

Incidencia de la intensidad de lluvia en el tiempo de concentración de microcuencas del Uruguay

Bentancor Lisette¹, Silveira Luis², García Petillo Mario^{1†}

¹Unidad de Hidrología, Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Avenida Garzón 780, 12900 Montevideo, Uruguay. Correo electrónico: lbentancor@fagro.edu.uy

²Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Julio Herrera y Reissig 565, 11300 Montevideo, Uruguay

Recibido: 16/10/13 Aceptado: 19/8/14

Resumen

Los métodos de diseño hidrológico buscan representar la respuesta de una cuenca frente a una tormenta, determinando el hidrograma de crecida. El *tiempo de concentración* (t_c) es un parámetro que refleja la distribución temporal del hidrograma de caudal y valores característicos como el máximo caudal, requerido para el diseño de obras hidráulicas como tajamares. La precisión del diseño es sensible a la exactitud con que se determina este parámetro. Sin embargo, las ecuaciones que se utilizan en el Uruguay para estimar el t_c , no han sido contrastadas con observaciones en cuencas nacionales. Con el objetivo de evaluar el ajuste de diferentes ecuaciones empíricas, se compararon los t_c estimados empíricamente y los observados a partir del análisis de hidrogramas e hietogramas medidos, y se analizó su relación con la intensidad de la lluvia y su recurrencia. Se compararon tres ecuaciones en 68 eventos, en cuatro microcuencas de usos contrastantes, con superficies entre 69 y 212 ha. Los t_c observados variaron con: i) la intensidad de la lluvia para períodos de retorno menores a cinco años, a diferencia de las ecuaciones utilizadas habitualmente, que establecen un valor constante, y ii) la cobertura para intensidades de lluvia inferiores a 60 mm h^{-1} , límite a partir del cual no se observaron diferencias entre coberturas. Se proponen ecuaciones para el cálculo de t_c , ajustadas con base en los t_c observados en cuencas nacionales, notándose que los períodos de retorno asociados a los eventos disponibles no son lo suficientemente altos para el diseño de obras.

Palabras clave: obras de almacenamiento de agua, caudal de diseño, flujo concentrado

Summary

Incidence of Rainfall Intensity in the Time of Concentration of Small Watersheds in Uruguay

The existing methods of hydrological design intend to represent the response of a basin to a storm by determining the flood hydrograph. Time of concentration (t_c) is a parameter that reflects the timing of the discharge hydrograph and characteristic values such as the maximum flow required for the design of hydraulic works, e.g, small dams and reservoirs. Design accuracy is sensitive to the precision with which the time of concentration is determined. However, the equations used in Uruguay to estimate the t_c have not been tested against observations in domestic basins. In order to evaluate the fit of different empirical equations, the observed t_c , computed from the analysis of measured hydrographs and hietographs were compared, and their relationship with rainfall intensity and recurrence was analyzed. Three equations were compared in 68 events in four small watersheds of contrasting uses, with areas between 69 and 212 ha. The observed t_c values varied with: i) the rainfall intensity for return periods shorter than five years, unlike commonly used equations which state a constant value, and ii) coverage for rainfall intensities below 60 mm h^{-1} , limit from which no differences were observed between coverages. Equations to compute the time of concentration are proposed based on the t_c values that were observed in domestic watersheds, noticing that the associated return periods are not high enough to hydraulic works design.

Key words: water storage structures, design flow, concentrated flow

Introducción

En el diseño de las obras de evacuación de agua como: alcantarillas, desagües empastados, cunetas, terrazas, aliviaderos de tajamares y presas de tierra, se debe determinar el caudal máximo instantáneo o punta de la crecida en cuencas no aforadas, para el período de retorno seleccionado en función de la vida útil de la obra y el riesgo asumido. Estimaciones precisas de esta descarga pico son importantes para evitar posibles daños en las estructuras (por ejemplo: daños en las obras de cierre en tajamares o presas de tierra) y asegurar un diseño económico (Hochkiss y Mc Callum, 1995).

A nivel nacional los métodos más usados para estimar el caudal máximo son el Método Racional (Kuichling, 1889), notando que no se recomienda su uso en cuencas con superficies que excedan 400 ha (Genta *et al.*, 1995), y el Método del Hidrograma Unitario Triangular propuesto por el US Natural Resources Conservation Service (en adelante NRCS, 2007). Para la aplicación de ambos métodos es necesario estimar el tiempo de concentración de la cuenca. Conviene, no obstante, destacar que Bondelid *et al.* (1982) observaron que más del 75 % de los errores en la determinación del caudal de descarga se deben a errores en la determinación del tiempo de concentración.

En hidrología el *tiempo de concentración* (t_c) representa el tiempo de viaje de una gota de lluvia que cae en el punto hidráulicamente más alejado de la cuenca y escurre superficialmente hasta su salida, es decir, el tiempo a partir del cual toda la cuenca contribuye al caudal en el punto de salida de la cuenca. Por lo tanto, suponiendo una lluvia de intensidad constante, el t_c es el tiempo de equilibrio o duración necesaria, para que se alcance el caudal máximo. Si se analizan hidrogramas e hietogramas el t_c se define –alternativamente– como el tiempo desde el baricentro y también desde el final de la lluvia neta hasta el final de la escorrentía directa, la diferencia entre ambas es mínima para tormentas de corta duración (Hotchkiss y Mc Callum, 1995). Abustan *et al.* (2008) obtienen resultados satisfactorios, determinando el t_c desde el baricentro de la lluvia neta al punto de inflexión del hidrograma de escurrimiento, trabajando en cuencas urbanas donde el punto de inflexión se acerca al escurrimiento pico compensando la diferencia entre el centro de masa y el final de la lluvia efectiva (Figura 1).

