^{Tr} = \frac{a \cdot P_1^{10} \cdot \log(10^{2-F} Tr^{F-1}) \cdot t}{60 \cdot (t + b)^c} \quad (9)$$

with  $P_t^{Tr}$  and  $P_1^{10}$  in millimeters,  $t$  in minutes ( $5 \leq t \leq 1440$ ) and  $Tr$  ( $5 \leq Tr \leq 100$ ) in years.

The values of the  $R$  and  $F$  quotients define the shape of the Intensity-Duration-Frequency curves and the separation between them; instead, rain  $P_1^{10}$  establishes the scaling. Therefore, when the pluviograph information is available, its value will have to be estimated probabilistically, as opposed to reading it in isohyet maps (SCT, 1990), as established by Campos (2008) in his procedure.

Estimations of Chen's formula are punctual and therefore they should adjust to the size of each watershed analyzed, since all the storms are less intense as they cover more area. The reduction factor ( $Fr$ ) that was applied is from USACE (1981), and it has the following expression:

$$Fr = 1.0 - 0.3549 \cdot D^{-0.42723} (1.0 - e^{-0.005794 \cdot A}) \quad (10)$$

**Cuadro 4. Valores de los parámetros de la fórmula de Chen originales y estimados.**

**Table 4. Values of Chen's formula parameters: original and estimated.**

| Parámetros: | Cociente lluvia-duración (R) |               |               |               |               |          |          |
|-------------|------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------|----------|
|             | 0.10                         | 0.15          | 0.20          | 0.30          | 0.40          | (0.50)   | (0.70)   |
| $a^\dagger$ | 4.58                         | 6.57          | 8.91          | 14.35         | 22.57         | (31.20)  | 40.01    |
| $a^\S$      | <i>4.534</i>                 | <i>6.695</i>  | <i>8.812</i>  | <i>14.369</i> | <i>22.570</i> | (31.321) | (48.722) |
| $b^\dagger$ | -2.84                        | -0.80         | 1.04          | 4.12          | 7.48          | (9.90)   | 11.52    |
| $b^\S$      | <i>-2.867</i>                | <i>-0.731</i> | <i>0.992</i>  | <i>4.124</i>  | <i>7.483</i>  | (9.975)  | (12.413) |
| $c^\dagger$ | 0.309                        | 0.420         | 0.507         | 0.632         | 0.738         | (0.820)  | 0.872    |
| $c^\S$      | <i>0.3082</i>                | <i>0.4216</i> | <i>0.5063</i> | <i>0.6316</i> | <i>0.7383</i> | (0.820)  | (0.900)  |

$^\dagger$  Valores originales. Entre paréntesis las magnitudes interpoladas y extrapoladas en las curvas originales de Chen.

$^\S$  Valores en cursivas calculados con las ecuaciones expuestas en Campos (2008).

$^\P$  Valores entre paréntesis calculados con las ecuaciones 6 a 8.

con  $P_t^{Tr}$  y  $P_1^{10}$  en milímetros,  $t$  en minutos ( $5 \leq t \leq 1440$ ) y  $Tr$  ( $5 \leq Tr \leq 100$ ) en años.

Los valores de los cocientes  $R$  y  $F$  definen la forma de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia y su separación entre ellas; en cambio, la lluvia  $P_1^{10}$  establece el escalamiento. Por ello, cuando se disponga de información pluviográfica se deberá de estimar su valor de manera probabilística, en vez de leerlo en las cartas isoyetas (SCT, 1990), como establece el procedimiento de Campos (2008).

Las estimaciones de la fórmula de Chen son puntuales y por ello se deben ajustar al tamaño de cada cuenca analizada, ya que todas las tormentas son menos intensas conforme abarcan más área. El factor de reducción ( $Fr$ ) que se aplicó procede del USACE (1981) y tiene la siguiente expresión:

$$Fr = 1.0 - 0.3549 \cdot D^{-0.42723} (1.0 - e^{-0.005794 \cdot A}) \quad (10)$$

donde,  $D$  es la duración de la precipitación en horas y  $A$  es el área de cuenca en  $\text{km}^2$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Números $N$ calibrados

En cada una de las 15 cuencas analizadas se tienen como datos básicos su área de cuenca, su tiempo de concentración y las estimaciones de su gasto máximo asociado a los seis periodos de retorno estudiados. Además, se adoptó en todos los casos un suelo tipo C para la estimación de pérdidas mínimas del método del HUT.

