

# SEGUIMIENTO DIARIO DEL ESTADO HÍDRICO EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES MEDIANTE MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA

Salgado, H. A.

*Cátedra de Riego y Drenaje - Facultad de Agronomía de Buenos Aires*  
Av. San Martín 4453 – C1417DSE – CABA  
[hasalga101@yahoo.com.ar](mailto:hasalga101@yahoo.com.ar)

## RESUMEN

El monitoreo cotidiano del estado hídrico del suelo es una herramienta fundamental para el diagnóstico de las condiciones de los cultivos, y la toma de decisiones de manejo e irrigación de los mismos. Los modelos hidrológicos distribuidos permiten el seguimiento del balance del agua en el suelo con resolución espacial y temporal ajustables a las características zonales de las cuencas hídricas. En este trabajo se presenta la estimación y el mapeo de la humedad volumétrica (HS) en tres capas del suelo en la alta cuenca del Arroyo De Los Huesos, en el Centro de la Provincia de Buenos Aires (Latitud 37°S; Longitud 60°W), Argentina. Para el cálculo de la HS se utiliza el modelo HYDROTEL v.2.6, con el cual se realiza el balance diario de flujos de entrada y salida y almacenamiento del agua en los suelos a nivel de las Unidades Hidrológicas Relativamente Uniformes (UHRU), en las cuales se divide la cuenca. Se simulan procesos físicos, utilizando una base de datos georreferenciada de relieve, suelos y uso de la tierra, a la cual se le incorpora información cotidiana de cobertura (altura, IAF, albedo y profundidad radicular), meteorología (lluvia, temperatura, radiación, vientos, humedad relativa) e hidrometría (aforos en secciones de los cauces).

Los datos simulados de HS se contrastaron con mediciones gravimétricas “in situ”, obteniendo un ajuste de  $r_2 = 0,7$ . El desvío medio RMS entre valores simulados y medidos es de 5%, lo cual equivale para las características generales de los suelos de la cuenca, en términos de lámina, a 5 mm de lámina por cada 10 cm de profundidad del suelo. El método resulta útil para contar con una visión cotidiana sinóptica y detallada del estado hídrico de los suelos, y la estimación del déficit hídrico de los cultivos en la cuenca.

## INTRODUCCIÓN

La información acerca de la humedad del suelo ha sido y es actualmente de interés tanto para productores y organizaciones vinculadas al agro, como para administradores y funcionarios del gobierno provincial y nacional.

La cantidad de agua en el suelo por unidad de masa o de volumen y su estado energético son factores fundamentales en el desarrollo de los cultivos, y presentan alta variabilidad espacial y dinámica temporal. Numerosas propiedades de los suelos dependen del contenido de agua, entre ellas la consistencia, plasticidad, dureza, compactibilidad, penetrabilidad, traficabilidad, etc. (Hillel, 1998). También el contenido hídrico gobierna el intercambio gaseoso con la atmósfera, afectando la respiración de las raíces, la actividad microbiana y los procesos químicos en el suelo.

Acompañando al crecimiento de la informática, se han desarrollado los modelos matemáticos, mediante los cuales se representó el comportamiento de un sistema a través de un conjunto de algoritmos, que expresan relaciones entre determinadas variables y parámetros.

Modelos hidrológicos son representaciones simplificadas del ciclo (o parte del mismo) del agua en la naturaleza. Dada la estrecha relación existente entre la modelización hidrológica y la biológica o ecológica, los modelos hidrológicos y atmosféricos deberían estar acoplados. No obstante, en la práctica tal acoplamiento es difícil, debido a la diferente escala espacial en que trabajan (Maidment, 1993).

Últimamente la hidrología abordó la consideración de los elementos determinantes de la superficie terrestre del ciclo hidrológico, en términos de su gran variabilidad a diferentes escalas espaciales y temporales. Los modelos distribuidos constituyen justamente una herramienta para abordar la estimación y simulación de los diferentes procesos hidrológicos, teniendo en cuenta su variabilidad espacio temporal en el interior de una cuenca hídrica, considerada la unidad física de análisis en hidrología (Ambroise, 1991).

La ventaja de la modelación distribuida con respecto a la tradicional modelación agregada consiste principalmente en la mejor representación de la variabilidad espacial de los fenómenos participantes en los procesos hidrológicos. Adicionalmente, sirve para lograr un mayor entendimiento a nivel de cuenca y de parcela.

Los modelos distribuidos permiten evaluar varias manifestaciones de la respuesta hidrológica en distintos sitios de la cuenca, ante distintas condiciones hidrometeorológicas, de uso del suelo y de obras de intervención antrópica (represas, alcantarillas, etc.). También permiten evaluar con mejor detalle el impacto de posibles escenarios de uso del agua o del suelo y de cambio climático.

Aunque generalmente se requiere de información detallada de la zona de estudio, este tipo de información día a día se encuentra más a disposición del público gracias al desarrollo que en los últimos 30 años han tenido los ordenadores, la cartografía digital, los sistemas de información geográfica y la teledetección.

A fines de la década de los 80 se desarrolló una nueva generación de modelos hidrológicos distribuidos, con una estructura espacial basada en modelos de elevación digitales. Contemporáneamente se desarrollaron nuevos modelos compatibles con sensores remotos y datos de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Fortin et al. 1995 y 2004).

