

# Influencia sobre el nivel freático en zonas de llanura debido al efecto del cambio en el uso del suelo y los condicionantes climáticos

*Joaquín López Laxague<sup>1</sup>, Pablo E. García<sup>1,2</sup>, Ángel Menéndez<sup>1,2</sup>, Federico Bert<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Programa Hidráulica Computacional (PHC), Laboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua - Autopista Ezeiza-Cañuelas, Tramo J.Newbery, km 1.600, Ezeiza, Argentina.

<sup>2</sup> Laboratorio de Modelación Matemática (LaMM), Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

<sup>3</sup> Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

E-mail: [jlopezlaxague@gmail.com](mailto:jlopezlaxague@gmail.com)

**RESUMEN:** El nivel freático es un parámetro fundamental en el desarrollo del ciclo hidrológico de las cuencas de llanuras, afectado principalmente por el uso del suelo y los condicionantes climáticos.

El presente trabajo tuvo por objeto cuantificar la variación en el nivel de la napa de la zona de la cuenca del Río Salado (Provincia de Buenos Aires) debido a las variaciones en el uso del suelo y el cambio en las precipitaciones. De esta manera se pudo comprender cuáles fueron los factores más influyentes en los cambios del nivel freático en los últimos 40 años en esta región.

Para esto se implementó un modelo calibrado y validado. A partir de este se plantearon diversos escenarios correspondientes a distintos tipos de cultivo y condiciones climáticas. En base a las simulaciones se analizaron las variaciones en el nivel freático comparado con los niveles de napa registrados con el mismo modelo usando condiciones de uso de suelo y clima medidos en la región durante el período en estudio.

Como resultados se obtuvieron valores de variación freática entre dos puntos temporales y espaciales determinados lo que permite la confección de mapas de profundidad freática. También se obtuvieron relaciones cuantitativas entre las variaciones freáticas obtenidas y los distintos usos del suelo y condicionantes climáticos.

## INTRODUCCIÓN

La cuenca del Río Salado se encuentra en la Provincia de Buenos Aires, Argentina y cuenta con una superficie aproximada de 17 millones de hectáreas altamente productivas. Se caracteriza por tener una topografía muy plana y una red fluvial poco desarrollada que está sujeta a períodos de inundación y sequía que afectan tanto las zonas rurales como las urbanas.

Los registros de precipitaciones marcan ciclos hidrológicos alternados húmedos y secos sin un orden establecido. A partir de los años 80 se ha observado una tendencia en el aumento de las precipitaciones sumado al efecto del cambio en el uso del suelo debido al proceso de sojización iniciado en la década del 70.

Aparejado a esto se registró un aumento en el nivel freático lo que hizo más frecuente inundaciones principalmente a comienzos del presente siglo.

Este trabajo tiene como finalidad cuantificar la influencia de las dos variables mencionadas en el nivel freático a fin de entender el rol que juegan cada una de ellas en los procesos de inundaciones y sequías en la cuenca de Río Salado.

## MODELO IMPLEMENTADO

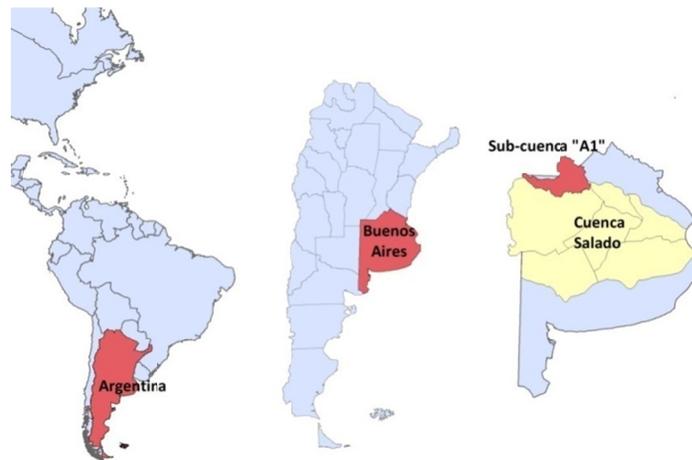
En el presente estudio, se utilizó el software MIKE SHE (Refsgaard y Storm, 1995). Inicialmente se aplicó para estudiar el plan de canalización para la Cuenca del Salado (UTN-FRA, 2007). La metodología y los resultados de dicho estudio se presentan en Badano et al. (2008 y 2010), y en Re et al. (2008). MIKE SHE es un modelo hidrológico espacialmente distribuido, basado en procesos físicos, que acopla el flujo superficial con el subterráneo. El mismo deriva del *Système européen hydrologique* o SHE (Abbot et al., 1986).

