

INTEGRACION DE MODELOS HIDROLÓGICOS – SIG COMO BASE PARA LA EVALUACION DE DISPONIBILIDADES HIDRICAS EN CUENCAS CON DATOS ESCASOS

Rosana Hämmerly, Ricardo Giacosa y Carlos Paoli

Universidad Nacional del Litoral - Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
Ciudad Univ. C.C.217 - 3000 Santa Fe (Arg.) – Tel: 54-342-4575224 (149) – Fax 54-342-4575224
e-mail: rhammer@fich1.unl.edu.ar

RESUMEN

El presente trabajo fue desarrollado en el marco del proyecto de investigación “Modelos Integrados para la Gestión de los Recursos Hídricos de una Cuenca”, dentro del cual uno de los objetivos perseguidos es adaptar y aplicar herramientas de modelación fácilmente accesibles y aptas para el caso de escasez de información.

Se utilizó como caso de estudio la modelación de la cuenca El Obispo (361 km²), Pcia. de Entre Ríos, puesto que interesa la determinación de las disponibilidades hídricas superficiales a efectos de evaluar en una etapa posterior, su uso con fines de riego y extender la metodología a cuencas similares. Se empleó como información base curvas de nivel, información de suelo y climática regional y un breve período de mediciones lluvia – escorrentía.

Para ello se generó un modelo digital del terreno (MDT), con el cual se llevaron a cabo las etapas de pre-procesamiento del terreno y procesamiento hidrológico, mediante el programa Arc View 3.2, que sirvió de base para la aplicación del modelo hidrológico HEC-HMS (Hydrologic Modeling System).

Se presentan los resultados obtenidos de la modelación, para un período de 90 días, los cuales presentan un buen ajuste con los hidrogramas registrados en la salida de la cuenca y las conclusiones respecto a la metodología y herramientas utilizadas.

Palabras clave: Modelación Hidrológica, SIG.

INTRODUCCIÓN

Para lograr el desarrollo regional se requiere un acabado conocimiento de las disponibilidades hídricas, que permitirán realizar un adecuado manejo de las mismas conjuntamente con otros recursos naturales y lograr así una planificación integral y más conveniente.

Un problema habitual que se presenta en cuencas de aportes medianas y pequeñas, es la no disponibilidad de registros sistemáticos del escurrimiento superficial en base a los cuales determinar la oferta del recurso disponible. Una de las formas de salvar este inconveniente es reproducir series de caudales a partir de series históricas de lluvias con la ayuda de un modelo de transformación lluvia –caudal trabajando en modo continuo.

Para que este tipo de trabajo resulte aplicable regionalmente es necesario lograr un cierto ajuste o calibración de la transformación lluvia – caudal en base a las características hidrológicas del área de aportes y de algunos datos medidos, aunque sean escasos.

Se requiere la determinación de parámetros hidrológicos que pueden ser obtenidos mediante técnicas computacionales que automatizan y agilizan las tareas de procesamiento del terreno y además facilitan la obtención de dichos parámetros para situaciones con escasez de datos y carencia de alguna otra información como la red de drenaje, pendiente del terreno, etc.

Los objetivos específicos de este trabajo se han conseguido mediante una adaptación e integración de metodología SIG con modelos hidrológicos para la estimación de los caudales en una cuenca. El ámbito de trabajo es la cuenca del arroyo El Obispo, ubicado en el centro de la provincia de Entre Ríos (República Argentina), donde se han implementado dos estaciones hidrométricas y pluviométricas para validar los resultados.

METODOLOGÍA

Los SIG son herramientas que permiten representar explícitamente la variabilidad espacial de las características físicas de una cuenca y de las variables hidrológicas, en tal sentido se han aprovechado sus potencialidades mediante la utilización del SIG ArcView 3.2, con sus extensiones Spatial Analyst y 3D (ESRI, 1996), integrándolo, mediante la interfase geoespacial Hec-GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modeling System Extension) desarrollada por U.S. Army Corps of Engineers Civils - Hydrologic Engineering Center (USACE (a), 2000), con el modelo hidrológico HEC-HMS (USACE (b), 2000) para obtener el hidrograma requerido.

A partir de la digitalización de las curvas de nivel de la zona de interés se confeccionó un Modelo Digital del Terreno (MDT) con el cual mediante el software Arc View v.3.2 y la interfase geoespacial Hec-Geo HMS, se realizó un procesamiento obteniéndose el trazado de la red de drenaje, la delimitación de la cuenca y subcuencas y extracción de características de cursos y cuencas (longitudes y pendientes de ríos, centroides de subcuencas, direcciones de flujos, etc.) como así también el esquema topológico que representa el comportamiento del sistema físico de la cuenca. Toda esta información es importada desde el HEC – HMS facilitando y agilizando la tarea de modelación.

HEC – HMS es un software utilizado para modelar los procesos de precipitación-escorrentía en una cuenca o región. Resulta un programa muy flexible que permite al usuario la selección de diferentes métodos para el cálculo de pérdidas, cálculo de hidrogramas, flujo base y propagación en cauces. Permite realizar simulaciones de los procesos hidrológicos a nivel de eventos o en forma continua, es decir considerar los procesos ocurridos durante la precipitación y también los desarrollados en períodos sin lluvia. Este modelo puede utilizar información geoespacial derivada de un SIG pero no depende de ella para su ejecución.