La integración entre SIG y modelización se puede realizar de diversos modos. Sui y Maggio (1999), citados por Mendoza et al. (2002), la clasificaron en 4 tipos: a) SIG incorporado al modelo; b) modelo o rutinas incorporados al SIG; c) acoplamiento holgado (loose coupling) y d) acoplamiento estrecho (tight coupling). Las diferentes modalidades se manifiestan en el rendimiento computacional, los procesos morfométricos-hidrológicos y las aptitudes diferenciales.

## MATERIALES Y MÉTODO

El monitoreo cotidiano de la HS se ensayó en una importante zona productiva agropecuaria del centro de la Provincia de Buenos Aires (Latitud 37°S; Longitud 60°W), donde se definió una cuenca piloto, en la cual se modeló y midió la HS.

La cuenca hídrica se localiza a las nacientes del Arroyo De Los Huesos, en el Sistema de Tandilla, cordón serrano que se extiende desde la costa (Mar del Plata) hasta las proximidades de Olavarría, con altitudes máximas de 500 m aproximadamente.

La zona de estudio se encuentra en la Unidad Sierras, que se subdivide en: a) Subunidad de relieve escarpado, con rocas aflorantes o apenas cubiertas por un delgado manto loess, suelos someros, limitados por la roca cercana a superficie (Hapludol lítico); b) Subunidad de relieve ondulado, con una capa de loess de hasta 2 m de espesor en los pedemontes, apoyada sobre la tosca (costra calcárea de gran dureza), pendientes altas (> 5%), red de drenaje dendrítica, suelos bien drenados (Hapludol petrocálcico y Argiudol típico somero).

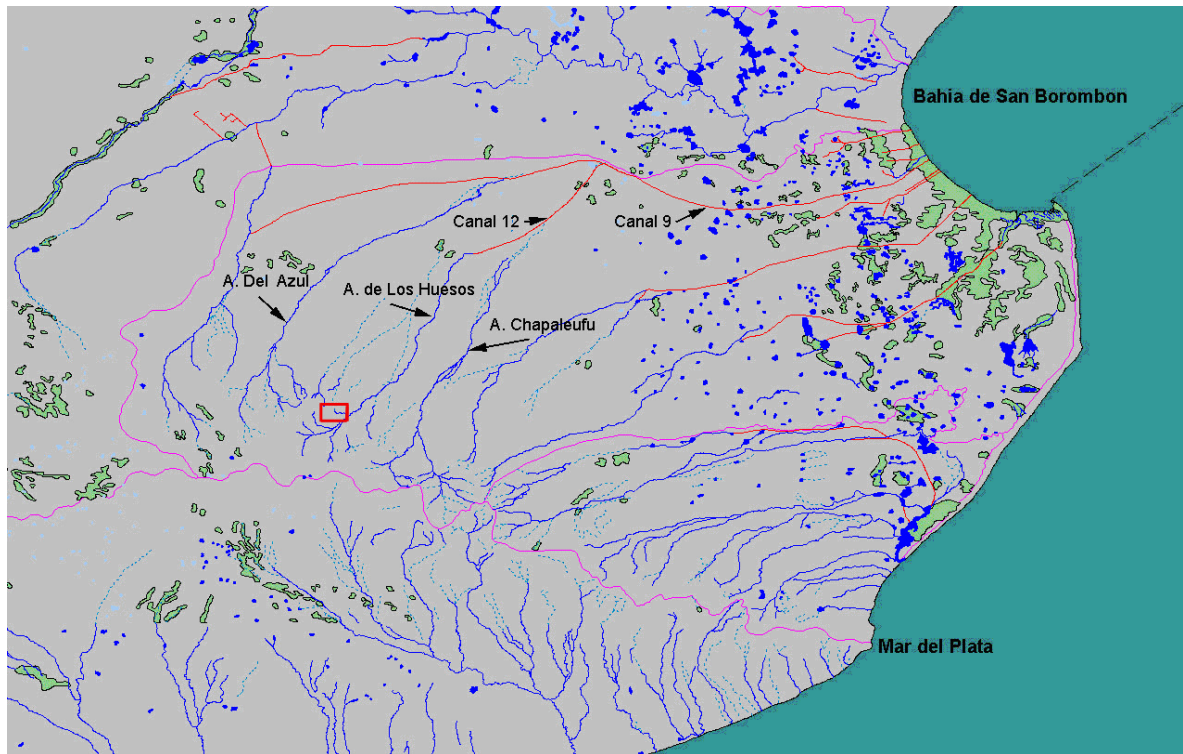
El ambiente ondulado de pedemonte es una transición hacia la llanura, con pendientes en general menores al 5%, surcado por vaguadas con gradientes del orden de 1 a 2%. Dominan los suelos Argiudoles típicos en las partes más altas, Argiudoles acuicos en las vaguadas y Natracuoles típicos en los bajos y cubetas.

