

Análisis de la Modificación en la Respuesta Hidrológica del Sistema del Arroyo Ludueña Provocada por Cambios en el Uso del Suelo

Erik D. Zimmermann Pedro A. Basile Gerardo A. Riccardi
Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - UNR.
Riobamba 245 bis - 2000 Rosario.

Resumen

En la década del '70 cambian las condiciones del uso del suelo en la cuenca del arroyo Ludueña, pasando de una economía basada sustancialmente en la ganadería a una agricultura extensiva (soja, trigo, maíz y forrajes). Esto implicó modificaciones considerables en la hidrología superficial de la cuenca.

A los efectos de evaluar tales modificaciones, en este trabajo se ha utilizado información pluviográfica y limnigráfica relevada en tres períodos (1969-1971, 1982-1984, 1994-1996). La información relevada cubre los diferentes procesos de cambios en el uso del suelo que se fueron verificando históricamente en el sistema.

Mediante la aplicación del método del SCS se estimaron los hietogramas netos (HN) de los eventos seleccionados y los correspondientes hidrogramas de escurrimiento directo (HED), en la sección de avenida de Circunvalación, se determinaron utilizando el método de Barnes.

La evolución de los tiempos de respuesta hidrológica, para los tres períodos mencionados previamente, se evaluaron a partir del tiempo de concentración. Dicho tiempo fue estimado en base a los HED.

Para el análisis de sistemas complejos como el estudiado, la respuesta hidrológica del sistema puede ser caracterizada a través de la función de transformación o transferencia que vincula los HN con los HED.

Teniendo presente que todo cambio que el sistema experimente va a estar reflejado en los parámetros que caracterizan dicha función de transferencia ó hidrograma unitario (HU), es importante determinar, a los fines de este estudio, los HU característicos de cada período. Los mismos se obtuvieron a partir de un proceso de deconvolución utilizando un algoritmo matricial, robusto y eficiente, basado en el método de mínimos cuadrados suavizado con restricciones.

Los resultados demuestran una reducción paulatina del tiempo de concentración del sistema hidrológico analizado. Los cambios en la función de transferencia (HU) evidencian los mismos comportamientos.

Introducción

Los sistemas hidrológicos (cuencas) emplazadas en llanuras son especialmente sensibles a los cambios artificiales. Puede deducirse que el efecto que provoca un terraplén de una ruta o del ferrocarril es comparable al que produce un dique de kilómetros de extensión en una cuenca emplazada en zonas de montaña, advirtiéndose la trascendencia de modificaciones aparentemente triviales como lo son los surcos de arado (Caamaño Nelli y Zimmermann, 1990). Como consecuencia de la baja pendiente de las áreas llanas (del orden de 50 cm/km, o menos) un desnivel de un metro

significa una barrera infranqueable desde el punto de vista hidrológico, que altera el escurrimiento natural de las aguas, acumulándolas.

La actividad económica del sector agrícola se ha modificado considerablemente en los últimos 35 años, en cuanto a formas de trabajo de la tierra y producción. Bajo el marco latinoamericano (agroexportador por excelencia) el producto bruto agrícola ha aumentado 2,5 veces en ese período y los recursos provenientes de ello proveen casi la mitad del financiamiento de los insumos importados.

Este crecimiento expansivo de la agricultura en Latinoamérica se ha realizado a costa del deterioro por sobrexplotación de los recursos naturales, especialmente en los minifundios, afectados por la mecanización y la artificialización en la producción. El uso de fertilizantes se incrementó a razón del 13,8% anual (CEPAL/FAO, 1976).

En el ámbito de la Argentina la agricultura química ha avanzado rápidamente. Los procesos de devastación, inducidos por ello, se ocultan merced a la gran disponibilidad de tierras que tiene el país. La llamada "desganaderización" protagonizada por la revolución agrícola pampeana que tuvo lugar a partir de los años '70, ha provocado procesos de desertificación en la pampa húmeda.

Se ha perdido lo que representaba una especie de agricultura orgánica al destinar el suelo para la producción exclusiva de granos, evolucionando hacia el monocultivo y eliminando la rotación de cultivos con pasturas para la ganadería.

