

## **SIMULACIÓN DE LA SALINIDAD Y TEMPERATURA DEL AGUA EN EL RÍO SALADO (SANTA FE)**

**Gustavo M. Baratti, Alfredo Trento y Ana M. T. Alvarez**

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), Universidad Nacional del Litoral (UNL), Ciudad Universitaria  
CC 217 Ruta Nac. N° 168 - km 472.4 (3000) Santa Fe. Tel: 54(342)4575233/34 int 169.  
E-mail: gustavob\_12@hotmail.com

### **RESUMEN**

Se presentan las variaciones espacio-temporales de temperatura y salinidad del agua del río Salado. Las mismas fueron obtenidas a partir de simulaciones numéricas realizadas con el módulo de transporte de escalares del sistema computacional HEC-RAS 4.0, que se encuentra acoplado al módulo que permite simular la hidrodinámica. El modelo fue aplicado a un tramo inferior del Salado comprendido entre las rutas provinciales 6 y 70, para una situación no estacionaria del escurrimiento en condiciones de aguas bajas. En distintos trabajos de campo se relevaron las geometrías de 24 secciones transversales, se realizaron 2 aforos hidrométricos y se midieron las cotas del pelo de agua en distintos puntos a lo largo del tramo. Se contó además con registros horarios de temperatura del agua y conductividad eléctrica, medida indirecta de la salinidad, a partir de una estación de monitoreo remoto en el borde de aguas arriba. Estos primeros resultados, para un intervalo de 40 días, muestran que la temperatura del agua fue adecuadamente representada en cuanto a sus ciclos diarios y amplitudes. En cuanto a la salinidad se obtuvieron valores que permiten apreciar la relación entre ambas variables.

### **ABSTRACT**

In this work, spatial and temporal variations of temperature and salinity on the Salado river are presented. They were obtained by means of numerical simulations using the scalar transport module of the computational system HEC-RAS 4.0, which is coupled to its hydrodynamic simulation module. The model was applied to the lower reach of the Salado river, between N° 6 and N° 70 provincial roads, for an unsteady flow situation during low water levels conditions. Geometry data for 24 cross sections and data related to water surface elevation at different points of the river reach were obtained through field works, in addition to two water discharge measurements. One-hour interval registries of water temperature and water salinity were available from a remote monitoring station located in the model input section. Preliminary results, for a 40 days interval, show that water temperature was adequately represented by its daily cycles and amplitudes. The information obtained about salinity shows the relationship between the two modeled variables.

### **INTRODUCCIÓN**

La temperatura,  $T$ , es una importante variable indicadora de la calidad de los cursos de agua, pues incide en los procesos biológicos, físicos y químicos de los constituyentes. La temperatura, por ejemplo, produce cambios en la densidad del agua, en la solubilidad de los gases disueltos y es una referencia básica para las reacciones cinéticas de los parámetros de calidad de aguas, desde la concentración de saturación de oxígeno, la tasa de decaimiento de bacterias (Thomann & Mueller, 1987) y hasta para los coeficientes de partición de metales pesados en la columna de agua (Turner, 1996). Otra variable indicadora relevante es la salinidad,  $S$ , la cual depende también de  $T$ , relacionándose de tal manera que para una concentración iónica dada,  $S$  aumenta con  $T$ . Por este motivo, en cursos de aguas salobres, como el río Salado, el conocimiento de ambas variables es un aspecto básico para llevar adelante estudios de calidad de aguas en particular y gestión del recurso hídrico en general. Es así que las determinaciones de campo son importantes, ya sea con instrumentos convencionales o con modernas sondas multiparamétricas que permiten adquirir una gran cantidad de información a tiempo real, a lo largo de los cursos de agua, como así también a lo

ancho y en puntos distribuidos en la vertical. La capacidad de obtener un elevado nivel de información en tiempos relativamente breve, en comparación con los métodos convencionales de muestreo, es uno de los motivos que han potenciado el empleo de sistemas computacionales de simulación y pronóstico, tanto hidrodinámicos como de calidad de aguas, en simultáneo.