En la Figura 1 se observa un hietograma de lluvia neta o efectiva y su correspondiente hidrograma de escurrimiento, en el que se diferencia el escurrimiento directo del subterráneo y escurrimiento subsuperficial o hipodérmico, y se destaca el punto de inflexión, aquel donde finaliza el escurrimiento directo y comienza la descarga del flujo subsuperfi-

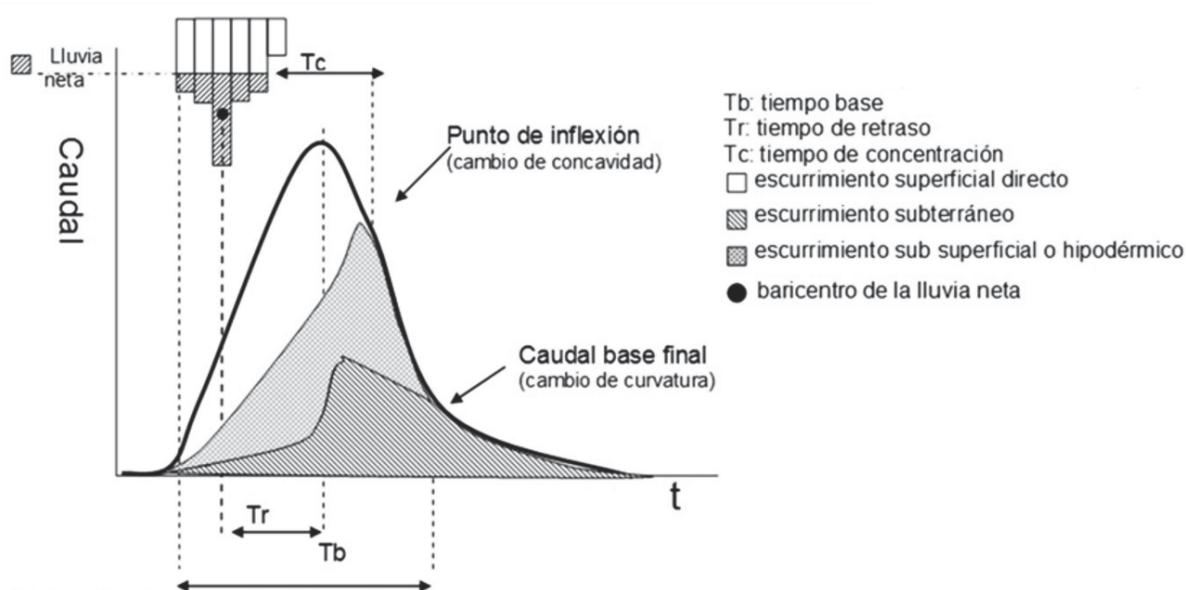


Figura 1. Hietograma y su correspondiente hidrograma en el punto de cierre de una cuenca. Adaptado de Custodio y Llamas (1983).

cial y flujo base. El punto de inflexión se ubica más o menos alejado del pico, dependiendo del tipo de suelo, la profundidad del mismo, la presencia de horizonte B textural entre otros.

Ferrer (1993) señala que el tiempo más utilizado en hidrología es el tc y lo define como el tiempo desde el final de la lluvia neta al punto de inflexión, puesto que a partir de ese punto tiene lugar el vaciado del volumen almacenado en el suelo-subsuelo de la cuenca, que no se corresponde con el tiempo de viaje definido anteriormente.

Reconociendo la importancia de los tiempos característicos en el diseño hidrológico, Mc Cuen *et al.* (1984) sostienen que se han desarrollado numerosos métodos para estimar los tiempos característicos como el tc, tiempo pico (Tp) y tiempo base (Tb). Estos autores resaltan que los métodos empíricos se han basado en datos limitados, razón por la que deben utilizarse con precaución en cuencas con características diferentes a las calibradas.

Existen básicamente dos interpretaciones del tc: una refiere al tiempo de equilibrio definido anteriormente y la segunda refiere al tiempo de viaje que es el más comúnmente empleado, puesto que son pocas las tormentas que tienen intensidad constante y uniforme como para que se aplique la primera. Por lo tanto existen diferentes maneras de estimar este parámetro, por medio de la relación de hidrogramas e hietogramas de lluvia neta: i) utilizando el tiempo de equilibrio (Hotchkiss y Mc Callum, 1995; Bell y Om Kar, 1969); ii) mediante el concepto hidráulico de tiempo de viaje (Chow *et al.*, 1994; Llamas, 1993). Los métodos de estimación basados en este último concepto usan características físicas como longitud de recorrido del agua y pendiente (Sheridan, 1994), y en muy pocos casos consideran la intensidad de la lluvia.

Mc Cuen *et al.* (1984) sostienen que ni en el concepto hidráulico de tiempo de recorrido ni en el de relaciones entre hietogramas de lluvia neta e hidrogramas se obtiene un dato verdadero, y en el segundo caso se agrega la dificultad de separar flujo base de escurrimiento directo o pérdidas de lluvia. En base a estas consideraciones, no existe un método único y exacto para estimar el tc, y su elección debe realizarse con precaución y atendiendo a la similitud con las cuencas en que fueron desarrollados.

Abustan *et al.* (2008) sostienen que la determinación del punto de inflexión es arbitraria pero aceptable. Hotchkiss y Mc Callum (1995) reconocen que existe un margen de error en la medición del tc a partir de datos de campo, puesto que en los hidrogramas observados existe una incertidumbre en la determinación del punto de inflexión.

Características que afectan el tc

Sheridan (1994) trabajó en nueve cuencas con pendientes inferiores a 1 % y longitudes de cauce entre 2,5 y 40 km, relacionó las características físicas (longitud, pendiente, forma y tamaño) de las cuencas con los tiempos del hidrograma y encontró que la longitud del cauce principal es el parámetro que mejor explica la variación observada del tc. Dooge (1973) sostiene que la pendiente es la segunda característica física de las cuencas más utilizada en las ecuaciones.

Hotchkiss y Mc Callum (1995) agregan que Ramser en 1927, en el desarrollo de la fórmula, que luego modificó Kirpich (1940), encontró que el tc varía con la intensidad de lluvia y el contenido de humedad del suelo, pero como los registros de datos con los que trabajó carecían de precisión, consideró el tc constante para todas las lluvias de las cuencas. Sin embargo, Wong (2005) encontró que las ecuaciones que no consideran la intensidad de la lluvia solamente son válidas para un rango limitado de intensidades de lluvia.

La cobertura del suelo afecta el tc, es así que Eisenbies *et al.* (2007) sostienen que los montes influyen en el almacenamiento y movimiento del agua en cuencas hidrográficas y que la cosecha o la reconversión en otros usos del suelo afecta la relación precipitación/escorrentía. Manifiestan además que los suelos forestales en general se caracterizan por tener tasas de infiltración altas.

Para obtener los hidrogramas e hietogramas de lluvia neta, es necesario contar con series de datos de intensidad de precipitación y caudal, con resoluciones altas (10 minutos o menor) y una longitud tal que permita identificar eventos con frecuencias de 25 o más años, requeridas para el diseño de las obras hidráulicas (Chow *et al.*, 1994). Eisenbies *et al.* (2007) sostienen que la poca frecuencia de eventos extremos y las dificultades para instrumentar cuencas han limitado la información científica confiable acerca de estos fenómenos, por lo que se usan modelos hidrológicos, pero los resultados no siempre han sido satisfactorios.

