

**XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA, SEPTIEMBRE 2008**

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA INTEGRADA
SUPERFICIAL-SUBTERRÁNEA DE UNA
CUENCA DE LLANURA EXTENSA**

Nicolás Badano, Emilio Lecertúa, Mariano Re, Fernando Re y Ángel Menéndez
UTN-Facultad Regional Avellaneda & INA-Laboratorio de Hidráulica, Argentina
angel.menendez@speedy.com.ar

RESUMEN:

Se describe la implementación de un modelo matemático hidrológico-hidráulico, que representa en forma integrada los escurrimientos superficial y subterráneo, para una cuenca de llanura de gran extensión. Se trata de la cuenca del río Salado del Sur, Argentina, de 17 millones de ha de extensión, de gran importancia por su intensa actividad agrícola-ganadera, que ha estado sometida a inundaciones catastróficas. Se explican las metodologías para representar diversos efectos: topografía del terreno, tipo de suelo, uso del suelo, vías de comunicación, etc. El modelo es calibrado para representar en forma continua en el tiempo caudales, niveles superficiales y niveles freáticos medidos, sobre una ventana de tiempo de 40 años. El estudio ha permitido efectuar un diagnóstico sobre las causas de estas inundaciones y analizar, actualizar y optimizar el plan de manejo. Se concluye que los modelos hidrológicos integrados para flujo superficial y subterráneo ya han alcanzado un nivel de madurez suficiente como para ser utilizados como herramienta práctica, y que es posible aplicarlos incluso a escala de cuenca.

ABSTRACT:

The implementation of a mathematical hydrologic-hydraulic model, that represents in an integrated way both the superficial and groundwater flow for a large extent, low slope basin, is described. It is the Salado del Sur basin, Argentina, with an area of 17 million ha, where intense agricultural and cattle farming activities take place, which has been subject to catastrophic floods. Methodologies to represent diverse effects are explained: land topography, soil type, land use, roads, etc. The model is calibrated to represent in a time continuous way measured discharges, superficial and groundwater levels, along a time window of 40 years. The study has led to a diagnosis on the causes of floods and to an analysis, upgrading and optimization of the management plan. It is concluded that integrated hydrological models for superficial and groundwater flow have reached a sufficient level of maturity to be used as a practical tool, and that it is possible to apply them even at a basin scale.

PALABRAS CLAVE:

Hidrología de llanura, Modelo integrado, Inundaciones

INTRODUCCIÓN

La modelación hidrológica de una cuenca de llanura extensa requiere la representación precisa del balance hídrico vertical. Actualmente es posible encarar el problema con modelos esencialmente mecanísticos, capaces de calcular ese balance en forma dinámica, integrando al mismo tiempo la modelación del escurrimiento superficial y el subterráneo.

Se ha aplicado esta metodología para modelar la cuenca del río Salado del Sur, de 17 millones de ha de extensión, ubicada en la Provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 1a). Esta cuenca, de gran importancia por su intensa actividad agrícola-ganadera, estuvo sometida a inundaciones catastróficas, que alcanzaron su máximo a principios de este siglo. El objetivo del estudio fue efectuar un diagnóstico sobre las causas de estas inundaciones y analizar, actualizar y optimizar el plan de manejo propuesto a finales de los años 90 (Plan Maestro Integral o PMI).

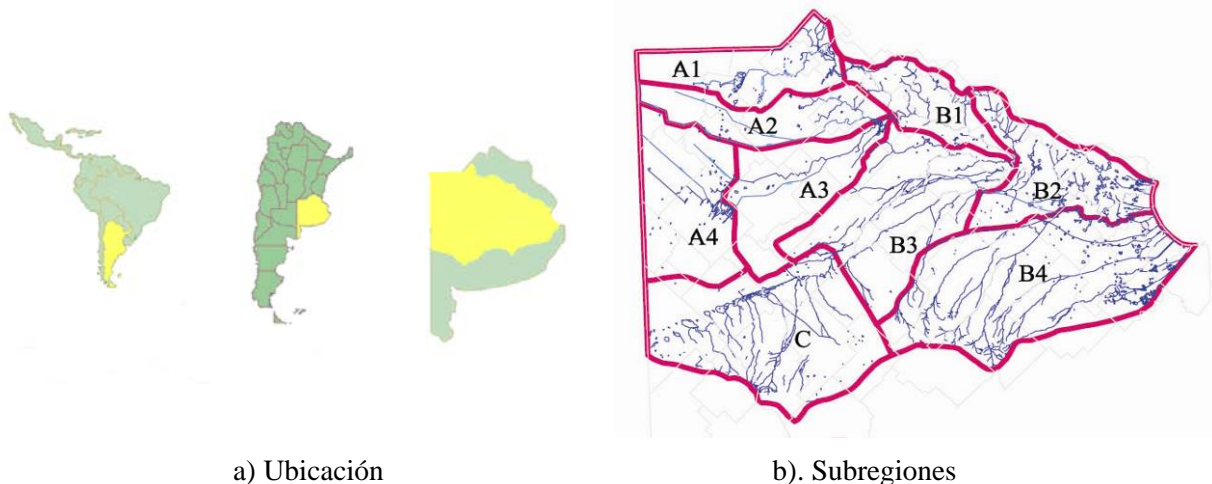


Figura 1.- La cuenca del Río Salado y sus subregiones.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO HIDROLÓGICO – HIDRÁULICO

El modelo matemático hidrológico-hidráulico (MMHH) desarrollado es capaz de representar simultáneamente todos los procesos involucrados en el ciclo hidrológico. En particular, este enfoque integrado permite incluir la interacción entre el agua subterránea y el escurrimiento superficial.

Los principales procesos representados son los siguientes:

- Intercepción por el follaje
- Infiltración a través de la zona vadosa
- Almacenamiento en las irregularidades del terreno
- Evapotranspiración
- Escurrimiento subterráneo
- Escurrimiento superficial

El modelo se desarrolló utilizando el sistema de modelación MIKE SHE, del DHI Water & Environment (www.dhisoftware.com/mikeshe). Dicho sistema es un modelo de base física, de parámetros distribuidos. En consecuencia, requiere ser alimentado con una gran cantidad de datos y parámetros físicos (variación espacial y temporal de datos meteorológicos, hidrológicos, geológicos e hidrogeológicos). El sistema MIKE SHE se acopló al modelo MIKE 11, que permite representar simultáneamente el escurrimiento unidimensional en cauces.

Con el objetivo de implementar herramientas de cálculo eficientes y precisas, se dividió la cuenca en una serie de submodelos. Dicha división se realizó siguiendo dos premisas principales:

- Respetar las subcuencas superficiales, realizando la partición aproximadamente a lo largo de divisorias de aguas. Estas subcuencas tienen en cuenta los trasvases producidos por las obras hidráulicas existentes.
- Procurar que las divisorias entre submodelos sean normales a las curvas isofreáticas. En los tramos en que esto no fue posible se consideraron condiciones de borde hidrogeológicas especiales (ver ‘Datos de condicionantes’).

Los siete submodelos resultantes siguen aproximadamente los límites de subregiones planteados por el Plan Maestro Integral (Figura 1b), con algunas modificaciones a fin de cumplir los criterios anteriormente enunciados. En particular, las subregiones A3 y A4 se representaron en un solo submodelo. Los flujos salientes de agua resultantes en cada submodelo se introdujeron en el submodelo de la región inmediatamente aguas abajo como entradas.