Los suelos corresponden al Orden “Molisoles”; Suborden “Udoles”; Gran Grupo “Argiudoles” y “Hapludoles” (US Soil Taxonomy, 1975). Los Argiudoles son el Gran Grupo más representativo de los Udoles. Su perfil típico muestra el resultado de la acción del clima húmedo o subhúmedo sobre el loess, en posiciones bien drenadas. La sucesión de horizontes (A1 - B1 - B2t - B3 - C), su contenido de materia orgánica en el A, la arcilla en el B2t son las características de los Argiudoles típicos, sobre los que se desarrolla la mayor parte de la actividad agrícola provincial.

La cuenca estudiada corresponde a un afluente del Arroyo de Los Huesos, que nace en las sierras de Tedín Uriburu y Chillar, fluye en dirección SW – NE, rectificándose en el Canal 12, luego en el Canal 9, que desemboca en el Río de la Plata (Figura 1).

En la estimación del ciclo del agua en el suelo participan múltiples componentes, los cuales están representados por las capas de un SIG integrado al modelo hidrológico HYDROTEL v.2.6 (Fortín y Royer, 2004), utilizado en este trabajo. Ésto posibilita el proceso distribuido de las variables hidrológicas, y le confiere flexibilidad a la aplicación, tanto a nivel de formatos de datos, como a nivel de su edición en la pantalla, facilitando la proyección de los datos entre diversas proyecciones cartográficas.

Las capas de datos que integran las bases de datos georreferenciadas del SIG son el relieve topográfico, la red hidrográfica y subcuencas, los suelos y su clase de uso.



**Figura 1: Ubicación de la cuenca piloto, recuadrada en rojo (Fuente: INA, 2002)**

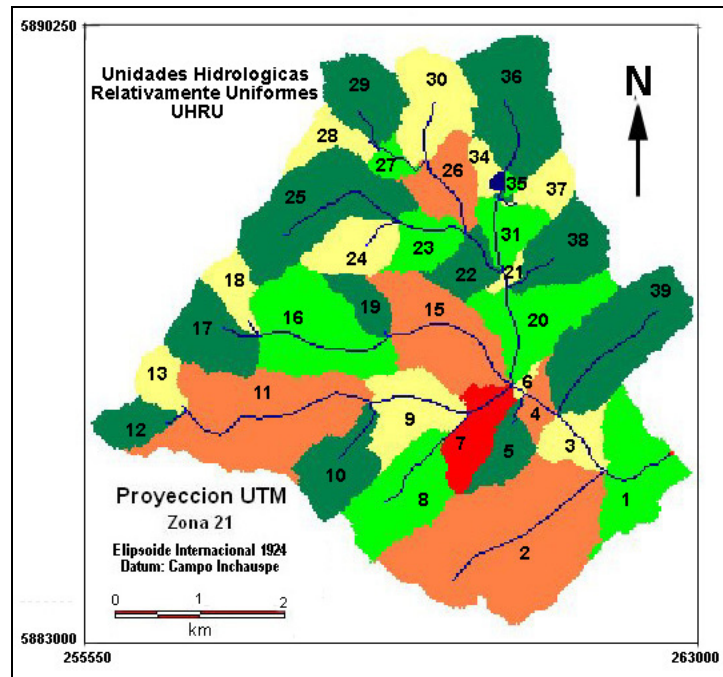
### ***Modelización topográfica***

La modelización distribuida requirió la definición precisa del relieve, realizada a partir del Modelo Numérico del Terreno (MNT), matriz de números que representa la distribución espacial de las altitudes.

La fuente de información fue la cartografía topográfica a Escala 1:50.000, de la cual se digitalizaron curvas de nivel y red vectorial de cauces. El MNT se obtuvo por interpolación lineal, con un valor de altitud cada 25 m, resolución espacial acorde con el nivel de distinción entre parcelas agrícolas dentro de la cuenca hidrográfica, y con la resolución planimétrica (píxel) de los sistemas de sensores remotos disponibles, que se emplearon para detectar uso y cobertura del suelo. (Salgado, 2008).

La extracción de parámetros morfométricos de la cuenca se realizó con el programa PHYSITEL v1.1 (Fortin et al., 2004), y consistió en:

- a) Obtención del mapa de pendientes o direcciones de flujo, mediante aplicación del algoritmo D8 (O'Callaghan and Mark, 1984)
- b) Determinación de la red de drenaje (cauces), con auxilio de una Red Digital de Ríos y Lagos DRLN (Turcotte et al., 2001)
- c) Selección del punto de salida (outlet) de la cuenca
- d) Delimitación de la cuenca
- e) Fijación de la resolución de la red y determinación de las subcuencas, denominadas Unidades Hidrológicas Relativamente Uniformes UHRU, en función de un umbral "k", dependiente del número mínimo de píxeles necesarios para contribuir a la generación de un brazo de la red de cauces (Figura 2).



**Figura 2: Configuración de la cuenca y sus UHRU's**

### *Suelos*

Se empleó la carta de suelos “Pablo Acosta” Hoja 3760-22-2, elaborada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 1989) bajo las mismas reglas geométricas (nomenclatura, proyección, escalas, límites, etc.) que las cartas topográficas, a partir de la cual se digitalizaron las unidades cartográficas.

Cada unidad cartográfica es una combinación de unidades taxonómicas (Series) utilizadas para definir un agrupamiento particular. La determinación de la clase textural de cada unidad cartográfica se realizó ponderando la participación de cada Serie en la misma. Con los porcentajes de arena, limo y arcilla se ingresó al triángulo textural (US Soil Survey Staff, 1993), de donde se obtuvo la clase textural correspondiente.