Métodos empíricos de estimación del tc

Se han desarrollado numerosos métodos empíricos para estimar el tc, para diferentes usos de suelos y geometrías de cuenca, descritos en la bibliografía internacional (Kang *et al.*, 2008; Chow *et al.*, 1994; Mc Cuen *et al.*, 1984). Los métodos para estimar el tc utilizados como referencia en este trabajo fueron: Kirpich (1940), Izzard (1946) y Onda Cinemática (Morgali y Linsley, 1965).

La ecuación de Kirpich (1940) se seleccionó por ser una de las más utilizadas a nivel nacional, y por ser la más citada en la bibliografía revisada (Tucci, 2000; Castiglioni *et al.*, 1999; Hotchkiss y Mc Callum, 1995; Sheridan, 1994 y Mc Cuen *et al.*, 1984). Las características de las cuencas estudiadas en este trabajo son similares a las de las cuencas en donde fue desarrollada la ecuación: cuencas naturales o de cultivos con pendiente entre 3 y 10 % y flujo encauzado (Tucci, 2000; Chow *et al.*, 1994). Tucci (2000) sostiene que cuando la longitud del cauce es mayor a 10 km la formula subestima el tc.

El método de Izzard, que fue desarrollado experimentalmente en laboratorio para flujos en caminos y áreas empastadas (Chow *et al.*, 1994), se consideró por incorporar la intensidad de lluvia y rugosidad (coeficiente de retardo), además de pendiente y longitud de flujo, ya consideradas por la ecuación de Kirpich. Si bien el método plantea una restricción, producto de la intensidad por la longitud de flujo menor a 3870 m h^{-2} , se optó por compararlo con los datos experimentales, para probar la hipótesis planteada.

La ecuación desarrollada por Morgali y Linsley (1965) es para flujo superficial a partir del análisis de Onda Cinemática. En la ecuación se considera el coeficiente de rugosidad como único, pero este parámetro es muy variable dependiendo de un número de factores que están interrelacionados entre sí, como rugosidad superficial, vegetación, irregularidad de la vía de escurrimiento, tamaño y forma de esta vía, nivel y caudal, entre otros (Chow, 1998). Este método se seleccionó para esta investigación, por que al igual que la ecuación de Izzard considera la intensidad de lluvia y la rugosidad del terreno.

Dos de los métodos seleccionados, Morgan y Linsley e Izzard, comparten el mismo formato general (Eq 7 y 8) compuesto por cuatro variables: longitud de flujo (L), coeficiente de rugosidad (n de Manning), pendiente (S), e intensidad de lluvia (i). La fórmula general (Li y Chibber, 2008), se expresa como:

$$tc = kL^a r^b S^c i^z \quad [1]$$

siendo:

tc: tiempo de concentración

k: constante

a, *b*, *y*, *z*: exponentes

Las variables intensidad y pendiente son inversamente proporcionales al tc, por lo que normalmente sus exponentes son negativos.

La hipótesis de este trabajo es que el tc no tiene un valor constante para cada microcuenca, sino que es variable en función de la intensidad de lluvia. Este trabajo tiene por objetivos: i) evaluar la incidencia de la intensidad de lluvia en el tiempo de concentración; ii) evaluar el grado de ajuste de diferentes ecuaciones empíricas a través de su confrontación con los tc «observados», resultantes del análisis de hidrogramas e hietogramas; y iii) ajustar la ecuación más apropiada a las condiciones locales.

Materiales y métodos

Se cuenta con datos discontinuos de precipitación y caudal entre junio 2001 y diciembre 2009, en dos pares de microcuencas, dos de uso forestal, y sus respectivos testigos cuencas de pasturas, ubicadas en los departamentos de Paysandú y Tacuarembó, Uruguay.

Las microcuencas ubicadas en el departamento de Paysandú se encuentran a 15 km de la localidad de Piedras Coloradas. La microcuenca forestal está situada en las coordenadas $32^{\circ} 14' 53'' \text{ S } 57^{\circ} 38' 48'' \text{ O}$, y la microcuenca cubierta por pasturas está situada en las coordenadas $32^{\circ} 16' 41'' \text{ S } 57^{\circ} 36' 15'' \text{ O}$.

Las microcuencas que se ubican en el departamento de Tacuarembó, se encuentran a 40 km al norte de la capital departamental. La microcuenca forestal está situada en las coordenadas $31^{\circ} 37' 58'' \text{ S}$, $55^{\circ} 41' 02'' \text{ O}$ y la microcuenca de pastura está situada en las coordenadas $31^{\circ} 38' 24'' \text{ S}$, $55^{\circ} 41' 6.3'' \text{ O}$.

En el Cuadro 1 se presentan los principales parámetros físicos de las microcuencas. El escurrimiento superficial en las cuatro microcuencas se tomó como concentrado, puesto que la zona de influencia del escurrimiento laminar (zona alta de la cuenca, donde no está trazado un curso en las cartas topográficas SGM, escala 1:50.000) varía entre 5 y 7 % del área total, considerándose despreciable su efecto.

Las características geomorfológicas y de distribución de los suelos son muy semejantes en ambas microcuencas de Paysandú así como en ambas microcuencas de Tacuarembó, lo que aporta solidez a que la variación del tc no se debe a esos factores. De acuerdo al mapa de suelos elaborado por Molfino (2000), la caracterización física y química de los suelos por García *et al.* (2004) y la descripción de suelos de Silveira *et al.* (2011), se elaboró el Cuadro 2, diferenciado los suelos de las cabeceras y de los valles asociados a los cursos de agua.

Cuadro 1. Parámetros de las microcuencas ubicadas en Paysandú y Tacuarembó .

	Microcuenca Paysandú Forestal	Microcuenca Paysandú Pasturas	Microcuenca Tacuarembó Forestal	Microcuenca Tacuarembó Pasturas
Área (km ²)	2,12	1,2	1,08	0,69
Longitud del cauce (km)	1,78	2,17	1,9	1,5
Pendiente del cauce %	0,90	1,60	2,30	4,90
Pendiente media de la cuenca %	4,70	5,90	3,90	6,70
Tiempo de concentración (min)(*)	39	36,5	28	17,7

(*) Estimado por el método de Kirpich (1940).

Cuadro 2. Tipos de suelos de las microcuencas ubicadas en Paysandú y Tacuarembó, porcentaje de área y pendientes.