Uno de esos sistemas computacionales es el conocido HEC-RAS 4.0 (Bruner<sup>a</sup>, 2008), que en su última versión permite calcular las variaciones espaciales y temporales hidrodinámicas, en simultáneo con el transporte de escalares, entre ellos S y T.

El presente estudio se realizó en un tramo inferior de 58 km de longitud del río Salado, comprendido entre una sección ubicada 1500 m aguas arriba de la Ruta Provincial 6, RP6, y la sección de la Ruta Provincial 70, RP70 (Figura 1). El río en este tramo presenta una elevada sinuosidad, con un valor medio de 1.96, aunque en algunos tramos alcanza valores extremos de 2.30. Su cauce es meandriforme, con una dirección general N-S y su caudal medio anual es de  $144.7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .



**Figura 1.-** Tramo en estudio del río Salado.

## OBJETIVOS

Simular numéricamente las variaciones espaciales y temporales de temperatura y salinidad del agua, para un escenario hidrodinámico no estacionario, caracterizado por un estado de aguas bajas y medias.

## MATERIALES Y MÉTODOS.

### Trabajos de campo

Se realizaron dos aforos para una situación de aguas bajas del río, en una sección de márgenes paralelas y estables utilizando el método por vadeo (ver Figura 2). Se utilizó el minimolinete OTT C2, estableciendo 10 verticales en la sección y dos mediciones puntuales por cada una ellas. A partir de los mismos se obtuvo la curva de descarga a la salida del tramo en estudio.



**Figura 2.-** Condiciones en que se realizaron los aforos.

Para implementar el modelo de transporte, se realizaron mediciones de T y conductividad eléctrica (CE) en la sección de RP6, a través de una estación de monitoreo remoto ubicada en la margen derecha del Río Salado, en un sitio cercano a la ciudad de Esperanza (Figura 1). Se efectuaron mediciones de las variables a intervalos de tiempo regulares, transmitiendo los datos cada una hora. Dada las dificultades prácticas para ubicar los sensores en el mismo cauce del río, se optó por un sistema de extracción periódica del agua, la que se bombea a una casilla en la que se encuentra un recipiente, junto con el instrumental correspondiente, con el que se ejecutan las mediciones. El sensor de T es un elemento semiconductor con una vaina protectora, mientras que para medir la conductividad se desarrolló un sensor de inducción, con la finalidad de evitar todo tipo de contacto con el agua, ya que el efecto corrosivo, junto con la elevada salinidad, hacen inviable el uso de celdas comunes con electrodos. Los sensores están conectados a una computadora, que a través de una señal de comunicación GPRS envía la información a la central, ubicada en la Facultad de Ingeniería Química (FIQ), en Santa Fe. Mayores detalles pueden consultarse en Kofman *et al.* (2009).

Los valores de CE permitieron obtener la serie de entrada para la salinidad S, mediante la ecuación (EPA, 1985):

$$S(\text{psu}) = 5.572 \cdot 10^{-4} \cdot CE + 2.02 \cdot 10^{-9} \cdot CE^2 \quad [1]$$

con CE en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

### Modelo Hidrodinámico

La hidrodinámica correspondiente al tramo en estudio fue calculada con el sistema HEC-RAS 4.0 (Bruner<sub>a</sub>, 2008), para una condición no estacionaria del escurrimiento, en el período de tiempo comprendido entre el 10/06/08 y 31/07/08. Este modelo es particularmente apropiado

para simular escurrimientos fluviales gradualmente variados, permanentes y no permanentes con geometría variable.

Para el cálculo del flujo no estacionario, el sistema utiliza las leyes físicas de conservación de masa (continuidad) y de cantidad de movimiento (*momentum*) (Bruner<sub>b</sub>, 2008). La primera se expresa matemáticamente en la forma:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad [2]$$

donde A es el área de la sección (m<sup>2</sup>), Q el caudal (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>), q<sub>l</sub> el caudal lateral por unidad de ancho (m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>), x es la variación respecto al espacio, en sentido longitudinal, y t es la variación respecto al tiempo.