El HEC – HMS está constituido por tres componentes: *i)* un Modelo de Cuenca, que contienen los parámetros de los distintos elementos hidrológicos y su conectividad, *ii)* un Modelo Meteorológico que reúne la información de la precipitación, y finalmente *iii)* las Especificaciones de Control que identifican el inicio y fin de la simulación y el intervalo de tiempo de los cálculos.

El hidrograma resultante de la modelación fue contrastado con los valores medidos y optimizado por el método de error medio cuadrático ponderado por los caudales al pico.

APLICACIÓN

Características Generales e Información Disponible

El sitio de estudio es la cuenca del arroyo El Obispo de 361 km², la cual pertenece a la cuenca del Río Gualeguay y se encuentra emplazada en el área central del Departamento de Rosario del Tala en la provincia de Entre Ríos. Las localidades más próximas son Maciá, Lucas González, Gobernador Solá y Rosario del Tala. En la Figura 1 se observa la ubicación geográfica de la misma.

La red de drenaje es jerarquizada con sentido de drenaje Oeste-Este. El régimen de escorrentía es de tipo intermitente y muy variable, estando asociado al régimen de precipitaciones locales. El relieve es de tipo ondulado con cotas topográficas entre 32 y 86 m. IGM en una longitud de 30 km.

Los suelos de las regiones altas de la cuenca pertenecen a la serie El Triángulo correspondiendo a zonas de peniplanicie ondulada y con un horizonte superior arcilloso. En las franjas ribereñas al curso principal y principales afluentes prevalecen suelos que pertenecen a la serie La Lidia y La Emiliana con paisaje suavemente ondulado y susceptible a la erosión. La vegetación corresponde al tipo de pradera, con isletas de montes (INTA, 1995).



Figura 1. Localización geográfica de la Cuenca del arroyo El Obispo (Entre Ríos, Arg.)

La información pluviométrica existente corresponde a cuatro estaciones cercanas a la cuenca con períodos de registros comprendidos entre 1956 y 1999 con algunos años faltantes y se encuentra recopilada en la Dirección de Hidráulica de la provincia de Entre Ríos. Además existen registros pluviográficos a partir de 1982 hasta el presente en la estación meteorológica de Lucas González, localizada en la parte alta de la cuenca.

Con la finalidad de contar con mayor información de la distribución de la precipitación y los caudales de salida de la cuenca para realizar la calibración del modelo, a partir de junio de 2001 se implementaron dos nuevas estaciones pluviométricas dentro de la cuenca, junto con la instalación de dos limnígrafos a presión con sus correspondientes escalas. El limnígrafo aguas arriba fue localizado en la intersección del arroyo con un camino provincial que une las localidades de Macia con Gobernador Sola, denominada “Sección 1”; el de la sección aguas abajo, se ubicó en la cruce del arroyo y la ruta provincial N° 6 denominándose “Sección 2” y coincidente con la sección de control. Este último ha registrado satisfactoriamente durante el período comprendido entre el 28 de Agosto y el 1 de Diciembre de 2002, aunque el período de operación fue mayor.

Se realizaron varios aforos en ambas secciones del arroyo El Obispo, los que sirvieron de base para la confección de las respectivas curvas H-Q. Los limnigramas registrados han sido transformados en hidrogramas mediante sus correspondientes curvas H-Q. La ubicación de las secciones se muestra en la Figura 2.

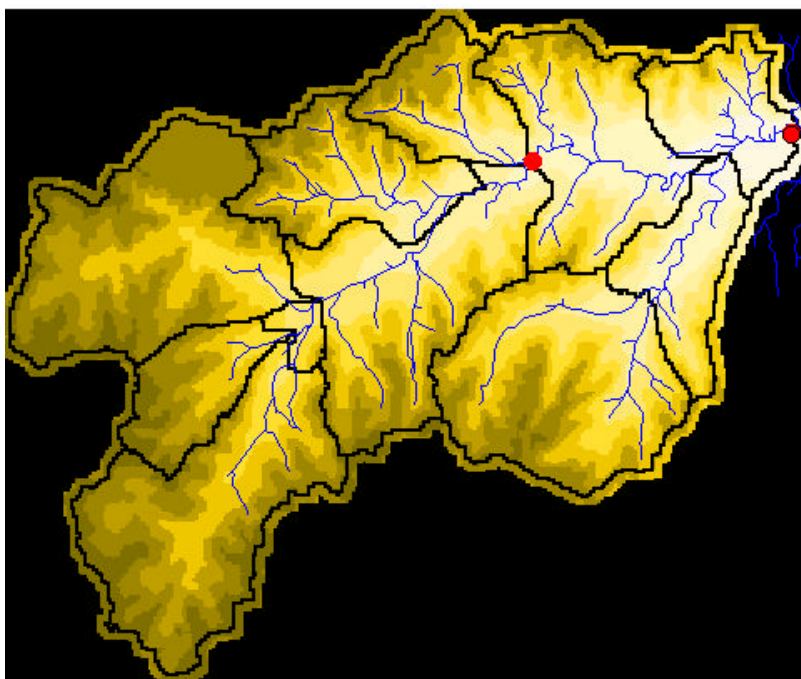


Figura 2. Ubicación de las estaciones de aforo

La Figura 3 presenta las curvas de descargas en las mencionadas secciones. En la “Sección 2” el máximo caudal aforado fue de $80 \text{ m}^3/\text{seg}$ para un $h = 3.45 \text{ m}$, en tanto el máximo valor registrado en el período de medición fue para una altura $h = 4.22 \text{ m}$ correspondiéndole un caudal $Q = 121 \text{ m}^3/\text{seg}$.