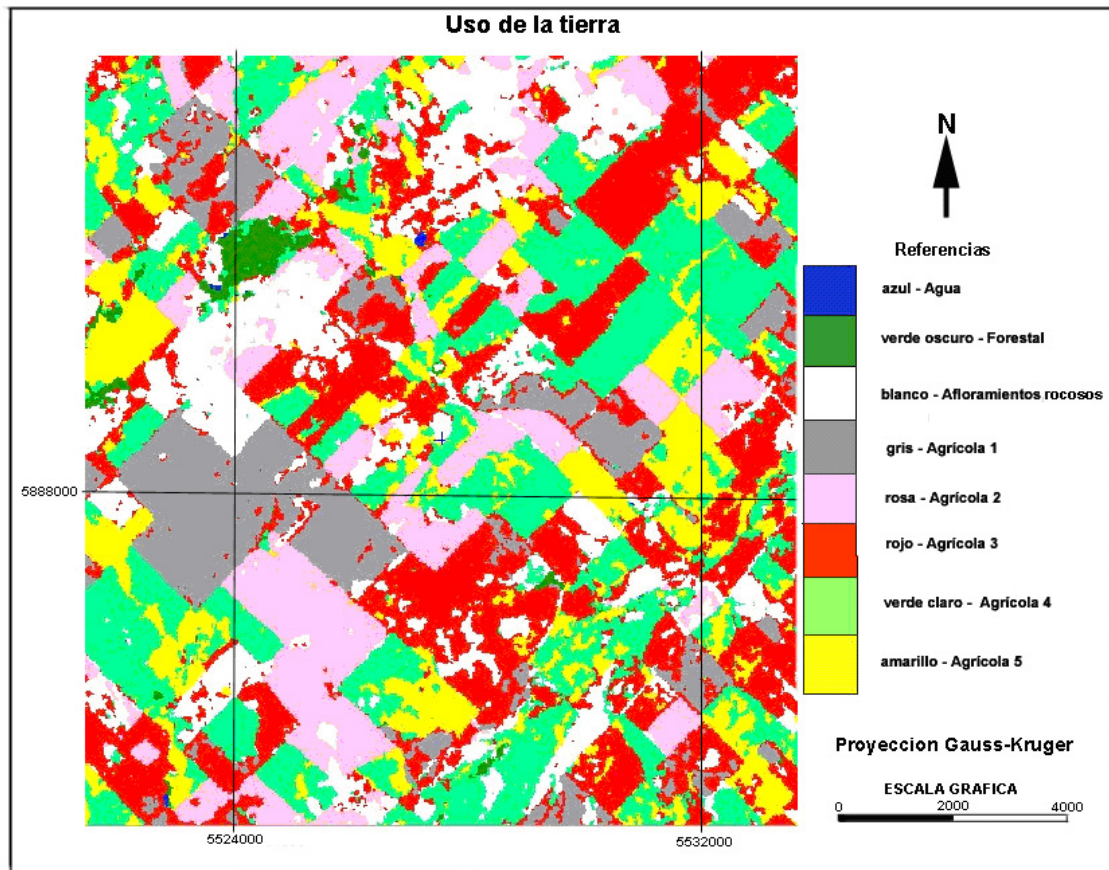
### *Uso de la tierra*

El uso de la tierra es fundamental en el cálculo del balance hídrico, dado que brinda el marco de referencia, en el cual evoluciona temporalmente la cobertura en cada UHRU.

La clasificación del uso de la tierra se realizó en base a la carta de imagen “Chillar” 3760-22, los datos de las campañas y la ayuda de imágenes ópticas Thematic Mapper (TM) LANDSAT, provistas por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE).

Se realizó una clasificación supervisada, tomando como “verdad terrestre” los lotes recorridos. El mapa resultante a partir de la imagen LANDSAT TM5 225-086 del 21/11/98 se muestra en Figura 3. Entre las clases de uso de la tierra reconocidas, se encuentran 5 clases diferentes de uso agrícola (gris, rosa, rojo, verde claro y amarillo). Cada clase de uso agrícola, identificada en general por la forma geométrica que adoptan las parcelas, es ocupada a lo largo del año por distintas coberturas, que dependen de las rotaciones de cultivos realizadas por los productores. La dinámica de la cobertura fue monitoreada principalmente mediante registros de campaña.



