

# MODIFICACIONES EN LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS ASOCIADAS AL RIEGO COMPLEMENTARIO EN UN AREA DE LLANURA

Erik D. Zimmermann

Centro Univesitario de Investigaciones Hidroambientales - FCEIA - UNR

## Resumen

Se plantea como objetivo el análisis de los efectos que provocaría un hipotético riego generalizado sobre el sistema hidrológico del Ao. Ludueña (Santa Fe, Argentina). Se evalúan los efectos mediante la explotación del modelo SHPLAN-2 durante un período lo suficientemente extenso como para contabilizar efectos a largo plazo.

Se generan sintéticamente series de variables de entrada atmosféricas, precipitación y evapotranspiración, que mantienen similares propiedades estadísticas que las registradas en la región de investigación. El modelo de tormenta asignado, previamente testado con datos reales (Zimmermann, 1998), genera aleatoriamente intervalos temporales entre eventos, duraciones e intensidades medias y máximas y coeficientes de avance. Se construyeron sintéticamente hietogramas horarios de tormentas para los veinte años, englobando 1293 eventos de lluvia. Los valores de evapotranspiración fueron generados en intervalos diarios, partiendo de registros de evaporación de tanque "A", afectados por un coeficiente de tanque. El ajuste de las series reales se obtuvo con un simple modelo compuesto por una componente *determinística* senoidal, de período anual, junto a otra *aleatoria* de "ruido blanco".

Calibrado previamente el modelo utilizado (SHPLAN-2) se utilizó el mismo bajo diferentes escenarios de simulación: a) Escenario actual con agricultura extensiva, sin uso masivo del riego, que fue tomado como referencia y b) Escenario hipotético, con uso intensivo del riego. Este último fue desdoblado en tres variantes, las cuales mantendrían una humedad óptima durante los días de riego, del 60%, 90% y 75% de la capacidad de campo, respectivamente. En el primer escenario de riego no se aprecian diferencias en el comportamiento hidrológico en relación a la situación sin riego. El escenario de máximo riego trae a colación importantes modificaciones: crece un 7% la evapotranspiración real, se produce un aumento del volumen de escorrentía directa y en la casuística de las tormentas que provocan escurrimiento. El cambio más significativo se muestra en los montos de percolación: el principal volumen de riego tiene por destino al acuífero freático. Se verifican también aumentos de menor cuantía, en los montos de escorrentía directa y en las frecuencias de lluvias que provocan escurrimiento. Desde el punto de vista estadístico, las láminas máximas de escurrimiento no evidencian grandes cambios. En cambio, para la hipótesis de máximo riego, se evidencia un aumento muy notable en la frecuencia de humedades altas y en los montos de percolación.

Aquí radica el impacto más negativo del riego sin control, dado que éstas modificaciones en la distribución de los flujos de humedad podrían resultar en incrementos notables de los niveles freáticos, principalmente en las zonas de descarga del acuífero. Esto reafirma los efectos dominantes de las recargas del acuífero por encima de los escurrimientos en superficie, situación típica en sistemas hidrológicos de llanura, con predominio de movimientos verticales de humedad.

## 1. INTRODUCCION

En un marco general, los efectos de la contaminación, degradación del suelo, pérdida de biodiversidad forman parte del legado histórico de un manejo de agua basado sobre una filosofía de derroche asociada a la explotación del recurso. El conocimiento de un sistema hidrológico, consecuentemente, es determinante para entender el cambio ambiental en escala global, regional o local y para considerar efectos a largo plazo. En relación al recurso hídrico, un desafío actual es enfrentar el crecimiento de la demanda, minimizando las pérdidas y alcanzando un régimen de explotación sostenido, *anticipando* y mitigando los efectos derivados de acciones tendientes a mejorar el rendimiento de los cultivos a partir del riego. Cabe esperar, ante la disponibilidad y buena calidad del recurso hidráulico subterráneo, que éste sea la principal fuente de abastecimiento para el riego. Sin analizar efectos en el corto plazo provocados por una explotación inadecuada de este recurso, el aumento de la productividad asociada al riego puede traer, por contrapartida, un mayor riesgo de inundaciones por humedecimiento del perfil, que con mayor frecuencia se encontrará en capacidad de campo.