La evapotranspiración se modela utilizando el método de Kristensen & Jensen (1975). El flujo superficial se resuelve como una onda cinemática bidimensional acoplado junto con un modelo dinámico 1D (implementado en el software MIKE 11) para el flujo concentrado. El flujo en la zona no saturada es modelado a través de la ecuación de Richards (1931). El flujo subterráneo se representa a través de la ecuación tridimensional de Boussinesq.

### *Implementación*

La región de estudio fue la subregión A1 ubicada al noroeste de la Cuenca del Río Salado del Sur (Figura 1). La misma cuenta con un área total de 14.500 km<sup>2</sup>.

Dada la gran extensión de la cuenca fue necesario implementar un modelo distribuido a fin de representar de la mejor manera posible las características de la cuenca. Una buena representación de la topografía fue fundamental para caracterizar las escasas pendientes de la cuenca. La discretización del dominio se hizo con celdas cuadradas de 1.000m de lado resultando un total de 14.000 celdas de cálculo.



**Figura 1.-Ubicación geográfica de la Subcuenca A1**

Es importante aclarar que en muchos casos la información con que se cuenta no tiene la densidad suficiente para representar su distribución espacial con la escala de grilla adoptada. Para esto se utilizaron distintos métodos, descriptos a continuación, de manera de asignar a cada celda un valor de acuerdo a la información disponible.

El Modelo Digital del Terreno (MDT) fue definido en base al obtenido por la misión topográfica efectuada por la NASA en febrero del año 2000 y ajustado con las curvas topográficas del Instituto Geográfico Nacional (UTN-FRA, 2007). El mismo cuenta con una resolución de 90m.

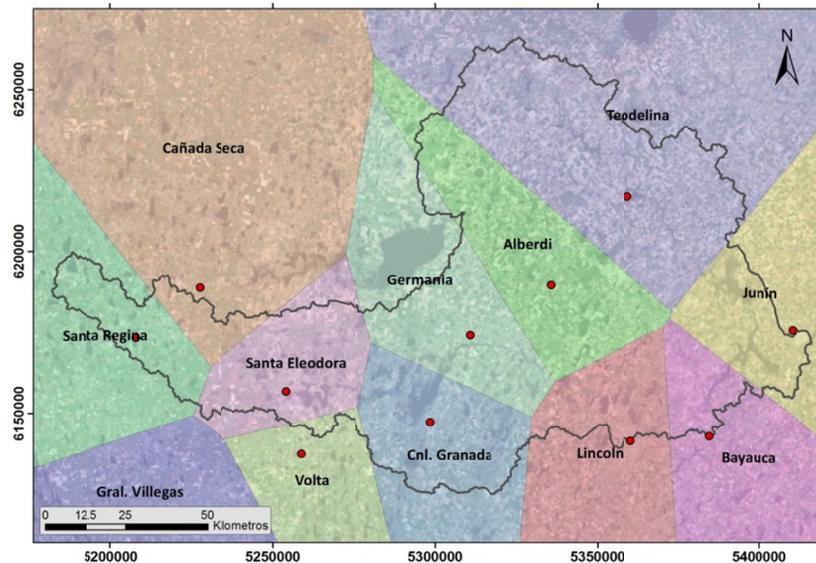
A partir del MDT se obtuvo el campo de almacenamiento en depresiones que establece el volumen acumulado en estas dado que en muchos casos son demasiado pequeñas en relación con la discretización del modelo hidrológico. Por el mismo motivo las obstrucciones laterales no se definen en base al MDT sino que se incluyen como barreras impermeables, para tal fin se modelaron las obstrucciones de mayor envergadura: las Rutas Nac. N° 7, 33 y 188 y la Ruta Prov. N° 50.

El tercer parámetro a establecer en relación con el flujo superficial es el coeficiente de rugosidad de Manning. Se adoptó para esto un valor en correspondencia con los valores publicados por Donigian et al. (1978) resultando un valor constante de  $0.2 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ .

El principal forzante hidrológico, las precipitaciones, se asignaron a cada celda mediante el método de los polígonos de Thiessen el cual fue utilizado en otros modelos de cuencas con características similares (Thompson et al., 2004). Se utilizaron series de 12 estaciones pluviométricas asignándoles a cada una un área de influencia (Figura 2) según el método mencionado.