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Datos geométricos

Por razones de eficiencia computacional se seleccionó para la resolución una grilla rectangular con un paso espacial regular de 5 km, excepto para la subregión A1, para la que se usó un paso de 2,5 km de modo de representarla con algo más de precisión, siendo que se trata de la zona donde se encontraban implementándose obras al momento del estudio. La malla utilizada para discretizar el dominio de dicha subregión estuvo constituida por alrededor de 6000 elementos o celdas.

Como fuente para los datos topográficos se utilizó un Modelo Digital del Terreno, de 90 m de paso (en adelante, MDT de detalle), construido en base a los datos satelitales de radar (SRTM) ajustados a las curvas de nivel registradas por el Instituto Geográfico Militar (IGM). El nivel topográfico de terreno correspondiente a cada celda se obtuvo como promedio de los valores asociados a los puntos interiores a la celda, generándose así el MDT del modelo.

Se distinguieron tres capas hidrogeológicas, como representativas de las principales formaciones. La capa superior está asociada a Formaciones Post-Pampeanas; la segunda capa corresponde a la Formación Pampeana; la tercera capa resulta de la sucesión horizontal de las formaciones Puelche (Arenas de granos medianos-finos) y Araucana (Arcillas y arcillas arenosas con yeso). Esta descansa sobre la Formación Precámbrica, que se consideró impermeable. Se dispuso de un Modelo Digital de Elevación de dichas formaciones con paso de 5 km, compatible con el paso de discretización adoptado.

Para cada submodelo se identificaron conducciones concentradas principales, naturales o artificiales (ríos, arroyos, cañadas, canales), para la situación preoperacional, es decir, antes de la implementación de las obras del Plan Maestro. Su planimetría se obtuvo de mapas y planos. Para la mayoría se contó con relevamientos de secciones transversales. Por razones de eficiencia computacional y consistencia con el paso de discretización de la cuenca, al modelo se incorporaron secciones cada 1 o 2 km. En la Figura 2a se muestran las conducciones concentradas principales para la subregión A1.

A medida que se generan excedentes hídricos y estos comienzan a escurrir, tienden a concentrarse en determinadas zonas del terreno que, debido a las bajas pendientes de las cuencas de llanura, a menudo no presentan cauces definidos. La planimetría de estas zonas de concentración de flujo, llamadas en este estudio *ramales*, se obtuvieron a partir del análisis del MDT de detalle. Los ramales fueron incorporados en el modelo unidimensional acoplado, a fin de representar los flujos

durante las crecidas. En la Figura 2b se muestran los ramales determinados para la subregión A1. Allí mismo se identifican las subcuencas asociadas a cada ramal.

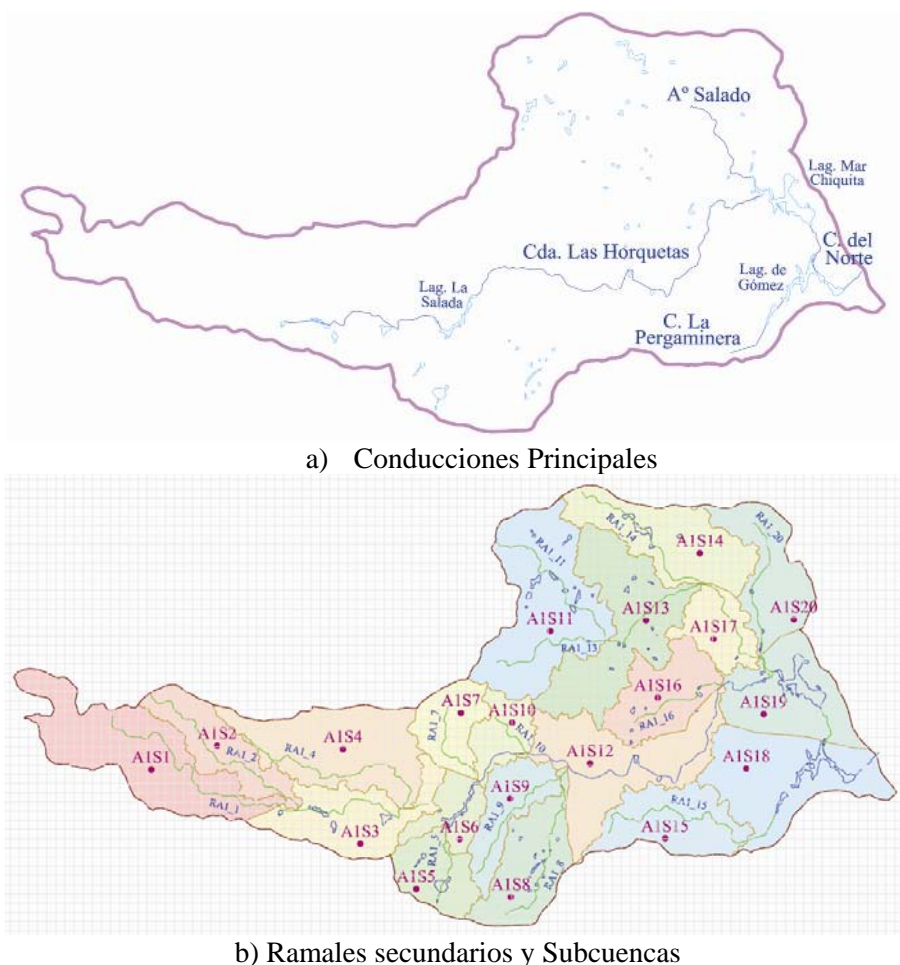


Figura 2.- Conducciones concentradas para la subregión A1.

La cuenca del Salado presenta numerosas cubetas, de origen eólico. Estas se conocen en la Pampa Húmeda como *bajos*. Los bajos constituyen zonas de almacenamiento no resueltas a la escala del modelo, ya que sus dimensiones son menores al paso de discretización horizontal. En consecuencia, su efecto integrado debe ser representado como una abstracción inicial (volumen por unidad de área), al igual que se hace con los charcos en modelos de menor escala. Dicha abstracción inicial se zonificó por subcuenca. El volumen de bajos por subcuenca se determinó también a partir del MDT de detalle.

Las redes de comunicación vial y ferroviaria constituyen obstrucciones significativas al escurrimiento de las aguas. Este efecto de obstrucción es aminorado por medio de obras de arte: puentes para permitir el pasaje del escurrimiento concentrado, y alcantarillas para permitir el paso de la escorrentía. Las rutas y ferrocarriles se representan en el MIKE SHE como contornos unidimensionales impenetrables. El flujo de agua a través de las obras de arte se tuvo en cuenta mediante las conducciones que los atraviesan.

Datos de forzantes

Las precipitaciones constituyen el forzante principal del proceso hidrológico para el sistema hídrico, ya que representan la inyección de agua al sistema. Se dispuso de series temporales de precipitaciones diarias en una gran cantidad de estaciones de la cuenca (Figura 3a), si bien con grandes baches de información. En base a los datos disponibles, se estableció como intervalo de tiempo de la simulación hidrológica continua el período 1963-2004. Se construyeron polígonos de

Thiessen alrededor de cada estación pluviométrica. La serie temporal de lluvias de cada estación fue asignada a toda el área del polígono de Thiessen asociado.