Esta desganaderización ha provocado la aparición de plagas y enfermedades que incrementaron el uso de pesticidas y el consiguiente aumento de contaminación ambiental que afecta a animales y al hombre (Ruscio, 1990). Sin embargo persisten presiones económicas que obligan al productor agropecuario para que obtenga el máximo beneficio y en el menor tiempo posible. Los agricultores son empujados hacia una agricultura intensiva, donde el suelo paga las consecuencias con su degradación, con o sin el uso de fertilizantes. Esta degradación se traduce en erosión de suelos (el problema más grave de la agricultura latinoamericana) y el consecuente proceso de sedimentación de los cursos de agua.

Obviamente, éstos procesos destructivos en el medio ambiente, irreversibles en gran parte, será un legado a las generaciones futuras, provocado por apetitos inmediatos.

En lo que atañe al proceso de inundación, el excesivo laboreo y la erosión provocada se traduce en la formación de costras en la superficie del suelo que impiden la infiltración de las lluvias por impermeabilización. El agua escurre por la superficie, lavando los nutrientes del suelo, erosionando, dejando a la vista los horizontes más pobres en materia orgánica (de ahí la necesidad de incorporarla artificialmente) y contribuyendo al consecuente anegamiento. El agua que no se incorpora a la estructura del suelo no sólo se inutiliza desde el punto de vista agrícola sino que es la que provoca procesos de inundación.

La cuenca del A° Ludueña

En la década del '70 cambian las condiciones de uso del suelo en la cuenca del arroyo Ludueña, pasando de una economía basada en la explotación ganadera a una agricultura extensiva (soja, maíz, etc.). Tal situación afectó la hidrología superficial de la cuenca.

La cuenca fue objeto de recientes estudios hidrológicos, con fines de investigación, encarados por el Departamento de Hidráulica e Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y

Agrimensura (Rosario). Para la concreción de los mismos se contó con aforos de caudales, fajas limnigráficas en soporte magnético y en papel, registrados en el cruce del arroyo con la avenida de Circunvalación para tres períodos: años 1969-1971, 1982-1984 y 1994-1996. Asimismo, se contó con los registros pluviográficos de las diferentes estaciones de medición que posee la cuenca. Esto constituye una valiosa información para evaluar el comportamiento del sistema ante los cambios del uso del suelo.

Análisis de los cambios en la velocidad de respuesta del sistema

De la observación directa de los registros de aforos pudo demostrarse una disminución marcada de los tiempos de concentración (Tabla 1) que acompañó al proceso de desganaderización. El tiempo de concentración se relaciona con la rapidez con que llegan los aportes de lluvias, ubicados en las partes más alejadas de la cuenca y es objetivamente estimable con los datos disponibles.

Período 1969-1971		Período 1982-1984		Período 1994-1996	
Tormenta	T_c (hs)	Tormenta	T_c (hs)	Tormenta	T_c (hs)
26/11/69	126	09/11/83	104	17/03/94	80
04/02/70	126	15/03/84	96	05/04/94	109
15/03/70	92	22/02/84	98	01/05/94	94
27/09/70	84			08/05/94	87
01/10/70	104			20/06/94	120
30/10/70	120			26/10/94	79
27/12/70	114				
12/03/71	122				
Promedio:	111 hs	Promedio:	99 hs	Promedio:	94.8 hs
Desvío:	±16 hs	Desvío:	±4 hs	Desvío:	±16.5 hs

Tabla 1: Variación de los tiempos de concentración T_c.

Comparando los dos primeros períodos, la Tabla 1 pone en evidencia una disminución del 11% en los tiempos de llegada de los aportes más alejados. Mientras que comparando el primer período con el último, esta disminución alcanza el 15%.

El cultivo en surcos a favor de la pendiente topográfica, la mayor parcelación y el consiguiente aumento de la densidad de caminos secundarios y rurales con sus respectivas cunetas son elementos que contribuyeron para acelerar el escurrimiento superficial provocando rápidos picos de caudales.

