



Análisis de hipótesis y aplicación del HUI Geomorfoclimático en la cuenca del arroyo Ludueña (llanura pampeana argentina)

Erik D. Zimmermann¹ y Gabriel Caamaño Nelli²

¹Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (UNR). Riobamba 245 bis, 2000 Rosario, Argentina.

²Centro de Investigaciones Hídricas Región Semiárida (INA-CONICET). Medrano (s/n) – (5152) V. Carlos Paz, Córdoba. Argentina.

E-mail de contacto: erikz@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Se aplica el HUI Geomorfoclimático en el sistema hidrológico del arroyo Ludueña (Pcia. de Santa Fe). A priori, hay hipótesis que son de difícil cumplimiento en sistemas de llanura por lo que presupone que la aplicación del HUIGC no será representativa. Primero, los tiempos de respuesta en llanura son mayores dando lugar a aportes de áreas alejadas del cauce. Además, la red de drenaje no es natural, sino que se ve fuertemente intervenida por el hombre, labrada mediante canalizaciones y obstruida mediante vías de comunicación. Estas características hacen que la simplificación cinemática, base del HUIGC, no pueda aplicarse. Se analizan los desfases entre la respuesta modelada y la observada en la sección de control del sistema real, donde en términos medios la sobre valoración de los caudales picos es del orden de 4,5 veces los valores observados en 16 tormentas aforadas en la cuenca.

Palabras clave: modelación matemática hidrológica, sistemas de llanura, Arroyo Ludueña

ABSTRACT

The Geomorphoclimatic IUH is applied in the Ludueña's hydrologic system (Santa Fe province). A priori, there are hypothesis that could not be representative for flatland systems, then, the application of the HUIGC could not produce good results. First, times of responses in flatlands are greater, then, there are far away of the watercourses areas that contribute to the flow. In addition, the network of drainage is not natural, it was hardly intervened by the man, by means of channelings and roads. These characteristics do that the kinematic hypothesis, used by IUHGC, can weakly be applied. The differences among the IUHGC response and observed data are analyzed. The model presented a over-estimation of the discharge peaks, which were on the order of 4.5 times the values observed for 16 measured storms in the basin.

Keywords: hydrological mathematical modelling, flatland systems, Ludueña river.

Introducción

Un objetivo parcial trazado para el marco general del trabajo consistió en identificar y cuantificar los parámetros geomorfológicos dominantes del comportamiento hidrológico de un sistema de avenamiento de baja pendiente, en aspectos de la función de transformación precipitación-escorrentía del sistema. La cuenca del arroyo Ludueña, representativa de sistemas hidrológicos de llanura ha servido en una primera etapa experimental.

En primer término, se tomaron en cuenta teorías de vigencia actual, como la del Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfoclimático (HUIGC). Partiendo de su planteo conceptual, puede pronosticarse, a priori, algunos resultados derivados de su aplicación. Los avances se han desarrollado bajo el concepto de cuenca hidrográfica convencional,

en donde puede definirse un área de aporte y el comportamiento de cada punto de la misma. Además existe una organización de la red de drenaje y puede identificarse cada componente de la red con un orden de jerarquía. Ante un estímulo externo (precipitación) la respuesta del sistema consiste en activar los mecanismos de disipación en términos de transferencia, es decir, el movimiento de los volúmenes de agua hacia la salida de la cuenca. Estos son los denominados Sistemas Hidrológicos Típicos (SHT).

En el aspecto clasificatorio de un Sistema Hidrológico Superficial se ha interpretado que la pendiente topográfica es el rasgo morfológico predominante y se han propuesto, inicialmente, algunos indicadores adicionales que permiten reconocer la "tipicidad" del Sistema (Caamaño Nelli y Zimmermann, 1990).

En los sistemas bajo estudio puede determinarse un área de aporte medianamente definida, aunque haya pequeños tramos de la divisoria de aguas, morfológicamente planos, en donde se evidencian procesos de flujo y reflujo a través del análisis aerofotográfico o de imágenes satelitarias. Otro rasgo remarcable es la gran diversidad en las formas del escurrimiento superficial, abarcando los de características mantiformes, con áreas de almacenamiento considerables, como los encauzados con cierta organización de la red, siendo estos últimos los predominantes desde el punto de vista areal. Estos indicios señalan que en los sistemas que se examinan coexisten elementos característicos de sistemas hidrológicos típicos y no típicos, determinando formas mixtas de comportamiento que hacen que no puedan ser tratados de una u otra manera. Esta diversidad de formas de escurrimiento que adopta el agua para alcanzar la salida del sistema hidrológico, coloca en conflicto ciertas hipótesis que son básicas en la conceptualización del HUIGC. Por ejemplo, las áreas en donde el flujo se dispersa poniendo de manifiesto escurrimientos mantiformes o almacenamientos temporarios en superficie son las responsables del fracaso de la hipótesis de constancia de la velocidad en todo punto de la red, además de alejarse del movimiento predominantemente cinemático.