El proceso de calibrado se realizó por tanteos asignando un número  $N$  para obtener una predicción a través del método del HUT, aplicado a cada cuenca, igual a la estimación de su gasto máximo observado. Los resultados numéricos de este proceso están en el Cuadro 5, tanto para el número  $N$  como para los parámetros calculados de la fórmula de Chen.

### Interpretación global de los resultados

Los resultados de Cuadro 5 pueden parecer a primera vista algo inconsistentes, ya que en ocho de las cuencas el número  $N$  desciende conforme crece el periodo de retorno, en cinco aumenta y en dos (Badiraguato y Agostadero) se presentan los dos comportamientos. Sólo en seis de las 15 cuencas estudiadas se obtienen números  $N$  que son bastante semejantes:

where  $D$  is the duration of precipitation in hours and  $A$  is the area of the watershed in  $\text{km}^2$ .

## RESULTS AND DISCUSSION

### Calibrated $N$ numbers

In each of the 15 watersheds analyzed, the basic data available are watershed area, time of concentration and estimations of maximum flow associated to the six return periods studied. In addition, in all cases a type C soil was adopted for estimation of minimum losses in the TUH method.

The calibration process was carried out by approximations, assigning an  $N$  number to obtain a prediction through the TUH method, applied it to each watershed, equal to the estimation of its maximum observed flow. The numeric results of this process are shown in Table 5, both for the  $N$  number and for the parameters calculated with Chen's formula.

### Global interpretation of the results

Results from Table 5 could seem, at first sight, somewhat inconsistent, since in eight of the watersheds the  $N$  number decreases as the return period increases, in five it increases and in two (Badiraguato and Agostadero), both behaviors are present. Only in six of the 15 watersheds studied,  $N$  numbers are obtained which are rather similar: in Bamícori, Zopilote, Choix, Calerita, Agostadero and Valle de Guadalupe, with average and median values that are very similar (Table 5).

The numerical results of Table 5 allow delimiting the  $N$  number in Hydrological Region No. 10 to between 80 and 86, with extreme values of 56.8 and 91.5. Instead, in Partial Hydrological Region No. 12 (Río Santiago), the regional  $N$  number is between 74 and 79, with extreme magnitudes of 58.1 and 89.4. It is worth highlighting that the extreme values occur in the greatest return period analyzed (100 years), which is logical for there is greater variability in the estimations involved.

When taking into account the multitude of factors that can influence the identification or calibration of the  $N$  number, global and specific results shown in Table 5 can be considered excellent. For example, there are factors associated to the TUH method itself, such as the structure of its design storm. Another

Cuadro 5. Resultados de la fórmula de Chen y de la identificación del número  $N$  con el método del HUT en las estaciones hidrométricas indicadas de las Regiones Hidrológicas No. 10 (Sinaloa) y 12 Parcial (Río Santiago).  
Table 5. Results from Chen's formula and identification of the  $N$  number with TUH method in the hydrometric stations indicated in Hydrological Regions No. 10 (Sinaloa) and Partial No. 12 (Río Santiago).