Análisis del proceso de impermeabilización del sistema

Las recientes deducciones se han realizado partiendo del análisis de la información aforimétrica extraída en forma directa. También pueden comprobarse algunas conclusiones adicionales, acerca del comportamiento del sistema, mediante metodologías indirectas. Como ejemplo válido se ha intentado pronosticar el número de curva (CN) del método del Servicio de Conservación de Suelos de EE.UU mediante ecuaciones que contemplan la intensidad máxima horaria de la tormenta (INTMAX) y un índice de precipitación antecedente (IPA) estimado según la expresión siguiente:

$$IPA(d) = IPA(d-n)k^n + P(d)$$

donde $P(d)$ es la precipitación caída el día d , $IPA(d-n)$ representa el índice de precipitación antecedente correspondiente a la tormenta ocurrida con n días de anticipación y k el coeficiente de abatimiento que representa la extracción de humedad del perfil por efecto de la evapotranspiración. Al valor de k se le asignó una variación cosenoidal, variando entre 0,86 (invierno) y 0,94 (verano).

El CN es un parámetro que varía entre 0 y 100 y se relaciona con el porcentaje de escorrentía para una lluvia dada (la porción de la lluvia que escurre hacia la salida) y depende del tipo de suelo, cobertura vegetal y morfología de la cuenca junto con el grado de humedad previo a la tormenta analizada.

En las ecuaciones utilizadas para las correlaciones, la variable $INTMAX$ representa las características de la tormenta y el IPA las condiciones de humedad precedentes (Zimmermann et al., 1990).

Las ecuaciones que mejor representan las características de la cuenca para los períodos analizados son:

$$CN = 38.5 + IPA^{0.83} + \frac{187.4}{INTMAX} \quad \text{para el período 1969-1971}$$

$$CN = 44.6 + IPA^{0.56} + \frac{157.4}{INTMAX} \quad \text{para el período 1982-1984}$$

$$CN = 67.4 + IPA^{0.36} + \frac{92.8}{INTMAX} \quad \text{para el período 1994-1996}$$

Estas ecuaciones fueron ajustadas con los datos observados de escurrimiento para un conjunto de tormentas registradas en los tres períodos.

La estimación del porcentaje de escurrimiento para los períodos involucra ecuaciones con distintos coeficientes lo que pone en evidencia que el comportamiento del sistema ha sido afectado por los cambios introducidos en el uso de la tierra.

En segundo lugar, el exponente de la variable IPA fue decayendo desde un valor de 0,82 en los comienzos de los '70 hasta un valor de 0,36 a mediados de los '90 indicando una menor dependencia del volumen de escurrimiento con las condiciones antecedentes del sistema, evidenciando una impermeabilización.

Luego, que el coeficiente de la variable $INTMAX$ sea mayor en los '80 indica que el escurrimiento de la cuenca es más sensible que antes a las características de la tormenta, lo cual es otro síntoma de impermeabilización.

La ecuación ajustada para los '90, si bien presenta un valor inferior del coeficiente, se inicia con un término constante sustancialmente mayor. Esto último indica que las tormentas más recientes, aún cuando las condiciones de humedad sean de extrema sequedad, parten con un valor inicial de CN superior al correspondiente de los períodos anteriores, dando la pauta de un grado de impermeabilización creciente.

El mayor laboreo de la tierra, con la consecuente formación del pie de arado, son factores que contribuyeron a favor de una mayor impermeabilidad de los suelos, disminuyendo los montos de infiltración.

En la Tabla 2 se presentan los valores del porcentaje de precipitación que escurre, pronosticados con las tres ecuaciones, bajo distintas intensidades y estados previos de humedad y considerando una tormenta ficticia de una hora de duración.

		Intensidad de la lluvia								
		Baja 10 mm/h			Media 25 mm/h			Alta 50 mm/h		
		Ec. '70	Ec. '80	Ec. '90	Ec. '70	Ec. '80	Ec. '90	Ec. '70	Ec. '80	Ec. '90
Condición anterior	Baja 5 mm	0%	0%	0%	0%	0%	1.5%	0%	0%	12.9%
	Media 20 mm	0%	0%	0%	0%	0%	2.2%	0%	0.2%	14.4%
	Alta 40 mm	0%	0%	0%	0%	0%	2.7%	5.3%	0.8%	15.6%

Tabla 2: Porcentaje de lluvia que escurre. Duración: 1 hora.

Deducción de la función de transferencia del sistema para cada período

Continuando con el análisis, se determinaron los hidrogramas unitarios (HU) característicos para cada período. Los mismos fueron obtenidos a partir de los hidrogramas de escurrimiento directo (HED) y de los correspondientes hietogramas netos (HN) para cada tormenta.