La evapotranspiración potencial puede ser considerada como un segundo forzante del proceso hidrológico para el sistema hídrico, ya que representa la extracción potencial de agua al sistema. Se dispuso de series temporales de evapotranspiración potencial diaria en varias estaciones climáticas de la cuenca, presentes en menor cantidad que las estaciones pluviométricas (Figura 3b). Estas series fueron obtenidas a partir de datos de temperatura, heliofanía, radiación, velocidad del viento y humedad relativa mediante método de Penman. Los registros presentaron baches de información para el período de trabajo, 1963-2004. Al igual que para las precipitaciones, se construyeron polígonos de Thiessen alrededor de cada estación climática.

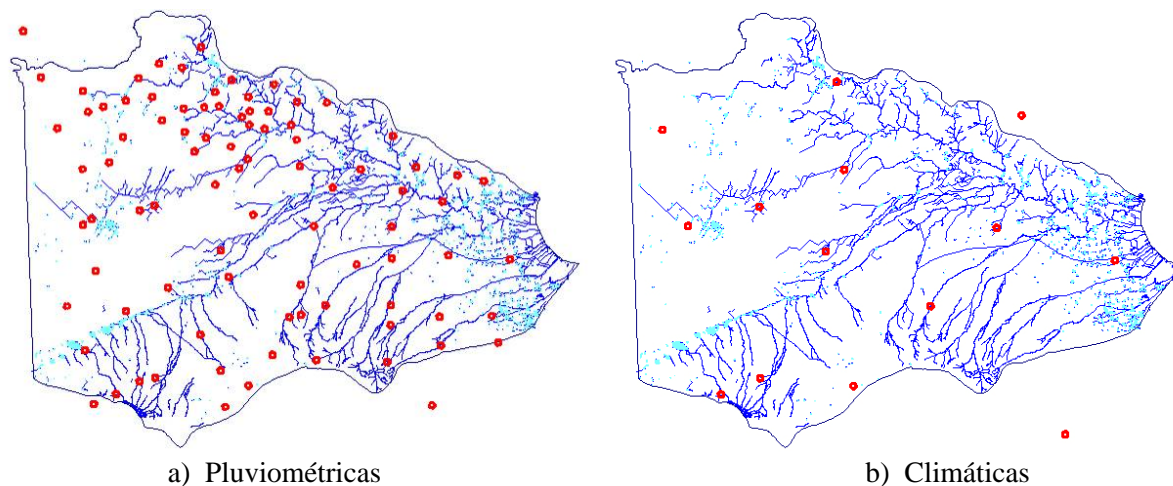


Figura 3.- Estaciones meteorológicas.

Datos de condicionantes

La evapotranspiración real está condicionada por las características del follaje y de las raíces de la vegetación, siendo siempre menor o igual a la evapotranspiración potencial. En el MIKE SHE esas características se representan, respectivamente, por el índice de área foliar (*LAI*) y el de profundidad de las raíces (*RD*). Dado que la zona de estudio puede considerarse como completamente antropizada, siendo los usos básicos del suelo la agricultura y la ganadería, el *LAI* y el *RD* evolucionan con una modulación estacional, la cual depende del tipo de cultivo. Se dispuso de series temporales anuales de áreas sembradas de distintos cultivos, discriminadas por partido. En función de los ciclos anuales de cada cultivo, ponderando su producción para cada año, pudieron reconstruirse las series mensuales de *LAI* y *RD* zonificadas por partido para todo el período 1963-2004. En la Figura 4 se muestra, a título ilustrativo, las series resultantes de *LAI* y *RD* para el partido de Gral. Arenales. La mayor modulación estacional que se observa durante los últimos años se debe al incremento de área destinada a la agricultura en desmedro de la ganadería.

El tipo de suelo condiciona la infiltración de agua hacia el subsuelo. En el modelo matemático, la infiltración a través de la zona vadosa depende de la conductividad vertical, la cual es una función de la saturación efectiva elevada a una potencia, denominada coeficiente de potenciación de Averjanov, cuyo valor depende del tipo de suelo. El modelo ha demostrado una sensibilidad considerable al valor de dicho parámetro. Para estimar su valor en cada zona se efectuó una correspondencia entre valores del coeficiente de Averjanov y las categorías de suelo encontradas en la cuenca del Salado, de acuerdo al Atlas de Suelos del INTA (INTA, 1995). La zonificación resultante se presenta en la Figura 5a.

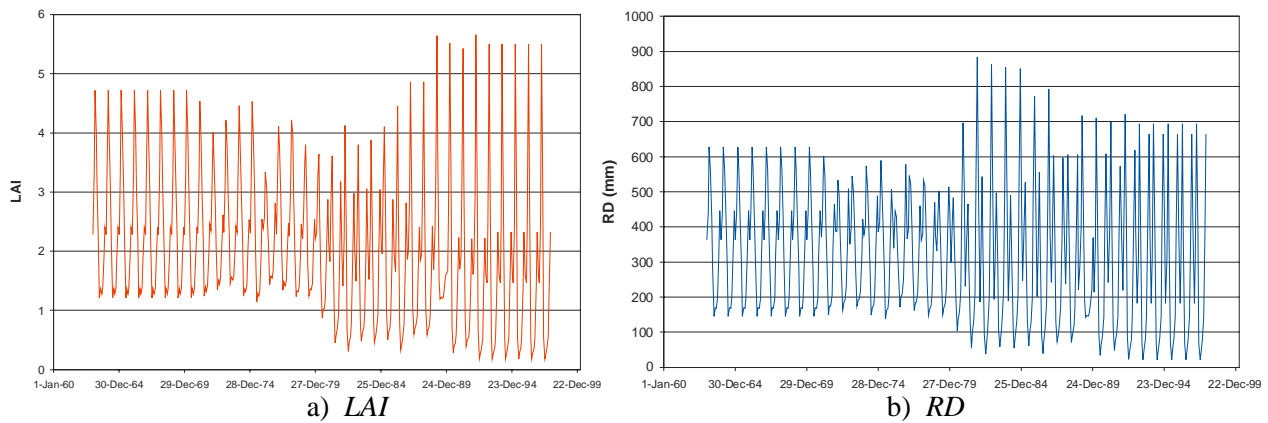


Figura 4.- Series de LAI del partido de Gral. Arenales.

La humedad del suelo condiciona la infiltración a través de la saturación efectiva. Esta depende de dos parámetros: la humedad en saturación y la humedad residual, a los cuales los resultados del modelo han mostrado una sensibilidad considerable. Se adoptaron los valores uniformes 0,405 para la humedad del suelo en saturación y 0,015 para la humedad residual del suelo, como representativos de una media para suelos entre gruesos y medio finos (Wösten, 1999).

La discretización vertical condiciona la representación del flujo subterráneo, dado que no es posible, por razones operativas (capacidad de cálculo), hacer que el error de truncamiento se torne despreciable. En general, el subsuelo muestra una zona no saturada en la parte superior y una saturada en la inferior, que requieren discretizaciones diferentes. En base a los datos disponibles de series históricas de niveles freáticos, se tomó un valor de 40 m como cota inferior para el espesor de la zona no saturada, que fue discretizado en 9 celdas. Para representar la zona saturada subyacente, el subsuelo fue discretizado en tres celdas, correspondientes con las principales capas hidrogeológicas.