		Suelos	% de área	Pendiente %
Cabecera	Microcuenca Paysandú	Brunosoles subéutricos Típicos/Lúvicos	40-50	3-6
	Microcuenca Tacuarembó	Luvisoles Típicos, Acrisoles y Litosoles	62-78	10-20
Valle	Microcuenca Paysandú	Argisoles Dúricos Melánicos abruptos y Litosoles	50-60	0,5-1,5
	Microcuenca Tacuarembó	Planosoles Gleysoles e Inceptisoles y Luvisoles Albicos	22-38	2-5

Datos tomados de Molfino (2000), García Préchac *et al.* (2004) y Silveira *et al.* (2011).

La cobertura de las microcuencas sitas en Paysandú consiste en pasturas (microcuenca de pastura) y plantación de *Eucalyptus globulus* ssp. *Maidennii* (microcuenca forestal), plantada en el año 1998, con una densidad de 895 árboles ha⁻¹.

El caudal se mide en vertederos de cresta delgada triangulares de 90°, provistos con limnigramas digitales, y la precipitación y su intensidad con pluviómetros digitales. También se cuenta con una estación meteorológica, que registra velocidad y dirección de viento, datos estos que se utilizan para corregir la precipitación (Musy y Laglaine, 1992). La serie disponible para este trabajo comprende datos continuos de precipitación y caudal del período junio 2006 a diciembre 2009.

La cobertura de las microcuencas sitas en Tacuarembó consisten vegetación original de campo natural (microcuenca de pastura), en tanto la microcuenca forestal se mantuvo con campo natural hasta julio de 2003 (período de calibración), en que fue plantada con *Pinus taeda*, con una densidad de 1000 árboles ha⁻¹.

El caudal se midió en una estructura de aforos tipo flume (Chescheir *et al.*, 2003), provistos con limnógrafo digital (Chescheir *et al.*, 2004) y la precipitación en una estación meteorológica provista con registradores automáticos de lluvia, ubicada en el límite entre ambas microcuencas.

Los datos de estas microcuencas fueron suministrados por la Universidad de Carolina del Norte (datos no publicados) constando de 11 meses lluviosos identificados por dicha institución:

- año 2001, febrero, marzo, abril y junio
- año 2002, octubre
- año 2003, enero y marzo
- año 2005, abril, mayo y junio
- año 2007, abril

Metodología de cálculo del tc

El tc se determinó aplicando la metodología descrita por Hotchkiss y Mc Callum (1995), como el lapso de tiempo entre el final de la lluvia efectiva y el punto de inflexión de la curva de descenso del hidrograma. El hidrograma de escurrimiento directo se obtuvo, deduciendo del caudal medido, el flujo base, determinado según la metodología de línea recta descrita por Chow *et al.* (1994), apta para corrientes efímeras, como es el caso de las cuencas estudiadas.

A partir de los datos de intensidad de precipitación correspondientes a cada tormenta se dedujeron las abstracciones (NRCS, 2007) y se obtuvieron los hietogramas de excesos de precipitación. Seguidamente, a partir del hidrograma del escurrimiento directo y el hietograma de exceso

de precipitación, se determinó gráficamente el t_c . Además, se calcularon parámetros característicos como intensidad máxima de lluvia (la máxima promedio correspondiente a un período de tiempo igual al t_c hallado), volumen de precipitación y caudal máximo.

También se determinó el periodo de retorno de cada tormenta, aplicando la metodología descrita por Silveira *et al.* (2000). Conocida la duración de cada evento, la precipitación acumulada en el mismo y la isoyeta de tres horas de duración y 10 años de periodo de retorno (Genta *et al.*, 1998), se calculó el coeficiente de corrección según la duración de la tormenta (ecuaciones [3] y [4]) y el coeficiente de corrección para el periodo de retorno (ecuación [5]), con lo que el periodo de retorno resulta la única incógnita en la ecuación [2].

$$CT(Tr) = 0,578 - 0,4312 \log \left[\ln \left[\frac{Tr}{Tr - 1} \right] \right] \quad [2]$$

Para $d < 3$ horas $CD = \frac{0,6208 \cdot d}{(d + 0,0137)^{0,5639}} \quad [3]$

Para $d > 3$ horas $CD = \frac{1,0287 \cdot d}{(d + 1,0293)^{0,8083}} \quad [4]$

$$P_{(d,Tr,p)} = P_{(3,10,p)} \cdot CT(Tr) \cdot CD(d) \quad [5]$$

CT: coeficiente de corrección según el periodo de retorno

Tr: periodo de retorno (años)

d: duración de la tormenta (horas)

CD: coeficiente de corrección según duración d de la tormenta

P(d,Tr,p): precipitación (mm), de duración d y periodo de retorno Tr, en el punto p (cierre de la cuenca).

P(3,10,p): precipitación de 3 horas de duración y 10 años de periodo de retorno en el punto p, resultante del mapa de isoyetas de lluvias extremas en el Uruguay (Genta *et al.*, 1998).

Procesamiento de datos

Los t_c observados resultaron de analizar los hidrogramas y hietogramas de los eventos que superaron los 25 mm de precipitación, con una resolución de cinco minutos, caracterizados por presentar un solo pico de caudal (Castiglioni *et al.*, 2006). Para ilustrar la metodología, en la Figura 2 se muestran un hidrograma e hietograma correspondiente a una de las tormentas identificadas, en que se determinó un t_c de 15 minutos.

Por otra parte, se estimaron los t_c utilizando las ecuaciones de Kirpich (1940) (Ec 6), Izzard (1946) (Ec 7) y Onda Cinemática (Morgali y Linsley, 1965) (Ec 8).

$$t_c = 0,3989L^{0,77} S^{-0,385} \quad [6]$$

t_c : tiempo de concentración (horas)
L: longitud hidráulica de la cuenca (km)
S: pendiente del cauce (%)

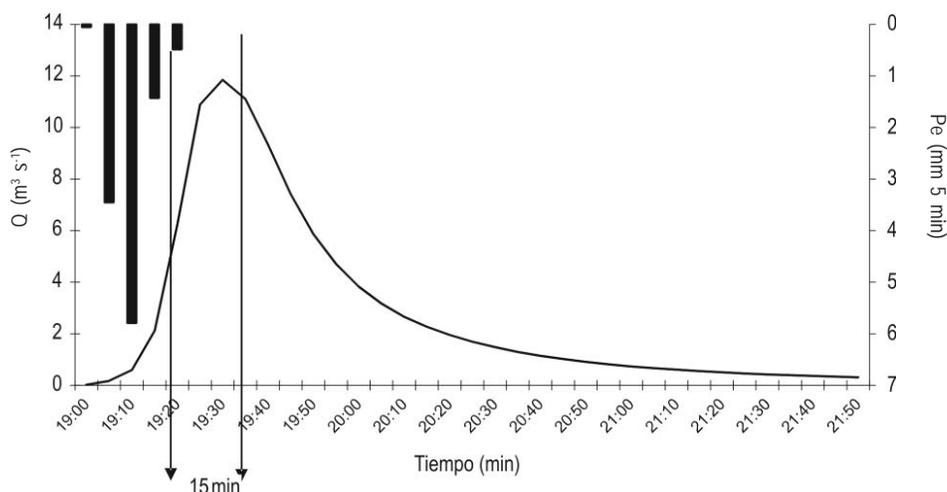


Figura 2. Hidrograma e hietograma de una tormenta.