La evapotranspiración calculada en el modelo con el método de Kristensen & Jensen (1975) requiere parámetros de evapotranspiración potencial y uso del suelo. Las series de evapotranspiración potencial fueron obtenidas a partir de las expresiones de Penman-Montieth y sus valores se distribuyeron, al igual que

los valores de precipitación, mediante la asignación de áreas de influencia de acuerdo a polígonos de Thiessen.



**Figura 2.-**Estaciones Pluviométricas y polígonos de Thiessen.

El uso del suelo queda representado por el tipo de cultivo implantado, para esto el programa requiere la introducción de series de Índice de Área Foliar (LAI, por sus siglas en inglés) y Profundidad de Raíz (RD, por sus siglas en inglés). Estos parámetros varían en el tiempo dependiendo del tipo vegetación y ciclo de crecimiento del cultivo.

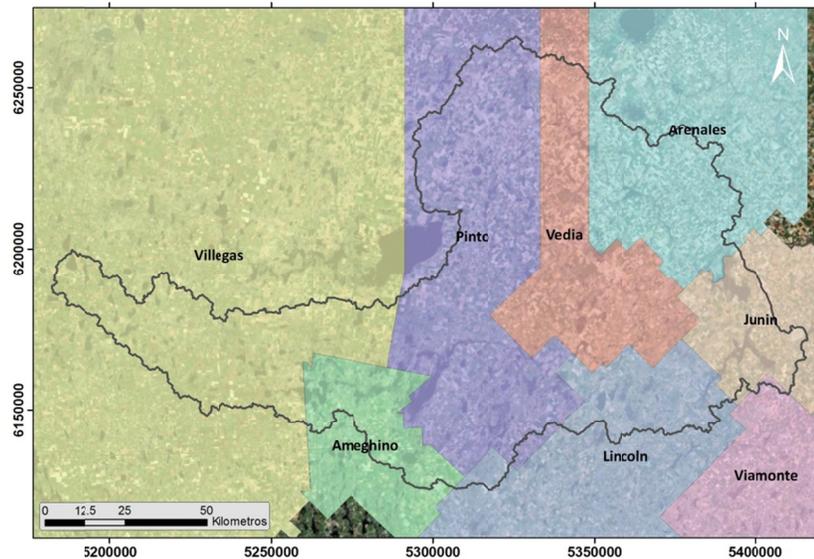
Los valores de LAI y RD se distribuyeron espacialmente según muestra la Figura 3. En la imagen cada zona se corresponde aproximadamente con las áreas de los municipios contenidos en la cuenca. Con las áreas así definidas se buscaron los registros anuales de cantidad de hectáreas cultivadas de Trigo, Maíz, Girasol y Soja y se supuso que la pastura ocupaba el área restante no contemplada por estos registros.

Con los datos obtenidos, y conociendo los cambios diarios de LAI y RD de cada especie, se construyó para cada zona series diarias de LAI y RD promedio utilizando como factor de ponderación el porcentaje areal por especie cultivada anualmente.

Para la caracterización del suelo en la zona no saturada se utilizaron dos tipos de formaciones geológicas. La Formación Junín compuesta por arenas finas y limos arenosos, se encuentra en la zona este de la cuenca A1 y se corta unos 40 km al oeste de la ciudad homónima a lo largo de una línea divisoria de sentido NO – SE para dejar al descubierto al este de la misma la Formación Pampeana compuesta de loess. (Figura 4).

En cuanto a la discretización en sentido vertical se adoptó una división en capas de 5 cm para los primeros 40 centímetros, y luego capas de 20 cm y 1 m hasta una profundidad de 20 metros.

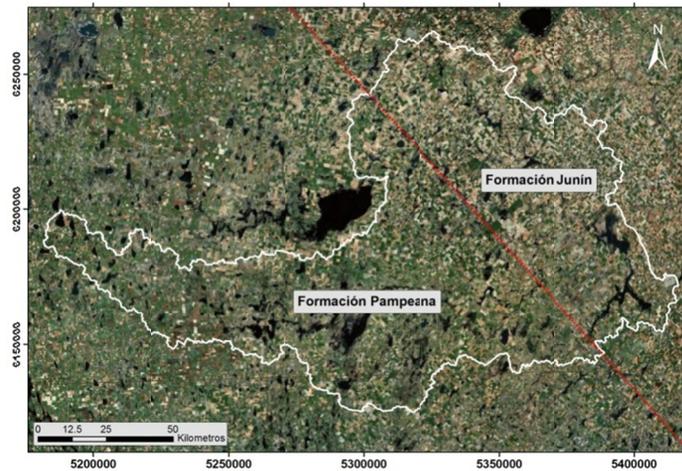
Para la modelación del componente subterráneo se representaron en el modelo las principales formaciones que muestran un comportamiento activo. La formación Paraná se consideró como base impermeable. Por sobre dicha base, se representaron las formaciones sincrónicas Araucana y Puelche cubiertas totalmente por el Pampeano, formado por limos arenosos. El mismo se encuentra a su vez cubierto, en la zona oeste de la cuenca, por la formación Junín.