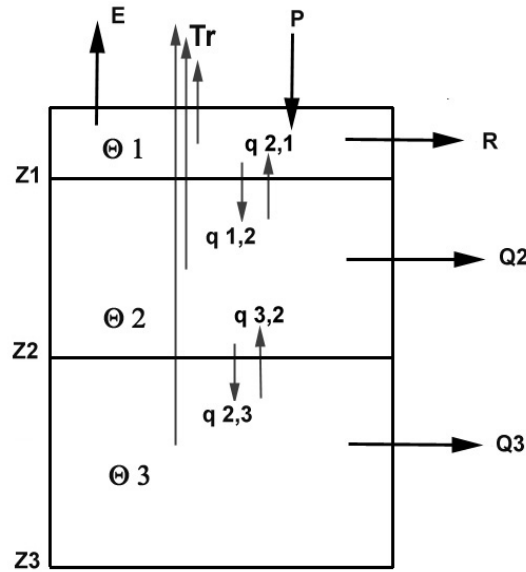


**Figura 3: Mapa de uso de la tierra**

### ***Balance vertical de agua en el perfil del suelo***

El modelo HYDROTEL v2.6 (Fortín y Royer, 2004) utiliza el algoritmo de Balance Vertical en Tres Capas (Bilan Vertical Trois Couches BV3C), que representa los procesos físicos de infiltración y redistribución vertical del agua en una columna de suelo, dividida en tres niveles. La unidad de simulación es la UHRU, definida anteriormente mediante el programa PHYSITEL.

Los espesores de las capas ( $Z$ ) se fijaron de acuerdo a su funcionalidad hidrológica, para cada grupo de UHRU. El límite inferior de cada capa se indica como  $z_i$  (Figura. 4). La capa superior ( $0$  a  $Z_1$ ) es relativamente estrecha, de espesor 10 cm, y corresponde a la parte de suelo afectada por la evaporación de suelo desnudo, cuya humedad puede estimarse por teledetección. Esta capa controla el escurrimiento de superficie ( $R$ ). La segunda capa ( $Z_1$  a  $Z_2$ ) sirve para describir la zona de transición entre la primera y la tercera capa. Su función es producir los escurrimientos diferidos ( $Q_2$ ) en la capa superior del suelo, y en este caso se fijo en 20 cm. La capa tercera ( $Z_2$  a  $Z_3$ ) controla el caudal de base  $Q_3$  (o freático), está cerca del estado de saturación, y en este caso se extendió hasta los 2 m de profundidad.



**Figura 4: Procesos en la columna de suelo (adaptado de Fortín et al., 1995)**

Las ecuaciones de continuidad, que describen el proceso en las capas, constituyen una representación de los procesos medios que ocurren. Los parámetros asociados a estas ecuaciones están relacionados a características físicas medibles del suelo. Ellos son: conductividad hidráulica a saturación ( $K_s$ ), potencial mátrico a saturación ( $\psi_s$ ), contenido hídrico a saturación, contenido hídrico a Capacidad de Campo (CC), contenido hídrico en Coeficiente de Marchitez (CM).

Rawls y Brakensiek (1989) caracterizaron las propiedades hidráulicas de los suelos, en función de las clases texturales, relación empleada por el modelo HYDROTEL, ante ausencia de otra información (Cuadro 2).

Las características hidráulicas cambian para cada UHRU en función del tipo de suelo correspondiente, el cual se determina a partir de datos de la capa SIG de suelos. El suelo de cada UHRU es aquel que ocupe la mayor superficie de la UHRU, o sea el más representativo de la UHRU. Todo esto da lugar a una distribución espacial de las características de las UHRU's, a las cuales se adjunta la pendiente del escurrimiento para cada UHRU.

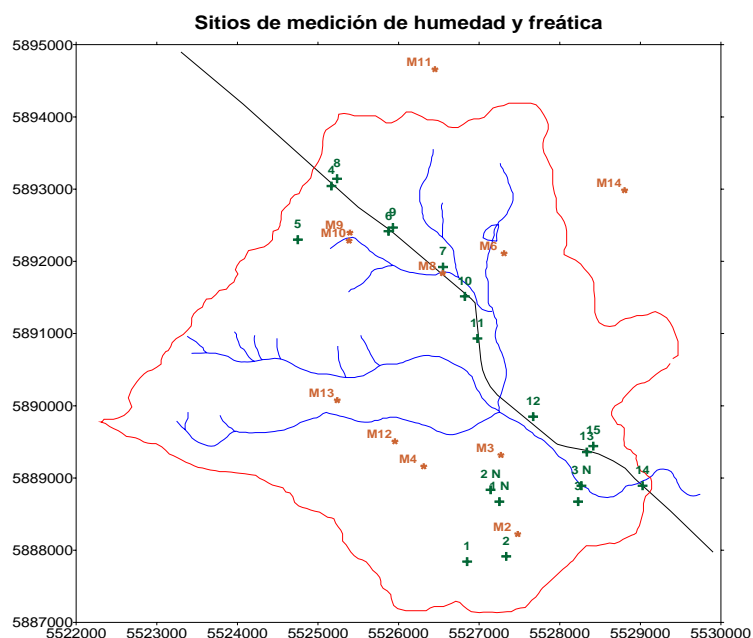
### ***Mediciones de HS a campo***

Se realizaron muestreos mensuales a efectos de contar con registros para ajustar y validar la modelización. Se utilizó el método gravimétrico patrón, en 20 sitios, a 2 profundidades, bajo distintas condiciones ambientales, de cobertura vegetal y de suelos.

También se realizaron mediciones freáticas en 15 pozos de la cuenca, debido a que el contenido de agua en el suelo no sólo deriva de la que se infiltra, sino también de la que puede aportar el acuífero por ascenso capilar, o en forma directa, especialmente cuando la superficie freática se ubica a poca profundidad. Se empleó una sonda, armada de modo sencillo con cable bipolar graduado y la ayuda de un téster.