La segunda ley física expresa que la tasa de variación de cantidad de movimiento respecto del tiempo es igual a la sumatoria de todas las fuerzas actuantes sobre el volumen de control. Las fuerzas a considerar son la de presión, gravedad y fricción. La forma final de la ecuación de *momentum*:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QU}{\partial x} + g A \left( \frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + S_f \right) = 0 \quad [3]$$

donde U (m s<sup>-1</sup>) es la velocidad del agua en la dirección longitudinal del canal, g (m s<sup>-2</sup>) es la aceleración de la gravedad, h (m) es la profundidad, S<sub>0</sub> es la pendiente de fondo y S<sub>f</sub> la pendiente de energía. Los dos primeros términos pertenecen a las fuerzas inerciales (aceleraciones locales y convectivas), el tercero representa las fuerzas de presión, el cuarto las fuerzas de gravedad y el quinto las fuerzas de fricción.

Para la implementación del modelo hidrodinámico se utilizaron las geometrías de 24 secciones transversales, determinadas por relevamientos de campo anteriores (Bodoira *et al.*, 2009). La rugosidad del cauce, representada por los coeficientes *n* de Manning, fue establecida a partir de estudios antecedentes (Trento *et al.*, 2000), con valores típicos que variaron en el intervalo 0.025-0.06. En la entrada, 1500 m aguas arriba de RP6, se definió una serie de caudales estimados a partir de una curva altura-caudal y en el borde de aguas abajo se impuso una curva de descarga en base a aforos realizados específicamente en condiciones de aguas bajas (ver Figura 2). El modelo se calibró con información de dos aforos realizados para las condiciones indicadas, en noviembre y diciembre de 2008, resultantes en 4.37 y 2.20 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> respectivamente. Se compararon las cotas del pelo de agua en la sección RP6 y otra ubicada 15 km aguas abajo, con las de la simulación, obteniéndose resultados satisfactorios.

### Modelo de Transporte

El sistema HEC-RAS 4.0 (Bruner<sub>a</sub>, 2008) contiene un módulo computacional que representa el transporte de escalares, acoplado a la hidrodinámica. Su modelo matemático se basa en una ecuación unidimensional de advección-dispersión-reacción [4], expresada por:

$$\frac{\partial(V\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(Q\phi)}{\partial t} \Delta x = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) \Delta x + F \quad [4]$$

con  $\phi$ : el escalar en cuestión,  $V$ : el volumen del segmento considerado ( $m^3$ ),  $\Gamma$ : el coeficiente de dispersión longitudinal ( $m^2 s^{-1}$ ),  $F$ : el término fuente o sumidero, que se define según la cinética específica para cada indicador, con las unidades del escalar considerado. En el caso que  $\phi$  es la temperatura del agua ( $T$ ), el término  $F$  depende de las variables meteorológicas: intensidad del viento, nubosidad, presión atmosférica, humedad relativa y radiación neta de onda corta. Mientras que, cuando el escalar considerado es la salinidad ( $S$ ), que es una variable conservativa,  $F$  queda limitado sólo a la condición fuente.

HEC-RAS aproxima la ecuación [4] mediante el algoritmo QUICKEST (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics with Estimated Streaming Terms) propuesto por Leonard (1979). Este esquema numérico presenta un error de truncamiento de tercer orden espacial y temporal, que atenúa las oscilaciones propias de los esquemas centrados y de la disipación numérica, característica de los esquemas regresivos, aún para condiciones altamente advectivas. El sistema dispone también la opción del algoritmo QUICKEST-ULTIMATE (Leonard 1991), para el caso en que se presenten oscilaciones sin correspondencias físicas. El sistema HEC-RAS utiliza para el modelo de transporte celdas, que se establecen inicialmente entre dos secciones hidráulicas transversales. Los puntos computacionales son localizados entre secciones transversales pares.