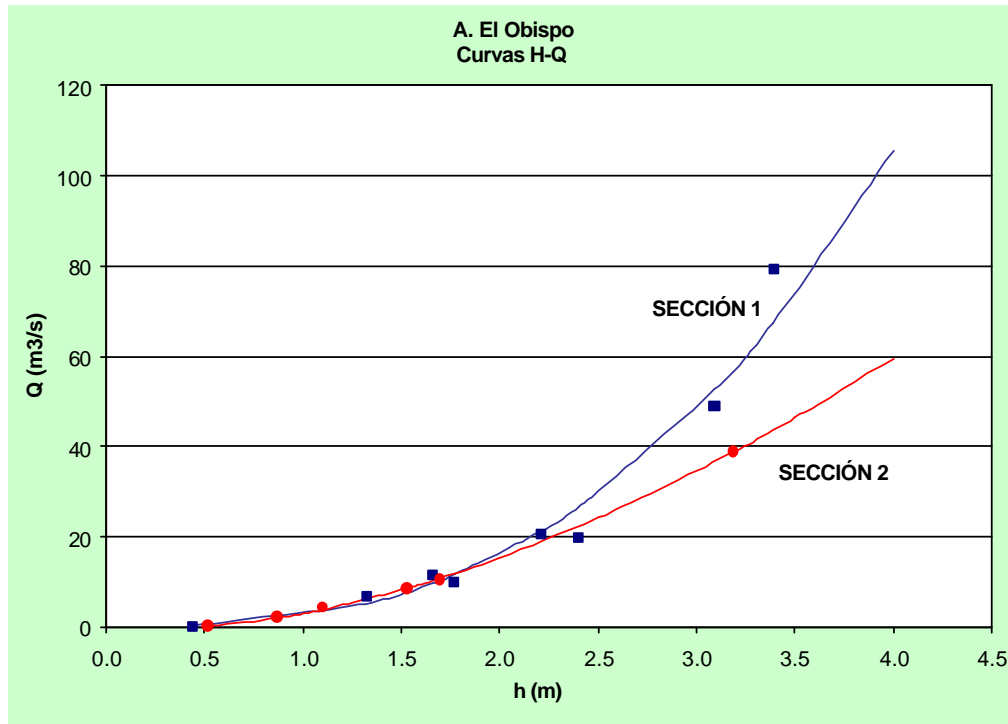


Figura 3. Curvas de descargas

La información topográfica disponible ha sido preparada en ambiente SIG a partir de la digitalización de cartas topográficas del IGM en escala 1:50.000, con curvas de nivel de equidistancia 1.25 m. y generación posterior del modelo digital del terreno (MDT). De acuerdo a Wang y. Yin (1998), la escala utilizada resulta conveniente para la extracción de los parámetros hidrológicos y de gradientes y la generación automática de la red de drenaje mediante SIG.

El mapa de la red de drenaje se ha digitalizado a partir de las cartas topográficas y análisis visual de fotografías aéreas e imágenes de satélite.

Obtención de los parámetros hidrológicos y las características de la cuenca con SIG

De acuerdo a lo que recomienda la bibliografía especializada para realizar modelación distribuida mediante SIG (Garbrecht, et al., 2001; Ogden et al., 2001; Olivera, F., 2001), se realizaron las siguientes tareas:

Generación de MDT: a partir de las curvas de nivel digitalizadas, las mismas fueron convertidas a un modelo TIN (Triangular Irregular Network) y luego a mallas regulares de 30 m de tamaño de celdas. Las mallas generadas corresponden a modelo Raster con formato GRID. La Figura 4 presenta el modelo digital del terreno de la cuenca del arroyo El Obispo junto con la red de drenaje digitalizada.