Es necesario, entonces, evaluar el riesgo que esto conlleva, recurriéndose a la explotación del modelo de balance vertical SHPLAN-2, que fuera previamente validado, implementado y calibrado en el sistema hidrológico del arroyo Ludueña (Zimmermann, 1997), durante un período lo suficientemente extenso como para contabilizar efectos a largo plazo.

## 2. MODELO DE SIMULACION SHPLAN-2

### 2.1 Submodelo de flujos bajo superficie

El modelo está basado en la ecuación de Richards, expresada en términos de la humedad volumétrica  $\theta$ , para estimar su redistribución en la zona no saturada (ZNS), contemplando la estimación de los montos de agua intercambiados con la atmósfera y el acuífero. La ecuación de movimiento, en el caso de flujo vertical, con una analogía a la ley de difusión de Fick, es:

$$q = -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) \quad 1$$

donde  $q$  es la velocidad de Darcy del flujo no saturado,  $\theta$  la humedad volumétrica,  $z$  la coordenada vertical,  $K$  la conductividad no saturada,  $D(\theta)$  el coeficiente de difusividad del medio, producto de la conductividad no saturada  $K$  por el gradiente de la curva de contenido de humedad y potencial matricial ( $d\theta/d\Psi$ ). La ecuación de continuidad establece para el flujo vertical, que:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} \quad 2$$

Se emplean técnicas numéricas para la integración de las ecuaciones diferenciales. Se realiza un planteo en diferencias finitas de las ecuaciones precedentes (Zimmermann, 1997), centrado espacialmente y explícito en el tiempo. Para las condiciones de contorno, se plantea la resolución de las ecuaciones anteriores, con algunas de las incógnitas conocidas, contemplando la imbibición y/o desecación como condición de borde superior. En este último caso se utiliza el modelo de sumidero de Feddes y otros, 1988. La condición de borde inferior se contempla incluyendo las celdas en la capa acuífera con humedad de saturación ó si el

flujo subterráneo es importante magnitud puede considerarse una o un conjunto de celdas sumidero, con flujo igual al subterráneo. Para definir las curvas características del suelo se emplean las relaciones de Brooks-Corey.

## 2.2 Submodelo de intercepción y almacenamiento en superficie

Los volúmenes interceptados por la vegetación se simulan mediante ecuaciones del tipo:

$$Int = \text{minimo} [CCob(aP + b), IntMax] \quad 3$$

donde  $Int$  es el volumen de intercepción,  $CCob$  un coeficiente adimensional de cobertura vegetal,  $a$  y  $b$  constantes que dependen del tipo de cultivo y su desarrollo,  $P$  el volumen de precipitación e  $IntMax$  una capacidad máxima de almacenamiento dado que para elevados montos de precipitación los valores estimados de  $Int$  son cuestionables.

El almacenamiento superficial se consideró como una capacidad máxima a abastecer una vez satisfecha la intercepción, de la siguiente manera:

$$AS = \text{minimo} [ASMax, P - Int] \quad 4$$

donde  $AS$  es el almacenamiento superficial y  $ASMax$  la capacidad de almacenamiento de la cuenca, extractada de aerofotografías.

## 3. EXPLOTACION DEL MODELO SHPLAN\_2

La explotación del modelo SHPLAN\_2 se realizó bajo dos escenarios diferentes, a) Escenario Actual con agricultura extensiva, sin uso masivo del riego, salvo algunas parcelas experimentales.

b) Escenario Futuro con agricultura extensiva, uso intensivo del riego bajo explotación del acuífero puelche. Este acuífero representa una fuente de buena calidad para riego, para la zona de análisis y en la generalidad de los casos, sobretodo de muy buena transmisibilidad, permitiendo una explotación a elevados caudales, aptos para la fuerte demanda del riego. El acuífero puelche se encuentra a unos 45 m de profundidad, separado del freático mediante sedimentos acuicludos, por tal motivo se supone que la interacción entre ambos es mínima. Esto elimina la posibilidad de un circuito rápido de recarga y descarga de la napa freática, constituyendo el riego un potencial generador de condiciones antecedentes más húmedas que lo normal. En ambas situaciones se analizó el comportamiento del sistema del Ludueña, simulado mediante el SHPLAN\_2, a lo largo de veinte años, por lo cual hubo que construir series sintéticas de tormentas horarias y evapotranspiración diaria específicamente diseñadas.