Otro factor crucial en el desarrollo del método es que el clima moldea la red de drenaje a su necesidad y aquí el hombre juega un rol muy activo en su construcción y en los controles del flujo, tales como las alcantarillas viales. Estos elementos distorsionan fuertemente la naturalidad de la red, alejándose de los planteos básicos del HUIGC.

Por otro lado, la escasa pendiente del paisaje se deriva en bajas energías para el labrado de la red y, consecuentemente, pobres densidades de drenaje en el sistema natural. Esto hace que los aportes de las áreas contiguas del curso de agua sean significativos y, más aún, las magnitudes de tales áreas hacen que el equilibrio con la intensidad de lluvia rara vez sea alcanzado, contradiciendo hipótesis del método.

En síntesis, se presupone que la aplicación del HUIGC en el sistema hidrológico del Ludueña no es convencional, y en cierta manera se está forzando la adaptación del método a condiciones diferentes a las que se utilizaron para su formulación, y además, se puede pronosticar una sobrestimación de la respuesta hidrológica en términos de caudales.

Desarrollo teórico del HUIGC

El desarrollo de la teoría del Hidrograma Unitario Geomorfoclimático se basó en dos etapas. La primera de descubrimiento de las vinculaciones entre parámetros de la geomorfología cuantitativa, tales como los que se deducen de las leyes de Horton, con el HUIG. En la segunda etapa, se plantea una relación entre un parámetro dinámico del enfoque geomorfológico previo, como la velocidad del flujo, con las características de la tormenta que produce el hidrograma, reflejadas a través de la intensidad neta y la duración de la misma. Con este paso se acopla la variable climática al enfoque anterior generando el HUIGC.

El HUI Geomorfológico

El HUIG fue desarrollado por Rodríguez Iturbe y Valdés (1979), con el objeto de conocer en que forma se relacionan los procesos hidrológicos y los geomorfológicos. En el HUIG, el nexo entre los procesos hidrológicos y geomorfológicos lo establecen dos herramientas básicas: (a) el ordenamiento de los elementos de las redes de drenaje de acuerdo con las leyes de Horton, con la fundamentación matemático-estadística que realizara Shreve y los criterios de ordenamiento de Strahler y (b) la función característica de respuesta hidrológica de una cuenca, su Hidrograma Unitario Instantáneo.

Para el desarrollo analítico los autores han considerado una cuenca de tercer orden con un recipiente a la salida de la misma, aunque luego el estudio fue generalizado para cuencas de cualquier orden. Bajo este esquema se estudia la rapidez con que se llena el recipiente de la salida, cuando una precipitación efectiva unitaria se impone instantáneamente sobre toda la cuenca con distribución uniforme. La derivada de la curva de volumen de volúmenes almacenados es el hidrograma de descarga que resulta de una precipitación unitaria impuesta, es decir el HUI.

El enfoque estocástico dado para el HUI parte de la probabilidad de que una gota de lluvia, escogida al azar, alcance el balde en un tiempo t dado. Dicha probabilidad es descrita por una función similar a la de volúmenes acumulados, comenzando en cero al tiempo de comienzo de la lluvia y finalizando en uno al tiempo infinito. Desde este punto de vista, las ordenadas de la curva mencionada representarían el porcentaje de gotas que han alcanzado la salida de la cuenca para el momento t . El HUI, entonces, es concebido como la distribución de frecuencias de los

tiempos de llegada (retardos) de las partículas de agua a la salida, cuando sobre la cuenca se aplica una lluvia efectiva, unitaria e instantánea distribuida uniformemente en el espacio.

Al desarrollar las teorías, los autores destacan que, salvo en los cursos de primer orden, la mayoría de las gotas involucradas en la creciente que circulan por el estado i (orden i de la red), provienen de las corrientes de orden inferior al i , restando importancia a las gotas que caen sobre la cuenca y que escurren superficialmente, pues si bien intervienen en la creciente lo hacen en escaso margen. Cabe perfectamente una objeción a esta hipótesis en el caso bajo estudio: aquí se presupone que las partículas de agua de las áreas contiguas a los cursos y que entran en juego en el proceso son escasas, en relación a las que conduce la red de flujo. Esto es cuestionable en los sistemas hidrológicos que se pretende modelar, dado que la red es incipiente, la densidad de drenaje es baja y por ello el porcentaje de gotas de agua que escurren superficialmente podría ser alto.

