

# MODELACIÓN HIDROLÓGICA CONTINUA DEL RÍO MATANZA - RIACHUELO

**E.A. Lecertúa, A.N. Menéndez, N. D. Badano**

Instituto Nacional del Agua (INA)

Casilla de Correo 21, 1802 Aeropuerto Ezeiza, Argentina, (54-11) 4480-4500,

[ealecer@yahoo.com.ar](mailto:ealecer@yahoo.com.ar)

## RESUMEN

El río Matanza-Riachuelo, de aproximadamente 70 km de extensión, es el principal curso de agua urbano que atraviesa la Región Metropolitana de Buenos Aires. La descarga no controlada de altas cantidades de materia orgánica, proveniente tanto de fuentes domésticas como industriales, genera condiciones anóxicas para la mayor parte del río, y durante la mayor parte del tiempo. El modelo de calidad de aguas de la Cuenca Matanza-Riachuelo ha sido utilizado para definir y dimensionar la estrategia de saneamiento, consistente en la ampliación y construcción de plantas de tratamiento para los efluentes domésticos, la implementación de Programas de Reconversión Industrial para las grandes industrias, y la implantación de estaciones aireadoras tipo SEPA en la parte baja del río.

La transformación de lluvia a caudal se efectúa mediante el modelo conceptual NAM (DHI). Se trata de un modelo de parámetros concentrados. Lleva la cuenta, en forma continua, del contenido de agua en tres almacenamientos diferentes, pero interrelacionados, para cada subcuenca: superficial, inferior ó de raíces, y agua subterránea.

Los forzantes climáticos utilizados fueron: temperaturas mínima, media máxima; precipitación; heliofanía efectiva; humedad relativa media en la estación Ezeiza, provista por el SMN (Servicio Meteorológico Nacional). Para calcular la serie temporal de evapotranspiración potencial se aplicó la fórmula de Penman - Monteith.

Para la calibración y validación del modelo hidrológico / hidrodinámico se utiliza toda la información hidrométrica disponible desde la década del 60 hasta la fecha, producidas por la DIPSOH (Dirección Provincial de Saneamiento y Obras Hidráulicas de Buenos Aires), INA (Instituto Nacional del Agua) y ACUMAR (Autoridad de Cuenca Matanza – Riachuelo), entre otros.

Se ha calibrado y verificado el modelo hidrológico / hidrodinámico para la Cuenca del Matanza – Riachuelo, constituyendo una representación adecuada del balance hídrico dinámico de la cuenca. Este modelo ha permitido obtener resultados útiles para la gestión de la cuenca y se encuentra operativo para evaluar diversos escenarios hidrológicos (por ejemplo inundaciones).

**Palabras Clave:** Modelación Hidrológica – Matanza-Riachuelo – Modelación Numérica

## INTRODUCCIÓN

La cuenca Matanza - Riachuelo ocupa una superficie de aproximadamente 2200 km<sup>2</sup>, y comprende parte de la Ciudad de Buenos Aires (CABA) y 14 municipios del Gran Buenos Aires. La descarga no controlada de altas cantidades de materia orgánica, proveniente tanto de fuentes domésticas como industriales, genera condiciones anóxicas para la mayor parte del río, y durante la mayor parte del tiempo. Como parte de un plan de recuperación se conformó la Autoridad de Cuenca Matanza-Riachuelo (ACuMaR). Esta encargó a la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) y el Instituto Nacional del Agua (INA), la implementación de un modelo numérico de calidad de las aguas, de modo de producir un diagnóstico de la situación presente y ensayar alternativas de recuperación.

El modelo de calidad de aguas de la Cuenca Matanza – Riachuelo (Menéndez, A; et al, 2009) ha sido utilizado para definir y dimensionar la estrategia de saneamiento. En este trabajo se presenta la calibración y validación del modelo hidrológico / hidrodinámico utilizando toda la información hidrométrica disponible desde la década del 60 hasta la fecha, producida por diversos organismos provinciales y nacionales.

## MODELO MATEMÁTICO

La transformación de lluvia a caudal se efectúa mediante el modelo conceptual NAM desarrollado por el Danish Hydraulic Institute (DHI). Se trata de un modelo de parámetros concentrados, cada subcuenca es considerada como una unidad, pero continuo en el tiempo. Lleva la cuenta, en forma continua, del contenido de agua en tres almacenamientos diferentes, pero interrelacionados, para cada subcuenca: superficial, inferior ó de raíces, y agua subterránea. El flujo de agua se desdobra en escorrentía, interflujo y flujo de base. El esquema del modelo conceptual se presenta en la Figura 1.

