

# IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO SHALL EN LA CUENCA DEL ARROYO LUDUEÑA MEDIANTE EL USO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICOS.

*Jovita Mendez Zacarías<sup>(1),(2)</sup> y Erik Zimmermann<sup>(1),(3)</sup>*

<sup>(1)</sup>Departamento de Hidráulica – CURIHAM. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. <sup>(2)</sup>Becaria CONICET. <sup>(3)</sup>Investigador CONICET.

E-mail: jovitamz@fceia.unr.edu.ar

**RESUMEN:** Se describe la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG), para la gestión de información necesaria en la modelación de un sistema hidrológico del sur de la provincia de Santa Fe.

Se modeló la cuenca del Arroyo Ludueña de aproximadamente 740 km<sup>2</sup> de extensión, mediante un sistema de simulación hidrológica de tipo hidrodinámico-hidrológico cuasi-3D, que contempla las componentes subterráneas y superficiales de flujos de agua, conjuntamente con los flujos verticales hacia el acuífero y la atmósfera, llamado SHALL. Este sistema presenta alto nivel de detalle espacial lo que implica una elevada demanda de información, la cual fue gestionada utilizando SIG.

Se adoptó una discretización espacial de grilla de celdas regulares de 1000m de lado, a las cuales se les asignó información topográfica, de usos de suelo, edáfica, geológica y red de drenaje, etc.

Para la constitución del modelo digital de terreno de una cuenca se utilizaron las curvas de nivel del Instituto Geográfico Nacional en formato digital.

La identificación de los usos del suelo se realizó mediante el procesamiento de imágenes satelitales utilizando el SIG, con el apoyo de información recopilada en campo.

Para caracterizar la zona no saturada se digitalizaron, vectorizaron y, finalmente, rasterizaron las Cartas de Suelos del INTA, donde se identificaron diferentes series, asociaciones, consociaciones y complejos de suelos. Se aplicaron funciones de pedotransferencia para asignarles propiedades hidráulicas.

Finalmente se realizaron simulaciones con el modelo y se presentaron los resultados en forma gráfica mediante la utilización del SIG.

Se concluye sobre la potencialidad de los SIG para el procesamiento de la información como para la interpretación de los resultados.

## INTRODUCCIÓN

La investigación se enmarca dentro del programa de investigación llevado a cabo en el Departamento de Hidráulica y el CURIHAM, ambos dependientes de la FCEIA – UNR, cuyo título es: Modelos Matemáticos Aplicados a los Recursos Hídricos Regionales. Dicho programa tiene por objetivo la formulación, desarrollo, implementación y aplicación de modelos matemáticos para representación de diferentes procesos del ciclo hidrológico, tales como el escurrimiento superficial y subterráneo, como así también la representación de distintos subprocesos asociados como la erosión, transporte y deposición de sedimentos por acción del escurrimiento superficial.

Se han desarrollado sistemas de modelación, basados en los esquemas de celdas. En sucesivas investigaciones se ha ampliado el campo de aplicación original. Actualmente, en lo que respecta a modelación hidrológica a parámetros distribuidos y a escala temporal continua se desarrolló, íntegramente en el lugar de trabajo, un sistema de simulación hidrológica, denominado SHALL (Simulación Hidrológica de Áreas de Llanura).

El nivel alcanzado en el desarrollo de modelos necesita ser validado en el campo de la aplicación a sistemas hidrológicos de la región, y aquí es donde el aporte de este trabajo de investigación pretende ser más relevante. La gestión de la información necesaria para abastecerlos involucra un esfuerzo de recopilación y generación de herramientas computacionales para automatizar el proceso de vuelco de datos, ya que el grado de detalle con que trabajan es elevado.

Se propone aquí el desarrollo de programas de gestión que permitan (a) abastecer sistemas de información geográfica (SIGs) con información de entrada y procesarla acorde a los requerimientos del modelo y (b) optimizar la interpretación de resultados del modelo SHALL. Esto implica, entre otras tareas, la transferencia de información satelital y de cartografías temáticas a los parámetros del modelo SHALL.