### 3.1 Serie sintética de tormentas

La construcción sintética de series de tormentas con características semejantes a las observadas, fue realizada previamente a este trabajo (Zimmermann, et al, 1996; Zimmermann, 1998). Los datos observados, a partir de los cuales se construyó la serie sintética, consistieron en cinco años de registros pluviográficos de la estación Alcorta (Pcia. Santa Fe). Los mismos fueron analizados mediante cinco variables: duración de lluvia, tiempo entre eventos, intensidad media y máxima de lluvia y coeficiente de avance de la tormenta. A priori, las variables se

clasificaron en independientes y dependientes. Para las primeras, tiempo entre eventos, intensidades medias y duración de tormentas, fueron ajustadas funciones de distribución de probabilidad. Como variables dependientes se consideraron: el coeficiente de avance como una función de la duración de tormenta e intensidad máxima como una función de la intensidad media del evento. Se propusieron relaciones multiplicativas para las regresiones, cuyos coeficientes fueron ajustados. La metodología propuesta para crear una serie sintética de tormentas de veinte años de duración consistió en generar aleatoriamente series de variables independientes mediante las funciones de distribución ajustadas, generar series de variables dependientes mediante las ecuaciones de correlación seleccionadas incorporándoles un *ruido blanco* en función de los errores de los residuos generados en el ajuste de tales ecuaciones. Previamente, se calcularon y compararon las características estadísticas de las series dato y sintéticas, obteniéndose buenas concordancias.

Las series generadas sintéticamente a partir de la metodología presentada, están constituidas por día y hora de comienzo de la tormenta, duración, intensidad máxima y media, coeficiente de avance de tormenta y lámina total precipitada. A partir de ella se construyeron hietogramas de forma triangular, ya que se ha probado que estadísticamente es la forma más frecuente (Zimmermann, 1998). Los veinte años de simulación englobaron 1293 eventos de lluvia, es decir, 64,7 tormentas por año, totalizando unos 952,9 mm anuales de precipitación, datos ampliamente representativos de la casuística regional.

### 3.2 Serie sintética de datos de evapotranspiración

El procedimiento utilizado consistió en la generación sintética de una serie temporal de datos de evapotranspiración potencial afectados por un *coeficiente de tanque*. Se partió de una serie observada (1992-1994) de datos de tanque "A" (estación agroexperimental de Zavalla). El autocorrelograma de la serie observada demostró una gran dependencia entre los registros diarios mientras que el periodograma mostró que existe una fuerte componente con frecuencia 1 cada 363,7 días, indicando que en la práctica existe un período anual en el fenómeno. La función de autocorrelación parcial indicó que la serie podría identificarse con un proceso autorregresivo de orden 4 ó 5 (AR(4) ó AR(5)) ó proceso mixto autorregresivo y de promedios móviles ARMA(2,2). Ante la gran cantidad de parámetros que involucran los modelos ajustados se optó por representar la serie mediante una combinación sencilla entre un modelo determinístico, de comportamiento medio senoidal, junto a una componente aleatoria, con promedio nulo y varianza no nula (*ruido blanco*). La ecuación propuesta fue:

$$ET(t) = ET_m + \Delta ET * \cos \frac{2\pi t}{365} + a_t \quad 5$$

donde  $ET(t)$  el valor de evaporación de tanque para el día  $t$ ,  $ET_m$  es el promedio de la serie de evaporación de tanque,  $\Delta ET$  la amplitud media, con una frecuencia de repetición de 365 días y  $a_t$  una componente de ruido blanco. Los parámetros ajustados fueron:  $ET_m = 3.45$  mm;  $\Delta ET = 3.0$  mm. El ruido blanco fue ajustado con una distribución normal con media  $\mu(a_t) = 0.0024$  y un desvío standard de  $\sigma(a_t) = 2.19058$  mm. La metodología para reproducir series de evaporación de tanque consistió en aplicar la ecuación 5, generando previamente una serie aleatoria de valores  $a_t$  con los parámetros ajustados previamente y una ley de distribución normal. La serie de evapotranspiración implicó la generación de 7300 valores diarios.

### 3.3 Escenarios de simulación

**Escenario actual.** La simulación para el período de veinte años, bajo las condiciones actuales de explotación agrícola, se realizó bajo los siguientes parámetros: permeabilidad saturada  $K_s = 2,52$  mm/h (calibrado previamente en el sistema hidrológico); humedad de saturación y residual:  $\theta_s = 0,50$ ,  $\theta_r = 0,12$ ; profundidad radicular  $Z_a = 0,45$  m; profundidad freática  $Z_f = 3,50$  m; capacidad de almacenamiento superficial  $ASMax = 4,65$  mm; capacidad de almacenamiento por intercepción  $IntMax = 5$  mm. La percolación es considerada positiva cuando el movimiento de humedad se da desde la zona saturada a la zona no saturada (capilaridad), y es negativa, cuando la ZNS alimenta a la ZS (percolación propiamente dicha).

**Escenarios de Riego.** Los cultivos típicos de la zona, en orden de importancia, son soja, trigo-soja de segunda y maíz. El área cultivada en la cuenca del arroyo Ludueña, ocupa en la actualidad entre 85% y 90% del total de su superficie. Las parcelas de maíz ocupan, aproximadamente, entre 10-15% de la superficie cultivada mientras que el binomio trigo-soja 2° ocupa entre 15-20% quedando el resto del área cultivada con predominio de soja de primera (65-75%). Estos porcentajes son dinámicos, en función de los precios del mercado para exportación.

En promedio, el cultivo de maíz, requiere unos 140 mm de riego repartidos durante cuatro dosis aplicadas en etapas previas de crecimiento (15 de noviembre), en floración (1 al 30 de diciembre) y dos dosis posteriores a la floración (aproximadamente 15 de enero y 15 de febrero). En el caso de la soja, el requerimiento es de unos 170 mm, distribuidos en las mismas etapas señaladas para el maíz, con fechas promedio del 10 de diciembre, 10 de enero, 1 al 28 de febrero (floración) y 10 de marzo. Para el trigo, el requerimiento medio es de unos 95 mm, repartidos en tres dosis (10 de agosto, 1 al 30 de setiembre y 15 de octubre). Para el caso de la soja de segunda, las etapas son idénticas a la soja de primera, estando las fechas de aplicación desplazadas unos veinte días más tarde. Durante la temporada de riego, debe garantizarse que el estado de humedad del perfil se encuentre entre un 60% y 90% de la capacidad de campo, por ende las dosis de riego (normas) deben suplir las diferencias entre el estado real de humedad y el ideal. Los porcentajes de cobertura, referidos al área total de la cuenca, fueron fijados, a los fines de la simulación, en: área ganadera, 14%; área cultivada máxima, 86%; área del trigo y soja 2°, 13%; área del maíz, 9 % y área de la soja 1°, 64%. La secuencia operativa en el modelo consistió en los siguientes pasos: a) Verificar si el día de simulación es día de riego, de ser así qué coeficiente (tanto por uno) de área ocupa el cultivo a regar, b) Estipular la norma de riego, como la diferencia en mm de lámina de agua entre la humedad antecedente del perfil de suelo y la humedad óptima, fijada en un porcentaje de la capacidad de campo. c) La norma de riego, afectada por el coeficiente de cobertura, se distribuye a intervalos horarios de un día, a manera de lámina de precipitación y es operada con la rutina de lluvia, que provocará la infiltración.