La permeabilidad hidráulica vertical del suelo saturado también condiciona la infiltración (Wagner y Medina, 1998). Los resultados muestran sensibilidad a este parámetro. Por otro lado, la permeabilidad hidráulica horizontal del suelo afecta solamente el escurrimiento del agua subterránea. Dado que dichos flujos son extremadamente lentos debido a las bajas pendientes de la cuenca, se verificó muy baja sensibilidad de los resultados a variaciones en este parámetro dentro los rangos informados. Para ambos parámetros se utilizó en el modelo la zonificación y valores estimados en el PMI de la Cuenca del Salado.

La capacidad de almacenamiento en el suelo condiciona el flujo subterráneo. Esta se representa por medio de dos parámetros: el almacenamiento específico y el rendimiento específico. Los resultados del modelo han mostrado una sensibilidad considerable al valor del almacenamiento específico. Se adoptó el valor uniforme 2×10^{-4} 1/m, como representativo de un suelo arenoso denso (Anderson y Woessner, 1992). La sensibilidad de los resultados del modelo al rendimiento específico es relativamente baja. Se adoptó en este caso el campo de valores utilizado en el PMI.

En la cuenca del Salado las condiciones iniciales constituyen un condicionante significativo de la evolución del sistema. En particular, el nivel freático inicial es muy determinante de esa evolución, ya que para reproducir correctamente las mayores inundaciones registradas en la cuenca (primeros años de las décadas de 1990 y del 2000) es necesario que las fuertes precipitaciones que las generaron se encuentren en presencia de niveles freáticos muy cercanos a la superficie del terreno, y esto se logra partiendo de niveles iniciales adecuados. Adicionalmente, para evitar un largo transitorio durante el arranque, que inutilizaría varios años iniciales de la corrida, es necesario que la condición inicial represente una condición de régimen, con el balance vertical bien establecido. Esta condición se generó mediante una corrida de estabilización, bajo un régimen de lluvias y

evapotranspiración potencial con periodicidad anual. Dicha precipitación anual se calibró a fin de obtener los niveles freáticos iniciales deseados.

Dado que se sabe que las curvas isofreáticas en la cuenca son muy aproximadamente perpendiculares a la fronteras elegida para los submodelos, se adoptó como condición de borde un contorno impermeable para el agua subterránea. En los tramos particulares de las fronteras en que no se cumple dicha condición se adoptó como condición de borde un gradiente piezométrico fijo, obtenido de las curvas isofreáticas medias conocidas (Figura 5b).

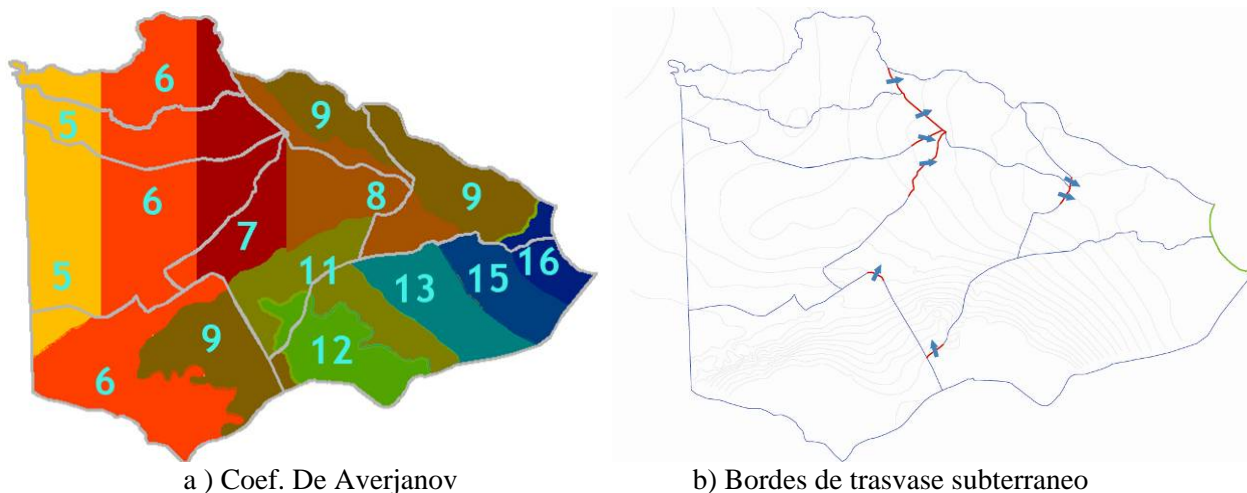


Figura 5.- Coeficiente de Averjanov y Bordes de trasvase de agua subterránea entre subregiones.

La rugosidad del terreno condiciona la velocidad de la escorrentía. Esta fue caracterizada mediante un coeficiente de rugosidad de Manning. Se verificó una relativamente baja sensibilidad de los resultados a variaciones en este parámetro dentro los rangos informados, por lo que se asignó finalmente al mismo un valor uniforme de 0,033 (Chow, 1959).

VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO

Criterios

Como criterio general de aceptabilidad, el modelo debe ser capaz de proveer resultados que muestren un acuerdo cuantitativo satisfactorio con las mediciones disponibles de niveles y caudales de aguas superficiales y niveles freáticos. Al mismo tiempo, se apuntó lograr un acuerdo cualitativo satisfactorio entre los mapas de inundación asociados a las grandes crecidas, provistas por el modelo y los registrados satelitalmente.

En primer lugar, el modelo se validó verificando que se logran reproducir las grandes tendencias; en particular, los momentos de ocurrencia y orden de magnitud de los mayores excedentes hídricos, y la modulación de los niveles freáticos.

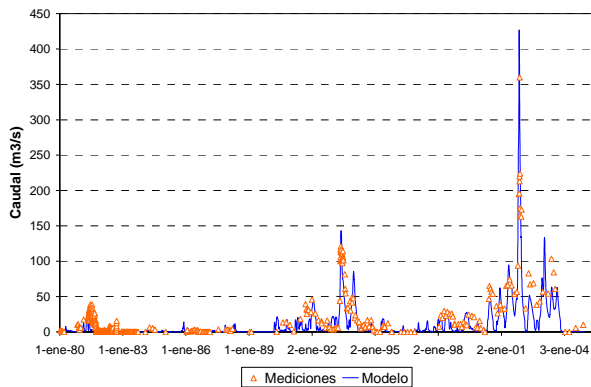
En segundo lugar, el modelo se calibró tratando de reproducir lo más fielmente posible los valores registrados, en un sentido global. Para ello se ajustaron el nivel freático inicial y la evapotranspiración potencial, aplicándole un factor de reducción de entre 0.85 y 1 variable para las distintas estaciones. Cabe destacarse que los datos de evapotranspiración potencial tienen en general una incertidumbre de ese orden.

Resultados

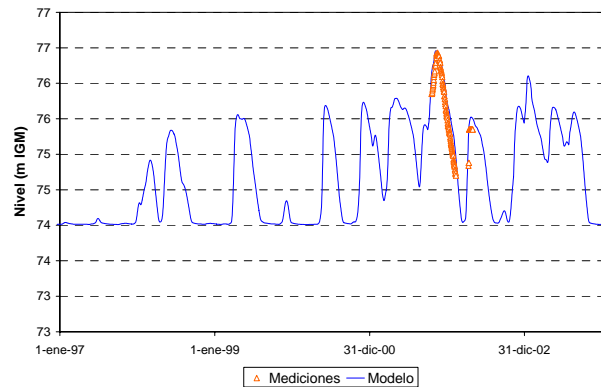
En línea generales se obtuvieron acuerdos satisfactorios al comparar los datos históricos registrados con los resultados calculados con el MMHH. A título ilustrativo, se presentan a continuación algunos resultados obtenidos para la subregión A1.