La implementación regional del modelo en el sector meridional de la provincia de Santa Fe permitirá contar con una herramienta de avanzada para la evaluación de impactos en el largo plazo de acciones tales como cambios de uso del suelo, cambios climáticos, y en términos generales para la planificación y gestión del recurso hídrico en dichos sistemas.

## BREVE DESCRIPCIÓN DEL MODELO SHALL

El sistema comprende un modelo hidrodinámico cuasi-3D, que contempla las componentes subterráneas y superficiales de flujos de agua, conjuntamente con los flujos verticales hacia el acuífero y la atmósfera. En cada celda ó unidad de discretización espacial, el modelo SHALL puede cuantificar dinámicamente variables de estado (almacenamientos por intercepción, superficial, en el perfil del suelo y subterráneo) y flujos de intercambio (evapotranspiración, ascenso capilar, escurrimiento superficial, mantiforme y encauzado, a

superficie libre y a través de constricciones -puentes, alcantarillas, sobrepaso de terraplenes, etc.-, infiltración, percolación profunda y escurrimiento subterráneo). La aptitud de conectar la hidrología de superficie con la subterránea, lo habilita para realizar predicciones acerca de evoluciones en los procesos hidrológicos provocados por acciones antrópicas a escala de cuenca y en el largo plazo.

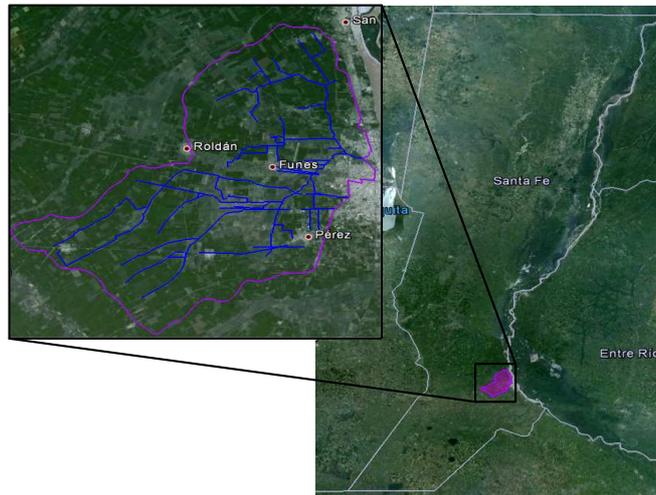
Para simular los procesos descritos en el párrafo anterior, el modelo necesita ser dotado de parámetros de superficie, como pendientes, rugosidades, distribución de cultivos, etapas de maduración de los mismos y porcentaje de cobertura. Asimismo requiere de parámetros de la Zona No Saturada (ZNS): curvas de retención de humedad y conductividad hidráulica; y de la Zona Saturada (ZS): conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento. Dichos parámetros son asignados al modelo mediante archivos que deben ser confeccionados en el lenguaje del mismo.

## DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA FÍSICO ESTUDIADO

La cuenca del arroyo Ludueña se encuentra situada Sur de la provincia de Santa Fe, entre los paralelos 32°45' S y 33°08' S y los meridianos 61°04' O y 60°39' O (Figura 1). Linda al sur con la cuenca del A° Saladillo, al norte y al oeste con la del A° San Lorenzo y engloba parte del casco urbano de la ciudad de Rosario, desembocando en el río Paraná. Tiene un área de aporte de aproximadamente 740 km<sup>2</sup>, una pendiente media de 1,4 por mil y su cabecera se ubica en la cota 70 IGM.

La red hídrica principal está constituida por el A° Ludueña y los canales Ibarlucea y Salvat, mientras que en épocas de lluvia se adicionan numerosos y pequeños cursos naturales (cañadones) y artificiales que aportan al escurrimiento. El arroyo fue canalizado hasta 10 km aguas arriba de su desembocadura, finalizando esta obra en el año 1964. Al ingresar en la ciudad de Rosario es entubado hasta 500 m aguas arriba de su descarga en el río Paraná. El sector norte de la cuenca es drenado mediante dos canales artificiales, Funes-Salvat e Ibarlucea-Nuevo Alberdi, construidos en 1948.