**Figura 3.-**Distribución de Zonas de igual serie de LAI y RD

Como condiciones de borde se tomaron los gradientes hidráulicos subterráneos supuestos como constantes en base a líneas isofreáticas.

Debido al gran tamaño de las celdas en comparación con las dimensiones de las secciones transversales de los cauces, estos fueron definidos de forma explícita mediante un modelo unidimensional acoplado al modelo hidrológico. Los cauces así definidos concentran los excedentes hídricos y los conducen hacia la salida de la cuenca. Las conducciones representadas en el modelo fueron el río Salado, el canal de vinculación entre Laguna de Mar Chiquita y Laguna de Gómez, la Cañada de las Horquetas y el Arroyo Salado, así como otros 5 cursos y canales de menor importancia. De la misma manera se modelaron explícitamente las lagunas La Salada, Mar Chiquita y de Gómez, integradas a la red de cauces.



**Figura 4.-Formaciones Geológicas.**

### *Calibración y Validación*

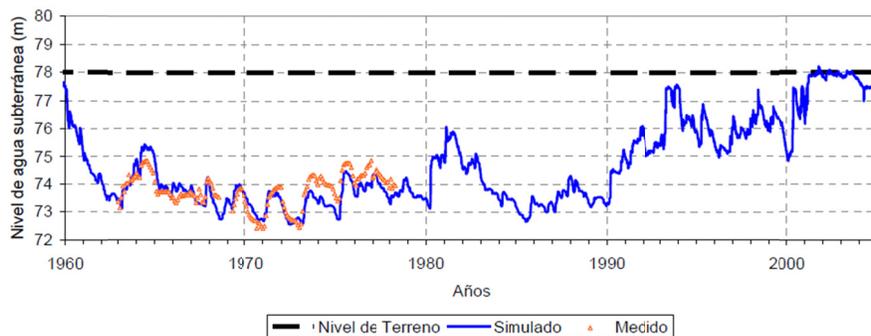
Para la calibración del modelo se contrastaron los datos medidos de 9 estaciones de profundidad freática con los valores simulados. Con el objeto de reducir un indicador global (error cuadrático medio) se variaron y determinaron los parámetros correspondientes a la zona no saturada.

Para la validación se utilizaron los valores de 8 estaciones de aforo siendo la correspondiente al emisario de la cuenca la única que presenta registros relativamente sistemáticos. La Tabla 5 muestra tanto las estaciones de medición de nivel freático y caudal con sus correspondientes períodos de registro.

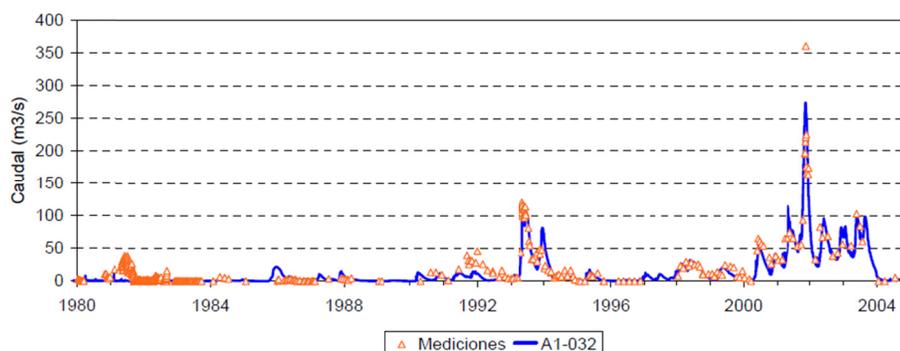
En la Figura 6 se observan los niveles freáticos modelados y medidos en la estación Junín. Puede verse que existe cierta diferencia entre ambos aunque la modulación resultante de la simulación es muy similar a lo registrado. En la Figura 7 se observa la serie de caudales medidos y simulados para la estación ubicada en el emisario de la cuenca, puede verse un buen acuerdo para la mayor parte de los aforos.