Las simulaciones se realizaron bajo tres escenarios ó hipótesis de riego:

- **Escenario No. 1:** Mantenimiento de una humedad óptima del 90% de la capacidad de campo durante los días de riego (implica mantener la capacidad del perfil de 120 cm de profundidad en 459 mm, de manera permanente).
- **Escenario No. 2:** Mantenimiento de una humedad óptima del 60% de la capacidad de campo durante los días de riego, garantizando un contenido de agua de 306 mm, para los primeros 120 cm.
- **Escenario No. 3:** ídem con un 75% de la capacidad de campo (383 mm, para el perfil).

Los parámetros del sistema empleados para las simulaciones fueron los mismos que los utilizados en el caso anterior.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

### 4.1 Cambios en el balance hidrológico

La tabla 1 presenta una síntesis de los resultados alcanzados durante las simulaciones para el período de veinte años. En términos generales la profundidad del acuífero freático, adoptada para el sistema, quizás sea más representativa de las áreas de descarga que de las áreas de recarga, por ello el movimiento predominante es el de ascensión de humedad. Por ello también serán frecuentes elevados tenores de humedad en el perfil de suelo, dada la proximidad del nivel freático, poniéndose en una situación conservadora respecto a los escurrimientos que puedan darse. Esto no invalida los resultados que puedan alcanzarse, dado que, fundamentalmente, interesan las modificaciones relativas provocadas por los cambios de uso hídrico que pretenden realizarse. Puede notarse la persistente acción de la evapotranspiración, que obliga a satisfacer su demanda descargando al acuífero si no hay otra fuente de alimentación. Esto también fue comprobado en las etapas de calibración del modelo.

		Escenario sin riego	Riego al 60% de CC	Riego al 75% de CC	Riego al 90% de CC
Balance	<i>P</i>	952,9 mm	952,9 mm	952,9 mm	952,9 mm
	<i>NR</i>	0 mm	1,6 mm	230,5 mm	1277,2 mm
Medio	<i>Q</i>	173,2 mm	177,8 mm	185,1 mm	229,4 mm
Anual	<i>ET</i>	936,7 mm	938,5 mm	948,8 mm	1000,1 mm
	<i>B</i>	157,2 mm	161,8 mm	49,5 mm	-1000,6 mm
Análisis de Frecuencias	$0\text{ mm} < Q < 5\text{ mm}$	37 %	36%	34%	29%
	$5\text{ mm} < Q < 10\text{ mm}$	15 %	15%	18%	22%
	$Q > 10\text{ mm}$	48 %	49%	48%	48%
Análisis de Frecuencias	$B < 0\text{ mm}$	47%	50%	63%	78%
	$0\text{ mm} < B < 50\text{ mm}$	50%	49%	36%	21%
	$B > 50\text{ mm}$	3%	1%	1%	1%
Análisis de Frecuencias	$350 < H < 375\text{ mm}$	37%	35%	21%	15%
	$375 < H < 400\text{ mm}$	58%	59%	70%	48%
	$H > 400\text{ mm}$	5%	6%	9%	37%

**Referencias:** *P* precipitación, *NR* norma de riego, *Q* escurrimiento, *ET* evapotranspiración, *B* percolación, *H* humedad del perfil de suelo a 120 cm de profundidad.

**Tabla 1. Estadísticas para cada escenario de simulación.**

El escenario de suplementar la humedad del perfil al 90% de capacidad de campo, presenta grandes diferencias en el comportamiento del sistema, en relación a la simulación de la situación actual. En primer lugar el suministro de agua por riego es de gran magnitud, un 34% superior a la precipitación media anual. Tal volumen es necesario transferir al perfil para garantizar, permanentemente, una condición de humedad muy exigente, como lo es un 90% de la capacidad de campo. Esto trae a colación importantes modificaciones en el funcionamiento hidrológico. En primer lugar, crece un 7% la evapotranspiración real, superando incluso el valor medio de precipitación, aunque no parece ser la modificación de mayor magnitud, dado que