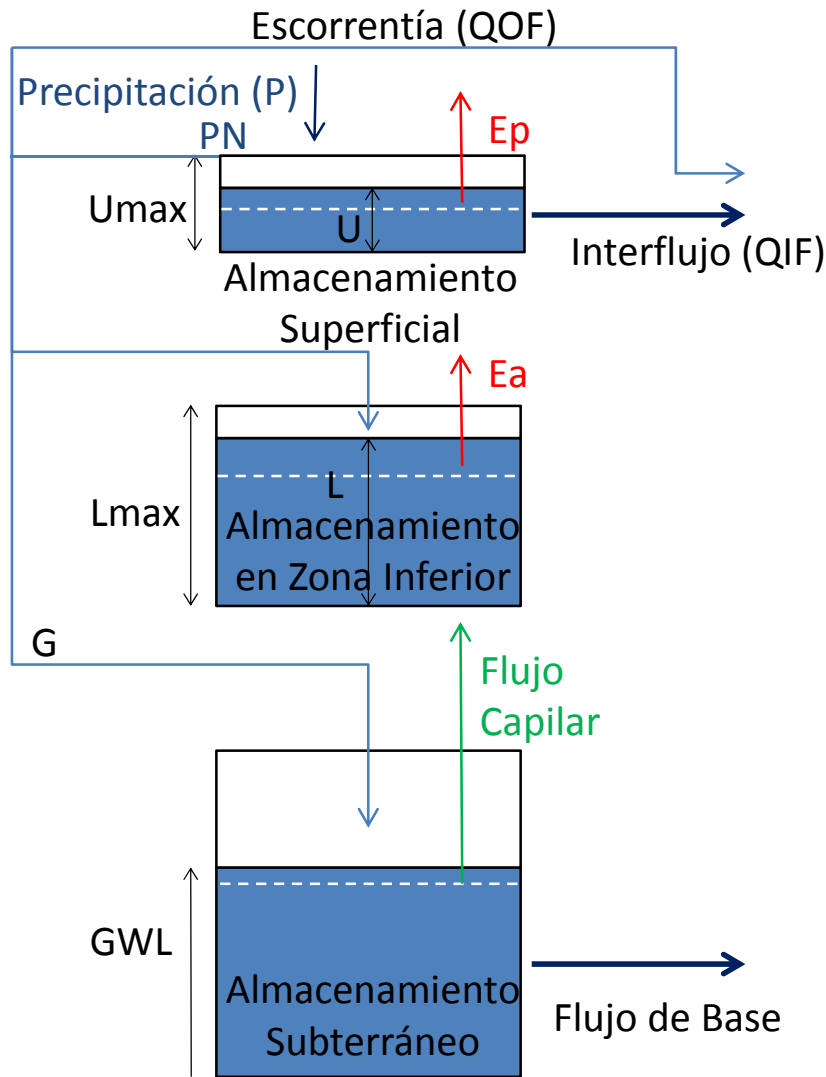


Figura 1: Esquema conceptual NAM

A continuación se describen los principales parámetros y se presentan las principales ecuaciones del modelo:

**Almacenamiento superficial (U):** Es la humedad interceptada por la vegetación, la atrapada en depresiones del terreno y la almacenada en la capa superior del suelo. Disminuye debido al consumo por evaporación y por filtración horizontal (interflujo). Tiene un límite superior ( $U_{max}$ ), que típicamente varía en el rango 10 - 20 mm. Cuando lo supera, algo del exceso de agua ( $P_N$ ) se dirige hacia los cursos de agua como escorrentía ( $QOF$ ), mientras que el resto se infiltra hacia las zonas más bajas y, eventualmente, hacia el almacenamiento como agua subterránea.

**Almacenamiento en zona inferior (L):** Es la humedad almacenada en la capa de suelo inferior a la superficie, desde donde la vegetación captura agua para la transpiración. Además, controla la cantidad de agua que recarga al agua subterránea ( $G$ ) y que alimenta al interflujo ( $QIF$ ) y a la escorrentía ( $QOF$ ). Tiene un límite superior ( $L_{max}$ ), que típicamente varía en el rango 50 - 300 mm. Luego de asignar parte del exceso de agua ( $P_N$ ) a la escorrentía y a la recarga del agua subterránea, el resto incrementa el contenido de humedad de la zona inferior ( $\Delta L$ ) (Ecuación 1):

$$\Delta L = P_N - QOF - G$$

Ecuación 1

Evapotranspiración ( $E_p$ ,  $E_a$ ): Existe una demanda potencial desde el almacenamiento superficial ( $E_p$ ). Si el contenido de humedad en el almacenamiento superficial es menor a ese requerimiento ( $U < E_p$ ), la fracción restante es retirada por la actividad de las raíces desde la zona inferior a una tasa real ( $E_a$ ) proporcional a la evapotranspiración potencial, que varía linealmente con el contenido de humedad relativo de la zona inferior ( $L/L_{max}$ ) (Ecuación 2):

$$E_a = (E_p - U) \frac{L}{L_{max}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Escorrentía (QOF): Cuando el almacenamiento superficial derrama ( $U > U_{max}$ ), el exceso de agua ( $P_N$ ) da lugar a la escorrentía y la infiltración. La parte que contribuye a la escorrentía es proporcional al exceso de agua ( $P_N$ ) y varía linealmente con el contenido de humedad relativo de la zona inferior ( $L/L_{max}$ ) (Ecuación 3):

$$QOF = \begin{cases} CQOF \frac{L/L_{max} - TOF}{1 - TOF} P_N & \text{si } L/L_{max} > TOF \\ 0 & \text{si } L/L_{max} \leq TOF \end{cases} \quad \text{Ecuación 3}$$

donde CQOF es el coeficiente de escorrentía ( $0 \leq CQOF \leq 1$ ), y TOF el valor umbral del contenido de humedad en la zona de raíces para generar escorrentía ( $0 \leq TOF \leq 1$ ). El resto ( $P_N - QOF$ ) se distribuye entre un incremento del contenido de humedad de la zona inferior ( $L$ ) y una percolación profunda hacia almacenamiento en aguas subterráneas. El ruteo de la escorrentía se efectúa utilizando un modelo de dos reservorios lineales en serie con una escala de tiempo variable (Ecuación 4):

$$CK = \begin{cases} CK12 & \text{si } QOF < QOF_{min} \\ CK12 \left( \frac{QOF}{QOF_{min}} \right)^{-\beta} & \text{si } QOF \geq QOF_{min} \end{cases} \quad \text{Ecuación 4}$$

donde CK12 es la escala de tiempo base (típicamente varía en el rango 3 - 48 horas),  $QOF_{min} = 0.4$  mm/hr es el límite superior para ruteo lineal, y  $\beta = 0.4$  (esto corresponde a utilizar la fórmula de Manning para modelar la escorrentía, interpretada entonces como un flujo cinemático).

Interflujo (QIF): Es proporcional al almacenamiento superficial ( $U$ ) y varía linealmente con el contenido de humedad relativo de la zona inferior ( $L/L_{max}$ ) (Ecuación 5):

$$QIF = \begin{cases} CKIF \frac{L/L_{max} - TIF}{1 - TIF} U & \text{si } L/L_{max} > TIF \\ 0 & \text{si } L/L_{max} \leq TIF \end{cases} \quad \text{Ecuación 5}$$

donde CKIF es la escala de tiempo para el interflujo (típicamente varía en el rango 500 - 1000 horas), y TIF el valor umbral del contenido de humedad en la zona de raíces para generar interflujo ( $0 \leq TIF \leq 1$ ). Su ruteo se efectúa utilizando un modelo de dos reservorios lineales en serie, con la misma constante de tiempo (CK12).