	<b>Estacion</b>	<b>Datos</b>	<b>Período</b>	
<b>Nivel Freático</b>	Junin 1	177	01/1963	05/1978
	Junin 2	42	01/1998	01/2004
	General Pinto	43	01/1998	01/2004
	Alberto Idiart	35	11/2000	11/2003
	Savigliano	48	11/2000	12/2004
	Monte Largo	50	11/2000	12/2004
	Pedro Ratallino	41	11/2000	03/2004
	Fotín Gainza	25	11/2000	10/2003
	Frotín República	24	11/2000	10/2002
	<b>Caudal</b>	Río Salado en Ruta 7	708	12/01/1980
Arroyo Salado		11	18/08/2001	16/12/2001
Cañada de Las Horquetas		11	18/08/2001	16/12/2001
Canal Piñeyro		10	05/11/2001	16/12/2001
Laguna La Pantanosa		12	05/06/2001	15/06/2004
Ingreso de Lagunas Encadenadas a El Chañar		12	05/06/2001	15/06/2004
Ingreso de Alternativa Norte a El Chañar		13	05/06/2001	15/06/2004
Salida de ElChañaral		12	05/06/2001	15/06/2004

**Tabla 5.-Estaciones de Medición de Caudal y Nivel Freático**



**Figura 6.-Nivel freático en la estación Junín.**



**Figura 7.-Caudales en el emisario de la cuenca, Río Salado – Ruta Nacional N°7.**

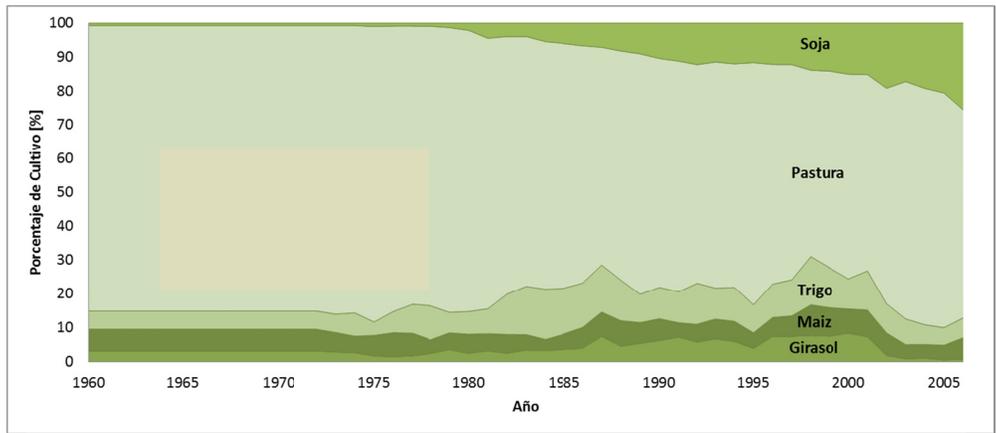
## ESCENARIOS

Para evaluar la incidencia sobre el nivel freático debido a los cambios en el uso del suelo y las precipitaciones se plantearon dos escenarios que surgen de la modificación de un escenario base que utiliza las series y parámetros medidos o calibrados.

### *Escenario Base*

Este escenario utiliza condiciones reales sucedidas en el período de simulación. Las series intervinientes en este son las medidas en campo y las estimadas a partir de estas mediciones.

El uso del suelo tuvo un fuerte cambio a partir de los años '70, a partir de este período se ve un incremento de las áreas cultivadas de soja en detrimento de las áreas de pastura principalmente. Esta tendencia se muestra en la Figura 8 donde se grafican las proporciones de áreas ocupadas por cada plantación en promedio para la cuenca en estudio. Se ve que hay una variación del área cubierta por pastura de un 84% en 1960 a un 62% en 2004 mientras que el área cultivada de soja crece de 1% a 25% en el mismo período.