Las variables meteorológicas intensidad del viento, nubosidad, presión atmosférica y humedad relativa se obtuvieron de la información que registra diariamente, a diferentes intervalos de tiempo, el Centro de Información Meteorológica (CIM) de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) en la estación El Pozo (ciudad universitaria, Santa Fe). Todas las variables de entrada se homogeneizaron a  $\Delta t = 1$  hora, generando así las series de datos correspondientes a cada variable.

Para el caso de la radiación de onda corta neta, que se establece como la diferencia entre la radiación solar incidente y reflejada, se utilizaron técnicas que permiten estimar estos flujos en función de los datos meteorológicos disponibles. Una de las fórmulas simplificadas para estimar la radiación de onda corta neta estacional,  $Q_{sn}$  ( $Watt m^{-2}$ ), se expresa (EPA, 1985):

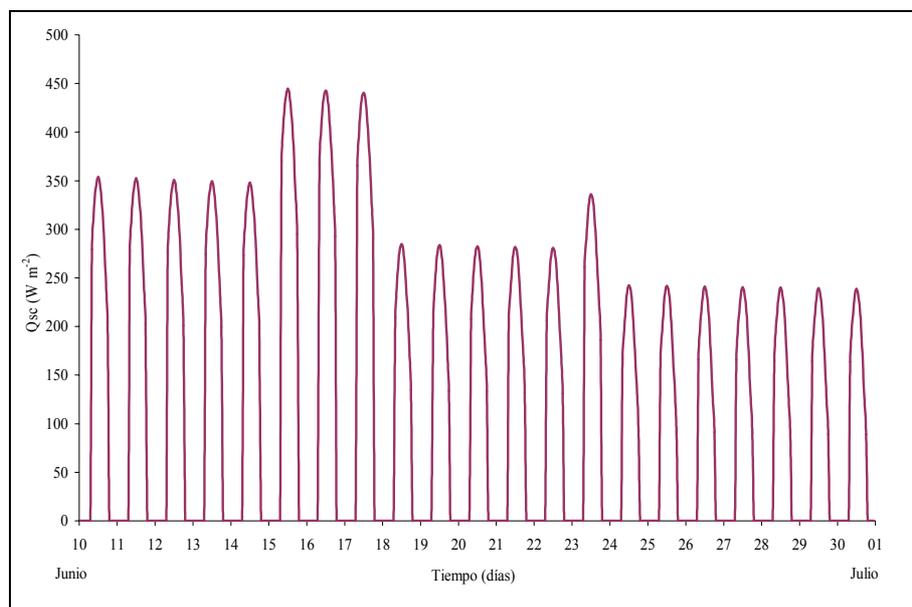
$$Q_{sn} = 0.94 Q_{sc} (1 - 0.65 C^2) \quad [5]$$

con  $Q_{sc}$  la radiación solar en cielo despejado y  $C$  la fracción del cielo convertida en nubosidad.  $C$  adopta valores de 0.9 para cielo totalmente nublado, 0.5 a 0.9 para parcialmente nublado, 0.3 a 0.5 para algo nublado y 0.1 si el cielo está despejado. Los valores de  $Q_{sc}$  diarios y horarios se obtuvieron de un ajuste cosenoidal y senoidal respectivamente, a través de la siguiente ecuación [6]. En general:

$$Q_{sc} = Q_{scc} + A_t \cos\left(\frac{2\pi t}{T_e} + f_e\right) \quad [6]$$

con  $Q_{scc}$  la radiación solar observada en cielo despejado (EPA, 1985),  $A_t$  la amplitud,  $t$  el tiempo en que se calcula,  $T_e$  longitud del intervalo de tiempo del período considerado y  $f_e$  la fase de la onda.