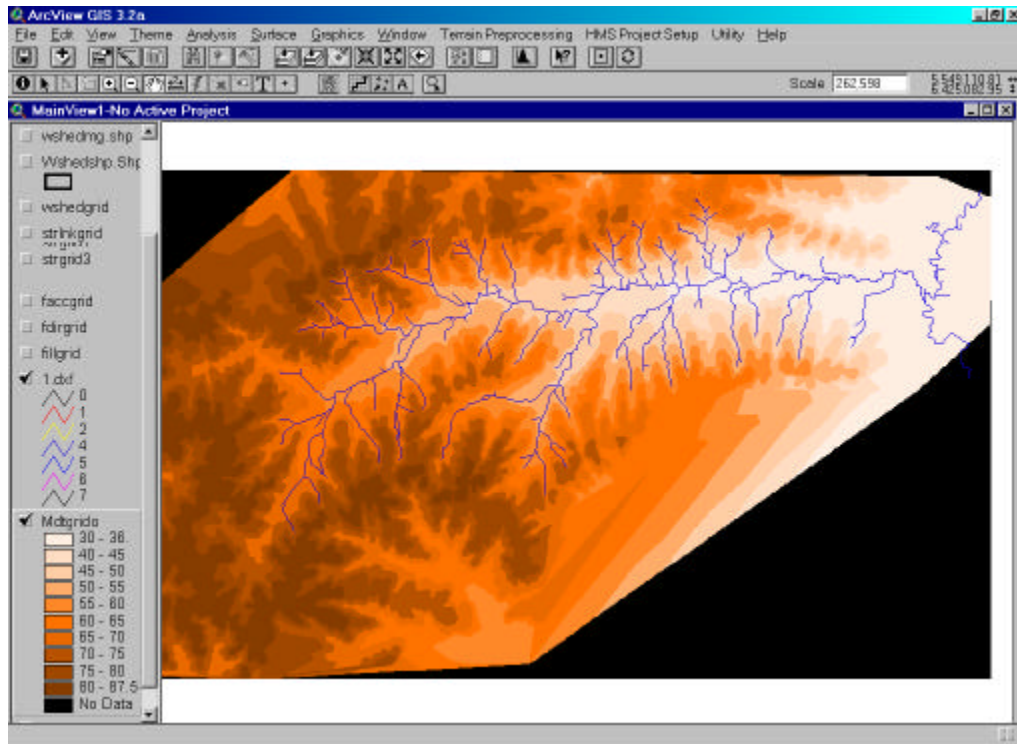


Figura 4. MDT y red hidrográfica

Obtenido el MDT se realizó el pre-procesamiento del terreno, que consiste en la determinaciones de: dirección de flujo, flujo acumulado, definición de cursos, segmentación de los cursos, hasta aquí todas las capas se almacenaron en formato raster. Luego de esta operación los datos se vectorizan, realizándose sucesivamente operaciones de procesamiento de polígonos, procesamiento de segmentos de cauces y agregación de subcuencas.

El próximo paso es la identificación del área de estudio de acuerdo a la ubicación del punto de salida (Figura 5), mediante la. De este modo se recorta de la zona de análisis el área efectiva de aporte, para la cual se realizará la determinación de las características físicas de cada subcuenca y los segmentos de cauces que conforman la red derivada.

Estas características físicas son requeridas en el modelo HEC-HMS y facilitan la estimación de varios parámetros hidrológicos. Mediante las características de cursos y subcuencas, se calculan las longitudes y pendientes de los ríos, los centroides de las subcuencas, los mayores recorridos del flujo y sus centroides. Este conjunto de datos es almacenado en una tabla de atributos, y puede ser fácilmente visualizada para futuros análisis y aplicaciones.

Finalmente en el procesamiento de HEC-GeoHMS se crean los archivos de entrada al Modelo HEC-HMS, Estos archivos incluyen un mapa de fondo con el contorno de la cuenca, el esquema topológico de la misma con la conectividad de sus elementos y un archivo con los parámetros para cada celda de la grilla.

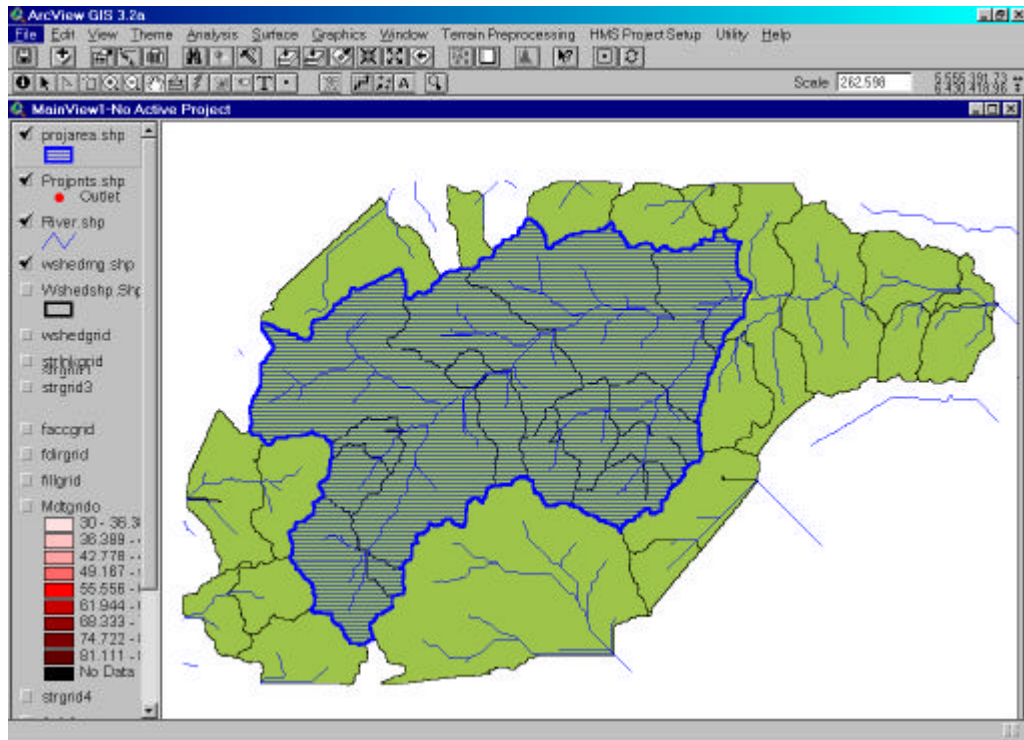


Figura 5. Delimitación de la cuenca de interés

La Figura 6 muestra la delimitación de las cuencas resultante de la modelación en SIG y el esquema topológico que será importado al HEC-HMS. Por su parte la Figura 7 presenta a modo de ejemplo, las tablas con los atributos de los parámetros hidrológicos determinados.