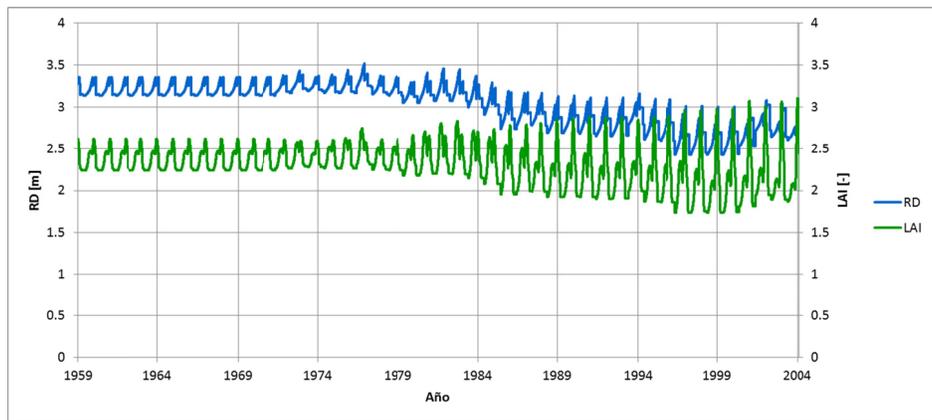


**Figura 8.-Distribución porcentual de tipos de cultivos**

Como se dijo anteriormente, para representar el uso del suelo en el modelo se hace uso de los parámetros LAI y RD. El primero es el Índice de Área Foliar y se calcula como el cociente entre el área de las hojas de ese cultivo y el área proyectada verticalmente sobre el suelo por el mismo. De esta manera a medida que aumenta el LAI también lo hace la densidad del cultivo. Por otro lado el parámetro RD es la profundidad de la raíz de un cultivo, de esta manera plantaciones con más profundidad de raíz tienen mayor capacidad de absorber agua del suelo en épocas de sequía que otros con valores de RD menores.

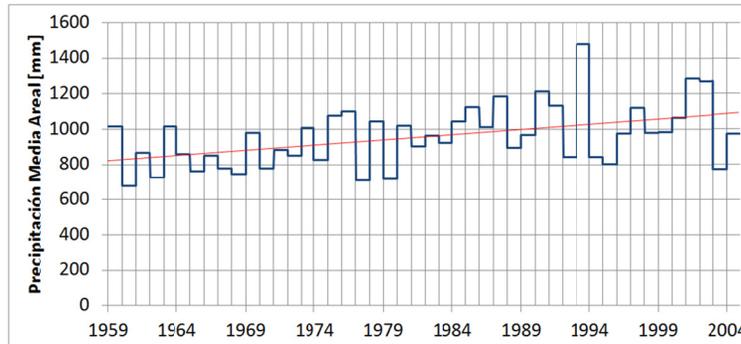
Por lo dicho es importante conocer la magnitud de estos parámetros fundamentalmente de los cultivos de soja y pastura. La soja tiene un período de siembra y cosecha de noviembre a marzo y se caracteriza por valores altos de LAI (máximos de 5.40) y medios a bajos de RD (máximos de 2.30m). Por su parte las pasturas se encuentran durante todo el año dado que no sufren los procesos de cosecha y siembra y al contrario de los cultivos de soja poseen un alto RD (3.50 m) y bajos valores de LAI (2.50m).

En la Figura 9 se muestra la serie de LAI y RD promedio utilizada en la simulación del Escenario Base, notar que a medida que se incrementa el área cultivada de soja, conforme pasan los años, también lo hace el LAI y por el mismo motivo disminuyen los valores registrados de RD. La oscilación del gráfico se corresponde con los períodos de crecimiento y cosecha de los cultivos.



**Figura 9.-Evolución de LAI y RD promedio**

Las series de precipitación fueron obtenidas a partir de los valores registrados en las estaciones pluviométricas que aparecen en la Figura 10. En general puede verse un leve incremento en la precipitación anual lo que se traduce en años más húmedos, esta tendencia se ve en las Figuras 8 donde se graficó la precipitación media areal (PMA) acumulada anual y la línea de tendencia de la serie.



**Figura 10.-**Precipitación media areal acumulada anual.

### *Escenario S*

Corresponde al uso del suelo igual al del año 1960 durante todo el período de simulación. Esto se materializa utilizando las series de LAI y RD del año 1960 para todo el período.

### *Escenarios $P \times f$*

En estas simulaciones se afectaron las series de precipitación por distintos valores constantes de incremento o decremento llamados  $f$ . De esta manera se obtienen las nuevas series multiplicando las utilizadas en el Escenario Base por el factor  $f$  para obtener los siguientes Escenarios:

- $P \times 0.9$
- $P \times 0.8$
- $P \times 1.1$
- $P \times 1.2$

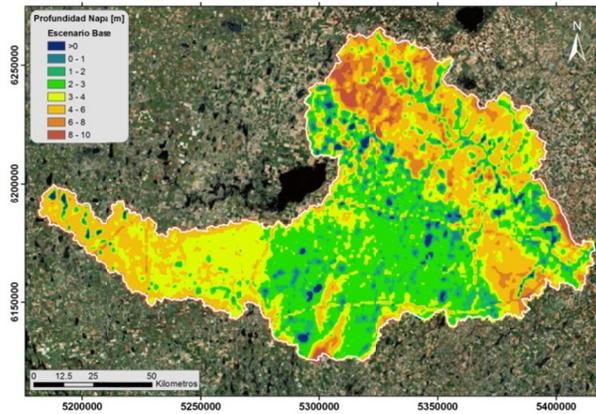
Cabe aclarar que en estos escenarios la series de LAI y RD se corresponden con las series observadas sin afectación alguna tal como se utilizan en el Escenario base