En la Figura 3 se muestran las variaciones diarias de  $Q_{sc}$  de una serie considerada (10/06/2008 al 30/06/2008), donde se observa que la radiación sólo influye en el intervalo de salida y puesta del sol.



**Figura 3.-** Variación de  $Q_{sc}$  para la serie considerada.

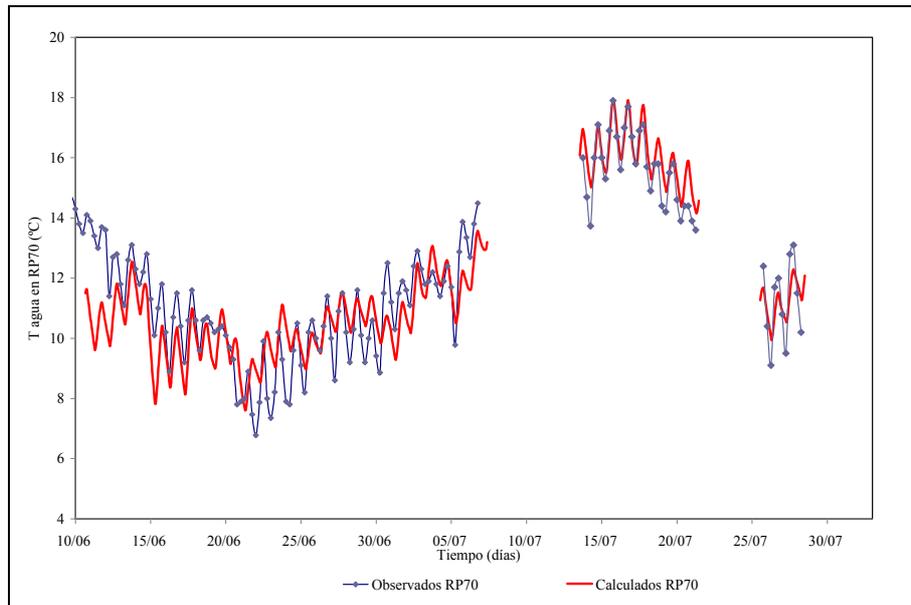
Para la condición de borde aguas arriba se especificaron series temporales de  $T$  y  $S$  del agua con paso horario. Las condiciones de borde aguas abajo se representaron mediante una condición de gradiente espacial nulo para ambas variables dependientes. Las condiciones iniciales se determinaron en base a valores promedio registrados a lo largo del curso. Se empleó un intervalo temporal  $\Delta t=360$  s, y un intervalo espacial máximo  $\Delta x=400$  m. El coeficiente de dispersión longitudinal fue calculado con una fórmula empírica.