| Hidrométrica:    | Parámetros de la fórmula de Chen |       |        |        | $T_r^{\dagger}$ | Números $N$ identificados |      |      |      |      |      | $cN^{\ddagger}$ | Valor medio | Valor mediano |
|------------------|----------------------------------|-------|--------|--------|-----------------|---------------------------|------|------|------|------|------|-----------------|-------------|---------------|
|                  | $R$                              | $F$   | $a$    | $b$    |                 | 2                         | 5    | 10   | 25   | 50   | 100  |                 |             |               |
| 1. Bamícori      | 0.470                            | 1.800 | 29.423 | 9.779  | 0.807           | 87.1                      | 82.4 | 80.5 | 78.6 | 78.7 | 79.5 | ↓ ≈             | 81.1        | 80.0          |
| 2. La Tina       | 0.403                            | 1.791 | 22.880 | 7.596  | 0.742           | 77.9                      | 71.7 | 67.0 | 63.3 | 61.7 | 61.4 | ↓               | —           | —             |
| 3. El Bledal     | 0.495                            | 1.732 | 31.801 | 10.455 | 0.828           | 78.9                      | 72.4 | 68.4 | 64.9 | 63.0 | 61.8 | ↓               | —           | —             |
| 4. Zopilote      | 0.466                            | 1.380 | 28.981 | 9.646  | 0.803           | 79.7                      | 85.6 | 87.5 | 89.5 | 88.7 | 88.0 | ↑ ≈             | 86.5        | 87.8          |
| 5. El Quelite    | 0.353                            | 1.788 | 18.372 | 5.862  | 0.689           | 79.7                      | 70.4 | 65.6 | 60.9 | 58.5 | 56.8 | ↓               | —           | —             |
| 6. Badiraguato   | 0.363                            | 2.045 | 19.223 | 6.205  | 0.699           | 91.0                      | 73.1 | 66.9 | 66.6 | 72.6 | 81.9 | ↓ ↑             | —           | —             |
| 7. Choix         | 0.544                            | 1.505 | 36.240 | 11.430 | 0.861           | 81.7                      | 82.4 | 83.2 | 85.8 | 88.9 | 91.5 | ↑ ≈             | 85.6        | 84.5          |
| 8. Guamuchil     | 0.559                            | 1.301 | 37.420 | 11.582 | 0.867           | 71.2                      | 75.6 | 78.4 | 81.9 | 85.3 | 88.2 | ↑               | —           | —             |
| 1. San Juanico   | 0.428                            | 1.500 | 25.210 | 8.420  | 0.766           | 77.3                      | 75.0 | 72.6 | 69.5 | 67.2 | 65.2 | ↓               | —           | —             |
| 2. Calerita      | 0.416                            | 1.513 | 24.126 | 8.043  | 0.755           | 74.3                      | 75.4 | 75.0 | 74.3 | 73.6 | 72.6 | ↓ ≈             | 74.2        | 74.3          |
| 3. Huascato      | 0.700                            | 1.178 | 48.720 | 12.413 | 0.900           | 78.8                      | 83.5 | 85.7 | 88.0 | 88.7 | 89.4 | ↑               | —           | —             |
| 4. Agostadero    | 0.483                            | 1.320 | 30.688 | 10.148 | 0.819           | 78.4                      | 79.6 | 79.6 | 78.9 | 78.3 | 77.8 | ↑ ↓             | 78.8        | 78.7          |
| 5. Valle de Gpe. | 0.574                            | 1.519 | 38.484 | 11.648 | 0.871           | 76.9                      | 75.9 | 74.4 | 72.4 | 71.5 | 70.4 | ↓ ≈             | 73.6        | 73.4          |
| 6. La Yerbabuena | 0.653                            | 1.395 | 44.443 | 11.971 | 0.889           | 73.0                      | 70.6 | 68.0 | 64.0 | 61.0 | 58.1 | ↓               | —           | —             |
| 7. Cuixtla       | 0.695                            | 1.203 | 48.248 | 12.361 | 0.899           | 73.8                      | 78.4 | 80.2 | 81.7 | 82.5 | 82.7 | ↑               | —           | —             |

$^{\dagger}$  Período de retorno en años;  $^{\ddagger}$  Comportamiento del número  $N$  conforme crece el  $T_r$ .

en Bamícori, Zopilote, Choix, Calerita, Agostadero y Valle de Guadalupe, con valores medios y medianos muy similares (Cuadro 5).

Los resultados numéricos del Cuadro 5 permiten acotar el número  $N$  en la Región Hidrológica No. 10 entre 80 y 86, con valores extremos de 56.8 y 91.5. En cambio, en la Región Hidrológica No. 12 Parcial (Río Santiago) el número  $N$  regional está entre 74 y 79, con magnitudes extremas de 58.1 y 89.4. Conviene destacar que los valores extremos ocurren en el mayor periodo de retorno analizado (100 años), lo cual es lógico al haber mayor variabilidad en las estimaciones involucradas.

Al tomar en cuenta la multitud de factores que pueden influir en la identificación o calibración del número  $N$ , los resultados globales y específicos del Cuadro 5, se consideran excelentes. Por ejemplo, hay factores asociados al propio método del HUT, como la estructura de su tormenta de diseño. Otro factor sumamente importante es la estimación del tiempo de concentración de la cuenca, que no sólo implica la aplicación de fórmulas empíricas, sino la determinación aproximada de sus propiedades físicas.