## RESULTADOS

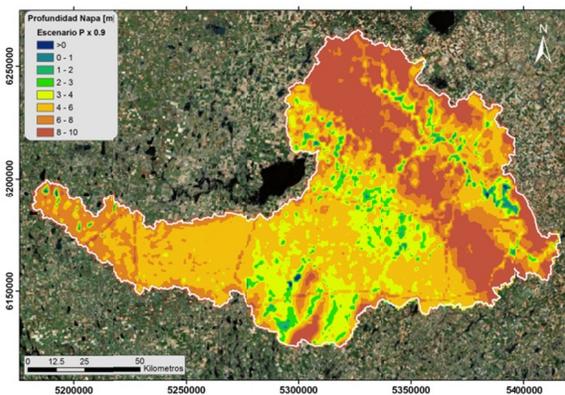
Para cada escenario se simularon 45 años correspondientes al período 1959 - 2004. Los resultados arrojados corresponden a valores de profundidad freática en cada celda para cada paso de tiempo.

En las figuras 11, 12 y 13 se presentan mapas de profundidades medias del nivel de napa correspondientes al año 2004. Se observó que existen dos comportamientos diferenciados que están correlacionados con las formaciones Pampeana y Junín (Figura 4).

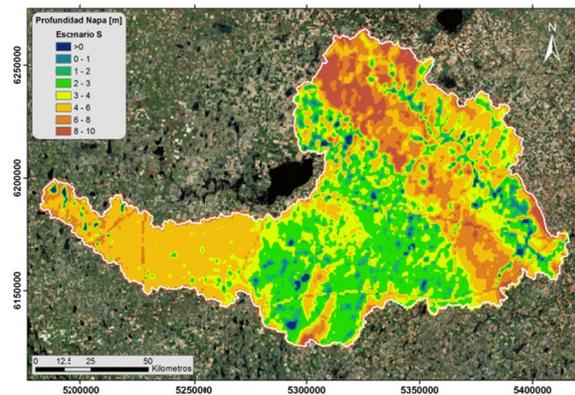
En la Figura 14 se grafica el promedio de la profundidad freática media en toda la cuenca. Del gráfico se puede comparar la variación en el nivel de napa con la serie correspondiente al Escenario Base (línea punteada).



**Figura 11.-Profundidad Freática – Escenario Base**



**Figura 12.-Profundidad Freática Escenario P x 0.9**



**Figura 13.-Profundidad Freática Escenario S**

Se puede apreciar que la serie correspondiente al Escenario P x 0.8 no finaliza en el año 2004 sino que termina antes (año 1982). Esto es así debido a que en la simulación al alcanzarse valores tan bajos de nivel freático se produce una desestabilización del sistema por falta de agua, esto detiene la corrida.

Para cuantificar dichas variaciones se confeccionó la Tabla 15 donde se registran las diferencias entre las profundidades freáticas medias entre los distintos escenarios y el Escenario Base para períodos de 10 años. De esta manera se obtuvo una estimación de la magnitud de ascenso o descenso del nivel de napa.