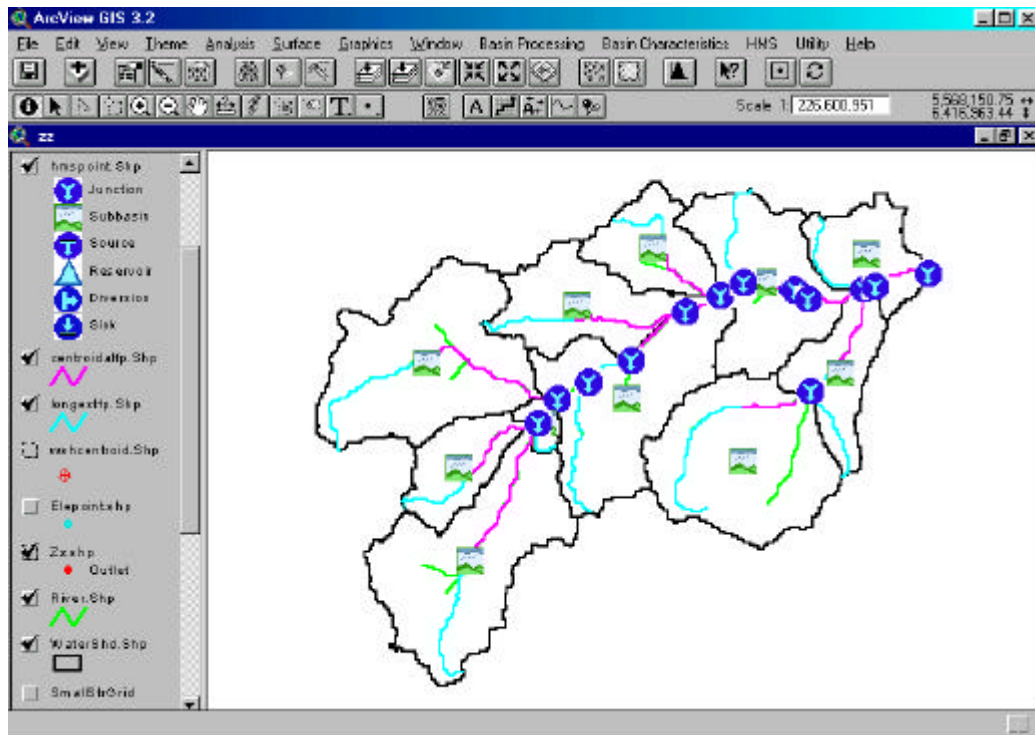


Figura 6. Esquema topológico

Attributes of WaterShd_Shp										
Shape	Id	Gridcode	Area	Wshld	TopoDane	Perimeter	Elevation	DSElv	Slp_EndFl	Slp_1085
Polygon	4	22	19339999.98	22	0	25400.00000	69.4497	50.0000	0.004	0.004
Polygon	5	28	21980000.00	28	0	28400.00000	50.3713	41.1629	0.004	0.003
Polygon	7	25	38382500.00	25	0	40900.00000	49.0305	43.7738	0.003	0.003
Polygon	29	57	26157500.00	57	0	33900.00000	65.0686	52.1663	0.003	0.003
Polygon	46	71	60022499.99	71	0	52400.00000	67.5000	58.7500	0.002	0.002
Polygon	60	75	55080000.00	75	0	56000.00000	60.6551	50.0000	0.002	0.002
Polygon	88	115	58767500.00	115	0	42100.00000	74.9194	50.0000	0.003	0.002
Polygon	89	79	11622500.00	79	0	20300.00000	48.7500	43.7500	0.004	0.003
Polygon	92	126	54725000.00	126	0	54100.00000	69.9802	61.1918	0.001	0.001
Polygon	106	125	17520000.00	125	0	25600.00000	72.5000	61.1864	0.003	0.003