La Figura 6a muestra la comparación entre los aforos y los caudales calculados para la situación preoperacional en el Río Salado a la salida de la subregión. En la Figura 6b se comparan los registros de nivel en la Laguna de Gómez con los resultados del modelo.

En la Figura 7 se muestra la comparación entre registros freaticos y niveles calculados en dos estaciones. El acuerdo se considera muy satisfactorio en términos generales, ya que el modelo es capaz de reproducir la modulación temporal de los registros.

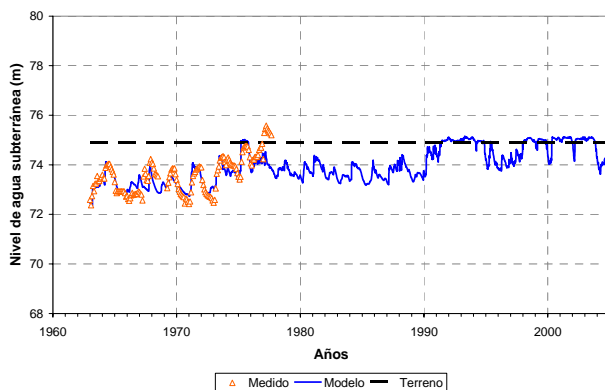


a) Caudales en el R. Salado, Ruta 7

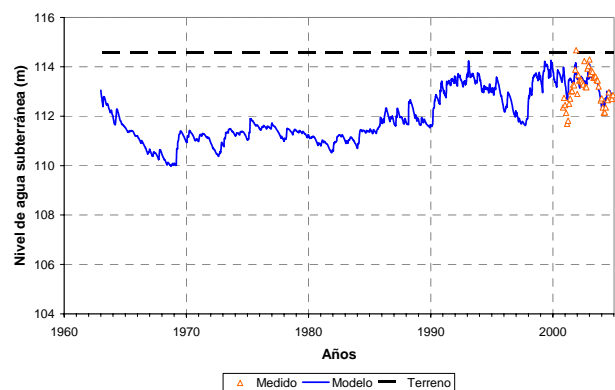


b) Niveles en la Lag. De Gomez

Figura 6.- Comparación entre caudales y niveles registrados y series calculadas.



a) Junín



b) F4

Figura 7.- Comparación entre niveles freáticos registrados y serie de niveles calculados.

La Figura 8 presenta la comparación entre las zonas inundadas de acuerdo a imágenes satelitales y al modelo, para los instantes de mayor inundación correspondientes a las crecidas de 1993 (mayo) y 2001 (noviembre). Se observa un acuerdo cualitativo satisfactorio.

Si bien el flujo de agua subterránea fue modelado por subregión, el ensamble de las isofreáticas resultó compatible entre subregiones, tal cual surgió de efectuar una comparación con resultados del modelo regional de agua subterránea obtenidos en el PMI. Esto se considera una validación adicional de la metodología de modelación utilizada.

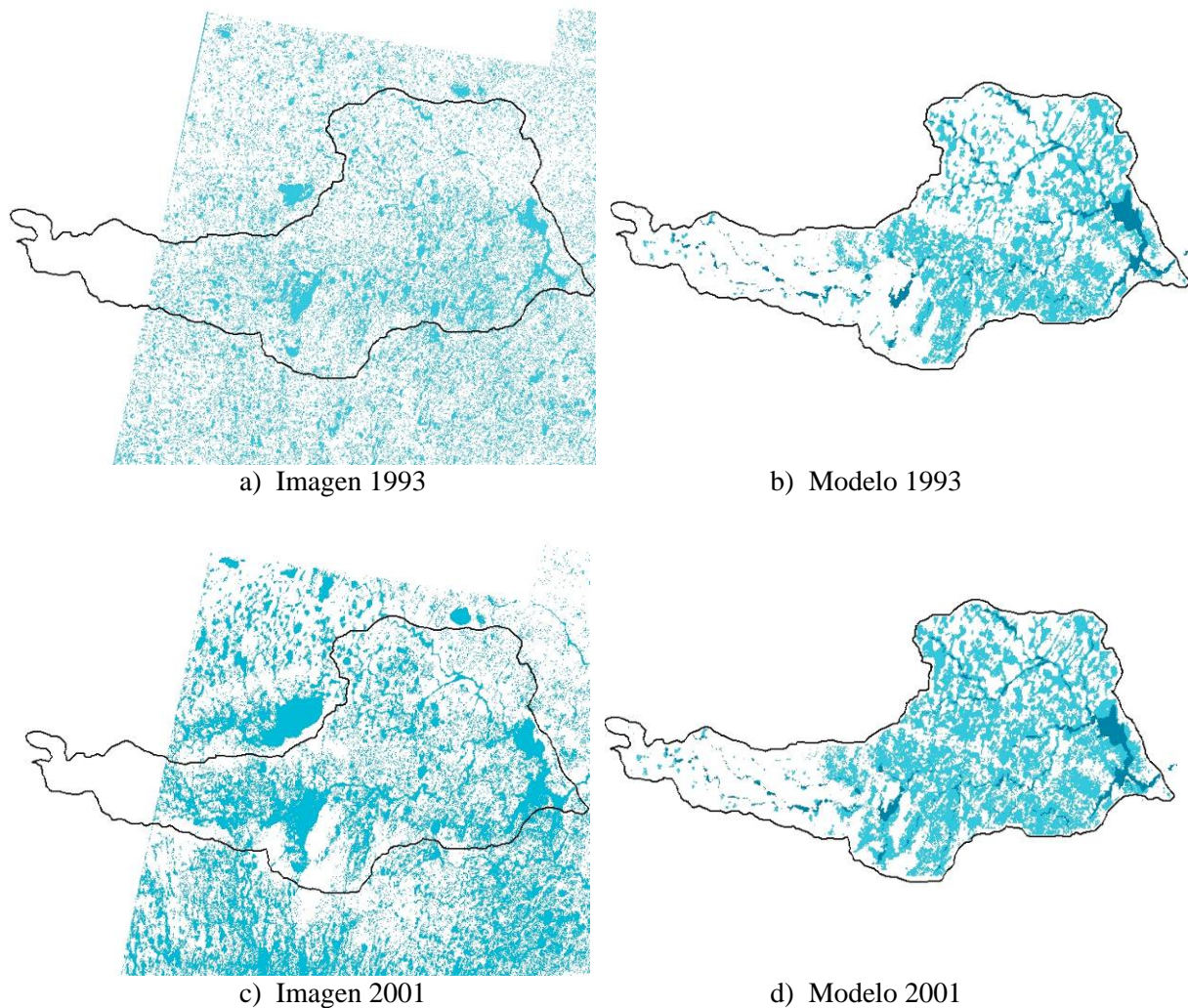


Figura 8.- Comparación entre zonas inundadas registradas y calculadas en situación preoperacional para la subregión A1.

PRODUCTOS DEL MODELO

Tipos de productos

El modelo provee en general dos tipos de productos: mapas de la distribución instantánea de la distintas variables y series temporales de las mismas para puntos o secciones fijas. En forma directa, el modelo provee ambos tipos de productos para las variables primarias del problema. Existen algunas variables secundarias de interés que debieron ser obtenidas mediante posprocesamiento de esas variables primarias. A continuación se presentan resultados directos e indirectos del modelo.

