

## EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA ESTIMAR EL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN EN UNA ZONA DE LLANURA

Briceño N<sup>1</sup>., Scioli C<sup>2</sup>., Entraigas I<sup>3</sup>., Blanco M<sup>4</sup>.

**RESUMEN:** El tiempo de concentración ( $T_c$ ) es uno de los parámetros más sensibles que participa en el cálculo de la escorrentía máxima de una cuenca, debido a que un error en la determinación del mismo generará una sobre o subestimación en los caudales de diseño. En este trabajo se evalúa la consistencia de las ecuaciones utilizadas internacionalmente para estimar los  $T_c$  de las cuencas mediante el contraste de eventos observados. La necesidad de evaluar estas fórmulas radica en que las mismas son utilizadas fuera de sus límites de validez, tanto en términos de área como en características morfológicas de sus regiones. Mediante el análisis de hietogramas e hidrogramas observados de una cuenca de llanura se cuantificó el tiempo que transcurre desde el final de la precipitación efectiva hasta el final de la escorrentía directa. Esto permitió hacer una comparación entre los resultados obtenidos a partir de la aplicación del método gráfico y de las ecuaciones que conforman el cuerpo de los métodos empíricos. Los resultados indicarían que algunas de las ecuaciones analizadas no son válidas para sistemas de llanuras debido a su complejidad en la generación de escorrentía y en la dinámica hídrica. Además, se concluye que para la cuenca alta del arroyo del Azul la ecuación de Ventura es la más adecuada, obteniendo un error de 13 %.

**PALABRAS CLAVE:** Precipitación, escorrentía, cuenca

## EVALUATION OF METHODS TO ESTIMATE THE TIME OF CONCENTRATION IN A PLAIN AREA

**ABSTRACT:** The time of concentration ( $T_c$ ) is one of the most sensitive parameters for calculating the maximum runoff on a basin, because an error in its determination would generate an overestimation or underestimation in design flows. In this work, the consistency of the equations used internationally to estimate the  $T_c$  is evaluated through the contrast of

<sup>1</sup> Ingeniera hidrometeorologista, becaria doctoral CICPBA, Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff" (UNCPBA – CIC – CONICET). Rep. de Italia 780 (B7300) Azul, Buenos Aires, Argentina. Correo: nbriceno@ihlla.or.ar

<sup>2</sup> Doctor en Ingeniería, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (Universidad Nacional del Litoral).

<sup>3</sup> Doctora en Ciencias Naturales, Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff".

<sup>4</sup> Ingeniero hidrometeorologista, becaria doctoral CICPBA, Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff".

observed events. The need for an evaluation of these formulas is that they are used outside their validity limits, both in terms of area and morphological characteristics of their original regions proposed. Through the analysis of observed hydrographs and hietograms, the time that elapses from the end of effective precipitation to the end of direct runoff was quantified. This allowed to carry on a comparison between the equations and the observed data. The results would indicate that some of the analyzed equations are not valid for plains systems, probably due to their complexity in the generation of runoff and in the hydric dynamics. In addition, we concluded that for del Azul creek upper basin, the Ventura equation is the most appropriate, with an error of 13%.