of WaterShd_Shp										
Slp_1085	LongestFL	USElv	CentroidalFL	Name	LongestFL	CentroidalFL	Elevation_H	USElv_HMS	DSElv_HMS	Area_HMS
0.004	8359.798	82.0000	3929.899	R740W220	8359.798	3929.899	69.450	82.000	50.000	19.340
0.003	8489.087	75.0000	2110.660	R420W280	8489.087	2110.660	50.371	75.000	41.163	21.980
0.003	11776.955	77.0000	4948.528	R760W250	11776.955	4948.528	49.031	77.000	43.774	38.383
0.003	10273.402	80.0000	5774.874	R830W570	10273.402	5774.874	65.069	80.000	52.166	26.157
0.002	15393.860	85.0000	7301.219	R1030W710	15393.860	7301.219	67.500	85.000	58.750	60.022
0.002	15655.992	82.0000	6159.798	R750W750	15655.992	6159.798	60.655	82.000	50.000	55.080
0.002	12482.590	82.0000	3797.056	R1150W1150	12482.590	3797.056	74.919	82.000	50.000	58.767
0.003	7363.351	70.0000	3334.924	R790W790	7363.351	3334.924	48.750	70.000	43.750	11.622
0.001	14824.621	82.0000	7751.219	R1260W1260	14824.621	7751.219	69.980	82.000	61.192	54.725
0.003	8787.615	87.0000	4237.006	R1250W1250	8787.615	4237.006	72.500	87.000	61.186	17.520

Figura 7. Tabla de atributos de parámetros hidrológicos

Modelación Hidrológica mediante HEC-HMS

Una vez importado al HEC-HMS los archivos con los atributos obtenidos en el SIG, se procede a confeccionar los módulos necesarios para el funcionamiento del mismo.

Dentro de la modelación de cuenca se tiene en cuenta los cálculos de las pérdidas que incluyen la intercepción, el almacenamiento superficial y la infiltración. Con el exceso de agua se determina la transformación de éste volumen en escurrimiento superficial o directo, que junto con el volumen del flujo base, conforman el flujo total. El tránsito de éste volumen por los canales o tramos de los ríos también se realiza por medio del modelo de cuenca. El resultado de todos estos cálculos es un hidrograma de escurrimiento en el punto de salida de la cuenca.

Con relación al *Modelo de Cuenca*, los atributos adoptados para la modelación fueron los siguientes:

- Método de pérdida: se seleccionó el modelo de simulación continuo de humedad de suelo (SMA, Soil Moisture Accounting) Este modelo simula el movimiento y almacenamiento del agua en la vegetación, superficie de suelo, en el perfil de suelo y acuíferos. Para una precipitación y evapotranspiración dada el modelo computa la escorrentía superficial, el flujo subterráneo, pérdidas debido a evapotranspiración y percolación profunda sobre la cuenta total.
- Método de transformación: Hidrograma unitario de Clark.
- Método de Flujo Base: Reservorio lineal.
- Método de Traslado: método de Muskingum.

Por su parte, el *Modelo Meteorológico* está conformado por la información de la cantidad de precipitación que cae sobre la cuenca, y la cantidad y ubicación de los medidores.

En este caso, la información provenía de dos pluviómetros ubicados dentro de la cuenca y uno registrador situado en la parte alta de la misma, asignando a cada pluviómetro la misma distribución temporal del registrador.

El período de la precipitación registrada está comprendido entre el 10 de Setiembre del 2002 al 25 de Enero de 2003, con un paso de tiempo de tres horas.

Los datos de evapotranspiración fueron derivados de los datos promedio de evaporación de tanque afectados por un coeficiente de reducción de 0.9.

El módulo de las *Especificaciones de Control* indica el inicio, el fin y el intervalo de tiempo de los cálculos de la simulación. El mismo corresponde al período comprendido entre el 10 de Setiembre al 25 de Enero de 2003, con un paso de tiempo de tres horas, coincidente con el registro de las precipitaciones.

Aplicaciones realizadas

El período de alturas observadas y sus respectivos caudales comprende sólo un periodo de 90 días de análisis. La simulación y optimización se hizo para los primeros 60 días (Set-Oct 02) utilizando los 30 días restantes (Nov 02) para verificación de los resultados. Para el periodo Dic 02-Ene 03, se generaron caudales a partir de los datos de precipitación.

Los hidrogramas así optimizados mediante el método del error medio cuadrático presentan un buen ajuste con respecto a la magnitud de los caudales máximos, tiempo al pico de los sucesivos hidrogramas, volúmenes de escorrentía y formas de los mismos. En la Figura 8 se puede apreciar el ajuste entre las observaciones y las estimaciones de los hidrogramas.

Por su parte la Tabla 1 presenta un resumen de los montos de caudales máximos y volúmenes con el porcentaje de la desviación para los picos más relevantes.