Los HN se determinaron utilizando el método del Servicio de Conservación de Suelos de EE.UU y los HED se determinaron aplicando el método de Barnes (Chow et al., 1994; Orsolini et al., 2000).

Para cada tormenta analizada, el proceso de deconvolución se efectuó mediante el programa computacional HIDUNI-MCS desarrollado en lenguaje Fortran (Basile, 1999). Dicho programa resuelve el conjunto completo de ecuaciones mediante un algoritmo matricial, robusto y eficiente, basado en el método de mínimos cuadrados suavizados con restricciones (Hoerl et al., 1970; Kuchment, 1967; Dooge, 1984).

En las Figuras 1, 2 y 3 se presentan los HU promedios, de 2 horas de duración, determinados para los períodos 1969-1971, 1982-1984 y 1994-1996 respectivamente.

En la Tabla 3 se presentan los parámetros característicos de los distintos HU para cada período. Tales parámetros muestran algunas diferencias. En particular, se observa una ligera disminución del tiempo al pico T_p en los dos últimos períodos. Mientras que el caudal pico U_p y el tiempo de base T_b se mantienen en torno a un valor medio de $4.08 \text{ m}^3/\text{s}.\text{mm}$ y 88 hs respectivamente.

Período	U_p ($\text{m}^3/\text{s}.\text{mm}$)	T_p (hs)	T_b (hs)
1969 – 1971	4.22	20	86

1982 – 1984	3.94	16	94
1994 – 1996	4.07	17	84

Tabla 3: Parámetros característicos de los HU.

Si bien el caudal pico del HU no muestra sustanciales cambios, esto no implica que la respuesta de la cuenca no aumente en lo que respecta a volúmenes y caudales. En efecto, ante una precipitación de similar magnitud en dos períodos diferentes y con similares condiciones antecedentes, una disminución de la infiltración en uno de los períodos conlleva a un aumento no solo de volumen sino también de intensidades del HN. Esto se traducirá, a través de la convolución con una dada función de transferencia, en hidrogramas de mayores caudales y también mayores volúmenes.

Por otra parte, si se comparan las ramas ascendentes de los HU se observa que la correspondiente al período 1994-1996 muestra una pendiente ligeramente superior respecto a las de los restantes períodos. Tal comportamiento está indicando un aumento en la velocidad de respuesta del sistema, ya evidenciado, por otra parte, a través de la reducción del tiempo de concentración y del tiempo al pico, como se mencionara precedentemente.

Conclusiones

El presente trabajo ofrece un breve panorama acerca de las consecuencias inmediatas, que en los procesos de inundación, tienen factores antrópicos como el cambio en el uso del suelo de la cuenca.

Se ha comprobado una modificación en el comportamiento hidrológico de la cuenca del A° Ludueña en el transcurso de los años '70, '80 y '90. En el primer período (1969-1971), donde el uso predominante de la tierra se correspondía con una economía pastoril, la respuesta hidrológica de la cuenca es más amortiguada, hay una mayor infiltración, con coeficientes de escorrentía menores. Además, las condiciones precedentes de humedad influyen con mayor peso en las salidas del sistema real, en otras palabras, como si éste fuese más "memorioso", teniendo presente los eventos antecedentes para evaluar la respuesta.

En el segundo y tercer período, las condiciones del uso del suelo han variado considerablemente, se produce una gran expansión agrícola en la década del '70 (predominantemente, soja), aumentando el laboreo del suelo, con una mayor densificación de las vías de comunicación rurales. Se alteran las condiciones de escurrimiento del sistema: hay una mayor impermeabilidad, con coeficientes de escurrimiento mayores que en el período 1969-1971. Como se mencionó anteriormente, el peso de la variable *IPA* (condición antecedente) es menor, lo que determina un sistema con menor memoria, y el de la variable intensidad máxima de la tormenta fue mayor. Entonces, la respuesta del prototipo depende más de las características de ésta última que de la condición de estado inicial, en comparación con el período anterior, lo que constituye una forma de comprobar el proceso de impermeabilización progresivo sufrido por la cuenca.