Mediante un complejo desarrollo matemático y probabilístico los autores llegan a expresiones del caudal pico q_p y tiempo al pico t_p del HUI en función de la velocidad del flujo y parámetros geomorfológicos de la red de flujo:

$$q_p = \frac{1,31R_L^{0,43}V}{L_\Omega} [\text{hrs}^{-1}] \quad (1)$$

donde R_L es la relación de longitudes de Horton, V la velocidad de la corriente en m/s y L_Ω la longitud del curso de mayor orden en Km. Admitiendo que $R_B/R_A = 0,8$, donde R_A es la relación de áreas y R_B la relación de bifurcación se llega a una expresión para el tiempo al pico del HUI:

$$t_p = \frac{0,39L_\Omega R_L^{-0,38}}{V} [\text{hrs}] \quad (2)$$

siendo triangular la forma del HUIG.

Un aspecto importante del planteo es que el HUIG depende de la velocidad del flujo V a cada instante de tiempo. Este parámetro es desconocido. Rodríguez Iturbe et al. (1979) obtuvieron histogramas de distribución de velocidades para todo el período de los hidrogramas de salida de las cuencas experimentales sobre las cuales trabajaron.

Comprobaron que la mayor parte del caudal se concentraba en un intervalo no muy ancho cerca de la velocidad del pico, además, que la varianza de esa distribución disminuía

sensiblemente cuando aumentaba la intensidad o la duración de la lluvia, ó ambas a la vez.

Por lo anterior se dedujo que utilizar la velocidad del pico era una hipótesis razonable. Análisis posteriores permitieron comprobar la veracidad de la hipótesis, sobre todo para velocidades superiores a los 2 m/s. El método geomorfológico considera, entonces, que las características dinámicas de una crecida se sintetizan a partir de la velocidad de la descarga instantánea máxima.

Lo anterior encierra la contradicción de que para predecir el pico de la descarga es necesario conocer previamente su velocidad. Este hecho hace inaplicable al método, por lo que las investigaciones continuaron en una segunda etapa, donde se introdujeron los factores climáticos causantes de la dinámica del proceso.

El HUI Geomorfoclimático

En este desarrollo, las dos características fundamentales del HUI, el caudal pico q_p y tiempo al pico t_p , son consideradas variables aleatorias con funciones de distribución de probabilidades dependientes de la geomorfología y del clima. Este último interviene indirectamente en el análisis, al suponerse que las funciones de distribución de otras dos nuevas variables aleatorias e independientes, la intensidad i_r y la duración t_r de las lluvias.

Suponiendo que sobre la cuenca se produce una lluvia efectiva de intensidad constante i_r , de duración t_r , y con distribución espacial uniforme, se intenta en este enfoque alternativo, relacionar el parámetro dinámico V del enfoque geomorfológico con estas variables.

Las hipótesis de trabajo son dos: (a) la velocidad V es constante en toda la cuenca para un tiempo dado de la tormenta uniforme y (b) el escurrimiento de los cursos de la cuenca puede representarse mediante un esquema de aproximación cinemática

Bajo estos supuestos la teoría geomorfoclimática podría presentar inconvenientes en su identificación con los sistemas bajo estudio. Es sabido que la antropización que afecta a éstos sistemas es importante, especialmente dada por una fuerte densificación de vías de comunicación. Esto provoca importantes embalsamientos del flujo superficial para los cuales la aproximación cinemática carece de elementos teóricos para representarlos. Además, es conflictiva la proposición que sostiene la constancia de la velocidad media en cualquier punto de la red.

Rodríguez Iturbe et al. (1981) interrelacionaron a V , con i_r y t_r y características

geomorfológicas de una cuenca promedio de primer orden. Manteniendo la hipótesis sustentada en el enfoque geomorfológico en cuanto a que el tiempo de viaje sobre el terreno puede despreciarse y considerarse sólo el tiempo de viaje de las gotas sobre el curso, el tiempo de concentración de la cuenca de primer orden puede representarse como:

$$tc_1 = \left[\frac{L_1 \cdot i_*^{1-m_1}}{\alpha_1} \right]^{1/m_1} \quad (3)$$