Recarga de agua subterránea (G): Es proporcional al exceso remanente de agua luego de considerar la escorrentía ( $P_N - QOF$ ) y varía linealmente con el contenido de humedad relativo de la zona inferior ( $L/L_{max}$ ) (Ecuación 6):

$$G = \begin{cases} (P_N - QOF) \frac{L/L_{\max} - TG}{1 - TG} & \text{si } L/L_{\max} > TG \\ 0 & \text{si } L/L_{\max} \leq TG \end{cases} \quad \text{Ecuación 6}$$

donde TG es el valor umbral del contenido de humedad en la zona de raíces para generar recarga de agua subterránea ( $0 \leq TG \leq 1$ ; típicamente varía en el rango 0 – 0,70).

Flujo de base: Proviene del almacenamiento de agua subterránea y se calcula como la descarga desde un reservorio lineal con una escala de tiempo CKBF, que determina la curva de recesión del hidrograma en períodos secos.

Rendimiento específico del almacenamiento subterráneo (Sy): Mide la cantidad de agua factible de ser almacenada subterráneamente debido a la compresibilidad de la matriz de suelo y del agua en los poros. Depende del tipo de suelo. Valores típicos se encuentran en el rango 0,01 – 0,10 para arcillas y 0,10 – 0,30 para arenas.

Profundidad máxima de agua subterránea que causa flujo de base (GWLBF0): Puede interpretarse como la distancia entre el nivel medio de la superficie del terreno y el nivel de agua del río receptor.

Profundidad del flujo unitario capilar (GWLBF1): Representa la profundidad de la tabla de agua que genera un flujo capilar hacia arriba de 1 mm/día cuando las capas superiores de suelo están secas, correspondiendo al punto de marchitamiento.

Para calcular la serie temporal de evapotranspiración potencial, se aplicó la fórmula de Penman - Monteith, que requiere como datos la latitud, la heliofanía, las temperaturas máxima y mínima diarias y la humedad relativa media. Estos datos fueron provistos por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en la estación Ezeiza. También fueron provistas las series de precipitación en dicha estación.

El modelo hidrológico se encuentra implementado dentro del software Mike 11 (del DHI), que es el que ha sido utilizado para la modelación hidrodinámica de los cursos de agua. En la Figura 2 se presentan las subcuencas identificadas en el modelo hidrológico, mientras que en la Figura 3 se muestran los cursos de agua representados en el modelo unidimensional hidrodinámico. El tramo principal está constituido por el río Matanza – Riachuelo, de aproximadamente 62 km de extensión. En la cabecera de los arroyos se impone un caudal concentrado y en los tramos se introduce un caudal de forma distribuida a lo largo del curso receptor de la esorrentía. En la desembocadura al Río de la Plata se utilizan valores horarios de nivel en la estación Palermo, provistos por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN).

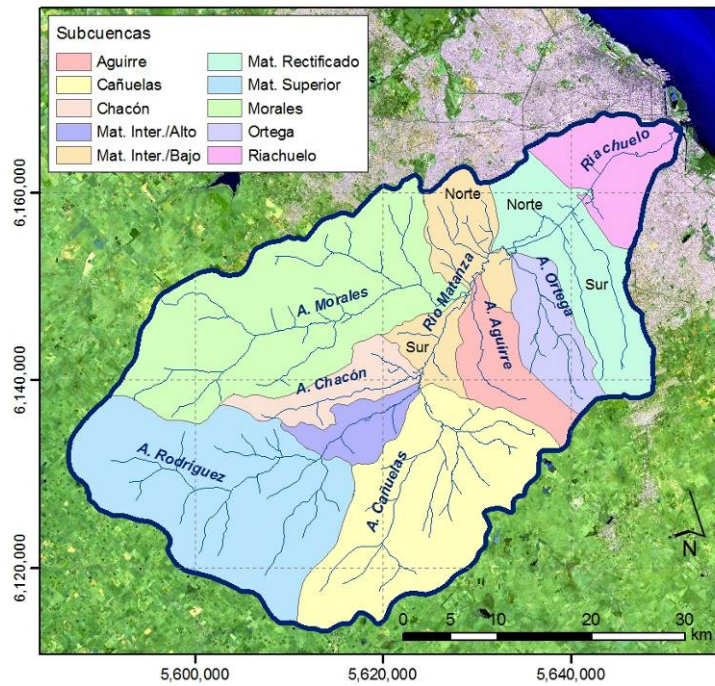


Figura 2: Subcuencas de la cuenca Matanza - Riachuelo

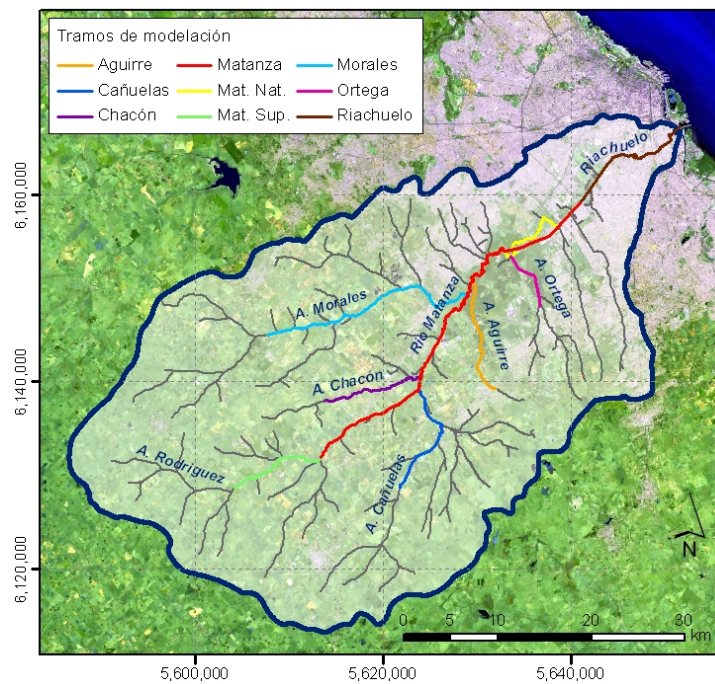


Figura 3: Cursos de agua modelados  
**CALIBRACIÓN DEL MODELO**

La calibración del modelo consistió en ajustar parámetros dentro de los rangos pertinentes, de modo de reproducir lo más fielmente posible las mediciones de caudal efectuadas en los cursos representados. La sensibilidad a ajustes en parámetros del modelo hidrológico es significativa esencialmente en la zona superior de la cuenca, de carácter más rural, donde los aportes antrópicos de agua a los cursos no son preponderantes, y donde no llegan los efectos de la marea. Para la zona inferior de la cuenca, en cambio, de carácter más urbano, resulta importante contabilizar adecuadamente los significativos aportes antrópicos y representar con precisión la amplitud de la