La región se encuentra atravesada por importantes terraplenes tanto viales como ferroviarios. La red de cursos y canales primaria tiene una extensión de aproximadamente 140 Km, en tanto que con el agregado de cunetas y canales secundarios esta longitud de vías de drenaje alcanza los 360 Km. La densidad de drenaje considerando solamente los cursos naturales es de 0,19 Km/Km<sup>2</sup>, en tanto que al cabo de la alteración antrópica alcanzada a la fecha, la densidad de drenaje asciende a 0,49 Km/Km<sup>2</sup>, lo que conforma un importante indicador del grado de transformación que ha sufrido la cuenca.



**Figura 1.** Ubicación geográfica cuenca del Arroyo Ludueña.

## PARAMETRIZACIÓN DEL MODELO SHALL

### *Metodología para la caracterización de los parámetros de superficie*

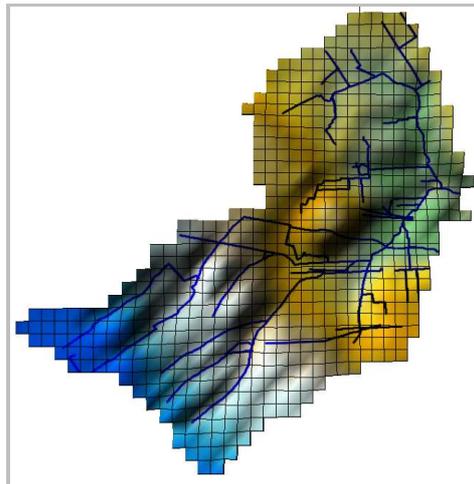
Para la caracterización de la superficie de la cuenca se utilizaron parámetros topográficos y de cobertura superficial.

La topografía se representó mediante un modelo digital del terreno (MDT) que fue generado a partir de un archivo en formato CAD que posee las curvas de nivel del Instituto Geográfico Nacional, con el que se contaba en el lugar de trabajo.

La generación del MDT se realizó imprimiendo en un archivo en formato ASCII, las coordenadas de los puntos que definen las curvas de nivel. Luego, mediante un programa de interpolación espacial se construyó una grilla regular (de 1000m de lado) utilizando el algoritmo de interpolación de Kriging. Finalmente se delimitó la grilla de datos en correspondencia con el contorno de la cuenca, utilizando un SIG se recortó la matriz de datos con un archivo en formato ASCII con las coordenadas de los vértices de la poligonal que la define.

La resolución espacial adoptada para la grilla fue definida con el criterio de no superar el volumen de almacenamiento computacional, acorde con las capacidades informáticas disponibles, pero manteniendo un grado de detalle acorde a las necesidades de modelación.

En la Figura 2 se observa una representación del modelo digital del terreno con la resolución adoptada, que posee la red de drenaje.



**Figura 2.** Modelo Digital de Terreno – Red de drenaje.

La cobertura superficial de la cuenca se determinó mediante la técnica de teledetección, que permitió asignar un uso del suelo a cada celda del modelo. Para esto se utilizó una imagen obtenida por el satélite Lansat 7, sensor ETM+, del día 6 de diciembre de 2007 e información recopilada en campo, en la zona en estudio.

Se contó con información relevada en un proyecto de investigación afín realizado en el lugar de trabajo (Scuderi y Stenta), donde se realizó un seguimiento del estadio fenológico de los cultivos presentes en 17 lotes de la zona en estudio durante 2 años, con una periodicidad mensual.