//RUTA 6/FLOW/01AUG2002/3HOUR/GAGE/

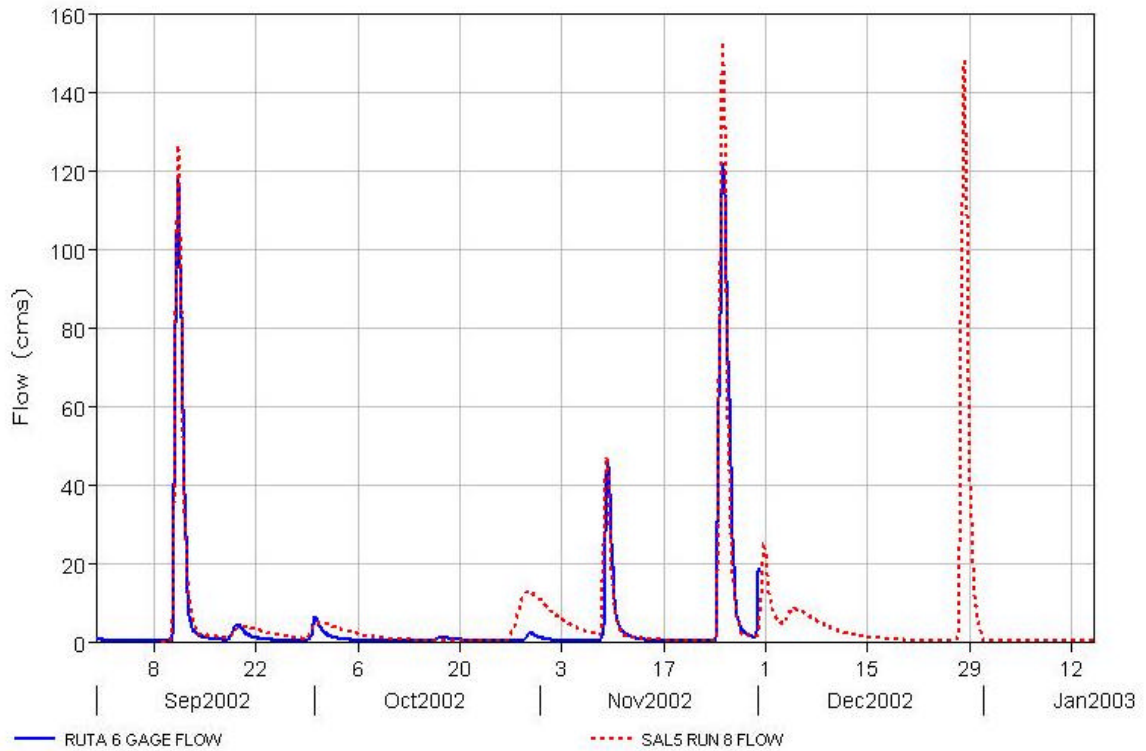


Figura 8: Hidrograma observado y simulado con el programa HEC-HMS

Tabla1. Caudales y volúmenes observados y calculados

Fecha	Qp Obs. (m ³ /s)	Qp Calc. (m ³ /s)	Desvío Qp (%)	Tp Obs.	Tp Calc.	Vol Obs. (hm ³)	Vol Calc. (hm ³)	Desvío Vol (%)
12/09/02	117.6	126.5(*)	7.6	9 hs.	9 hs.	12.331	12.925	4.8
10/11/02	44.9	47.2(*)	5.1	9 hs.	6 hs.	4.459	4.920	10.4
26/11/02	121.6	152.8 (**)	25.6	6 hs.	3 hs.	15.885	15.980	0.6

referencia :

(*) Q período calibración

(**) Q período verificación

A título ilustrativo se presenta en la Figura 9 una salida gráfica de las distintas variables calculadas por el modelo SMA.