A manera de ejemplo se han mostrado las modificaciones en el comportamiento hidrológico del arroyo Ludueña como consecuencia de la desganaderización encarada durante los años '70. Este proceso de degradación del recurso suelo es irreparable, lo que la naturaleza demora milenios en construir el hombre lo destruye rápidamente, ocasionando serias dificultades en ámbitos urbanos, como las consecuentes inundaciones. Se debería contemplar, en primer lugar, una política diferente de explotación de los recursos suelo y agua, introduciendo la variable ambiental en los análisis de producción. En este sentido resulta conveniente revertir el régimen de monocultivo y la consecuente dependencia con los agroquímicos, implementar las prácticas conservacionistas, lograr una eficiente incorporación del agua en el suelo.

En segundo término, para tener en cuenta las modificaciones de la calidad del medio ambiente que generen las acciones del hombre, deben realizarse las evaluaciones de impacto ambiental correspondientes. Aquí hay que invertir para mejorar la información disponible y generar nuevos datos, elevando su calidad científica y empleando técnicas de manejo de incertidumbre. Además, para poder identificar en forma consistente los cambios que se han verificado en la respuesta hidrológica de la cuenca del arroyo Ludueña sería necesario contar información hidrológica estadísticamente relevante.

Se debe resaltar la importancia de la modelación matemática de los sistemas reales, como herramienta imprescindible para poder cuantificar los cambios inducidos por acciones del hombre, sus efectos y la posible modificación de la calidad ambiental. Los estudios probabilísticos sobre los registros de caudales de períodos anteriores al actual no reflejan los cambios que se verifican en el uso del suelo (aumento del grado de urbanización, por ej.) y la única manera de contemplarlos es a través de los modelos matemáticos. Por otra parte surge la necesidad de emplearlos para efectuar el pronóstico de inundaciones a tiempo real para anticipar los desbordes y dar las alarmas para las respectivas evacuaciones. En este caso es necesario contar con sistemas de monitoreo automático de variables hidrometeorológicas en la cuenca.

Referencias

- Basile, P.A. (1999). "Programa computacional HIDUNI-MCS". Informe interno. Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. FCEIA. UNR.
- Caamaño Nelli, G. y Zimmermann, E.D. (1990). "Tipología de los sistemas hidrológicos superficiales". XVI Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas. Bahía Blanca.
- CEPAL-FAO (1976). "Perspectivas del consumo y la producción de fertilizantes en América Latina". IV Conferencia Regional de la FAO para la América Latina y Conferencia Latinoamericana CEPAL/FAO de la Alimentación. Lima.
- Chow, V.T.; Maidment, D.R. y Mays, L.W (1994). "Hidrología Aplicada". ISBN 958-600-171-7. McGraw Hill Interamericana, S.A..
- Dooge, J.C.I. (1984). "Unit hydrograph concepts and methods". Vol. 2. Lecture papers on the International Post-Graduate Course in Hydrology. University of Padua. Italy.
- Hoerl, A.E. y Kennard, R.W. (1970) "Ridge regression, biased estimation for nonorthogonal problems". Technometrics. Vol. 12, N 1, pp. 55-67.
- Kuchment, L.S. (1967). "Solution of inverse problems for linear flow models". Soviet hydrology-selected papers. Vol. 2, pp.194-199.
- Orsolini, H.E.; Zimmermann, E.D. y Basile, P.A. (2000). "Hidrología: Procesos y Métodos". ISBN 950-673-254-4. UNR Editora. Editorial de la Universidad Nacional de Rosario.
- Ruscio, A. (1990). "Hacia el desierto pampeano". Reportaje realizado a G. Gallo Mendoza (FAO). Suplemento Verde de Pagina 12. Dic. 1990.
- Zimmermann, E.D. y Caamaño Nelli, G. (1990). "Estimación del coeficiente CN (SCS) a partir de información pluviográfica en la cuenca del arroyo Ludueña". XIV Congreso Nacional del Agua. Córdoba.