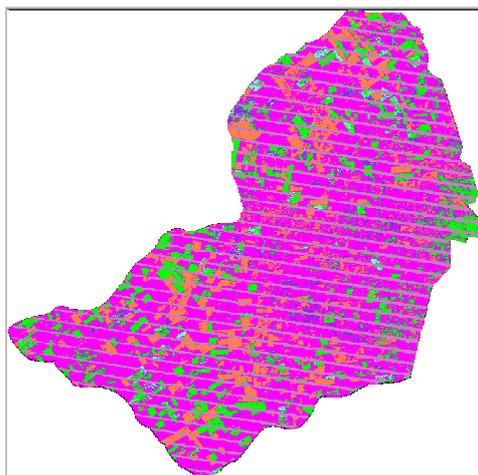
Utilizando la aplicación de procesamiento de imágenes del programa gvSIG, se determinaron los tipos de cobertura. El tratamiento realizado fue el de clasificación supervisada, para esto se utilizaron todas las bandas menos la térmica (banda 6) y el método elegido fue el de la máxima verosimilitud.

En función del uso del suelo y de los requerimientos del modelo se determinaron 7 tipos de cobertura: Trigo (1), Soja (2), Pastura (3), Rastrojo (4), Maíz (5), Suelo desnudo (6) y Agua (7).

Los centros poblados se identificaron en un procedimiento al margen de la clasificación, debido a que si se los considera en ella, constituyen una importante fuente de error por la elevada dispersión de la firma espectral sus píxeles.

En la Figura 3 se exhibe la imagen satelital clasificada según los tipos de cobertura y recortada según el límite de la cuenca en estudio.

Respecto a la imagen, cabe mencionar que se utilizó ésta pese a estar dañada debido a que su uso es satisfactorio para el objetivo del trabajo de elaborar una metodología para el procesamiento de la información se consideró satisfactoria su utilización.



**Figura 3.** Clasificación de imagen según cobertura – Cuenca A° Ludueña.

Una vez realizada la clasificación se procedió a exportar el archivo a formato ASCII para ser interpretado por un programa elaborado en lenguaje Fortran realizado en este trabajo con el objeto de “traducir” la información generada por otros medios al modelo SHALL. Dicho programa se denominó INTERFASE y se describe mas adelante.

#### *Metodología para la caracterización de la zona no saturada*

A los fines de caracterizar las propiedades de la ZNS se partió de la información elaborada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 1972), que caracteriza los perfiles de suelos presentes en el área de estudio.

Básicamente las tareas realizadas en este ítem consistieron en la digitalización y georeferenciación de las cartas de suelo, discretización acorde a la grilla de trabajo empleando SIG, asignación de propiedades hidráulicas de suelos para las asociaciones mediante funciones de pedotransferencia ya probadas en la región de estudio y traducción de la información generada a parámetros del modelo SHALL por unidad de discretización espacial.

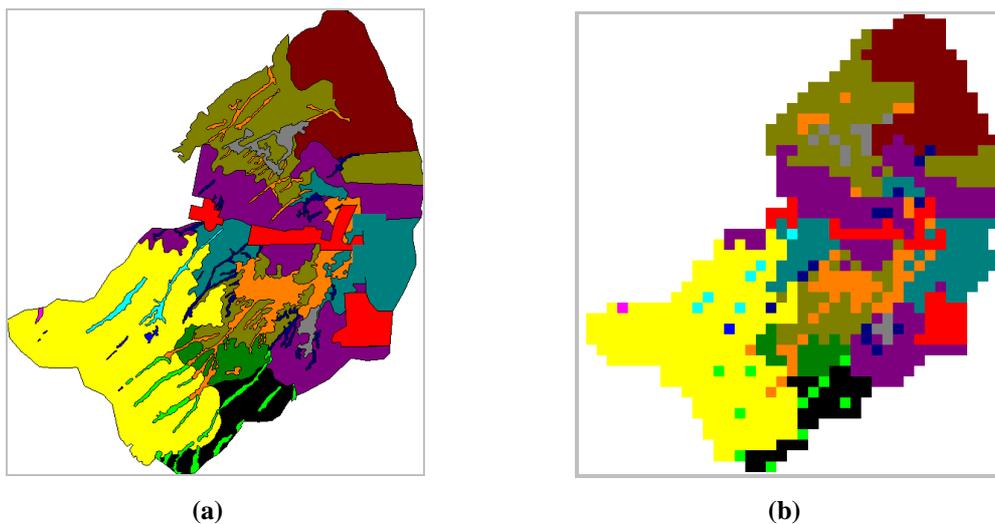
De las cartas de suelos disponibles se extractó la información de las series de suelos presentes en las cuencas y se calcularon los parámetros hidráulicos de la ZNS que son empleados por el modelo SHALL: conductividad hidráulica saturada, presión capilar y conectividad de poros para la curva de retención (modelo de Brooks-Corey) y humedades volumétricas residuales y de saturación.