Otras estimaciones, como las relativas a las lluvias de diseño pueden incluir: 1) errores en el trazo de las curvas isoyetas; 2) ubicación no deseable de la estación pluviométrica; 3) diferente periodo de registro de la precipitación máxima diaria anual y de la información pluviográfica de las curvas isoyetas; 4) universalidad de la fórmula de Chen; 5) veracidad de la ecuación 10 para la corrección por tamaño de cuenca. Finalmente, en la obtención de las predicciones, tanto del gasto máximo como de la precipitación diaria, pueden ocurrir todo tipo de errores, desde los que originan los métodos utilizados hasta la selección de resultados.

## CONCLUSIONES

Los resultados globales de la calibración del número  $N$  indican que en la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa) este parámetro tiene un valor representativo que oscila entre 80 y 86. En cambio, en la Región Hidrológica No. 12 Parcial (Río Santiago), es ligeramente menor, con una magnitud representativa que varía entre 74 y 79.

El procedimiento de calibración descrito es aplicable en toda cuenca rural aforada que incluya estaciones pluviométricas dentro de ella, o como mínimo

factor que es extremadamente importante es la estimación del tiempo de concentración de la cuenca, que no sólo implica la aplicación de fórmulas empíricas, sino la determinación aproximada de sus propiedades físicas.

Otras estimaciones, como las relativas a las lluvias de diseño, pueden incluir: 1) errores en el trazo de isohyetas; 2) ubicación no deseable de la estación pluviométrica; 3) diferente periodo de registro de la precipitación máxima diaria anual y de la información pluviográfica de las isohyetas; 4) universalidad de la fórmula de Chen; 5) veracidad de la ecuación 10 para la corrección por tamaño de la cuenca. Finalmente, cuando se obtienen predicciones, tanto para el caudal máximo como para la precipitación diaria, todos los tipos de errores pueden ocurrir, desde los que se originan por los métodos utilizados, hasta la selección de resultados.

## CONCLUSIONES

Los resultados globales de calibrar el número  $N$  indican que en la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa), este parámetro tiene un valor representativo que varía entre 80 y 86. En cambio, en la Región Hidrológica No. 12 Parcial (Río Santiago), es ligeramente menor, con una magnitud representativa que varía entre 74 y 79.

El procedimiento de calibración descrito es aplicable en toda cuenca rural aforada que incluya estaciones pluviométricas dentro de ella, o como mínimo

factor que es extremadamente importante es la estimación del tiempo de concentración de la cuenca, que no sólo implica la aplicación de fórmulas empíricas, sino la determinación aproximada de sus propiedades físicas.

—End of the English version—



en su estación hidrométrica. Por ello, se recomienda utilizarlo en otro tipo de zonas geográficas del país para contar con los indicadores de orden de magnitud global del número  $N$ , encontrados en las dos regiones hidrológicas estudiadas.

Finalmente, durante la estimación de crecientes de diseño en cuencas rurales o urbanas sin aforos se considera sumamente útil la calibración expuesta, realizando ésta en las cuencas circunvecinas ubicadas dentro de la misma región hidrológicamente homogénea.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece al editor y a los dos árbitros anónimos, sus observaciones y recomendaciones, las cuales permitieron describir mejor las bases teóricas y el alcance de este trabajo.