donde: $i_* = \frac{A_1}{L_1} i_r$, L_1 : longitud promedio de los cursos de primer orden, A_1 área de aporte promedio de los cursos de primer orden, α_1 y m_1 son parámetros de la aproximación cinemática del canal promedio de primer orden. Para la determinación de la velocidad instantánea máxima, la teoría cinemática establece fórmulas que dependen de la relación entre la duración de la tormenta y el tiempo de concentración de la cuenca promedio de primer orden tc_1 , así es que cuando $t_r < tc_1$:

$$V_{max} = \alpha_1 \cdot (i_* \cdot t_r)^{m_1-1} \quad (4)$$

y si $t_r > tc_1$:

$$V_{max} = \alpha_1^{1/m_1} \cdot [L_1 \cdot i_*]^{m_1-1} \quad (5)$$

Los autores han demostrado que la probabilidad de que $t_r < tc_1$ es muy baja, por lo cual han considerado como general el caso en que se alcanza el equilibrio para la cuenca de primer orden.

Esta es una suposición conflictiva en los sistemas bajo estudio, dado que los tiempos de concentración en las planicies son elevados, pudiendo resultar mayores que los tiempos de lluvia neta.

Derivadas las funciones de densidad de probabilidades para las dos variables que definen el HUI, q_p y t_p , aplicadas a una tormenta en particular conducen a que si $t_r < tc$:

$$q_p = \frac{0,871}{\Pi_1^{0,4}} \quad [\text{hrs}^{-1}] \quad (6)$$

$$t_p = 0,585 \Pi_1^{0,4} \quad [\text{hrs}] \quad (7)$$

siendo tc el tiempo de concentración de la cuenca de orden Ω y Π_1 representa el parámetro del HUIGC para la tormenta dada y es igual a:

$$\Pi_1 = \frac{L_\Omega^{2,5}}{i_r \cdot A_\Omega \cdot R_L \cdot \alpha_\Omega^{1,5}} \quad (8)$$

donde α_Ω representa el parámetro de onda cinemática para el curso de mayor orden:

$$\alpha_\Omega = \frac{\sqrt{S_\Omega}}{P_\Omega^{2/3} n_\Omega}$$

siendo S_Ω , n_Ω y P_Ω la pendiente representativa, el coeficiente de rugosidad de Manning y el perímetro mojado de la sección transversal del curso de mayor orden, respectivamente, L_Ω la longitud del curso de mayor orden (km) y A_Ω el área de aporte total de la de la cuenca de orden Ω (km²)

Henderson demostró que mientras las características del pico del HUI estén correctamente determinadas, la forma en sí de éste no es muy importante y una aproximación triangular es completamente satisfactoria. El mismo autor demostró que la relación entre Q_p y Q_e en una cuenca vale:

$$\frac{Q_p}{Q_e} = 2 \frac{tr}{tb} \left[1 - \frac{tr}{2tb} \right] \quad (9)$$

siendo Q_p el caudal pico del hidrograma a la salida de la cuenca y Q_e el caudal de equilibrio igual $i_r A$ y t_b el tiempo base del hidrograma unitario instantáneo coincidente con el t_c de la cuenca. Dado que $t_b q_p / 2 = 1$ porque el volumen del HUI es unitario y combinando las ecuaciones precedentes, se obtiene (Caamaña Nelli y Dasso, 1983):

$$Q_p = 2,42 \frac{ir \cdot A \cdot tr}{\Pi^{0,4}} \left[1 - \frac{0,218tr}{\Pi^{0,4}} \right] \quad (10)$$

El tiempo para el pico del hidrograma de salida ha sido analizado por Rodríguez Iturbe et al. y puede calcularse como: $T_p = t_p + 0,75t_r$, que combinando con la ecuación (7) se llega a:

$$T_p = 0,585 \Pi^{0,4} + 0,75t_r \quad (11)$$

ecuación válida para $t_r < t_b$. Las ecuaciones y permiten calcular el Q_p y el T_p sin realizar la convolución.

Aplicación del HUIGC en el A⁰ Ludueña

Las cuencas hidrográficas que se analizan en este estudio (zona de la Pampa Ondulada,

provincia de Santa Fe) presentan relieves con bajos gradientes topográficos en donde el drenaje es embrionario dejando como rastros pequeñas lagunas conectadas (o simplemente aisladas), relieves cóncavos con cuerpos de agua importantes (250 Ha, en algunos casos) y relieves en donde el gradiente es suficiente, pudiendo hablarse de un avenamiento definido y organizado. El área examinada, que comprende las cuencas de los arroyos Pavón, Sauce, Saladillo, Frías, Seco, Ludueña y San Lorenzo, está caracterizada por suaves ondulaciones generadas por la neotectónica del Terciario. Hay hipótesis de ascensos y descensos de los bloques fracturados del basamento de la llanura que provocan estas flexuras que se manifiestan en superficie. Los movimientos verticales determinaron un relieve de planos escalonados en donde se desarrollaron las redes actuales. Existen elementos que garantizan la representatividad de estos sistemas como transicionales. El sistema hidrológico del arroyo Ludueña tiene un área de aporte de 700 km², con pendientes medias del orden del 1 por mil.