Previamente a este trabajo fue procesada gran cantidad de información de los suelos de la región, generando una base de datos con propiedades hidráulicas de 204 asociaciones del sur santafesino (Zimmermann y Basile 2008, Zimmermann et al. 2008). Es por esto que en esta etapa, sólo se debieron estimar los parámetros para algunos suelos que no se encontraban en la base de datos.

Las propiedades ponderadas para los espesores de suelos publicados en las cartas de INTA se extrapolaron en profundidad para todo el espesor de la ZNS.

La identificación de los tipos de suelo presentes en la cuenca se realizó a través de la digitalización de las Cartas de Suelo del INTA. Dicha digitalización fue realizada en un trabajo previo (Ruggeri, 2007) y se encontraba disponible en la biblioteca virtual del Departamento de Hidráulica de la FCEIA, un archivo en formato vectorial con todos los tipos de suelo presentes en la cuenca (Figura 4(a)).

Utilizando el software Ilwis 3.3 Academic ©, se transformó el archivo en formato vectorial a ráster con el tamaño de grilla adoptado para la modelación (Figura 4 (b)), quedando cada elemento de la grilla con un tipo de suelo asignado. Finalmente se exportó el archivo a formato ASCII para ser interpretado por el programa INTERFASE.



**Figura 4.**Tipos de suelo cuenca A° Ludueña. (a) Formato vectorial. (b) Formato ráster.

Una vez identificado el tipo de suelo que representa a cada celda del modelo, fue necesario atribuirle a cada tipo sus parámetros hidráulicos. Mediante la aplicación de rutinas del programa INTERFASE (ver más adelante) se conforman los archivos de datos que empleará el modelo SHALL.

#### *Metodología para la caracterización de la zona saturada*

Básicamente las tareas desarrolladas fueron identificación de celdas vecinas para establecer la matriz de conexiones y vinculaciones, asignación de parámetros hidráulicos por vinculación y por celda saturada e identificación de celdas que actúan como condición de borde, ya sea externa o interna.

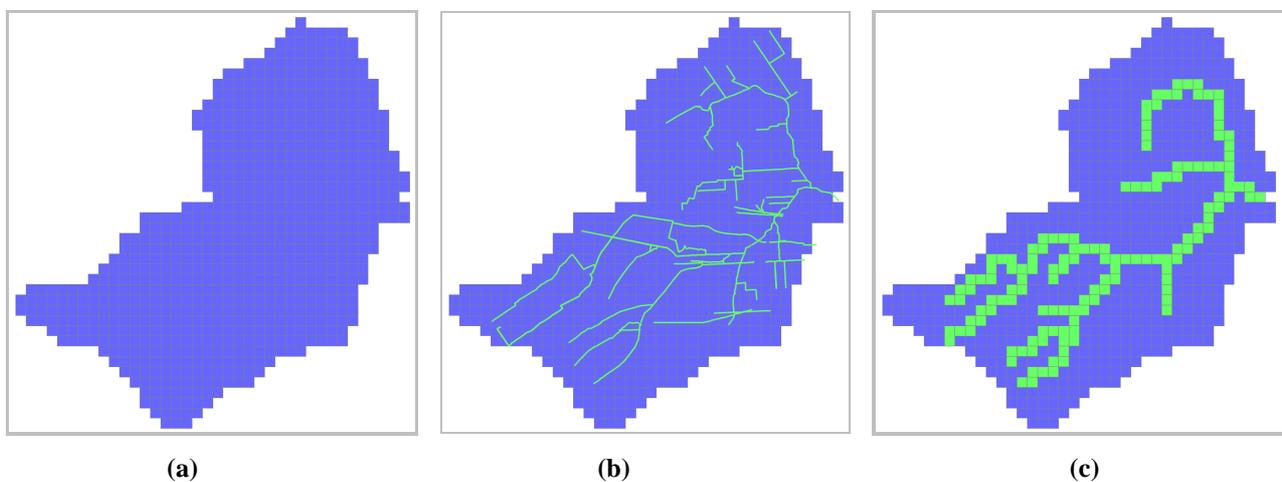
Los aspectos a considerar para la caracterización de la zona saturada comprendieron tres ítems principales:

- Definición de parámetros hidráulicos S y K: Estos se estimaron en base a valores característicos regionales.
- Definición de condiciones de borde externas: Como tal se consideró la cota de pelo de agua del río Paraná, que se constituye en cuerpo receptor de los aportes superficiales y subterráneos de las

cuencas de estudio. La misma se estimó considerando la altura media del río en la desembocadura de cada uno de los arroyos.

- Definición de condiciones de borde internas: Los cursos de agua internos a las cuencas analizadas, que descargan la freática en forma permanente, se consideran como condiciones de borde interna con cota preestablecida para el flujo subterráneo.

La identificación de las celdas que actúan como condiciones de borde interna del modelo se realizó utilizando el programa GvSIG. Se cargó el MDT y sobre el mismo se incorporó el archivo que posee los cursos en formato .dxf. Utilizando las herramientas del SIG, se seleccionaron las celdas que contienen cursos y se les asignaron profundidades y alturas correspondientes a caudales de base por tramos (Figura 5). Cabe mencionar que sólo se consideraron como condicionantes los cursos de régimen permanente de la cuenca.



**Figura 5.** Proceso de definición de condiciones de borde internas. (a) Modelo Digital del Terreno. (b) MDT con cursos de agua. (c) Selección de celdas condicionantes del modelo.

Finalmente se le atribuyeron las cotas de pelo de agua a cada celda que actúan como condiciones de borde. Las mismas fueron calculadas a partir de la cota de terreno natural de la celda, la profundidad del curso y el tirante correspondiente al caudal de base del mismo.

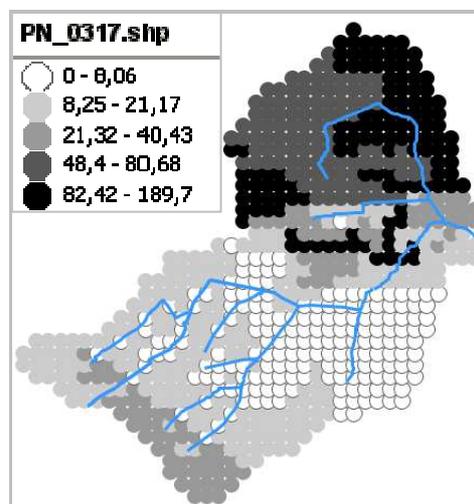
## PUESTA EN OPERACIÓN DEL MODELO SHALL

Se realizaron simulaciones de un año de duración, con el objetivo de detectar posibles errores en la parametrización del sistema. Para esto se constituyeron series de precipitaciones y de evapotranspiración potencial. Ambas se obtuvieron a partir de datos históricos registrados en la región, pluviográficos y de evaporación de tanque tipo “A”, respectivamente. Las series fueron utilizadas para obtener resultados en corridas preliminares.

Una vez realizadas las corridas, para procesar la información de salida y extraer los datos deseados, se utilizó un programa llamado GESTIONAR (Zimmermann, 2000). El mismo fue escrito en lenguaje FORTRAN y permite extraer los resultados temporales de las variables a elección (humedad del perfil, escurrimiento, evapotranspiración, cota de la freática, etc.) almacenados en los archivos de salida del SHALL, que son guardados en la medida que los procesa.