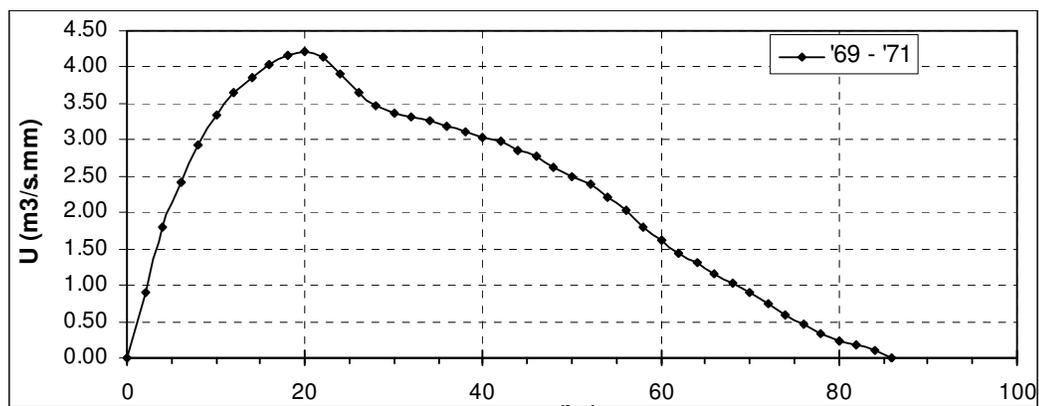


Figura 1: Hidrograma unitario correspondiente al período 1969-1971.

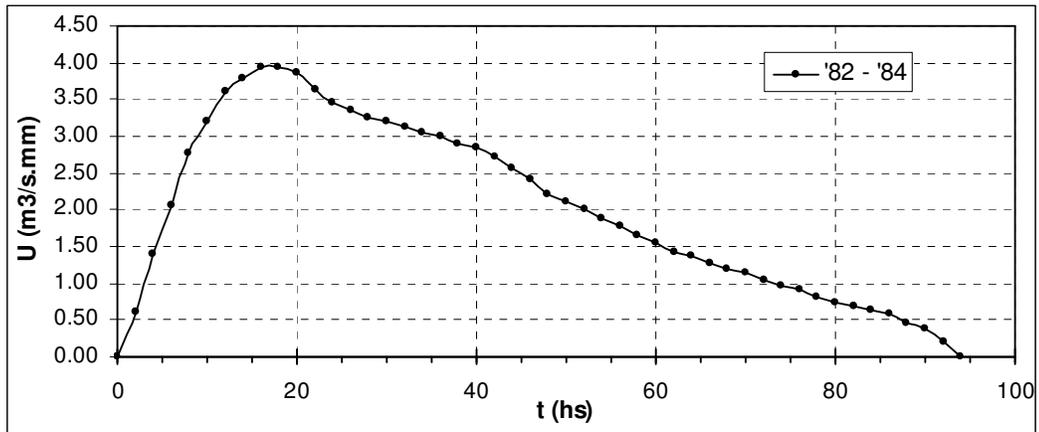


Figura 2: Hidrograma unitario correspondiente al período 1982-1984.

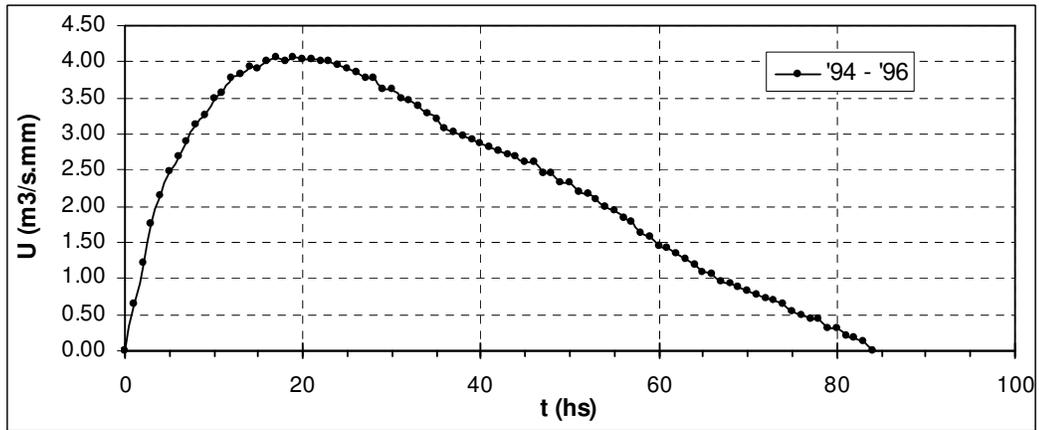


Figura 3: Hidrograma unitario correspondiente al período 1994-1996.