**KEYWORDS:** Precipitation, runoff, basin

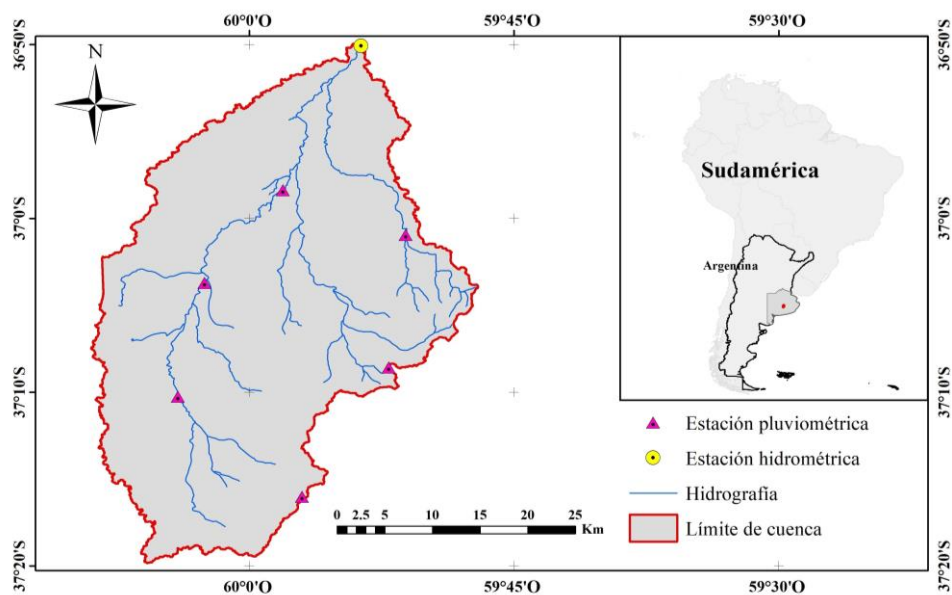
## INTRODUCCIÓN

La definición más común de tiempo de concentración ( $T_c$ ) es aquella que lo señala como el tiempo de viaje de una gota de lluvia que escurre superficialmente desde el lugar más lejano de la cuenca hasta el punto de salida, cuando ocurre una lluvia uniforme que cubre toda el área en cuestión. Determinar los parámetros de tiempo para cuencas hidrográficas, particularmente el  $T_c$ , representa un desafío en la hidrología moderna, ya que actualmente no existe una definición universalmente aceptada (GRIMALDI et al., 2012). En este sentido, existen tanto métodos físicos, como gráficos y hasta empíricos para su estimación (KAUFMANN et al., 2017).

El  $T_c$  es una variable relevante debido a que se utiliza en los modelos matemáticos como parámetro primario en la simulación de los diferentes procesos hidrológicos. Al mismo tiempo, también se destaca su importancia al momento de elaborar diseños hidráulicos, ya que las imprecisiones en su estimación generan errores significativos en el cálculo de los caudales máximos. En Argentina no existen pautas consensuadas desde los diferentes estamentos de decisión y gestión para la elaboración de los hidrogramas de diseño, lo que en general promueve la elección de aquellas ecuaciones que son utilizadas con mayor frecuencia, sin llevar a cabo un análisis meticuloso que se adecue a cada sistema. El objetivo de este trabajo es comparar los resultados del método gráfico con los obtenidos a partir de la aplicación de diferentes ecuaciones empíricas para la estimación del  $T_c$  en una cuenca de llanura, y determinar así la fórmula que mejor se ajusta a un sistema hidrológico de tales características.

## MATERIAL Y MÉTODOS

La zona de estudio seleccionada es la cuenca alta del arroyo del Azul, ubicada en el centro de la provincia de Buenos Aires, República Argentina (Figura 1). Este sector abarca una superficie de 1043,69 km<sup>2</sup>, con elevaciones que varían entre 143 y 297 msnm, y pendiente promedio de 2,62 %. Estas características promueven que, en general, la cuenca presente un comportamiento hidrológico en el que predominan los procesos típicos de los ambientes de llanura, esto es, que los movimientos verticales del agua (infiltración y evapotranspiración) prevalezcan sobre los horizontales (escurrimiento), estableciéndose, además, una estrecha interrelación entre las aguas superficiales y subterráneas. La cuenca bajo estudio está bien instrumentada, contando con 6 estaciones pluviométricas y una estación hidrométrica de registro continuo, cuyos datos de resolución horaria fueron utilizados en el presente estudio.