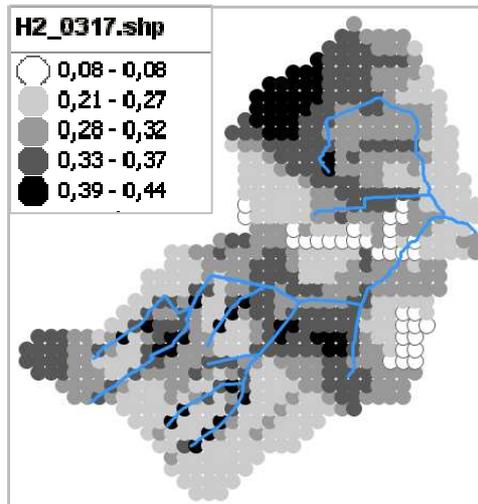
Con el modelo SHALL se pueden obtener valores de percolación, evapotranspiración real, precipitación neta, etc. para cualquier celda y en cualquier instante de tiempo. Se han calculado valores para fechas determinadas en todas las celdas de las cuencas, con el objetivo de graficar mapas de resultados, para esto se utilizó el programa GvSIG.

La fecha elegida para el cálculo de se corresponde con un evento lluvioso, por lo cual uno de los cálculos que realiza el modelo es la precipitación neta para cada celda. En la figura 6 se observa la distribución espacial de dicha precipitación.



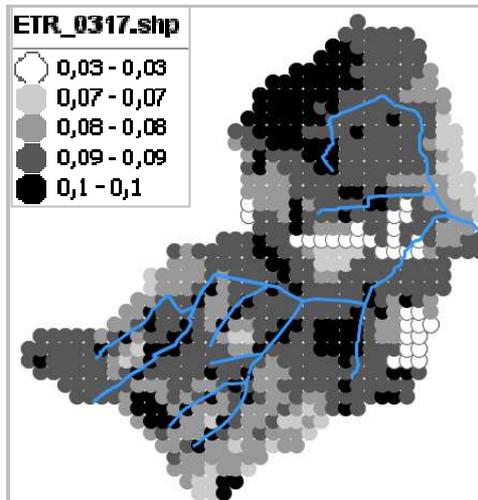
**Figura 6.** Precipitación neta. Cuenca del A° Ludueña.

Asimismo se actualiza el perfil de humedades para cada celda, nodo por nodo, al final del evento lluvioso. En la Figura 7 se representan las humedades que contienen las primeras dos “capas” de celdas, lo cual representa aproximadamente la profundidad radicular.



**Figura 7.** Humedad volumétrica primeras 2 “capas” de celdas. Cuenca del A° Ludueña.

Se valora, además, la lámina de evapotranspiración diaria para cada celda del modelo, esto se puede observar en la Figura 8.



**Figura 8.** Evapotranspiración real. Cuenca del A° Ludueña.

También se calculan volúmenes de percolación para cada celda durante el período de simulación que comprende desde el final del evento lluvioso anterior hasta la fecha en la que se evalúan los datos. (Ver Figura 9).

Al observar las referencias del gráfico, se debe considerar que el eje z positivo está orientado hacia arriba, por lo cual los valores de percolación negativos indican flujo hacia abajo.

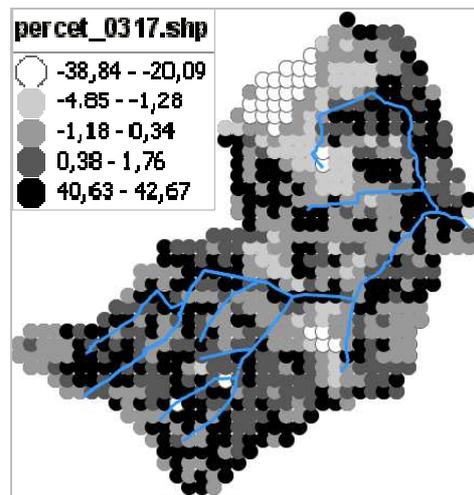


Figura 9. Percolación. Cuenca del A° Ludueña.