oscilación de marea, controlada por la rugosidad del cauce. Los valores finales adoptados para los parámetros del modelo hidrológico se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Valores de calibración de los parámetros del modelo hidrológico

| <b>Parámetro</b> | <b>Unidad</b> | <b>Valor</b>                       |
|------------------|---------------|------------------------------------|
| $U_{max}$        | mm            | 20                                 |
| $L_{max}$        | mm            | 220                                |
| $CQOF$           | -             | 0,4                                |
| $CKIF$           | hrs           | 1.000                              |
| $CK12$           | hrs           | 2 * <i>Tiempo de Concentración</i> |
| $TOF$            | -             | 0,3                                |
| $TIF$            | -             | 0,6                                |
| $TG$             | -             | 0,4                                |
| $CKBF$           | hrs           | 60.000                             |
| $Sy$             | -             | 0,1                                |
| $GWLBF0$         | m             | 3,0                                |
| $GWLBF1$         | m             | 1,5                                |

Para la representación de la marea se ajustó el coeficiente de rugosidad de Manning (considerado en principio con un valor uniforme de 0,040 en todo el río) en la zona de acción de la marea, que se subdividió en dos tramos: el primer tramo, desde la desembocadura en el Río de la Plata hasta 10 km aguas arriba, que es donde se desarrollan las mayores profundidades y donde se depositan principalmente los sedimentos, con un valor de 0,015 (el utilizado en el Río de la Plata); y el segundo tramo, hasta la cabecera del Canal Aliviador, que es hasta donde llega el efecto de la marea, con un valor de 0,025.

Para la calibración se utilizaron las series de caudales diarios registrados por la Dirección Provincial de Saneamiento y Obras Hidráulicas de la Provincia de Buenos Aires (DIPSOH) durante la década del 60. Las estaciones hidrométricas fueron: Candelaria (A° Morales), sobre el período 1966/1969, Máximo Paz (río Matanza), sobre el período 1966/1968 y Autopista Riccheri (río Matanza), en ausencia del Canal Aliviador, sobre el período 1962/1972 (Figura 4).

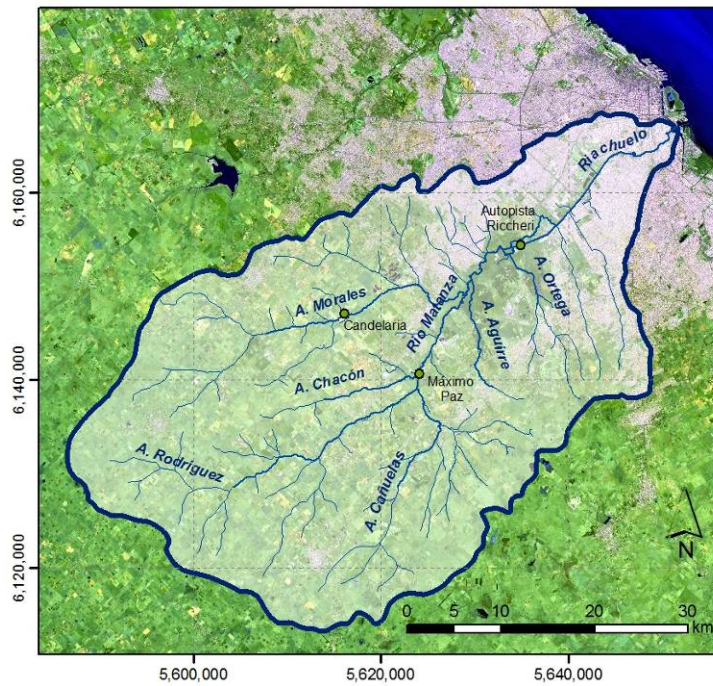
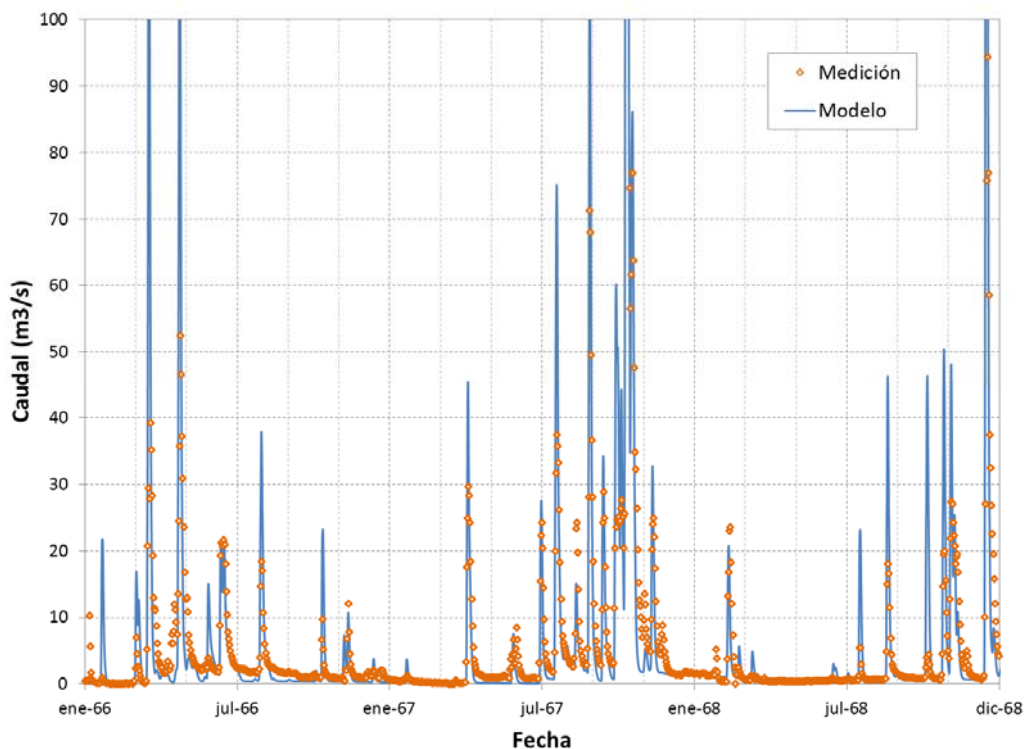