### LITERATURA CITADA

- Bethlahmy, N. 1977. Flood analysis by SMEMAX transformation. *J. Hydraulics Div.* 103: 69-78.
- Bobée, B., and F. Ashkar. 1991. Log-Pearson type 3 distribution. *In: The Gamma Family and Derived Distributions Applied in Hydrology*. Water Resources Publications. Littleton, Colorado, USA. pp: 76-120.
- Campos A., D. F. 1982. Manual para la estimación de avenidas máximas en cuencas y presas pequeñas. Dirección General de Obras Hidráulicas y de Ingeniería Agrícola para el Desarrollo Rural de la SARH. México, D. F. 225 p.
- Campos A., D. F. 1991. Programa para el método del hidrograma unitario triangular de estimación de crecientes. *In: XVII Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería*, A. C. Monterrey, N. L. pp: 109-113.
- Campos A., D. F. 1994. Aplicación del método del índice de crecientes en la Región Hidrológica No. 10, Sinaloa. *Ing. Hidráulica Méx.* IX: 41-55.
- Campos A., D. F. 2006. Análisis probabilístico por medio de excedencias. *In: Análisis Probabilístico Univariado de Datos Hidrológicos*. Av. Hidráulica 13. AMH-IMTA. México, D. F. pp: 79-87.
- Campos A., D. F. 2008. Calibración del método Racional en ocho cuencas rurales menores de 1650 km<sup>2</sup> de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa), México. *Agrociencia* 42: 615-627.
- Cunnane, C. 1988. Methods and merits of regional flood frequency analysis. *J. Hydrol.* 100: 269-290.
- Chander, S., S. K. Spolia, and A. Kumar. 1978. Flood frequency analysis by power transformation. *J. Hydraulics Div.* 104: 1495-1504.
- Chen, C-I. 1983. Rainfall Intensity-Duration-Frequency formulas. *J. Hydraulics Eng.* 109: 1603-1621.
- Escalante S., C. 1998. Multivariate extreme value distributions with mixed Gumbel marginals. *J. Am. Water Resources Assoc.* 34: 321-333.
- Escalante S., C. 1999. Inferencia y pronóstico de eventos con base en la teoría de los subconjuntos borrosos. *Ing. Hidráulica Méx.* XIV: 5-17.
- Gutiérrez L., A., T. Lebel, y L. Descroix. 2004. Reflexiones sobre el concepto de cuencas hidrológicamente homogéneas. *In: XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Sao Paulo, Brasil. 10 p.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2000. ERIC II: Extractor Rápido de Información Climatológica 1920-1998. 1 CD. Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-IMTA. Jiutepec, Morelos.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2003. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). 8 CD. Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-IMTA. Jiutepec, Morelos.
- Laguna O., O. 2005. La modelación de la relación lluvia-escurrimiento. *In: Las ciencias del agua en Morelia, aplicaciones frente a los retos del siglo XXI*. IMTA-UMSNH. Jiutepec, Morelos. pp: 60-87.
- Miller, D. L., y R. A. Clark. 1966. Estudio de avenidas. *In: Diseño de Presas Pequeñas*. U. S. Department of the Interior. CECSA. México, D. F. pp: 53-95.
- Miller, D. L., R. A. Clark, and S. Schamach. 1977. Flood studies. *In: Design of Small Dams*. U. S. Bureau of Reclamation. Washington, D. C., USA. pp: 37-95.
- Mishra, S. K., P. Suresh Babu, and V. P. Singh. 2008. SCS-CN Method. *In: Singh, V. P. (ed). Hydrology and Hydraulics*. Water Resources Publications. Highlands Ranch, Colorado, USA. pp: 277-330.
- NERC (Natural Environment Research Council). 1975. The peaks over a threshold (POT) model. *In: Flood Studies Report, Vol. I*. London, England. pp: 185-213.
- Santillán H., O. D. 2000. Criterio de homogeneidad hidrológica con parámetros fisiográficos y climatológicos. *In: XVI Congreso Nac. Hidráulica*. Morelia, Michoacán. pp: 761-766.
- SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes). 1990. ISOYETAS de Intensidad-Duración-Frecuencia. República Mexicana. Subsecretaría de Infraestructura de la S.C.T. México, D. F. 495 p.
- SRH (Secretaría de Recursos Hidráulicos). 1975. Actualización al Boletín Hidrológico No. 36. Tomo VI, periodo 1970-73. Subsecretaría de Planeación de la S.R.H. México, D. F.
- Snider, D. 1972. Hydrographs. *In: National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology*. U. S. Soil Conservation Service. Washington, D. C., USA. pp: 16.1-16.26.
- Stedinger, J. R., R. M. Vogel, and E. Foufoula-Georgiou. 1993. Frequency analysis of extreme events. *In: Maidment, D. R. (ed). Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, Inc. New York, USA. pp: 18.1-18.66.
- USACE (U. S. Army Corps of Engineers). 1981. Rainfall-runoff simulation. *In: HEC-1 Flood Hydrograph Package*. Hydrologic Engineering Center. Davis, California, USA. pp: 8-42.