$$tc = 526,74 \left(\frac{(0,0000276i + c)L^{1/3}}{S^{1/3}i^{2/3}} \right) \quad [7]$$

tc: tiempo de concentración (min)
i: intensidad de lluvia (mm h⁻¹)
c: coeficiente de retardo (0,06 para pasturas y 0,09 para plantación forestal)

L: longitud hidráulica de la cuenca (m)

S: pendiente del cauce (m m⁻¹)

$$tc = \frac{441L^{0,6}n^{0,6}}{(i^{0,4}S^{0,3})} \quad [8]$$

tc: tiempo de concentración (min)

L: longitud de flujo superficial (km)

n: coeficiente de rugosidad de Manning (m^{-1/3}s⁻¹)

i: intensidad de lluvia (mm h⁻¹)

S: pendiente promedio del terreno (m m⁻¹)

En este trabajo se consideró un coeficiente n de 0,03 para pasturas y 0,075 para plantación forestal (Chow, 1998). Además, se tomó la fórmula general [1] e Izzard [7], modificando esta última para asimilarla a la fórmula general, y se ajustó por regresión no lineal la constante y los exponentes de cada uno de los parámetros, así como los respectivos coeficientes de rugosidad, que difieren de acuerdo a la cobertura. Finalmente, se realizó un análisis de regresión mediante el programa XLSTAT de los tiempos de concentración calculados con respecto a los tc observados.

Resultados y discusión

Se identificaron 68 eventos que cumplen con las restricciones metodológicas. De ellos, 35 corresponden a microcuencas forestales (17 registrados en Paysandú y 18 en Tacuarembó) y 33 a microcuencas cubiertas por pasturas (16 en Paysandú y 17 en Tacuarembó).

Los tc observados para las microcuencas ubicadas en Paysandú variaron entre 10 y 150 minutos, mientras que para las microcuencas en Tacuarembó variaron entre 5 y 30 minutos. Estas variaciones se pueden deber a las heterogeneidades en la muestra de datos. En efecto, como ya se señalara, en las microcuencas en Paysandú se dispuso de una serie continua entre 2006 a 2009, mientras que en Tacuarembó se contó con una serie discontinua consistente en 11 meses lluviosos entre 2001 a 2007.

Los periodos de retorno de las tormentas disponibles variaron entre 1 y 25 años. No obstante, en Tacuarembó el 60 % de los eventos tiene recurrencias entre 2 y 4 años y en Paysandú el 37 %, lo que es coherente con el sesgo de los datos disponibles para este trabajo.

Intensidad de lluvia

En las Figuras 3 y 4 se relacionaron gráficamente las intensidades de lluvia máxima, correspondientes a una duración igual al tc observado en cada tormenta, y estos últimos, observándose que tc disminuye, para todas las cuencas, a medida que aumenta la intensidad de lluvia y por consiguiente su recurrencia. Es decir, tc está inversamente relacionado con la intensidad de la lluvia.

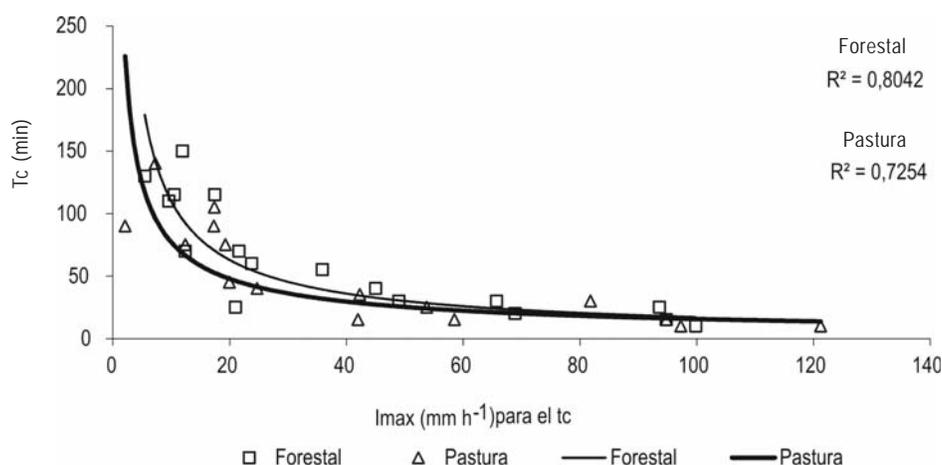


Figura 3. Relación entre intensidades máximas para una duración igual al tc de cada tormenta y los tc de las microcuencas de Paysandú Forestal y Pasturas.

*R² significativo al 1 % con 16 grados de libertad del error, para la microcuenca forestal y 15 para la pastura.

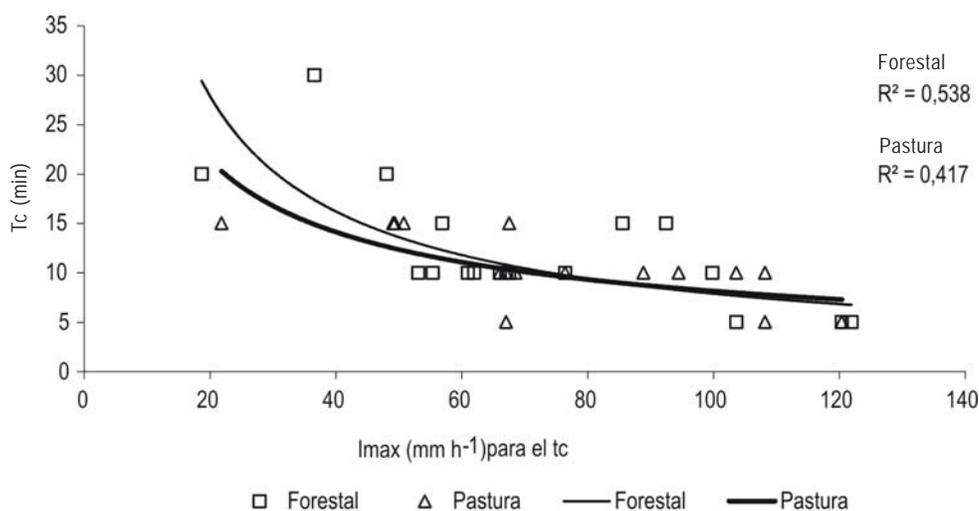


Figura 4. Relación entre intensidades máximas para una duración igual al t_c de cada tormenta y los t_c de las microcuencas de Tacuarembó Pastura, Forestal.