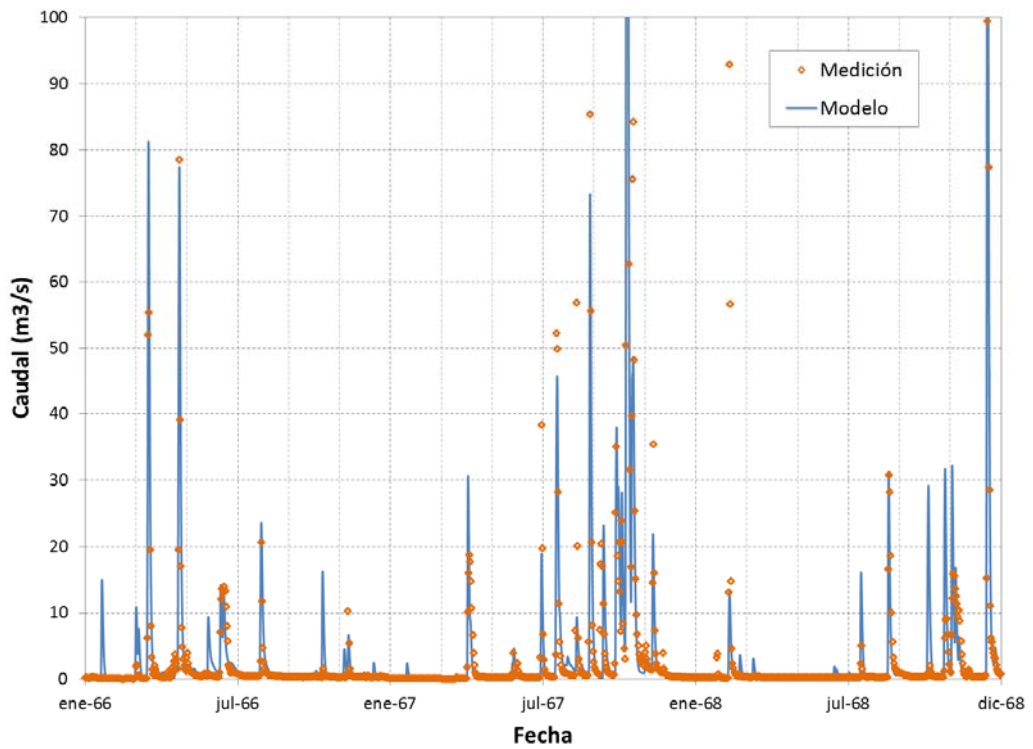
Figura 4: Ubicación de estaciones históricas de serie de caudales

En la Figura 5 se comparan las series de caudales diarios medidas con las provistas por el modelo. Téngase en cuenta que en este período aún no se había construido el Canal Aliviador del río Matanza, por lo que no existían efectos de marea en la estación Autopista Riccheri; en consecuencia, la serie temporal de caudal del modelo se obtuvo sumando lo registrado en la sección de nacimiento del Canal Aliviador y lo aportado por el arroyo Ortega. El nivel de acuerdo general se considera satisfactorio, en el sentido de que el modelo tiende a capturar correctamente el flujo de base y los picos de crecida tanto en oportunidad de ocurrencia como en amplitud.

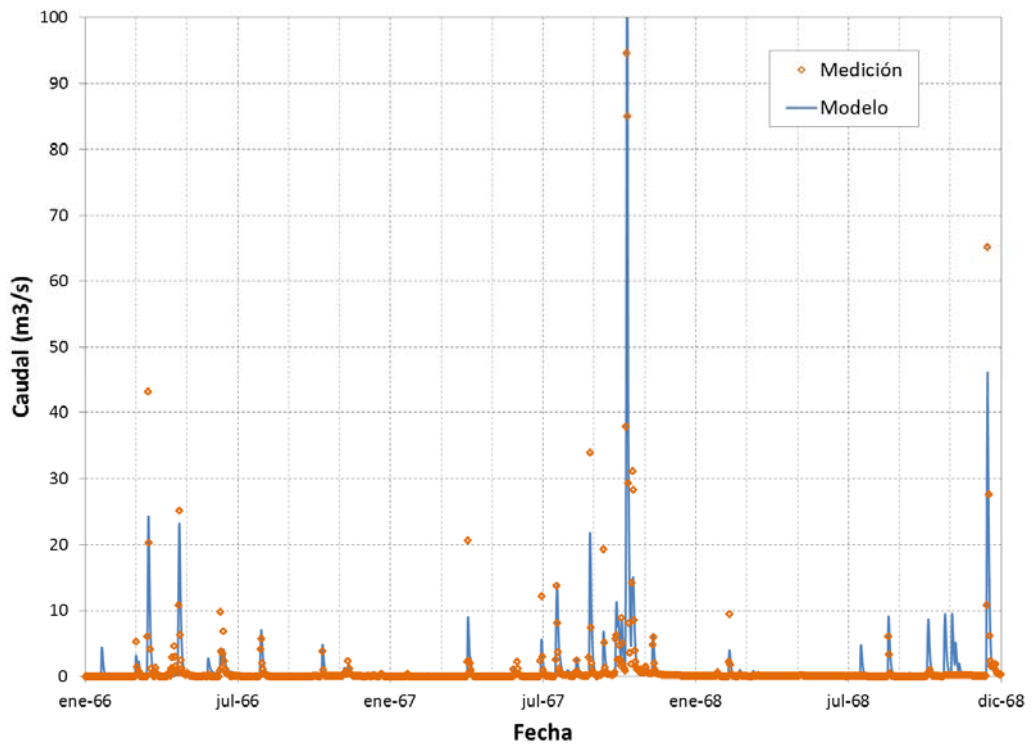


a) Estación Autopista Riccheri (Matanza – Riachuelo)





b) Estación Máximo Paz (Matanza – Riachuelo)



c) Estación Candelaria (A° Morales)