**Cuadro 2: Propiedades hidráulicas de los suelos (según Rawls y Brakensiek, 1989)**

| Clase de Textura       | Porosidad efectiva<br>$\phi_e$<br>cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> | Agua retenida a succión 0,33 bar<br>$\theta_{cc}$<br>cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> | Agua retenida a succión 15 bar<br>$\theta_{cm}$<br>cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> | Conductividad hidráulica a saturación<br>$K_s$<br>cm/h | Potencial mátrico a saturación<br>$\Psi_s$<br>cm | $\lambda$ | $\alpha$ |
|------------------------|--|---|---|--|--|-----------|----------|
| Arenoso                | 0,417  | 0,091   | 0,033   | 21,00  | 15,98  | 0,694     | 10,0     |
| Areno franco           | 0,401  | 0,125   | 0,055   | 6,11   | 20,58  | 0,553     | 6,0      |
| Franco arenoso         | 0,412  | 0,207   | 0,095   | 2,59   | 30,20  | 0,378     | 4,5      |
| Franco                 | 0,434  | 0,270   | 0,117   | 1,32   | 40,12  | 0,252     | 3,5      |
| Franco limoso          | 0,486  | 0,330   | 0,133   | 0,68   | 50,87  | 0,234     | 3,0      |
| Franco arcillo arenoso | 0,330  | 0,255   | 0,148   | 0,43   | 59,41  | 0,319     | 3,5      |
| Franco arcilloso       | 0,390  | 0,318   | 0,197   | 0,23   | 56,43  | 0,242     | 2,0      |
| Franco arcillo limoso  | 0,432  | 0,366   | 0,208   | 0,15   | 70,33  | 0,177     | 1,5      |
| Arcillo arenoso        | 0,321  | 0,339   | 0,239   | 0,12   | 79,48  | 0,223     | 1,0      |
| Arcillo limoso         | 0,423  | 0,387   | 0,250   | 0,09   | 76,54  | 0,150     | 0,8      |
| Arcilla                | 0,385  | 0,396   | 0,272   | 0,06   | 85,60  | 0,165     | 0,5      |

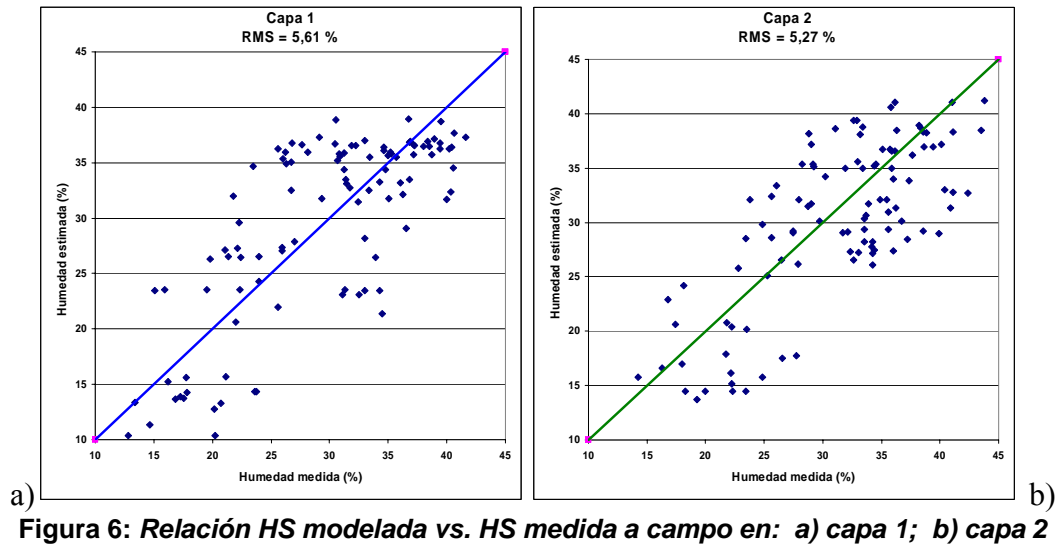


**Figura 5: Sitios de medición de HS (+) y freática (\*).**

## RESULTADOS

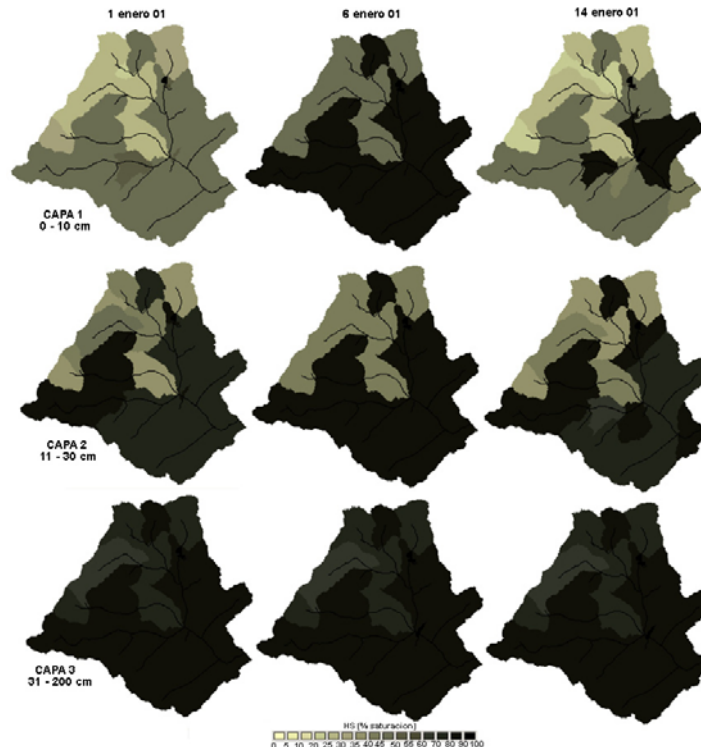
Se compararon los valores de HS estimados con HYDROTEL ( $HS_H$ ) y los medidos (HS) para las 2 primeras capas, obteniendo los siguientes gráficos (Figura 6a y 6b).