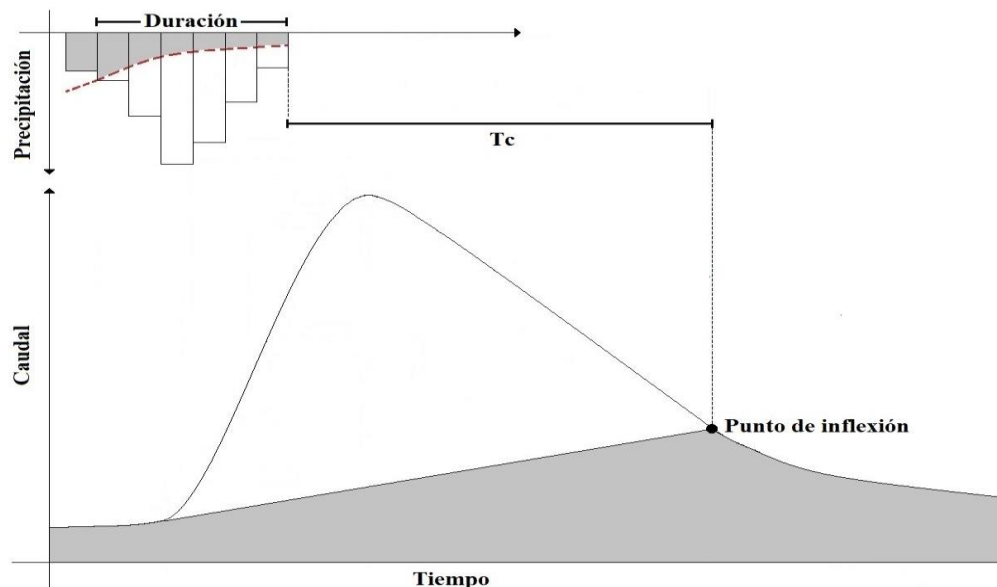


**Figura 1.** Ubicación relativa de la zona de estudio y las estaciones hidrometeorológicas consideradas.

La metodología utilizada consistió en la determinación del Tc mediante los métodos gráfico y empírico, seguida de una evaluación comparativa entre ambos a partir de la estimación de los errores generados en cada fórmula.

La estimación del Tc mediante el método gráfico tiene en cuenta la separación de hietogramas de lluvia en abstracción inicial, pérdidas y precipitación efectiva; y la separación de hidrogramas de escorrentía total en caudal directo y base (GERICKE & SMITHERS, 2014). De los varios métodos gráficos que existen para la estimación de los tiempos característicos teniendo en cuenta las observaciones de precipitación y escorrentía (MCCUEN, 2009), en este trabajo se utilizó aquel que considera al Tc como el comprendido

entre el final de la precipitación efectiva y el final de la escorrentía directa, siendo este último valor el punto de inflexión del hidrograma después del caudal pico (Figura 2). Teniendo en cuenta estas consideraciones, se seleccionaron aquellos eventos (21 en total) en los cuales la distribución espacial y temporal de la precipitación era uniforme y estaban asociados a hidrogramas con un solo pico.



**Figura 2.** Esquema ilustrativo de la definición de Tc utilizada en este trabajo.

Los métodos empíricos, por su parte, se utilizan para determinar el Tc en base a parámetros geomorfológicos, hidrológicos y meteorológicos propios del área bajo análisis. Se llevó a cabo una revisión de las fórmulas disponibles en la literatura (FANG et al., 2008; KAUFMANN et al., 2014; Ravazzani et al., 2019) y a partir de allí se seleccionaron 29 ecuaciones (Tabla 1), algunas de las cuales fueron modificadas en su formato original a fin de unificarlas en cuanto al sistema internacional de unidades. Los valores de los datos correspondientes a las características de la cuenca necesarios para la aplicación de este método fueron determinados mediante el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica. Finalmente, se llevó a cabo una comparación de los resultados obtenidos mediante la aplicación de ambos métodos a partir del cálculo de las diferencias relativas.

**Tabla 1.** Métodos empíricos seleccionados

Método	Ecuación	Método	Ecuación
Arizona DOT	$T_c = 0,16526 * A^{0,1} * L^{0,25} * L_c^{0,25} * S^{-0,2}$	Kirpich	$T_c = 0,0663 * L^{0,77} * S^{-0,385}$
Bransby-Williams	$T_c = 0,2426 * L * S^{-0,2} * A^{-0,1}$	McCuen et al.	$T_c = 2,2535 * i^{-0,7164} * L^{0,5552} * S^{-0,2070}$
California C.P.	$T_c = 0,95 * (L^3 * \Delta H^{-1})^{0,385}$	Onda cinemática	$T_c = 7,35 * L^{0,6} * n^{0,6} * i^{-0,4} * S^{-0,3}$
Carter	$T_c = 0,0977 * L^{0,6} * S^{-0,3}$	Papadakis-Kazan	$T_c = 2,1539 * n^{0,52} * L^{0,5} * i^{-0,38} * S^{-0,31}$
Cuerpo de Ing.	$T_c = 0,191 * L^{0,76} * S^{-0,19}$	Pasini	$T_c = 0,108 * (A * L)^{0,333} * S^{-0,5}$
DNOS	$T_c = 0,419 * k^{-1} * A^{0,3} * L^{0,2} * S^{-0,4}$	Picking	$T_c = 0,0883 * L^{0,667} * S^{-0,333}$
Dooge	$T_c = 0,365 * A^{0,41} * S^{-0,17}$	Pilgrim-McDermott	$T_c = 0,76 * A^{0,38}$
Epey	$T_c = 6,89 * L^{0,36} * S^{-0,18}$	SCS Lag	$T_c = 0,057 * [(1000/CN) - 9]^{0,7} * L^{0,8} * S_b^{-0,5}$
F.A.A.	$T_c = 0,3788 * (1,1 - C) * L^{0,5} * S^{-0,333}$	Simas-Hawkins	$T_c = 0,322 * (A/L)^{0,594} * S_b^{-0,15} * S_{scs}^{0,313}$
George Ribeiro	$T_c = 0,267 * L * (1,05 - 0,2 * p)^{-1} * S^{-0,04}$		$S_{scs} = (25400/CN) - 254$