Excedentes hídricos

El excedente hídrico es el agua que queda en superficie, luego del balance vertical, y, superando la abstracción inicial, escurre. Es una variable secundaria que representa el efecto neto de las precipitaciones, ya que tiene en cuenta los efectos del nivel de la napa freática y de la inundación superficial. Para cada celda, se obtiene restándole a la precipitación la evapotranspiración real, la infiltración y la abstracción inicial.

Al ser el excedente hídrico el índice representativo del efecto neto de las precipitaciones, es el que ha sido utilizado para caracterizar la recurrencia de los eventos de inundación. Se trabajó a un nivel de agregación de subcuenca.

Caudales en ramales

Los ramales colectan el excedente hídrico de la subcuenca asociada. El caudal del ramal es una variable primaria. Se analizó el caudal al pie del ramal, aunque lo suficientemente alejado de la ‘desembocadura’ en la conducción principal como para evitar efectos de remanso. Obviamente, el caudal en los ramales muestra comportamientos similares a los de los excedentes hídricos de la subcuenca asociada.

Para efectuar una categorización de ramales, que contribuya a definir un criterio de prioridades en cuanto a construcción de canales colectores secundarios, se estableció un indicador de su capacidad de captación. Se eligió como índice el caudal medio asociado a la ventana 1990-2004, que es el que capta los mayores excedentes y evita los grandes períodos de caudal nulo. A partir de este tipo de resultados se puede construir directamente el ranking de capacidad de captación.

Áreas inundadas

Es necesario distinguir entre dos tipos de inundación. Por un lado, la ‘inundación en bajos no drenados’ es la que se produce en los bajos que no poseen un drenaje y, en consecuencia, almacenan agua básicamente estanca, que se acumula hasta infiltrar o evaporarse. Por otro lado, la ‘inundación a lo largo de las conducciones’ es la que se produce a lo largo de una conducción concentrada (río, arroyo, cañada) o de una serie de bajos conectados por canales, donde existe un drenaje hacia una zona controlada. Nótese que a lo largo de las conducciones puede haber inundación aún sin desborde, ya que, además del área propia de los eventuales conducciones concentradas (relativamente pequeña), incluye el área inundada de los bajos y lagunas conectados por la conducción (área de bajos drenados).

Inundación en bajos no drenados

Dado que en el modelo el efecto de almacenamiento en bajos está incorporado en forma agregada, como una abstracción inicial, la inundación en bajos no drenados no es un valor directamente accesible de los resultados, sino que es necesario desarrollar una metodología de ‘recuperación’ de esa información. Se planteó una ley para relacionar el volumen de agua acumulada en superficie V , que constituye una variable de salida del modelo, versus el área de bajos no drenados inundada, A_{in} .

Se implementó un código computacional para efectuar esta operación en forma automática. En la Figura 9a se presenta, a título ilustrativo, las series temporales de área total inundada de bajos no drenados para la subregión A1. Se observa claramente la tendencia creciente del área inundada de bajos no drenados.

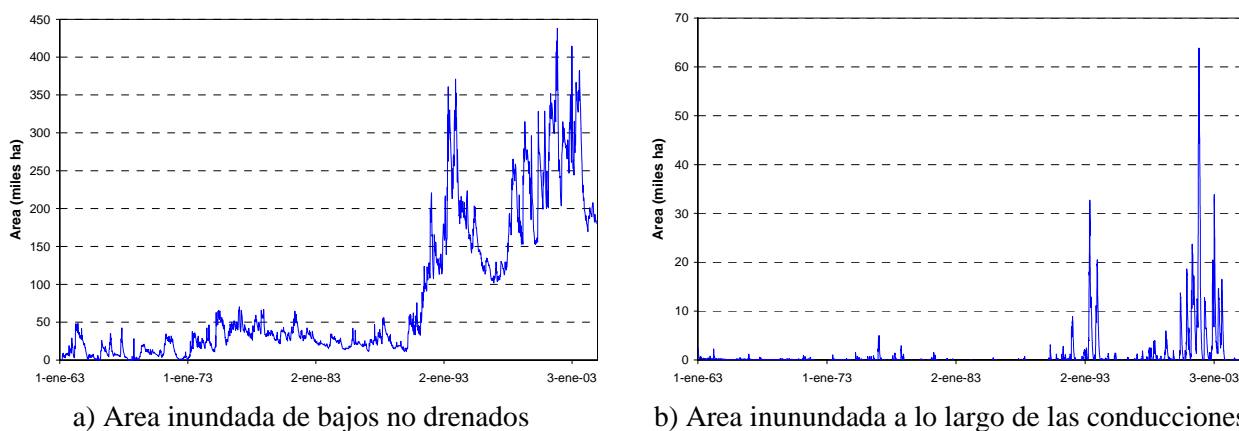


Figura 9.- Áreas inundadas parciales para la subregión A1.

Inundación a lo largo de las conducciones

El MIKE 11 provee series temporales de niveles de agua a lo largo de todas las conducciones concentradas (principales y ramales). Combinando esa información con los datos de perfiles

transversales, es posible determinar las series de áreas instantáneas de inundación asociadas a los distintos tramos.

Se construyó un algoritmo para efectuar esta operación, el cual fue implementado en un código computacional. En la Figura 9b se muestra, a título ilustrativo, la serie temporal de área de inundación a lo largo de las conducciones para la subregión A1. En este caso también se ha sustraído un valor de base (26 mil ha), interpretado como asociado a lagunas permanentes. Comparando con la Figura 9a se observa que las áreas inundadas a lo largo de las conducciones son, en general, un orden de magnitud menor a las correspondientes a bajos no drenados.

Inundación total

La Figura 10a presenta, a título ilustrativo, el área total inundada (suma del área inundada de bajos no drenados y a lo largo de las conducciones) para la subregión A1. En la misma figura se indica el área total de bajos y lagunas (luego de sustraerle la suma de los valores de base para bajos no drenados y conducciones); la superación de este valor indica completamiento de la capacidad de almacenamiento en bajos y lagunas, lo que significa que hubo desbordes generalizados. Nótese que éstos efectivamente llegaron a producirse en algunos momentos. En la Figura 10b se muestra el mismo resultado pero relativo al área total de cada subcuenca. Se observa que, para la subregión A1, el área inundada llegó a representar, para los momentos pico, una inundación del orden del 20 al 30% de la superficie de la subregión.

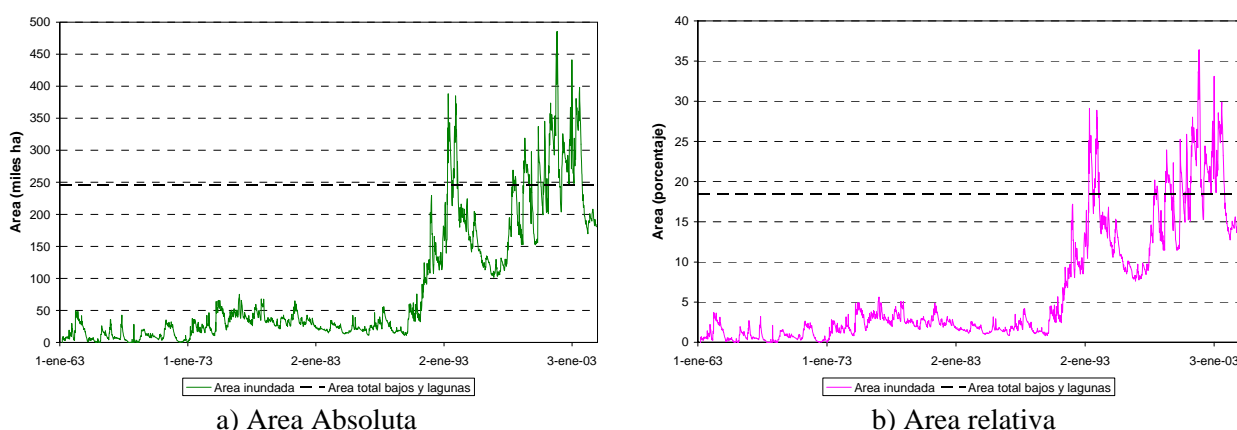


Figura 10.- Área inundada total para la subregión A1.