Pueden observarse áreas de acumulación y de transferencia. Las primeras están en el bloque deprimido de la cuenca, con bajas pendientes (menor a 1 m/km) y suelos impermeables. Las áreas de transferencia, dirigidas hacia el bloque deprimido, se ubican en la cabecera y presentan pendientes superiores (entre 2 y 3 m/km). Este análisis puede realizarse en forma relativamente precisa mediante el interpretación de imágenes satelitarias.

El área total de aporte puede subdividirse en dos subcuencas, una ubicada al norte en la cual el canal Ibarlucea es su principal colector y otra, ubicada al suroeste, desaguada por el arroyo Ludueña.

Debido al carácter antrópico de la cuenca es dificultoso el trazado de la red de avenamiento. Frecuentemente, en el área de acumulación, fue necesario "prolongar" las cañadas del área de transferencia para darle, al sistema de conducción, el aspecto de una red de drenaje. Obviamente, con este tratamiento se está forzando al sistema real a un comportamiento diferente y, al HUIGC, a identificarse con un prototipo idealizado. Únicamente bajo estas premisas fue posible el trazado de la red y la cuantificación de los índices de Horton, cuyos resultados se exponen a continuación. Tanto el arroyo Ludueña como el canal Ibarlucea son cursos de cuarto orden y a partir de la confluencia de éstos, a la altura de la Avda. de Circunvalación, el arroyo Ludueña incrementa a 5 su orden de jerarquía, desembocando en el

río Paraná luego de atravesar el éjido urbano de Rosario. Las características principales, acorde al ordenamiento trazado por Strahler, para ambas sub-cuencas se muestran en Tabla 1.

Tabla 1. Características de Strahler para las subcuencas del arroyo Ludueña.

SUBCUENCA ARROYO LUDUEÑA			
Orden u	N _u	L _u (km)	A _u (km ²)
1	35	3,85	7,0
2	10	6,10	34,5
3	4	10,05	110,2
4	1	9,40	453,2
SUBCUENCA CANAL IBARLUCEA			
Orden u	N _u	L _u (km)	A _u (km ²)
1	29	3,31	6,9
2	8	2,50	25,1
3	3	5,73	88,5
4	1	14,40	245,1

donde N_u representa el número de cursos de orden u, L_u la longitud promedio de los cursos de orden u y A_u el área de aporte total promedio de los cursos de orden u. Las relaciones de bifurcación, de longitudes y de áreas, de acuerdo a las leyes de Horton, son para la subcuenca Ludueña: R_B=3,184 (r=0,9973), R_L=1,374 (r=0,9230) y R_A=3,93 (r=0,9983). Para la subcuenca Ibarlucea son: R_B=3,030 (r=0,9985), R_L=1,690 (r=0,8768), R_A=3,31 (r=0,9986), donde r representa el coeficiente de correlación correspondiente (Tabla 2).

Tabla 2. Características de las subcuencas

	Ludueña	Ibarlucea
Area (km ²)	453	245
L _Ω (km)	9,4	14,4
R _B	3,18	3,03
R _L	1,37	1,69
R _A	3,93	3,31
S _Ω (m/km)	0,82	0,68
α _Ω	0,1049	0,127

Referencias: L_Ω es la longitud del curso de mayor orden, S_Ω es su pendiente media y α_Ω el parámetro de onda cinemática.

Puede constatarse que la relación de longitud, en el caso de la subcuenca Ludueña, es menor al límite inferior estadísticamente determinado para el parámetro, probablemente debido a la inexistencia de red en algunos tramos.

Procesamiento de información

Un requerimiento para la aplicación del HUIGC en el sistema bajo estudio fue el procesamiento de la información de precipitaciones y de descargas en la sección de control. Como resultado del tratamiento de la información hidrometeorológica se obtuvieron los datos de precipitación por intervalo y por subcuena analizada. Aquí se ha considerado dos subcuencas, la que aporta al arroyo Ludueña propiamente dicho y la que confluye en el canal Ibarlucea. La reconstrucción de los hietogramas de tormentas y el cálculo de los mismos por intervalo y por estación consistió en la confección de los hietogramas de las tormentas seleccionadas para el intervalo de 2 hs. elegido previamente en base al mínimo tiempo de concentración de ambas subcuencas.