Giandotti	$T_c = (4 * A^{0.5} + 1,5 * L) * (0,8 * H_m^{0.5})^{-1}$	Témez	$T_c = 0,3 * (L * S^{-0.25})^{0.76}$
Haktanir-Senzen	$T_c = 0,4475 * L^{0.841}$	Vente Chow	$T_c = 0,1602 * L^{0.64} * S^{-0.32}$
Izzard	$T_c = 85,5 * ((i/36286) + n) * (L/S)^{0.33} * i^{-0.67}$	Ventura	$T_c = 4 * A^{0.5} * L^{0.5} * \Delta H^{-0.5}$
Johnstone-Cross	$T_c = 0,0543 * L^{0.5} * S^{-0.5}$	Williams	$T_c = 0,272 * L * A^{0.4} * D^{-1} * S^{-0.2}$
Kerby-Hathaway	$T_c = 0,6061 * n^{0.47} * L^{0.47} * S^{-0.234}$	Yen-Chow's	$T_c = 1,2 * (n * L * S^{-0.5})^{0.6}$

**Nota:** T<sub>c</sub> (h): tiempo de concentración; A (km<sup>2</sup>): área de la cuenca; L (km): longitud del cauce principal o longitud hidráulica de la cuenca; L<sub>c</sub> (m): longitud medida desde el punto de concentración a lo largo de L hasta un punto en L que es perpendicular al centroide de la cuenca; S (m/m): pendiente promedio del cauce principal o pendiente promedio de la longitud hidráulica de la cuenca; S<sub>b</sub> (m/m): pendiente promedio de la cuenca; p (adm): relación entre el área cubierta por vegetación y el área de la cuenca; ΔH (m): diferencia de cota entre los extremos de la línea de agua principal; H<sub>m</sub> (m): altitud media de la cuenca (elevación media a partir de la salida); CN (adm): número de curva del método del SCS; S<sub>scs</sub> (mm): capacidad máxima de retención; C (adm): coeficiente de escorrentía; n (adm): coeficiente de rugosidad de Manning; k (adm): coeficiente del tipo de superficie; D (km): diámetro equivalente de la cuenca; i (mm/h): intensidad de la precipitación.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante la aplicación del método gráfico se obtuvieron tiempos que variaron entre 60 h (evento del 17 de agosto de 2012) y 128 h (evento del 03 de mayo del 2015), con un valor promedio de 85 h, desviación estándar de 17 h, y coeficiente de variación de 20 % (Tabla 2).

**Tabla 2.** T<sub>c</sub> obtenido a través del método gráfico

Evento	Fecha	(h)	Evento	Fecha	(h)	Evento	Fecha	(h)
1	15/10/06	97	8	25/08/12	67	15	07/07/14	87
2	09/03/07	99	9	05/09/12	89	16	23/08/14	61
3	15/09/07	74	10	07/10/12	82	17	06/09/14	63
4	04/10/07	93	11	18/10/12	88	18	03/05/15	128
5	18/05/12	65	12	21/12/12	94	19	30/10/15	86
6	08/08/12	73	13	25/05/14	107	20	20/05/17	99
7	17/08/12	60	14	13/06/14	80	21	28/06/17	91

Por otro lado, los T<sub>c</sub> obtenidos mediante la aplicación de diferentes ecuaciones empíricas (Tabla 3) presentaron una variación del 84 % entre ellos. El valor promedio estimado resultó de 35 h, encontrándose el 69 % de los eventos por debajo de la media, y solo el 31% por encima de dicho valor. La alta variabilidad de los resultados obtenidos reafirma la necesidad de llevar a cabo una evaluación específica utilizando datos propios del área en particular en la que se requiera conocer el T<sub>c</sub>. Considerando que las metodologías empíricas proporcionan como resultado el valor promedio de T<sub>c</sub> para la cuenca, se calcularon las diferencias relativas con respecto al promedio de todos los eventos medidos (Tabla 3). A partir del análisis de los resultados obtenidos se observa que la diferencia relativa entre ambos métodos varía entre 13 % y 95 %, destacándose la ecuación de Ventura como aquella más adecuada para la cuenca bajo estudio (error del 13 %). El hecho de que esta fórmula haya sido desarrollada para sistemas de similares características al analizado en el presente trabajo (cuencas rurales con pendientes no muy pronunciadas y clima templado) probablemente sea la principal explicación de este resultado.