R^2 significativo al 1 % con 16 grados de libertad del error.

Asimismo, los t_c para cubierta forestal son mayores que para pasturas en las dos localidades. La modificación de la rugosidad superficial resultante de sustituir pasturas por plantaciones forestales, conduce a que disminuya la velocidad de escurrimiento y, por lo tanto, a que aumente el tiempo de concentración. No obstante, para intensidades de lluvia superiores a 60 mm h^{-1} , no hay diferencias entre coberturas. Se observa además que los tiempos de concentración parecen tender hacia una asíntota para tormentas con los mayores períodos de retorno, no diferenciándose las coberturas.

La diferencia de tiempos de concentración encontrada entre coberturas para eventos de menor recurrencia se encuentra en concordancia con lo planteado por Eisenbies *et al.* (2007), y la tendencia a un valor constante, para eventos con los mayores períodos de retorno, concuerda con Grimaldi *et al.* (2010), quienes señalan la importancia de trabajar con series de datos con recurrencias altas, puesto que solo en estos casos se puede comprobar que el tiempo de respuesta no varía con la intensidad de lluvia.

Estimación del t_c

Las Figuras 5 y 6 muestran que los t_c observados de los hietogramas e hidrogramas, y los estimados mediante las ecuaciones consideradas, disminuyen cuando aumenta el período de retorno, resultado este válido para las cuatro cuencas estudiadas.

En las microcuencas cubiertas por pasturas y plantaciones forestales, sitas en Paysandú, t_c tiende hacia un

valor asíntótico menor al t_c estimado por el método de Kirpich, para períodos de retorno mayores a 1,5 años. Las ecuaciones de Izzard y Onda Cinemática sobrestiman el t_c para todo el rango de períodos de retorno (Figura 5). En cambio, en las microcuencas ubicadas en Tacuarembó, todos los estimadores de t_c utilizados sobrestiman el valor observado, siendo esta constatación válida para todo el rango de períodos de retorno asociados a los eventos disponibles (Figura 6).

Asimismo, los t_c observados tienden a un valor constante, menor al estimado por Kirpich, para períodos de retorno mayores a 10 a 15 años. Los bajos valores del coeficiente de determinación (R^2), obtenidos en las cuatro microcuencas, se explican por la dispersión para períodos de retorno entre 1 a 2 años (Figuras 5 y 6).

Izzard considera la intensidad de lluvia, resultando que t_c varía con el período de retorno o recurrencia del evento. Si bien sobrestima los valores de t_c en comparación con los «observados», se constata que para valores altos de período de retorno la diferencia se mantiene constante aunque el número de eventos extremos es escaso. La ecuación de Onda Cinemática tiene similar comportamiento a la ecuación de Izzard, puesto que también considera la intensidad de lluvia. No obstante, la sobrestimación es menor que la resultante de aplicar la ecuación de Izzard (Figuras 5 y 6), aunque no constante.

La sobrestimación que producen estas ecuaciones puede explicarse por el coeficiente de rugosidad, que en la ecuación de Onda Cinemática es considerado único en

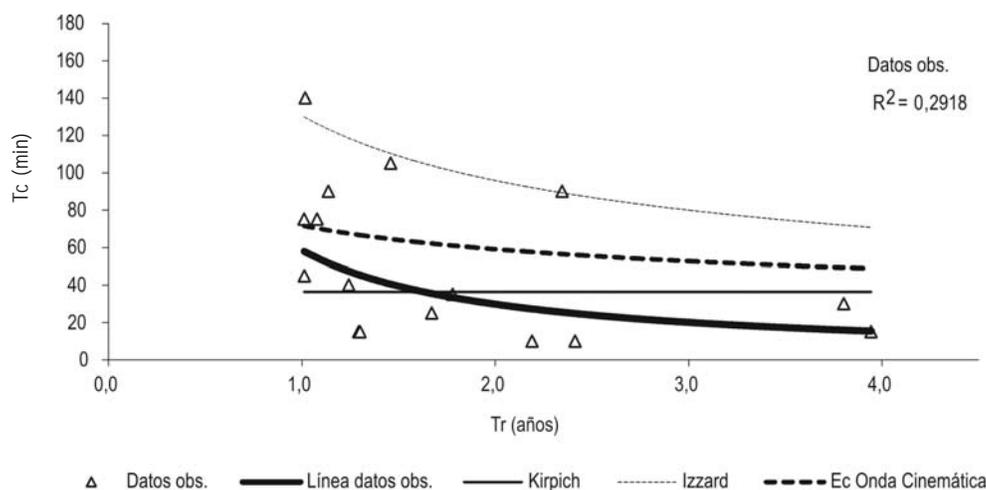


Figura 5. Relación entre periodos de retorno y tiempos de concentración observados y calculados en la microcuenca Paysandú Pastura.

* R^2 significativo al 5 % con 15 grados de libertad del error.

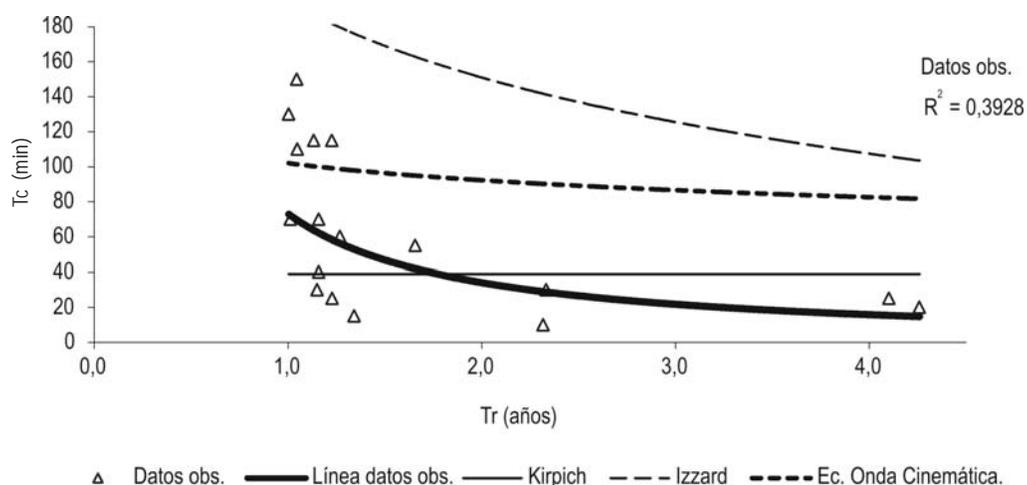


Figura 6. Relación entre periodos de retorno y tiempos de concentración observados y calculados en la microcuenca Paysandú Forestal.