La estimación de la distribución espacial de las tormentas por intervalos de cálculo se realizó con la metodología de los polígonos de Thiessen. En cada uno de los tres períodos de trabajo debió trazarse los polígonos correspondientes, ya que en cada uno de ellos entran en juego distintas estaciones de registro.

El tratamiento de la información hidrológica comprendió la construcción de la curva altura-descarga de la sección Circunvalación, transformación de alturas en caudales por intervalo de cálculo y separación de los componentes del escurrimiento en los hidrogramas calculados, aplicando la metodología de Barnes.

Para la determinación de los tiempos netos de los hietogramas se empleó la metodología del SCS. Se determinó, en primer lugar, el número de curva CN en correspondencia con cada hidrograma partiendo del volumen de escorrentía directa, asociado a una precipitación neta, y el total precipitado. Con el valor del parámetro CN determinado se aplicó el método SCS a cada tormenta, utilizando los montos acumulados de precipitación en cada intervalo de discretización temporal para estimar los acumulados de lluvia neta. Por diferencia entre montos netos acumulados en cada intervalo de precipitación se construyeron los hietogramas netos. Los tiempos netos de cada evento se determinaron por diferencia entre el primer intervalo de ocurrencia de lluvia neta y la duración de la tormenta (Tabla 3).

Aplicación del método y Resultados

Definidas las características de los eventos para los cuales se testea el método se aplicaron

las ecuaciones 6, 7, 8, 10 y 11 para determinar los caudales pico y tiempos al pico de los hidrogramas de crecidas. Se subdividió la cuenca en dos subcuencas aplicando los conceptos del HUIGC en cada parte y adicionando los hidrogramas generados parcialmente. Dado que los tiempos al pico para ambas subcuencas fueron similares la superposición se aproximó mediante la suma directa de los caudales pico del Ludueña y del Ibarlucea. Esta fuente de error no fue determinante en los resultados, tal como puede apreciarse en la Tabla 3.

Los resultados muestran que los caudales estimados son exageradamente sobrevaluados, sobre todo para las tormentas que producen escorrentías importantes como se puede verificar para la ocurrida el 28/02/84. En este caso la relación entre caudal pico estimado y observado es del orden de 3,5 veces. A pesar de ello en las tormentas de menor escorrentía la sobrestimación de los caudales picos es también notable. Existen relaciones entre 0,85 a 8,5 con una media de aproximadamente 4,5 (Tabla 3). En cuanto a los tiempos al pico, en términos generales, la predicción los subestima. Respecto a las relaciones entre tiempos al pico obtenidos mediante la aplicación de la ecuación 11 en la subcuena Ludueña y los medidos en la sección Circunvalación en su mayoría están subvaluados por el método.

Se pone en evidencia que los desfases se dan tanto para los grandes eventos como para los pequeños.

Explicación hipotética de los desfases

Ausencia de efectos de atenuación

El hecho de que los desfases entre caudales picos sean marcadamente por exceso y, además, que los errores en la estimación de T_p sean por defecto da la pauta de que el modelo de tránsito implícito en el HUIGC no contempla efectos de atenuación que se verifican en el prototipo.

Está claro que las relaciones entre la geomorfología y la hidrología planteadas en la teoría del HUIGC contemplan a la red de avenamiento en su estado natural, sin intervención humana de ningún tipo, mientras que la realidad del sistema considerado se encuentra fuertemente condicionada por estos aspectos.

Tabla 3. Valores observados y calculados para las tormentas consideradas en la comparación