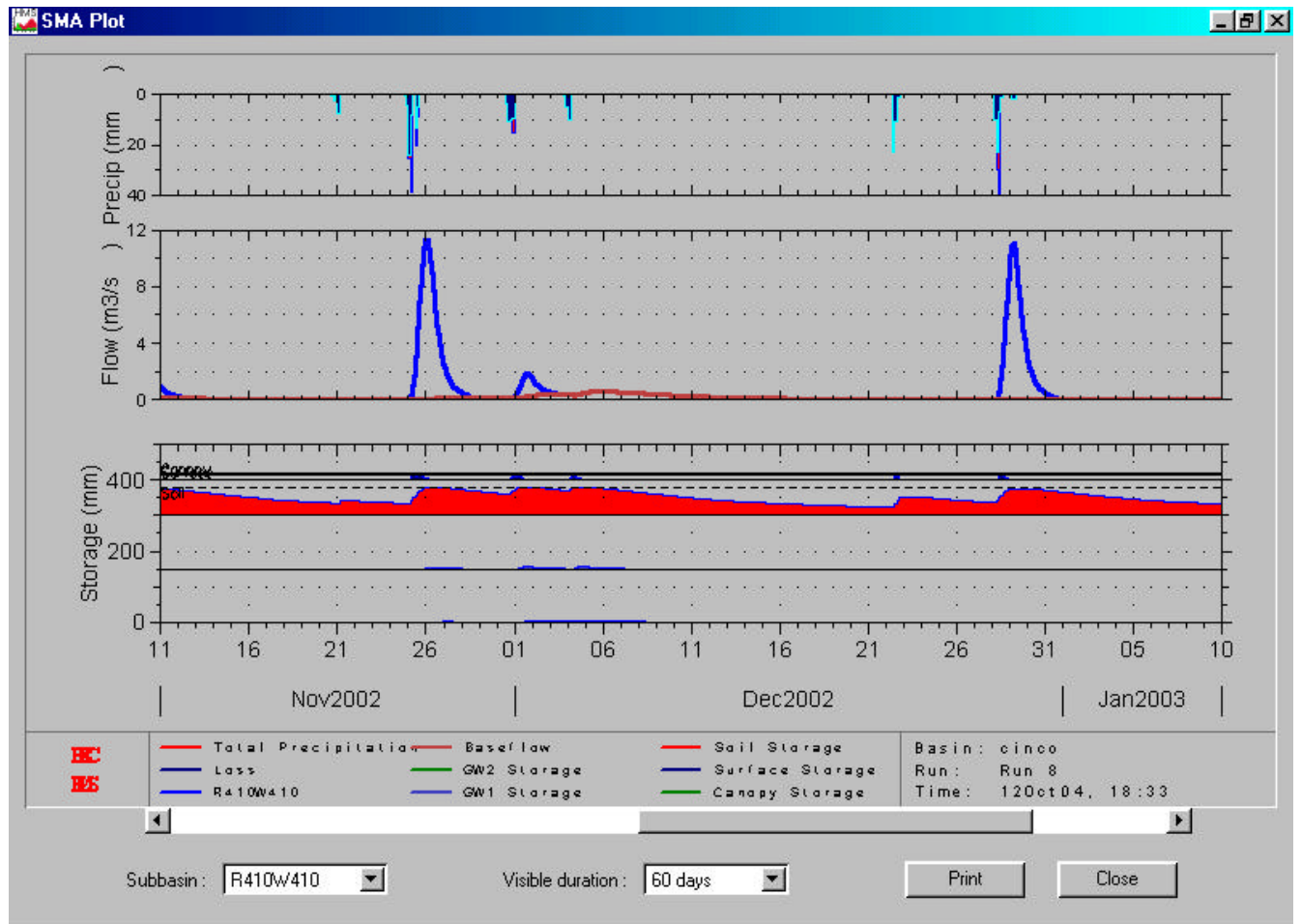


Figura 9: Representación de las disponibilidades hídricas calculadas

CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados se desprenden las siguientes conclusiones con respecto a la metodología y las herramientas utilizadas.

- La extensión geoespacial HEC-GeoHMS es una herramienta práctica para realizar el procesamiento del terreno y obtener sus características morfológicas y parámetros hidrológico, tales como definir cuencas de drenaje, los límites de las subcuencas, longitudes de ríos, mayores longitudes del flujo, pendientes, ubicación y longitudes de los centroides, representación esquemática de la cuenca y la conectividad entre los elementos que la representan. De todos modos hay que tener en cuenta que el dato digital por sí solo no sustituye al reconocimiento del sitio en estudio.
- La obtención automatizada de los parámetros físicos y el esquema topológico con la disposición e interconexión de las subcuencas a partir de la aplicación del Hec-GeoHMS permiten una fácil y adecuada integración al generar archivos con la información de cuenca, que son leídos en forma directa por el modelo hidrológico HEC – HMS, facilitando y agilizando la tarea de modelación.

- Los resultados obtenidos de la simulación continua con escasa calibración, muestran un buen ajuste entre los sucesivos hidrogramas calculados y medidos para las múltiples tormentas, lo que muestra la buena performance del modelo HEC – HMS.
- La bondad de los resultados se observa en las magnitudes de los caudales máximos, tiempo al pico de los sucesivos hidrogramas, volúmenes de escorrentía y formas de los hidrogramas.
- En períodos sin precipitaciones el modelo simula adecuadamente los procesos de almacenamiento, recarga y descarga entre los respectivos reservorios del suelo.
- Los parámetros utilizados para el cálculo del balance continuo de humedad se basan en conceptos físicos por lo que los resultados obtenidos pueden ser extendidos a nivel regional en cuencas no monitoreadas.
- Una vez implementada en el SIG la cuenca en estudio, es posible generar rápidamente varios escenarios de modelación que permitan realizar evaluaciones sobre usos y modificaciones que se produzcan sobre la misma.

BIBLIOGRAFÍA

ESRI (1996) *Arc View 3.2, Arc View Spatial Analyst y Arc View 3D Analyst*. USA.

Garbrecht, J.; Ogden, F.; Debarry, P.; Maidment, D. (2001) “*GIS and Distributed Watershed Models. I: Data Coverages and Sources*”. *Journal of Hydrological Engineering*. November/December 2001, pp. 506-514.

INTA – Gobierno de Entre Ríos (1995) *Carta de Suelos de la República Argentina, Departamento Tala, Provincia de Entre Ríos*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, EEA Paraná y Subsecretaría de Asuntos Agrarios, Gobierno de Entre Ríos.

Ogden, F.; Garbrecht, J.; Debarry, P.; Johnson, L. (2001) “*GIS and Distributed Watershed Models. II: Modules, Interfaces and Models*”. *Journal of Hydrological Engineering*. November/December 2001, pp. 515-523

Olivera, F. (2001) “*Extracting hydrologic information from spatial data for HMS Modeling*”. *Journal of Hydrological Engineering*. November/December 2001, pp. 524-520.

USACE (a) (2000) *HEC-GeoHMS. Geospatial Hydrologic Modeling System Extension. User's Manual*. U.S. Army Corps of Engineers Civils. Hydrologic Engineering Center.

USACE (b) (2000) *HEC-HMS. Hydrologic Modeling System. User's Manual*. U.S. Army Corps of Engineers Civils. Hydrologic Engineering Center.

Wang, X., Yin, Z. (1998) “*A comparison of drainage networks derived from digital elevation models at two scales*”. *Journal of Hydrology*, 210, pág. 221-241.