## RESULTADOS

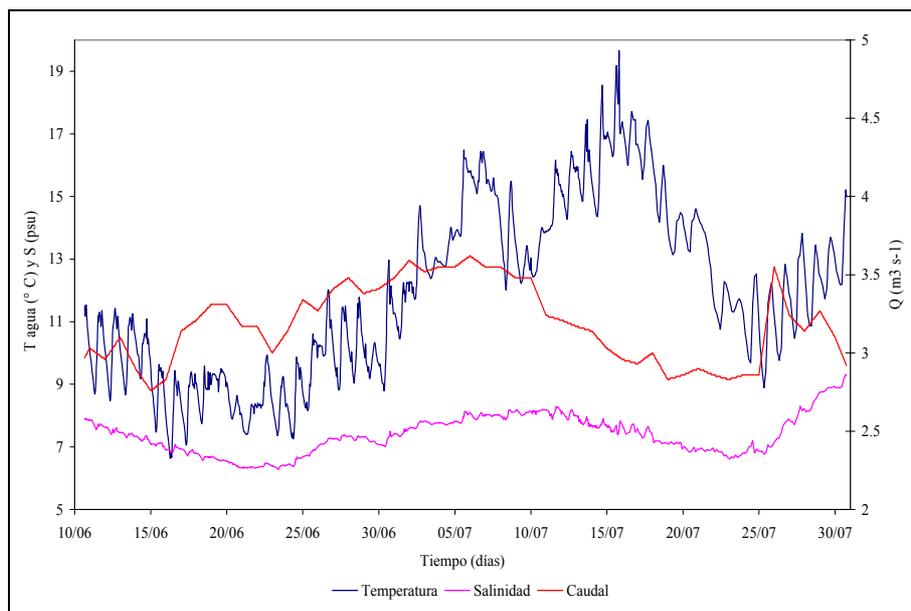
La simulación hidrodinámica muestra que el escurrimiento estuvo caracterizado por velocidades medias entre  $0.05$  y  $0.3$   $m\ s^{-1}$  y las profundidades medias en el río entre  $0.5$  y  $1.0$  m, con un rango de caudales de  $2.7$  a  $3.6$   $m^3\ s^{-1}$ . Cabe destacar que la simulación se efectuó para un período caracterizado por los bajos caudales en un escenario de sequía prolongada en todo el litoral argentino. En este contexto fue común observar el escurrimiento reducido a un canal de pocos metros de ancho, en algunos tramos del río Salado, con extensos bancos de arena en las orillas y el centro del cauce, y singularidades ocasionadas por árboles caídos que causaban obstrucciones al flujo. En estas condiciones, la elaboración de una curva de descarga específica para esa situación garantizó resultados confiables para las bajas profundidades y velocidades del tramo en estudio.

Las máximas y mínimas  $T$  observadas fueron  $17.9$  y  $6.8$   $^{\circ}C$  respectivamente, mientras que las homólogas calculadas fueron  $17.9$  y  $7.6$   $^{\circ}C$ . Los resultados muestran que  $T$  presentó variaciones diarias en un rango medio de  $2$   $^{\circ}C$ . En la Figura 4 se comparan valores de  $T$  observados y calculados en RP70. Se observan diferencias de hasta  $1$   $^{\circ}C$  entre las  $T$  medidas y calculadas, que pueden deberse a que la información meteorológica ingresada al modelo corresponde a una estación distante a  $40$  km del tramo simulado. La irregularidad observada entre los días 19 y 21 de junio se debe a precipitaciones locales de  $5$  mm. Se efectuaron

correlaciones entre las T observadas y la temperatura del aire, que no mostraron relaciones significativas.



**Figura 4.-** Comparación de T observadas y calculadas



**Figura 5.-** Relaciones entre T del agua, Q y S.

La Figura 5 muestra las relaciones entre las variables Q, S y T del agua en RP6. Se observa que cuando las variaciones de Q son suaves, tanto S como T no cambian bruscamente. Mientras que cuando los cambios en Q ocurren en pocos días, por ejemplo para la disminución observada entre el 11 y el 19/07, los valores diarios de T registran el cambio en sentido ascendente y S en sentido inverso.

La Figura 6 muestra perfiles longitudinales de T y S calculados para el 14/07, en un escenario dominado por el decrecimiento del caudal, que motiva un aumento de la salinidad y de la temperatura. El valor promedio de S fue 7.9 psu con valores extremos de 7.6 y 8.1 psu. La

variación diaria promedio de S fue de 0.1 psu con cambios diarios de hasta 0.3 psu, originados por las variaciones propias de la escala horaria de T.