Tormenta	Observados				Calculados Ludueña				Calculados Ibarlucea				Qp tot	R Qp
	Pn	ir	Tp obs	Qp Obs	tp	qp	Tp	Qp	tp	qp	TP	Qp		
	mm	mm/h	hs	m3/s	hs	hs ⁻¹	hs	m3/s	hs	hs ⁻¹	hs	m3/s		
26/11/69	4,0	2,0	68,0	12,6	3,1	0,2	4,6	76,1	5,0	0,1	6,5	26,5	102,6	8,1
04/02/70	0,9	0,2	4,0	2,7	5,7	0,1	7,2	9,2	9,2	0,1	10,7	3,2	12,4	4,6
15/03/70	2,3	0,2	24,0	13,0	3,9	0,1	5,4	35,7	6,2	0,1	7,7	12,3	48,1	3,7
13/05/70	0,3	0,1	4,0	3,4	8,7	0,1	10,2	2,1	14,0	0,0	15,5	0,7	2,9	0,8
27/09/70	1,3	0,3	2,0	7,8	6,4	0,1	9,4	12,0	10,3	0,1	13,3	4,2	16,2	2,1
01/10/70	2,3	0,6	26,0	10,2	5,1	0,1	8,1	26,1	8,2	0,1	11,2	9,2	35,2	3,5
30/10/70	3,4	0,4	12,0	16,5	5,1	0,1	9,6	36,8	8,2	0,1	12,7	13,2	50,0	3,0
27/12/70	4,0	0,5	42,0	12,1	4,1	0,1	7,1	55,0	6,6	0,1	9,6	19,5	74,5	6,2
13/03/71	1,2	0,2	16,0	5,0	5,1	0,1	6,6	13,8	8,2	0,1	9,7	4,7	18,5	3,7
09/11/83	7,8	1,3	6,0	30,0	2,4	0,2	3,9	188,5	3,8	0,1	5,3	66,4	254,9	8,5
12/11/83	5,6	0,9	6,0	32,5	2,7	0,2	4,2	120,3	4,3	0,1	5,8	42,1	162,5	5,0
21/02/84	5,0	0,5	18,0	16,8	2,8	0,2	4,3	103,2	4,5	0,1	6,0	36,0	139,2	8,3
28/02/84	46,6	3,3	36,0	205,0	2,4	0,2	11,4	447,0	3,8	0,1	12,8	253,9	700,8	3,4
15/03/84	2,8	0,7	10,0	19,6	4,7	0,1	7,7	34,0	7,6	0,1	10,6	12,0	46,0	2,3

Referencias: Pn: precipitación neta; ir : intensidad neta; Tp: tiempo al pico; Qp: caudal pico; tp y qp: tiempo y caudal pico del HUI; R Qp = relación entre caudales pico calculados y observados.

Grado de alejamiento de las hipótesis

Un segundo aspecto que debe tenerse en cuenta se vincula con las hipótesis establecidas en el planteo de las ecuaciones. Tras la descripción de la formulación matemática realizada, se fueron realizando algunos comentarios del grado de representatividad que podían tener éstas hipótesis en el prototipo bajo análisis. Estos se referían a los siguientes puntos:

- Las partículas de agua que entran en juego no solamente son las de las áreas contiguas a los cursos de agua, el aporte de las áreas alejadas puede ser significativo dada la baja densidad de drenaje de los cursos de llanura. Esto hace que la hipótesis de que la creciente que circula por el estado "I" del curso de agua no provenga solamente de las corrientes de orden inferior.
- La hipótesis que los tiempos de concentración en las planicies aledañas a los cursos de agua son pequeños, base sobre la cual se afirma la idea de que los segmentos se encontrarían en condiciones de equilibrio, también es cuestionable.
- La hipótesis del flujo de características cinemáticas en la red fuertemente condicionada por obras de arte es cuestionable.

Los dos primeros puntos están íntimamente relacionados, a partir de la importancia que adquiere en los sistemas de llanura, el escurrimiento no encauzado. Retomando el análisis realizado para determinar la teoría geomorfoclimática del HUI, se plantea que tanto

el caudal pico q_p como el tiempo al pico t_p del HUI son variables aleatorias cuyas distribuciones dependen de la geomorfología de la cuenca y del clima. Es sabido que la expresión teórica de la velocidad máxima instantánea en la cuenca promedio de primer orden, depende de la relación existente entre los tiempos de lluvia neta y de concentración, hecho por el cual se derivan las expresiones 4 y 5. Si q_p es interpretado como una variable aleatoria, de igual forma lo será la velocidad, de acuerdo a la relación establecida por la ecuación 1. En ese caso la función densidad de probabilidad (pdf) para V es (Rodríguez Iturbe et al, 1981):

$$f_V(V) = w \cdot f_V^1(V) + (1-w) \cdot f_V^2(V) \quad (12)$$

donde $w = \text{Prob}(t_r < t_c)$, $f_V^1(V)$ representa el caso en que $t_r < t_c$ y $f_V^2(V)$ el caso en que $t_r > t_c$.