Mapas de inundación

Para construir los mapas de inundación, se proció cortando la superficie constituida por el MDT de detalle con la superficie de inundación obtenida del modelo.

En la Figura 8 se presentaron mapas de inundación de acuerdo al modelo para la subregión A1, correspondientes a los picos de crecida de 1993 y 2001. En la Figura 11 se presentan, a título ilustrativo, los mapas de inundación para los eventos de 2, 5 y 10 años de recurrencia.

Preguntas que responde el modelo

Un modelo matemático de un sistema hídrico tiene tres usos principales, a saber:

- Para diagnosticar, es decir, comprender cómo funciona el sistema. Entonces, se puede responder al siguiente tipo de pregunta: *¿por qué sucedió lo que sucedió?*
- Para predecir, es decir, como herramienta de gestión. Entonces, se puede responder al siguiente tipo de pregunta: *¿qué sucede si...?*

- Para efectuar análisis retrospectivos, es decir, desentrañar relaciones causa-efecto en eventos que resultaron en conflictos. Entonces, se puede responder al siguiente tipo de pregunta: *¿qué hubiera sucedido si...?*

Disponiendo de un MMHH calibrado, es posible responder a algunas preguntas específicas de interés.

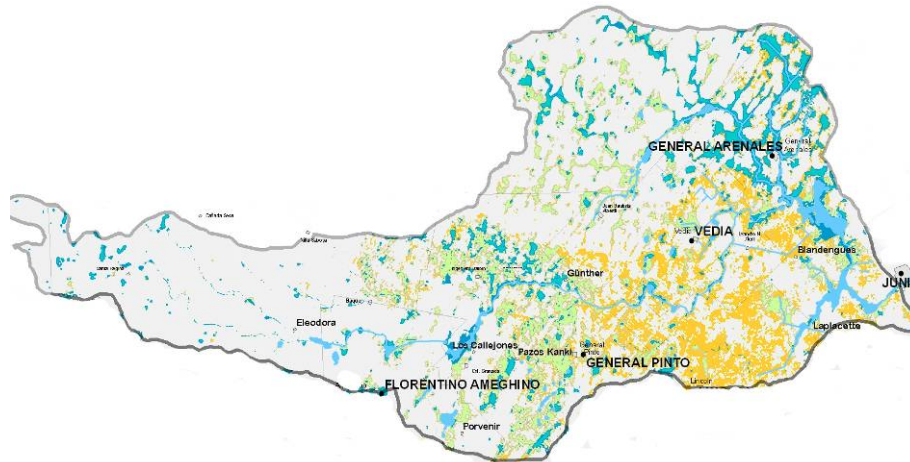


Figura 11.- Mapas de inundación para recurrencias de 2 (azul), 5 (verde) y 10 (anaranjado) años de recurrencia para la subregión A1.

En relación al tema de diagnóstico, en las secciones precedentes se han presentado productos que contribuyen a avanzar en la comprensión del sistema. Por ejemplo, el modelo ha permitido generar un ranking de los ramales en términos de su actividad (volumen de agua conducido), lo que contribuye a conformar un criterio para encarar futuras canalizaciones secundarias, es decir, responder a la siguiente pregunta: *¿cuál debería ser la estrategia de construcción de canales secundarios?*

Otra pregunta relacionada al diagnóstico, cuya respuesta fue obtenida en base al modelo, fue la siguiente: *¿Por qué la cuenca del Salado entró en crisis de inundaciones desde fines de los 80 hasta principios de los 2000?* En base a análisis estadísticos que han evidenciado que puede distinguirse una tendencia al aumento de la frecuencia de las precipitaciones intensas en esta región (Re, Saurral y Barros, 2005), el modelo muestra que se produjo, en concomitancia, una casi continua elevación del nivel de la napa freática, lo que en algún momento puso en crisis la capacidad de infiltración de los suelos, dando lugar a la generación de relativamente grandes excedentes hídricos (superficiales).

El modelo también contribuyó para contestar preguntas relacionadas con diversas controversias planteadas a lo largo de la historia de la cuenca. El análisis de dichos interrogantes queda fuera del alcance de esta publicación.

Por último, se utilizó el modelo integrado para responder una serie de preguntas de tipo predictivo, que tienen que ver con el planteo y operación de obras hidráulicas.

INCORPORACIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS

Tipos de obras

Se distinguirán distintos tipos de obras hidráulicas, de acuerdo a su función y su forma de modelación, a saber: canalizaciones, drenajes de bajos y obras de control.

Las canalizaciones tienen como función coleccionar excedentes hídricos y transportarlos hacia zonas controladas. Su implementación computacional es relativamente sencilla: simplemente se modifica la geometría de las secciones transversales de la conducción a canalizar incorporando el canal, y se le asigna al fondo del canal la rugosidad correspondiente.

Se denominará drenajes de bajos a los canales cortos y de relativamente baja capacidad que se construyen para drenar agua desde bajos hacia alguna canalización cercana. Estos drenajes no se representan explícitamente en el modelo, por un problema de escala y de información, pero sí sus efectos agregados. Estos consisten en la reducción del volumen de bajos no drenados asociado a la correspondiente celda, es decir, en la reducción de la abstracción inicial de esa celda.

Las obras de control, que se implantan en las canalizaciones o aguas abajo de las lagunas, tienen como función controlar el caudal pasante. En el modelo se representan sus efectos, a través de la especificación de una ley de funcionamiento que relaciona el caudal y los niveles de agua a ambos lados de la estructura en forma paramétrica. En el caso en que existen partes móviles (típicamente compuertas) es necesario, además, imponer una política de operación, que consiste en alguna ley para el posicionamiento de esas partes en función de la situación hidráulica (caudal, nivel) y, eventualmente, hidrológica (lluvias en la zona de influencia).

A continuación se presentan las obras hidráulicas incorporadas al submodelo A1.

Escenarios de obras

Se incorporaron a la cuenca una serie de tramos canalizados. Sobre algunos de los cuales se proyectan obras de control (Figura 12):



Figura 12.- Obras hidráulicas en la subregión A1 (CA: canalización; OC: obra de control).

Se definieron, entre otros, los siguientes escenarios de obras:

- *Obras/Base:* Incluye las canalizaciones y las obras de control principales, operando sin regulación (compuertas totalmente abiertas).
- *Obras/Control:* Obras/Base + obras de control secundarias operando sin regulación (compuertas totalmente abiertas).
- *Obras/Secundarios:* Obras/Base + canalización de cinco ramales secundarios.
- *Obras/Regulación:* Obras/Base + política de operación de la obra de control de la laguna de Mar Chiquita de acuerdo a un plan de manejo con señales locales y remotas.