Figura 5: Comparación entre series temporales de caudal medidas y calculadas

## VALIDACIÓN DEL MODELO

Para la validación del modelo se cuenta con la serie de caudales instantáneos del río Matanza sobre el período 1982 / 2007 y la serie de caudales cada 6 horas durante el período de 14 al 25 de mayo de 2000 (pasaje de una crecida) en la estación Autopista Riccheri, sobre el Canal Aliviador, ambas producidas por la DIPSOH.

Estas mediciones son posteriores a la finalización de la canalización del Matanza – Riachuelo (año 1973), por lo tanto, en la estación se hacen presentes los efectos de la marea y no existe relación única entre niveles y caudales. En la Figura 6 se muestra la comparación entre caudales observados y simulados desde el año 1990 a 1995. El acuerdo general se considera satisfactorio, en el sentido de que el modelo provee resultados compatibles con los registrados. Sin embargo, no es posible efectuar una comparación de tipo estadístico entre simulación y mediciones, ya que estas últimas constituyen una base de datos fuertemente incompleta.

En la Figura 7 se muestra la comparación entre lo simulado con el modelo y las mediciones para la crecida del río Matanza - Riachuelo durante mayo de 2000. Se observa un muy buen acuerdo para los niveles, salvo por el relativamente pequeño adelanto que muestran los resultados del modelo. Respecto de los caudales, las diferencias se atribuyen a la mala calidad de la curva altura - caudal en el Canal Aliviador, debido a la penetración de la onda de marea.

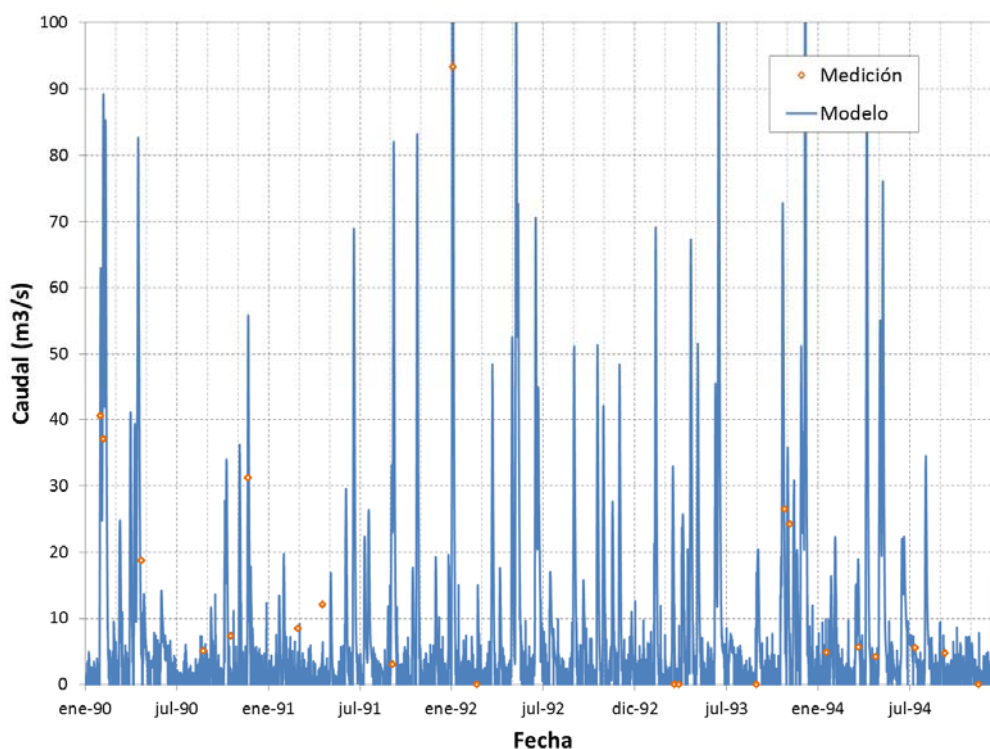


Figura 6: Comparación entre series temporales de caudal medidas y calculadas en Autopista Riccheri

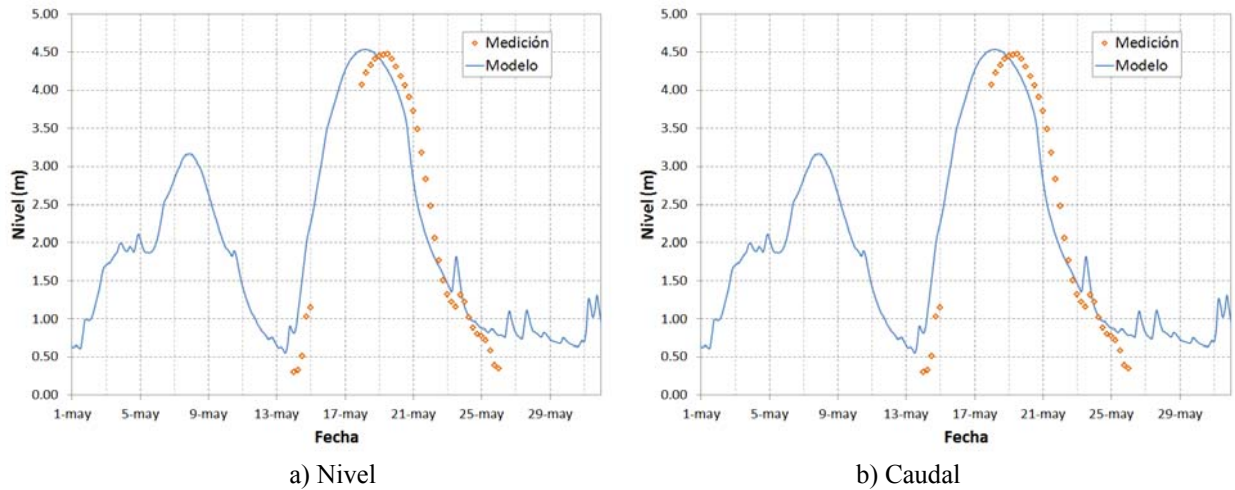


Figura 7: Comparación entre series temporales de nivel y caudal, medidas y calculadas en Autopista Riccheri