Tras complejos desarrollos teóricos los autores abordan a una expresión para cuantificar w , y consecuentemente $f_V(V)$, en función de las características geomorfológicas de las cuencas de primer orden y de la intensidad y duración media de las lluvias. Cuantificando el término de w para las características de la cuenca del Ludueña se llegó a un valor de 0,29 (Zimmermann, 1997). Es decir, que casi una de cada tres posibilidades $t_r < t_c$, no llegando a equilibrarse la cuenca de primer orden. Esto representa una probabilidad alta de que ocurra tal situación. La deducción de que w es cercana a cero partió de características geomorfológicas de cuencas de mayor pendien-

te. En el ejemplo citado por los autores se alcanza un valor de w de 0,057, menor que el calculado, justificando la adopción de la ecuación 5 como representativa.

Respecto al tercer apartado, si el incumplimiento de la hipótesis cinemática es el detonante, podría pensarse, bajo el esquema del HUI Geomorfológico, en optimizar o "calibrar" la velocidad del pico V de las ecuaciones 1 y 2.

Valiéndose de la ecuación 10 y obteniendo Π_i para las condiciones geomorfológicas de la subcuenca Ludueña, puede demostrarse que:

$$Q_p = 0,157 i_r \cdot A \cdot t_r \cdot V \cdot [1 - 0,039 V t_r] \quad (13)$$

Aplicando la resolvente a la expresión 13, cuadrática en V , bajo los parámetros del evento máximo de los registrados (28.02.84) la velocidad del pico es de 0,046 m/s, y para la tormenta del 15.03.84, $V = 0,073$ m/s.

Estos serían los valores de velocidad que debería colocarse en las expresiones para que los caudales sean representativos. Puede concluirse que son muy pequeños para tratarse como velocidades de pico en el curso principal, hecho que refleja la disparidad entre modelo y prototipo.

Conclusiones

Existe un importante grado de desfase entre la estimación de la respuesta hidrológica mediante el HUIGC y la respuesta del sistema real. Se piensa que existe una importante fuente de atenuación en el prototipo, causada por efectos de diversa génesis.

En primer término puede partirse de condicionamientos geomorfológicos que afectan la organización y las formas del flujo. Como se adelantara al comienzo del trabajo, la escasa pendiente remarca las influencias atenuadoras de las retenciones superficiales, los "cursos" de agua se "dispersan", se "des-encauzan", los aportes se dan lentamente. Estas bajas velocidades del flujo mantiforme, dan tiempo suficiente al aporte de áreas alejadas del cauce, contradiciendo la propuesta de que las áreas que alcanzan a aportar en el tiempo de la crecida son solamente las contiguas al curso, tal

como lo expresa el concepto de áreas parciales (Betson, 1964).

En segundo lugar, la red de drenaje no es el reflejo del clima, sino que se ve intervenida antrópicamente, labrada mediante canalizaciones u obstruida mediante obras de arte.

Por estas razones existe un importante grado de apartamiento, estimativamente cuantificado, entre la realidad y las hipótesis establecidas en el planteo de las ecuaciones básicas del modelo, de acuerdo a lo señalado en el ítem precedente. La teoría geomorfoclimática, fundamentalmente, está concebida para representar otro tipo de redes, pretender adecuarla a las estudiadas implicaría su reconstrucción.

Referencias

- Betson, R. P. 1964. What is watershed runoff?. *J. Geophys. Res.*, 69(8): 1541-52.
- Caamaño Nelli, G. y Dasso, C. 1983. Verificación y Comparación de Hidrogramas Unitarios Instantáneos de Base Geomorfológica. *XI Congreso Nacional de Hidráulica*; Córdoba.
- Caamaño Nelli, G. y Zimmermann, E. 1990. Tipología de los Sistemas Hidrológicos Superficiales; *XVI Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geodestas y Geofísicos*, Bahía Blanca.
- Rodríguez Iturbe, I. y Valdés, J. 1979; 'The Geomorphologic Structure of Hydrologic Response. *Water Resources Research*, Vol.15; No.6; pp 1409-1420.
- Rodríguez Iturbe, I., Devoto, G. y Valdés, J. 1979. Discharge Response Analysis and Hydrologic Similarity: The Interrelation Between the Geomorphologic IUH and the Storm Characteristics. *Water Resources Research*. Vol.15; No.6; pp 1435-1444.
- Rodríguez Iturbe, I., González, M y Bras, R. 1981. *Una Teoría Geomorfoclimática del Hidrograma Unitario Instantáneo*. Programa de Postgrado en Hidrología y Recursos Hídricos, Universidad Simón Bolívar; Caracas; Venezuela.
- Zimmermann, E. 1997. *Vinculación entre la Geomorfología y la Hidrología en Sistemas de avenamiento transicional*. Tesis doctoral. FCEFyN. UNC.