## PROGRAMA INTERFASE

Para que la información obtenida mediante las metodologías descritas previamente pueda ser interpretada por el modelo a emplear (SHALL) fue necesario preparar rutinas informáticas que permitan “traducir” los archivos de datos generados por otras fuentes.

Las rutinas mencionadas se compilaron en un programa escrito en lenguaje FORTRAN, llamado INTERFASE, que recopila información de superficie, de la zona vadosa y de la zona subterránea y arma los archivos de entrada del modelo SHALL.

Finalmente, se modelaron las cuencas utilizando los archivos del programa interfase y se realizaron corridas preliminares con único el objeto de detectar posibles errores en la gestión de datos y validar la metodología.

## CONCLUSIONES

Conjugando los tamaños de las cuencas y la resolución de la grilla adoptada, se utilizaron aproximadamente 740 celdas en superficie, 740 celdas homólogas subterráneas y 50 celdas en vertical que representan la ZNS. Esto totaliza más de 38.000 celdas para modelar la cuenca. Resulta imposible manipular la información necesaria para parametrizar el modelo de manera artesanal. Es aquí donde cobran vital importancia los SIG, ya que con ellos se puede lograr la administración de una gran cantidad de información distribuida espacialmente en forma rápida y eficaz.

Los SIG además de ser una poderosa herramienta para la dotación de datos de modelos con elevado grado de detalle espacial, permiten el intercambio de información almacenada en diferentes formatos (archivos de texto, planillas de cálculo, bases de datos, programas de diseño asistido por computadora tipo CAD, etc.). Asimismo poseen un entorno visual para la representación de los resultados que resulta muy útil a fin de

detectar errores groseros, cosa que se torna casi imposible mediante la simple observación de una matriz de datos.

Por todas las razones mencionadas en los párrafos anteriores se concluye sobre la importancia de los SIG para la gestión de la información de los modelos matemáticos ya sea para la caracterización de las cuencas como para la interpretación de resultados.

De igual manera se debe mencionar la necesidad de generar programas de interfaz, como el descrito previamente, que tomen los archivos de salida de los SIG y le den el formato para que puedan ser interpretados por el programa de simulación.

## REFERENCIAS

- INTA (1972). *Cartas de Suelo de la República Argentina*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Ruggeri P. y G. Riccardi (2007). *Georeferenciación y Digitalización de Cartas de Suelos de la zona Sur de la Provincia de Santa Fe*. Informe beca de investigación SECyT, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Inédito.
- Scuderi, C; Stenta, H. *Programa de recorridos de campo, identificación de cultivos, grado de desarrollo y porcentaje estimado de cobertura*. Departamento de Hidráulica. FCEIA, UNR Rosario, Santa Fe, Argentina. (Comunicación personal).
- Zimmermann, E. D. (2000). *Programa para la gestión de datos de salida del programa SHALL, resultados temporales de variables a elección*. Departamento de Hidráulica. FCEIA - CURIHAM, UNR Rosario, Santa Fe, Argentina. (Comunicación personal).
- Zimmermann, E. y Basile, P. (2008). “*Funciones de pedotransferencia para suelos limosos a partir de propiedades físicas y granulométricas*”. Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura. Universidad Nacional de Rosario, Santa Fe, Argentina. ISBN 978-950-673-691-0, pp 133-144.
- Zimmermann, E.; Scuderi, C.; Riccardi, G.; Stenta, H.; Basile, P.; García, M. y Rentaría, J. (2008). “*Asignación de parámetros hidráulicos de suelos utilizando funciones de pedotransferencia con información de las cartas de suelo del INTA*”. Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura. Universidad Nacional de Rosario, Santa Fe, Argentina. ISBN 978-950-673-691-0, pp 145-158.