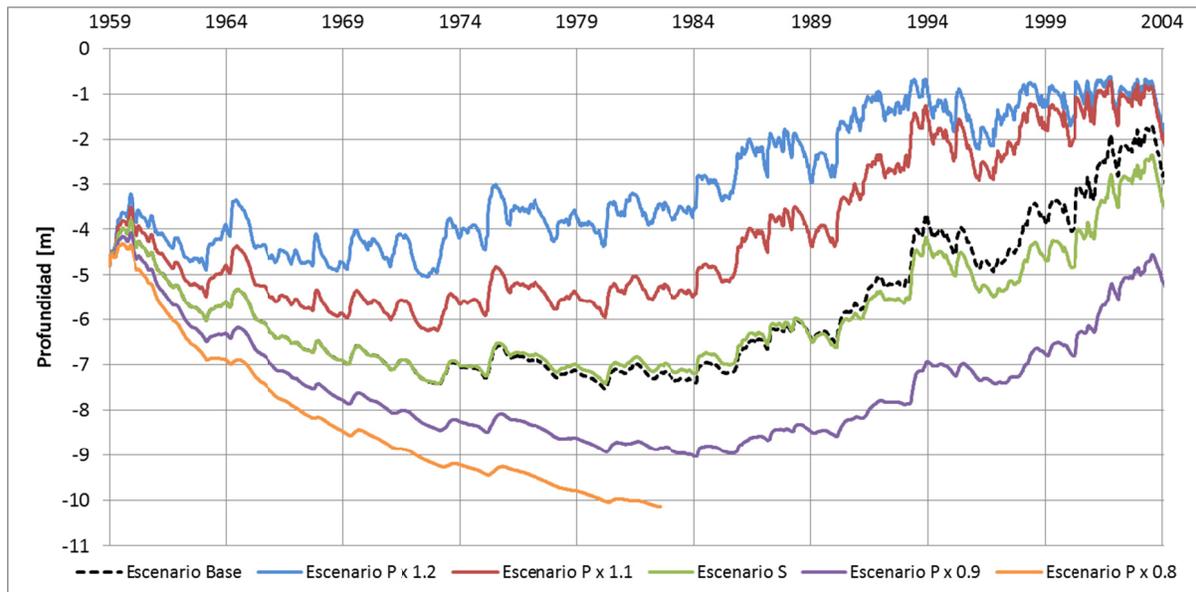
En la tabla las flechas hacia arriba de color verde indican ascenso, las flechas en color rojo y hacia abajo indican descenso del nivel freático mientras que las líneas amarillas indican que no hay variación entre los escenarios comparados.

## CONCLUSIONES

Mediante los resultados expuestos puede observarse que la influencia del cambio en el uso del suelo generó un ascenso en el nivel freático en la década de los años 90 la cual se atribuye al fuerte crecimiento de las áreas cultivadas con soja. Esto se atribuye a que este cultivo es estacional es decir no se encuentra durante todo el año además posee bajas profundidades de raíz lo que disminuye el consumo de agua del nivel freático.

El modelo mostró ser sensible a las variaciones en la precipitación de manera más notoria que en el uso del suelo. Esto demuestra la fuerte dependencia que posee el nivel freático de los sistemas hidrológicos de llanura con las lluvias registradas.

De esta manera se concluye que el aumento registrado en el nivel freático es fruto principalmente de los fenómenos climatológicos que sufra la región, sin embargo no hay que descartar la influencia que genera el uso del suelo principalmente cuando existe una producción agrícola intensiva como en este caso.



**Figura 14.-Niveles de profundidad freática media**

DÉCADA	Escenario S		Escenario P x 0.9		Escenario P x 0.8		Escenario P x 1.1		Escenario P x 1.2	
	Diferencia	Analisis	Diferencia	Analisis	Diferencia	Analisis	Diferencia	Analisis	Diferencia	Analisis
60-70	0.00	—	-0.73	▼	-1.34	▼	0.85	▲	1.76	▲
70-80	0.07	▲	-1.31	▼	-2.35	▼	1.53	▲	3.12	▲
80-90	0.10	▲	-1.96	▼	-		2.19	▲	3.94	▲
90-00	-0.59	▼	-2.86	▼	-		2.27	▲	3.07	▲

**Tabla 15.-Profundidad Freática Escenario S**

## REFERENCIAS

- UTN-FRA ( 2007). *"Plan de Desarrollo Integral del Río Salado: Estudio de Impacto Ambiental, Social y Territorial"*. DiPSOH y MAA, Buenos Aires, Argentina.
- Badano, N; et al (2008). *"Modelación hidrológica integrada superficial-subterránea de una cuenca de llanura extensa"*. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia. IAHR, AIIH.
- Badano N., (2010). *"Modelación Hidrológica Integrada de Grandes Cuencas de Llanura con Énfasis en la Evaluación de Inundaciones"*. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería – UBA
- Refsgaard, J.C., Storm, B. (1995). *"Computer Models of Watershed Hydrology"*. Water Resources Publications, Englewood, USA, pp. 809–846.
- Abbott, M.B.; et al.(1986). *"An introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen, SHE"*. Journal of Hydrology, 87.
- Kristensen, K.J. and Jensen, S.E. (1975). *"A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration"*. Royal Veterinary and Agricultural University, Nordic Hydrology 6, pp. 170-188.
- Richards, L.A .(1931). *"Capillary conduction of liquids through porous mediums"*, Journal of Applied Physics, 1(5), 318-333.
- Thompson, J.R; et al. (2004). *"Application of the coupled MIKE SHE/MIKE 11 modelling system to a lowland wet grassland in southeast England"*. Journal of Hydrology 293, 151–179.