* R^2 significativo al 1 % con 16 grados de libertad del error.

toda la longitud, a pesar de su variabilidad a lo largo del cauce y planicie de inundación, que conduce a que sea diferente para cada tormenta (Chow, 1998). Esto mismo se refleja en la ecuación de Izzard que introduce un coeficiente de retardo asociado a la intensidad de la tormenta restringido en valores desde 0,007 para pavimentos hasta 0,06 para pastura densa (Chow *et al.*, 1994), además de la restricción planteada en la introducción, que no cumplen las microcuencas estudiadas.

Ajuste de las ecuaciones

A pesar de que la ecuación de Izzard sobreestima los tiempos de concentración, incorpora los parámetros de la fórmula general (Li y Chibber, 2008). Por lo tanto, se decidió modificar la ecuación para llevarla a la forma de la ecuación general, ajustando para el conjunto de microcuencas, por regresión no lineal, los exponentes de cada parámetro y el coeficiente de retardo. Aplicando este procedimiento se obtuvo la ecuación [9].

$$t_c = 89,93L^{0,359} cS^{0,5}i^{0,7} \quad [9]$$

Del mismo modo, se ajustó la ecuación general, determinando los exponentes de cada uno de los parámetros y el coeficiente n de Manning para cada una de las coberturas, resultando la ecuación [10].

$$t_c = 32,96L^{0,3} n^{0,4} S^{0,47} i^{0,66} \quad [10]$$

Izzard modificada:

Ecuación general ajustada:

L: longitud de flujo superficial (km)

n: coeficiente de rugosidad de Manning ($m^{-1/3} s^{-1}$), (0,030 para pastura y 0,0753 para forestal)

c: coeficiente de retardo (0,06 para pasto y 0,09 para forestal)

i: intensidad de lluvia ($mm h^{-1}$)

S: pendiente promedio del terreno ($m m^{-1}$)

Los coeficientes de determinación (R^2) son significativos al 1 %, con 66 grados de libertad; siendo las dos ecuaciones estadísticamente significativas ($P < 0,001$).

Seguidamente, se analizó la relación entre los tiempos de concentración «observados» y los calculados por las ecuaciones [9] y [10], en forma conjunta para los dos tipos de cobertura (pasturas y plantaciones forestales), en las cuatro microcuencas estudiadas. La información relevante del análisis de regresión lineal se muestra en el Cuadro 3.

Como puede observarse, el ajuste de ambas ecuaciones es similar, no presentando diferencias en el coeficiente de determinación (R^2), cuyo valor indica que los parámetros incorporados en las ecuaciones [9] y [10] explican en un 56 % los t_c «observados». Los valores de la intersección (a) con el eje de las ordenadas significan que cada valor estimado es 23 o 24 minutos menor que el «observado».

Cuadro 3. Análisis de regresión lineal entre tiempos de concentración «observados» y calculados por las ecuaciones ajustadas (Izzard y general), para cubierta de plantación forestal y pasturas.

	<i>Izzard modificada</i>	<i>Ec. General ajustada</i>
R ² : coeficiente de determinación	0,56	0,56
b: pendiente de la recta	0,44 (0,048)*	0,42 (0,046)*
a: constante de la recta de regresión	23	24
P valor	<0,0001	<0,0001

*Error típico de b.

do». Por consiguiente, no se puede estimar con estas ecuaciones valores de t_c menores a 25 minutos.

Conviene, no obstante, resaltar algunas consideraciones a tener en cuenta al aplicar estas ecuaciones: i) estas ecuaciones fueron ajustadas para microcuencas con flujo concentrado; ii) los datos utilizados son de buena calidad pero limitados, requiriéndose una validación con otro conjunto de datos; iii) los eventos analizados corresponden a un período caracterizado mayoritariamente por déficit de precipitaciones con relación a la media histórica y, por tanto, son de baja recurrencia. Sin embargo, el t_c se utiliza para el diseño de obras, recomendándose recurrencias entre 15 y 100 años según el tipo de obra.

Conclusiones

El estudio de los tiempos de concentración «observados» a partir del análisis de hietogramas e hidrogramas, de una serie de eventos registrados en cuatro microcuencas, en dos zonas diferentes del país y bajo dos tipos de coberturas (plantación forestal-pasturas naturales) muestra que, para períodos de retorno menores a cinco años, el tiempo de concentración varía con la intensidad de la lluvia, y por consiguiente de su recurrencia.

Como era de esperar, se confirma que el tiempo de concentración «observado» es mayor en microcuencas forestales que en suelos cubiertos por pasturas naturales y que para intensidades de lluvia superiores a $60 mm h^{-1}$ no hay diferencias entre coberturas.

El tiempo de concentración estimado por las ecuaciones de Kirpich, Izzard y Onda Cinemática no es satisfactorio, puesto que para recurrencias utilizadas habitualmente para el diseño de obras hidráulicas en medios rurales produce valores superiores a los «observados».

El estudio propone dos ecuaciones para el cálculo del tiempo de concentración, Izzard modificada [9] y general [10]. No obstante, las limitaciones de los datos disponibles requieren profundizar y mantener en el tiempo los programas de monitoreo actuales, de modo de incorporar mayor número de eventos, particularmente de mayor recurrencia, para poder validar las ecuaciones propuestas. Asimismo, se requiere profundizar en la valoración del error en el cálculo de los tiempos de concentración observados.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ing. George M Chescheir (PhD), docente de la Universidad de Carolina del Norte, por proporcionar los datos de caudales y precipitación de las

microcuencas sitas en el departamento de Tacuarembó. El agradecimiento se hace extensivo a los programas PDT e INIA FPTA que permitieron instrumentar y mantener un programa de monitoreo en las microcuencas ubicadas en el departamento de Paysandú.