Por otro lado, en la cuenca baja, se cuenta con la serie de caudales horarios diurnos del Riachuelo durante la semana del 22 al 26 de marzo de 2004 en la estación Puente Bosch producida por el INA (2005) y la serie de caudales de paso temporal variable del río Matanza - Riachuelo en las estaciones Puente Avellaneda, Regatas Avellaneda, Puente La Noria y Autopista Riccheri en dos campañas (31 de agosto de 2011 y 2 de setiembre de 2011) producida por EVARSA (2012) para la ACuMaR. La ubicación de las estaciones se presenta en la Figura 8.

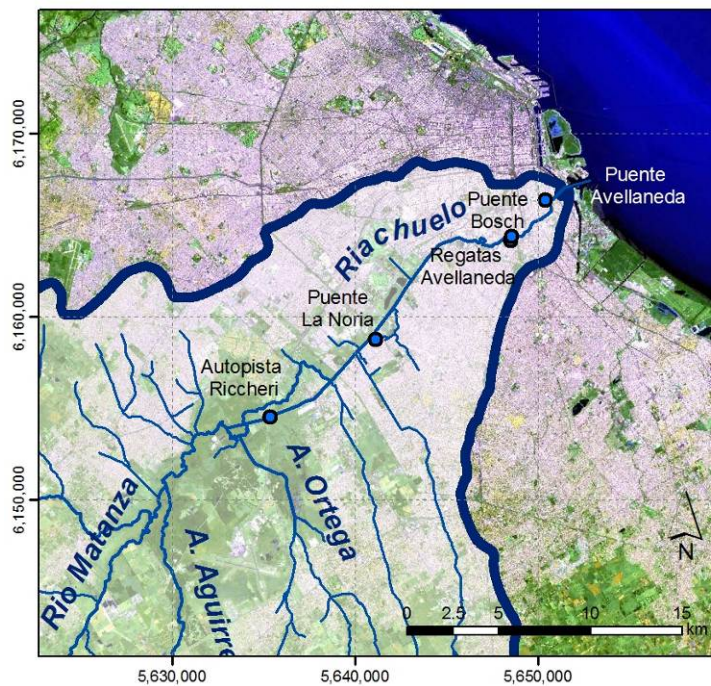


Figura 8: Ubicación de estaciones continuas

Las comparaciones entre mediciones y cálculo en las estaciones más cercanas a la desembocadura, donde los efectos de la marea y las descargas antrópicas son dominantes (disminuyendo la influencia de la variabilidad hidrológica) se presentan en las Figuras 9 y 10. El acuerdo general se considera satisfactorio, teniendo en cuenta las incertidumbres asociadas a las mediciones.