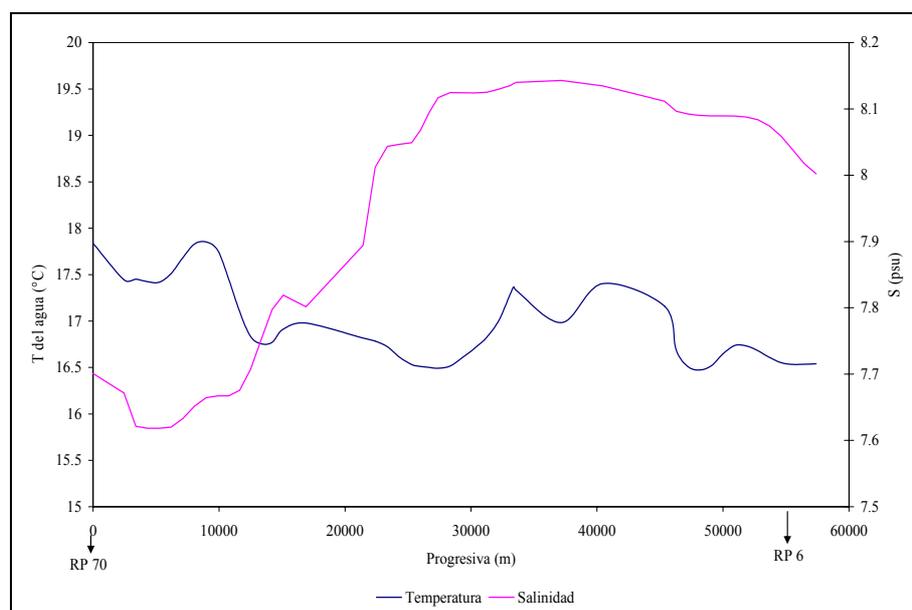


Figura 6.- Perfiles longitudinales de T y S (14/07/08).

## CONCLUSIONES

- Las T fueron representadas satisfactoriamente en escala horaria y diaria, con diferencias no mayores a 1 °C respecto de las medidas. Para ello fue relevante la elaboración de una curva de descarga apropiada a la condición de bajos caudales imperantes en el período de estudio.
- Las precipitaciones locales de corta duración originaron variaciones en el cálculo de T del orden de los 2 °C para el día y de 0.5 °C para la noche.
- Los resultados permiten observar que los cambios de S son relativamente suaves para el período simulado y que siguen una evolución inversa con Q.
- Se logró una representación adecuada de S en relación a T, si bien son necesarias más mediciones para un mejor ajuste.

**Agradecimiento.** Al CIM por la información meteorológica proporcionada. Este trabajo fue realizado en el marco de los Proyectos PICTO 36138, PICT RAICES 35885 subsidiados por la ANPCyT y UNL, y los CAI+D 2006: PE-232 código 12/H618 y PI código 12/G600, ambos subsidiados por la UNL.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Bodoira, F., Graciani, S., Trento, A.** (2009). "Determination of roughness coefficient in floodplains using Landsat images: the case of the Salado River lower basin (Argentina)", 6th Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Santa Fe Argentina.

**Bruner, G.** (2008). HEC RAS, *Rivers Analysis System User's Manual, Versión 4.0*, U.S. Army Corps of Engineers. (<http://www.hec.usace.army.mil>)

**Bruner, G.** (2008). HEC RAS, *Rivers Analysis System Hydraulic Reference Manual, Versión 4.0*, U.S. Army Corps of Engineers. (<http://www.hec.usace.army.mil>)

**EPA.** (1985). *Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling (Second Ed.)*, EPA/600/3-85/040

**Kofman, H., Lucero, P., Serralunga, F. y Trento, A.** (2009). “Desarrollo de una estación de monitoreo remoto en un río mediante red GPRS”, *I Congreso de Métodos Experimentales en Hidráulica*, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina, pp.76

**Leonard, B. P.** (1979). “A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 19, pp.59-98.

**Leonard, B. P.** (1991). “The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 88, pp.17-74.

**Trento, A. Alvarez A. M. y Rojas S.** (2000). “Simulación Hidrodinámica y del Transporte de Poluentes en el Río Salado (Santa Fe-Argentina)”, *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Córdoba, Vol. 3, pp.695-704.

**Thomann, R.V., Mueller J. A.** (1987). *Principles of surface water quality modeling and control*, J. Wiley, pp.644.

**Turner, A.** (1996). “Trace-metal partitioning in estuaries: importance of salinity and particle concentration”, *Marine Chemistry*, Vol. 54, pp.27-39.