**Tabla 3.** T<sub>c</sub> obtenidos mediante métodos empíricos y diferencias relativas.

Método	(h)	(%)	Método	(h)	(%)	Método	(h)	(%)
Arizona DOT	51	40,1	Giandotti	35	58,4	Picking	13	84,8
Bransby-Williams	28	66,6	Haktanir-Senzen	14	83,1	Pilgrim-McDermott	11	87,4

California C.P.	23	72,8	Izzard	70	17,3	SCS Lag	51	39,8
Carter	9	89,8	Johnstone-Cross	12	85,6	Simas-Hawkins	12	85,9
Corps Engineers	16	81,5	Kerby-Hathaway	5	94,5	Témez	25	71,0
DNOS	34	59,8	Kirpich	23	72,9	Ven te Chow	19	77,4
Dooge	20	76,7	McCuen et al.	50	41,6	Ventura	96	13,0
Epsey	102	19,8	Onda cinemática	73	13,8	Williams	13	84,5
F.A.A.	27	68,4	Papadakis-Kazan	19	77,3	Yen-Chow's	17	80,5
George Ribeiro	31	62,9	Passini	113	33,1			

## CONCLUSIONES

Mediante el análisis de 29 ecuaciones empíricas disponibles en diferentes artículos para determinar el Tc en una cuenca de llanura se observó que a partir de estas fórmulas se obtienen resultados diferentes entre sí, que en algunos casos pueden presentar errores de hasta 95 % en el cálculo de este parámetro. Por otra parte, se comprobó que el método gráfico utilizado es confiable para estimar el Tc y permite analizar individualmente la respuesta de la cuenca a distintas intensidades y duraciones de precipitación. Se destaca que la ecuación de Ventura es la que presenta mejor rendimiento para la cuenca alta del arroyo del Azul, aunque debido a que la misma es un sistema que presenta un comportamiento de llanura en la que la generación de escorrentía está fuertemente relacionada con las variaciones de los niveles freáticos (SCIOLI, 2016), se proyecta evaluar la relación de Tc con otras variables, tales como el grado de saturación del perfil del suelo o el coeficiente de escorrentía, en futuras líneas de investigación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fang, X.; Thompson, D. B.; Cleveland, T. G.; Pradhan, P.; Malla, R.; Time of concentration estimated using watershed parameters determined by automated and manual methods. **J. Irrig. Drain. Eng.**, v. 134, p. 202–211, 2008.
- Gericke, O. J.; Smithers, J. C. Review of methods used to estimate catchment response time for the purpose of peak discharge estimation. **Hydrol. Sci. J.**, v. 59, p. 1935–1971, 2014.
- Grimaldi, S.; Petroselli, A.; Tauro, F.; Porfiri, M. Time of concentration: a paradox in modern hydrology. **Hydrol. Sci. J.**, v. 57, p. 217–228, 2012.
- Almeida, I. A. de; Almeida, A. K.; Ayach, J. A. A.; Steffen, J. L.; Alves Sobrinho, T. Estimation on time of concentration of overland flow in watersheds: a review. **Geociências**, v. 33, p. 661–671, 2014.

Almeida, I. A. K. de; Almeida, A. K.; Gabas, S. G.;, Alves Sobrinho, T. Performance of methods for estimating the time of concentration in a watershed of a tropical region. **Hydrol. Sci. J.**, v. 62, p. 2406–2414, 2017.

McCuen, R. H. Uncertainty analyses of watershed time parameters. **J. Hydrol. Eng.**, v. 14, p. 490–498, 2009.

Ravazzani, G.; Boscarello, L.; Cislighi, A.; Mancini, M. Review of Time-of-Concentration Equations and a New Proposal in Italy. **J. Hydrol. Eng.**, v. 24, p. 1–11, 2019.

Scioli, C., **Un nuevo índice de similitud hidrológica para la simulación precipitación-escorrentía en sistemas de llanura**. Tesis Doctoral. Doctorado en Ingeniería; mención Recursos Hídricos, FICH-UNL, 145, 2016.