Asociada a la construcción de los canales, se ha considerado que se produce espontáneamente (a cargo de los productores rurales) la generación de drenajes de bajos en su entorno hasta una distancia de 2,5 km hacia cada lado. En consecuencia, se disminuyó a cero la abstracción inicial de las celdas adyacentes a las canalizaciones.

Efectos de las obras

Se presentan a continuación algunos resultados obtenidos para el escenario Obras/Base en la subregión A1. Estos resultados son representativos de los obtenidos en los casos en que se incorporaron nuevas obras de canalización al modelo.

La Figura 13 presenta la comparación del caudal a la salida de la subregión A1 con y sin las obras. Se observa que, respecto de la situación preoperacional, el pico de 2001, máximo histórico registrado, se atenúa alrededor del 45%. Esto se debe principalmente a la introducción de las obras de control. Por otro lado, el volumen escurrido resulta un 30% superior con las obras construidas, lo cual cuantifica la ampliación de la capacidad para evacuar excedentes hídricos.

La introducción de las obras no llega a producir cambios observables en los niveles freáticos.

De acuerdo al criterio de drenaje establecido más arriba, se ha considerado que la zona drenada por las obras está representada por franjas de 2,5 km de espesor a cada lado de las canalizaciones, lo que totaliza del orden de las 70 mil ha (es decir, alrededor del 5% del área de la subregión A1). En la Figura 14a se presenta la serie temporal de área inundada total (bajos no drenados y conducciones) de la subregión A1 (incluyendo ahora los valores de base), pero limitada a la zona drenada por las obras del escenario Obras/Base, tanto para la situación preoperacional como para el propio escenario Obras/Base. Se observa que la presencia de las obras se manifiesta, efectivamente, en una reducción muy importante del área inundada, partiendo del establecimiento de un nivel base significativamente menor de áreas bajo agua en forma permanente (es decir, las inundaciones arrancan de una situación más seca de la zona drenada). Los picos de inundación que aún se producen en la situación con obras se dan mayormente sobre áreas recuperadas en situaciones hidrológicas normales. Además, la duración de esas inundaciones resulta muy inferior a la de la situación preoperacional.

La Figura 14b muestra la diferencia entre las áreas inundadas con y sin obras, lo que representa el 'área recuperada', que se traduce directamente en los beneficios económicos de las obras.

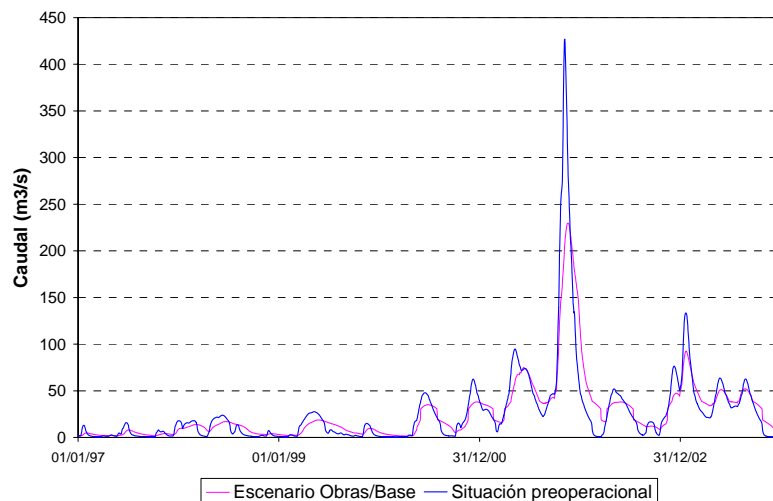


Figura 13.- Caudal en Junín para el escenario Obras/Base (1997-2003).

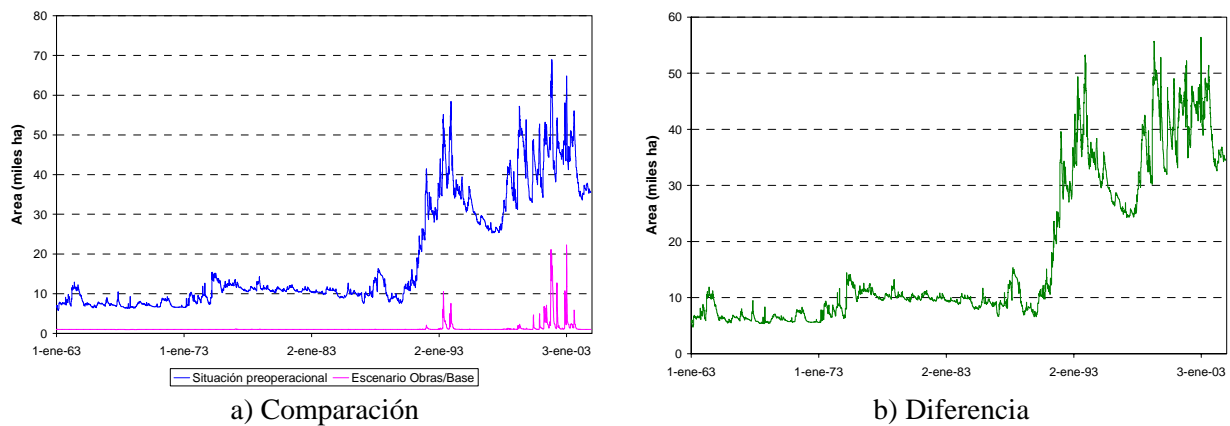


Figura 14.- Series temporales de áreas inundadas de la subregión A1 en zonas drenadas por las obras del escenario Obras/Base.

CONCLUSIONES

Los modelos hidrológicos integrados para flujo superficial y subterráneo ya han alcanzado un nivel de madurez suficiente como para ser utilizados como herramienta práctica. Más aún, este trabajo muestra que es posible aplicarlo a escala de cuenca, si se implementa criteriosamente.

En particular, su aplicación a la cuenca del río Salado ha permitido tanto aclarar los verdaderos alcances de las obras de desagüe construidas y proyectadas, como replantear estrategias de manejo.

REFERENCIAS

Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Avellaneda. (2007). “Estudio de Impacto Ambiental, Social y Territorial de la Cuenca del Río Salado”.

Halcrow & Partners. (1999) “Plan Maestro Integral de la Cuenca de Río Salado”. Ministerio de Obras y Servicios Públicos de la Provincia de Buenos Aires. La Plata, Argentina.

Re, M., Saurral, R., Barros, V. (2005). “Precipitaciones extremas en la Argentina, Tendencias y Cambio Climático”, IV Taller Internacional sobre Enfoques Regionales para el Desarrollo y Gestión de Embalses en la Cuenca del Plata, 29 Nov/2 Dic. Salto Grande, Entre Ríos, Argentina.

INTA (1995) “Atlas digital de suelos de la República Argentina en CD”.

Chow, V.T. (1959). “Open-Channel Hydraulics”, McGraw-Hill.

J.H.M. Wösten. (1999) “METADATA - Hypres Database of Hydraulic Properties of European Soils ver 1.0”, DLO Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research, The Netherlands.

Wagner, M.; Medina, G. (1998). “Técnicas de evaluación de compactación de suelos”. Maracay, Ven., Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. 36 p. (Serie B - N° 33), Venezuela.

Anderson, M. P. and Woessner, W. W. (1992). “Applied Groundwater Modeling”. Academic Press, San Diego.