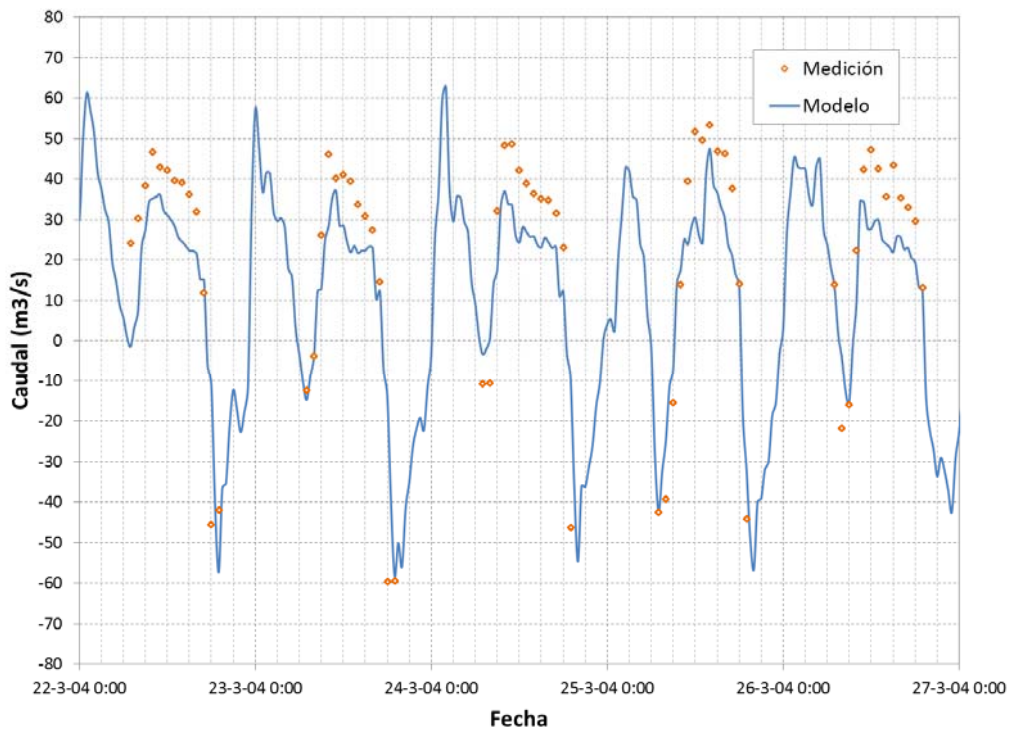
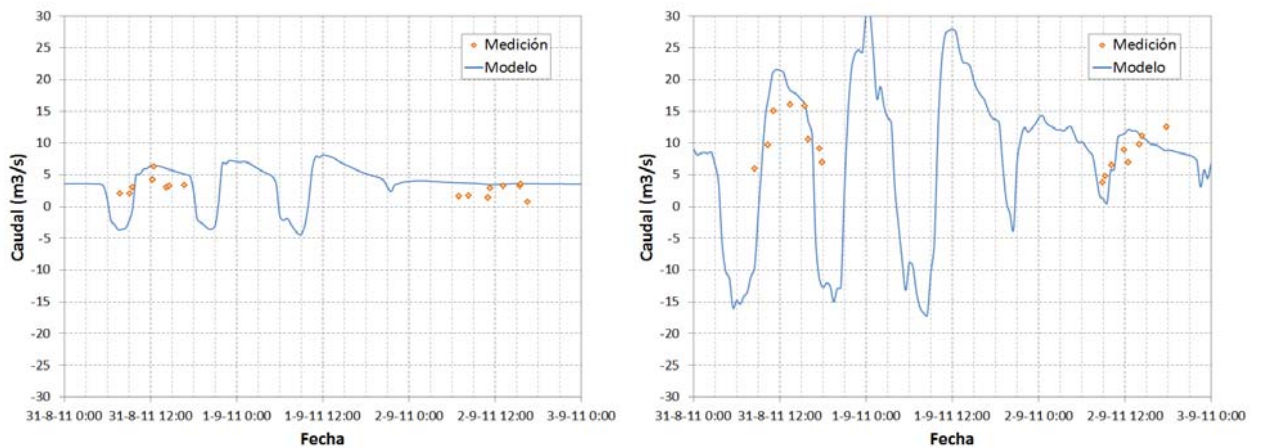
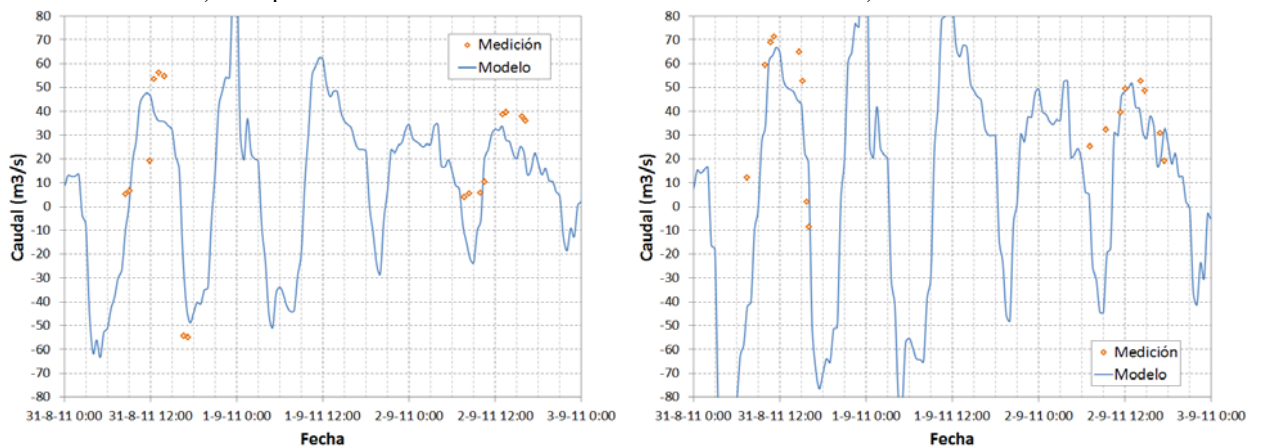


Figura 9: Comparación entre series temporales de caudal medidas y calculadas en Puente Bosch



a) Autopista Riccheri

b) Puente La Noria



c) Regatas Avellaneda

d) Puente Nicolás Avellaneda

Figura 10: Comparación entre series temporales de caudal medidas y calculadas

De esta manera, el modelo hidrológico se considera calibrado y verificado. Es decir, constituye una representación adecuada del balance hídrico dinámico de la cuenca del Matanza - Riachuelo, considerando toda la información hidrométrica disponible.

## CONCLUSIONES

Se ha calibrado y verificado el modelo hidrológico / hidrodinámico para la Cuenca del Matanza - Riachuelo, utilizando toda la información hidrométrica generada hasta el presente, que incluye caudales medidos entre 1966 y 2012 en una diversidad de estaciones, con y sin efectos de marea. De esta manera, se considera que el modelo constituye una representación adecuada del balance hídrico dinámico de la cuenca del Matanza - Riachuelo. Este estudio de modelación ha permitido obtener resultados útiles para la gestión de la cuenca.

En diciembre de 2012 la ACuMaR inauguró la primera estación de monitoreo continuo de caudal y calidad del agua del Riachuelo “Club Regatas Avellaneda”. Actualmente se está en proceso de puesta en marcha de tres estaciones de monitoreo continuo ubicadas en Puente La Noria, Puente Autopista Riccheri y en Cañuelas. Este modelo hidrológico / hidrodinámico permitirá contrastar dichas mediciones y evaluar diversos escenarios hidrológicos (por ejemplo inundaciones) con menor incertidumbre.

## BIBLIOGRAFÍA

- Menéndez, A; et al,** (2009) “*Modelación Matemática de la Cuenca Matanza-Riachuelo para el Estudio de Alternativas de Saneamiento*” Informe Integrador. Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- Danish Hydraulic Institute** (DHI). Mike 11 <http://www.mikebydhi.com/Products/WaterResources/MIKE11.aspx>
- INA** (2005) “*Evaluación de la Calidad Ambiental de la Cuenca Matanza - Riachuelo*” Informe para el Comité Ejecutor de la Cuenca Matanza-Riachuelo.
- Evarsa** (2012) “*Aforos de la Rectificación - Campañas 2 y 3*” Informe para la ACuMaR. Proyecto Desarrollo Sustentable Cuenca Matanza –Riachuelo – Préstamo BIFR 7706 - AR.