Bibliografía

- Abustan I, Sulaiman AH, Wahid NA, Baharudin F. 2008. Determination of Rainfall-Runoff Characteristics in An Urban Area : Sungai Kerayong Catchment, Kuala Lumpur [En línea]. En: 11th International Conference on Urban Drainage; 2008; Edinburgh, Scotland. 10p. Consultado 17 octubre 2014. Disponible en: http://web.sbe.hw.ac.uk/staff/profiles/bdgsa/11th_International_Conference_on_Urban_Drainage_CDICUD08/pdfs/706.pdf.
- Bell FC, Om Kar S. 1969. Characteristic response times in design flood estimation. *Journal of Hydrology*; 8: 173-196.
- Bondelid TR, Mc Cuen RH, Jackson TJ. 1982. Sensitivity of SCS models to curve number variation. *Water Resources Bull*, 20(2): 337-349.
- Castiglioni MG, Chagas CI, Massobrio MJ, Santanatoglia OJ, Buján A. 2006. Análisis de los escurrimientos de una microcuenca de Pampa Ondulada bajo diferentes sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo*, 24(2): 169 -176.
- Castiglioni MG, Massobrio MJ, Chagas CI, Santanatoglia OJ. 1999. Análisis de un modelo hidrológico en una microcuenca de Pampa Ondulada (Argentina). Investigación agraria. *Producción y protección vegetales*, 14(3): 531-544.
- Chescheir GM, von Stackelberg NO, Amatya DM, Skaggs RW. 2004. Effects of afforestation on the hydrologic behavior of basin in the Tacuarembó River : Progress report for 2003-04. Raleigh: North Carolina State University. Department of biological and Agricultural Engineering. 56p.
- Chescheir GM, Amatya DM, Skaggs RW. 2003. Effects of afforestation on the hydrologic behavior of basin in the Tacuarembó River : Progress report for 2002-03. Raleigh : North Carolina State University. Department of biological and Agricultural Engineering. 47p.
- Chow VT. 1998. Hidráulica de Canales Abiertos. Bogotá : Mc Grow-Hill. 667p.
- Chow VT, Maidment D, Mays L. 1994. Hidrología aplicada. Bogotá : Mc Grow-Hill. 584p.
- Dooge JC. 1973. Linear theory of Hydrologic Systems. Washington : USDA. 327p. (*Technical Bulletin*; 1468).
- Eisenbies MH, Aust WM, Burger JA, Adams MB. 2007. Forest operations, extreme flooding events, and considerations for hydrologic modeling in the Appalachians – A review. *Forest Ecology and Management*, 242: 77-98.
- Ferrer FJ. 1993. Recomendaciones para el Cálculo Hidrometeorológico de Avenidas. Madrid : Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. 76p.
- García PF, Hernandez J, Amarante P, Califra A, Delgado S, Salvo L, Hill M. 2004. Efecto de las plantaciones de Pino en Uruguay: Reporte anual de calidad de suelos. Montevideo : Universidad de la República. 45p.
- Genta JL, Charbonnier F, Rodriguez A. 1998. Precipitaciones máximas en el Uruguay. En: 2º Congreso Nacional de Vialidad Uruguay. Montevideo: Asociación Uruguaya de Caminos. pp. 301 - 310.
- Genta JL, Silveira L, Charbonnier F. 1995. Descripción y análisis de metodologías para la determinación de caudales máximos instantáneos y escurrimientos mensuales : Proyecto CONICYT-BID 187. Montevideo Facultad de Ingeniería. 16p.
- Grimaldi S, Petroselli A, Nardi F, Tauro F. 2010. Análisi critica dei metodi di stima del tempo di corrivazione. En: Atti del XXXII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche; 14 - 17 settembre 2010; Palermo, Italia. Palermo: Farina. pp. 312-322.
- Hotchkiss RH, Mc Callum BE. 1995. Peak discharge for small agricultural watersheds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(1): 36-48.
- Izzard CF. 1946. Hydraulics of Runoff from Developed Surfaces. En: Proceedings of the Twenty-Sixth Annual Meeting of the Highway Research Board Held at Washington, D.C. December 5-8, 1946. Washington : Highway Research Board. pp 129 - 146
- Kang JH, Kayhanian M, Stenstrom MK. 2008. Predicting the existence of stormwater first flush from the time of concentration. *Water research*, 42: 220-228.
- Kirpich ZP. 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Journal of Civil Engineering*. 10(6): 362.
- Kuichling E. 1889. The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous districts. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 20: 1-56.
- Li MH, Chibber P. 2008. Overland flow time of concentration on very flat terrains. *Journal of the Transportation Research Board*, 2060: 133-140.
- Llamas J. 1993. Hidrología general, principios y aplicaciones. Bilbao: Universidad del País Vasco. 635p.
- Mc Cuen RH, Wong SL, Rawls WJ. 1984. Estimating urban time of Concentration. *Journal of hydraulic Engineering*, 110(7): 887 - 904.
- Molfino JH. 2000. Proyecto de instalación de cuencas experimentales para el estudio de efectos del establecimiento de áreas forestales con pino en Uruguay. Montevideo: Colonvade. 56p.
- Morgali JR, Linsley RK. 1965. Computer analysis of overland flow. *Journal of Hydraulic Division*, 95(HY3): 81-100.
- Musy A, Laglaine V. 1992. Hidrologie Générale. Suisse : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne; Département de Génie Rural ; Institut d'Aménagement des Terres et des Eaux. 480p.
- NRCS 2007. National Engineering Handbook: Part 630 Hydrology. Washington : USDA.
- Sheridan JM. 1994. Hydrograph time parameters for flatland watersheds. *American Society of Agricultural Engineers*, 37(1): 103 - 113
- Silveira L, Chreties CH, Alonso A, Amorín C, De Izaguirre P, Crisci M, Symonds S, Martínez L, García M, García F, Delgado S, Clérici C, Bentancor L, Hill M, Alliaume F, Cabral P, Audicio P, Iroumé A, Huber A, Schipilov A. 2011. Efectos de la actividad forestal sobre los recursos suelos y aguas. Montevideo: INIA. 38p. (Serie FPTA ; 32).
- Silveira L, Genta JL, Charbonnier F, Failache N, Alonso J. 2000. Directivas de diseño hidrológico-hidráulico de alcantarillas : informe final. Montevideo: Universidad de la República. Facultad de Ingeniería ; Ministerio de Transportes y Obras Publicas. Dirección Nacional de Vialidad. 88p.
- Tucci C. 2000. Hidrología, Ciência e aplicação. Porto Alegre : UFGS. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos ; 4). pp. 195-198.
- Wong TSW. 2005. Assessment of Time of Concentration Formulas for Overland Flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(4): 383-387.