La recta diagonal (1:1) corresponde al ajuste perfecto. En la capa más superficial (0 a 10 cm), la dispersión, expresada con el parámetro RMS, fue de 5,61%, y resulta levemente mayor a la de la segunda capa (10 a 30 cm), para la cual  $RMS = 5,27\%$ . La capa 3 (hasta 2 m) simulada mediante el modelo HYDROTEL no se comparó con mediciones porque no se pudo hacer muestreo sistemático con barreno a dicha profundidad.

Se generaron mapas diarios de HS para las 3 capas mediante el algoritmo BV3C. En la Figura 7 se presenta una situación típica de verano, del 1 al 14 de enero de 2001, fechas entre las cuales ocurre una lluvia (30 mm), el 5 y 6 de enero.



**Figura 7: Evolución de la HS en las 3 capas**

Los tonos claros corresponden a menor humedad y los oscuros a valores mayores. La capa superficial presenta en general mayor heterogeneidad, con valores bajos (30 a 50 %) en

mayor proporción, y algunas UHRU's en la parte alta con mayor humedad (60 a 80 %). La tercera capa es más homogénea y húmeda, con valores superiores al 75 %. A su vez, la capa 2 presenta una situación intermedia, tanto en lo referido a humedad como a uniformidad. Al producirse la precipitación, la reacción inmediata es el incremento generalizado de la HS en la capa 1; no obstante, el efecto es pasajero, ya que a los pocos días, la situación retorna al estado general de gradiente positivo de HS hacia las capas mas profundas.

Para este mismo periodo se analizaron las UHRU's, cuya cobertura predominante es la clase "agrícola 2", identificada con color rosa en la Figura 3. Se presentan los valores de HS "actual" para las 3 fechas, en las 3 capas, en Cuadro 3.

**Cuadro 3: HS volumétrica (en %) en las UHRU's con cobertura "agr2"**

| UHRU | 1ene-1 | 1ene-2 | 1ene-3 | 6ene-1 | 6ene-2 | 6ene-3 | 14ene-1 | 14ene-2 | 14ene-3 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 1    | 21.36  | 34.44  | 36.19  | 37.06  | 36.62  | 36.62  | 19.18   | 35.32   | 36.62   |
| 2    | 22.93  | 36.50  | 38.38  | 39.31  | 38.38  | 38.84  | 22.00   | 37.44   | 39.31   |
| 8    | 20.04  | 31.90  | 33.95  | 34.77  | 33.95  | 33.95  | 18.81   | 28.63   | 34.36   |
| 21   | 19.85  | 32.00  | 33.62  | 34.83  | 32.81  | 33.62  | 19.04   | 32.81   | 34.43   |
| 24   | 20.09  | 33.21  | 35.26  | 36.08  | 34.44  | 34.85  | 20.09   | 34.44   | 36.90   |
| 28   | 10.25  | 16.40  | 30.75  | 19.68  | 17.22  | 29.93  | 10.25   | 16.40   | 28.29   |
| 29   | 10.32  | 16.28  | 28.58  | 19.06  | 16.67  | 28.19  | 9.93    | 15.88   | 28.98   |
| 31   | 20.09  | 31.98  | 34.03  | 35.26  | 33.21  | 33.62  | 19.27   | 33.21   | 34.85   |

Considerando los valores de HS a CC para las clases texturales correspondientes a las UHRU's, obtenidos del Cuadro 2, se tabuló la diferencia entre HS<sub>CC</sub> y la HS<sub>actual</sub> en el Cuadro 4. Cuando la HS<sub>actual</sub> > HS<sub>CC</sub>, los casilleros quedaron en blanco.

**Cuadro 4: Déficit (en % de HS vol.) respecto a Capacidad de Campo**

| UHRU | 1ene-1 | 1ene-2 | 1ene-3 | 6ene-1 | 6ene-2 | 6ene-3 | 14ene-1 | 14ene-2 | 14ene-3 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 1    | 4.14   |        |        |        |        |        | 6.32    |         |         |
| 2    | 2.57   |        |        |        |        |        | 3.50    |         |         |
| 8    | 5.46   |        |        |        |        |        | 6.69    |         |         |
| 21   | 5.66   |        |        |        |        |        | 6.47    |         |         |
| 24   | 11.71  |        |        |        |        |        | 11.71   |         |         |
| 28   | 21.55  | 15.40  | 1.05   | 12.12  | 14.58  | 1.87   | 21.55   | 15.40   | 3.51    |
| 29   | 21.48  | 15.52  | 3.22   | 12.74  | 15.13  | 3.61   | 21.88   | 15.92   | 2.82    |
| 31   | 5.41   |        |        |        |        |        | 6.23    |         |         |

Teniendo en cuenta que la clase agr2 presentó en esa fecha cultivos de maíz (*Zea Mays*) en estado de prefloración, con raíces de 40cm de profundidad, se calculó la lamina (en mm) de agua (lluvia o riego) que podría satisfacer tal diferencia de estado hídrico en Cuadro 5.

**Cuadro 5: Déficit respecto a CC, en mm, para d=40cm**

| UHRU | 1ene-1 | 1ene-2 | 1ene-3 | 6ene-1 | 6ene-2 | 6ene-3 | 14ene-1 | 14ene-2 | 14ene-3 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 1    | 4      |        |        |        |        |        | 6       |         |         |
| 2    | 3      |        |        |        |        |        | 4       |         |         |
| 8    | 5      |        |        |        |        |        | 7       |         |         |
| 21   | 6      |        |        |        |        |        | 6       |         |         |
| 24   | 12     |        |        |        |        |        | 12      |         |         |
| 28   | 22     | 31     | 1      | 12     | 29     | 2      | 22      | 31      | 4       |
| 29   | 21     | 31     | 3      | 13     | 30     | 4      | 22      | 32      | 3       |
| 31   | 5      |        |        |        |        |        | 6       |         |         |

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los Cuadros 3 a 5 presentan el estado hídrico y su alejamiento relativo respecto al estado de CC para una determinada cobertura (agr2), que se presenta en distintas proporciones, en varias UHRU's. Se percibe un déficit general en los 10 cm superficiales, que se atenúa con la lluvia, pero retorna a los pocos días, lo cual es explicable por las condiciones ambientales típicas del verano. El déficit es mayor en las unidades 28 y 29, que tiene una mayor participación (%) de cobertura "agr2" (maíz), equivalente a láminas del orden de 5,5 cm para toda la profundidad radicular (40 cm). Esto es potencialmente utilizable para identificar zonas en la cuenca, donde haya déficits hídricos, y estimar valores de láminas (de lluvia o riego) necesarias.

Los mapas cotidianos son una herramienta útil para visualizar la distribución de la HS en la cuenca, a escala de UHRU y a 3 profundidades. En general, es esperable una menor precisión en la capa más superficial, dado su mayor dinamismo, lo cual también es explicable por su mayor dependencia de los factores ambientales externos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ambroise, B.** (1991). Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré; Processus et modèles. *Séminaire du conseil scientifique du Department Sciences du Sol de l' INRA*, Dijon, France, 33 pp.
- Fortin J.P., R. Moussa, C. Bocquillon; J.P. Villeneuve,** (1995). Hydrotel, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique. *Revue des sciences de l'eau*, 8(1995):97-124.
- Fortin J.P et A. Royer** (2004). Le modèle hydrologique HYDROTEL. Bases théoriques. *INRS-ETE, Université du Québec*, Canada, 104 pp.
- Fortin J.P., P. Lavoier et A. Royer** (2004). PHYSITEL. Informations générales. *INRS-ETE, Université du Québec*, Canada, 54 pp.
- Hillel D.** (1998). Environmental Soil Physics. *Hillel Eds., Acad. Press*, CA, USA, 756 pp.
- Maidment D.R.** (1993). GIS and hydrologic modeling. In: Goodchild M.F.; Parks B.O.; Steyaert L.T. *Environmental modeling with GIS*. NY., *Oxford Univ. Press*. 14:147-167.
- Mendoza M., G. Bocco, M. Bravo, C. Siebe y M.A. Ortíz** (2002). Modelamiento hidrológico espacialmente distribuido: una revisión de sus componentes, niveles de integración e implicaciones en la estimación de los procesos hidrológicos en cuencas no instrumentadas. *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, México, 47:35-58.
- O'Callaghan J.F. and D.M. Mark** (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Comput. Vision Graphics Image Process.*, 28:323-344.
- Rawls, W.J. and D.L. Brakensiek** (1989). Estimation of soil water retention and hydraulic properties. *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling: Theory and Practice*. (Morel-Seytoux Ed.). *NATO ASI Series. Series C: Mathematical and Physical Sciences*. 275-300.
- Salgado H.** (2008). Influencia de la topografía en la modelización hidrológica distribuida, *Taller: Manejo sustentable del agua en Argentina: Agua superficial y subterránea, organizado por ALTERRA-Wageningen, INTA Clima y Agua y INA*, Mendoza, Argentina.
- Salgado H.** (2009). Estimación de la variabilidad de la humedad del suelo en base a modelización hidrológica y teledetección en la cuenca del Arroyo Pablo Acosta, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Tesis Doctor UBA, EPG FAUBA*, 200 pp.

**Sui D.Z. y R.C. Maggio** (1999). Integrating GIS with hydrological modelling practices, problems and prospects. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23 :33-51.

**Turcotte R., J.P. Fortin, A.N. Rousseau, S. Massicotte et J.P. Villeneuve** (2001). Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. *Journal of Hydrology*, 240:225-242.