depende de las condiciones atmosféricas. Otro aspecto modificadorio, preocupante, es el aumento de la escorrentía directa, en monto medio anual y en frecuencias de lluvias que provocan escurrimiento. El aumento del volumen neto es del 32%, respecto a la situación sin riego. Hay un aumento de alrededor del 38%, de tormentas que provocan escurrimiento. Sin embargo, lo más significativo es el cambio de signo en el flujo de agua con el acuífero, de ser preponderante en sentido ascendente para el caso sin riego, pasa a ser mucho mayor, en orden de magnitud y en sentido de recarga del acuífero. Se manifiesta como un efecto predominante, el principal movimiento del volumen de riego tiene por destino al acuífero freático. Este gran aumento de la recarga inducirá un importante aumento de los niveles freáticos.

La simulación bajo la segunda hipótesis de riego, esto es satisfacer permanentemente un contenido de humedad del perfil del 60% de la capacidad de campo, dio por resultado una escenario semejante al actual. La frecuencia registrada de tormentas que causan escurrimiento de magnitud fue de 8,15 eventos por año. Es decir que un 12,6 % de los eventos lluviosos anuales ocasionan volúmenes de escurrimiento. Prácticamente no se aprecian diferencias en el comportamiento del sistema, en relación a la simulación de la situación actual, hecho provocado por la casi nula tasa de riego anual, suministrada al perfil. Las cifras del balance medio anual coinciden, aproximadamente, con las estimadas para la situación sin riego. Se corrobora, entonces, que la humedad **natural** del perfil no desciende por debajo del 60% de la capacidad de campo.

La simulación para el período de veinte años, bajo la tercera hipótesis de riego, esto es satisfacer permanentemente un contenido de humedad del perfil del 75% de la capacidad de campo, dio por resultado una frecuencia registrada de tormentas que causan escurrimientos de magnitud de 8,55 eventos por año. Es decir que un 13,2 % de los eventos lluviosos anuales ocasionan volúmenes de escurrimiento. Acorde a la expectativa puesta, los cambios en los procesos hidrológicos son intermedios entre la situación sin riego y la primera hipótesis de riego, aunque el impacto en este tercer escenario no es tan drástico. Crece un 1,3% la evapotranspiración real. El aumento de la escorrentía directa, en el monto medio anual representa un 6,7% respecto de la situación sin riego y, en términos de frecuencias de lluvias que provocan escurrimiento, el crecimiento es del 5,5%. Lo más significativo es la reducción de los ascensos de humedad, pero sin alcanzar, en términos medios durante las dos décadas un cambio de signo en el flujo de agua con el acuífero, que se sigue manteniendo predominante en el sentido ascendente.

#### **4.2 Cambios estadísticos en la respuesta hidrológica del sistema**

El ingeniero ó hidrólogo realiza el diseño de obras hidráulicas, basado en un pronóstico de eventos catastróficos (sequías o inundaciones), mediante el apoyo de la estadística. Cuando el sistema hidrológico cambia su configuración, por alguna razón ajena al propio sistema (cambio climático, acciones antrópicas, etc.) resulta evidente que las muestras de alguna variable de interés, extractadas con anterioridad no serán representativas a partir de estos cambios en la respuesta. Tras la cuantificación de los efectos provocados por el riego a gran escala, queda por estimar su influencia en las estadísticas de eventos poco frecuentes, de los que causan desastres hidrológicos.

Con las muestras de láminas de escurrimiento, valores de percolación y de humedad del perfil se realizaron ajustes, con un conjunto de leyes de distribución de probabilidad, y se

estimaron los valores de cada variable asociados a probabilidades de ocurrencia. Se tomaron períodos de retorno entre 1,66 años y 100 años, las muestras consistieron en valores máximos anuales, extractados de los veinte años de simulación para cada variable y escenario. Se seleccionó para las comparaciones la ley de Pearson de tres parámetros, a los fines de homogeneizarlas y dado que en la mayoría de los casos presentó buenos bajos errores cuadráticos medios.

En la figura 1 se representan en escala logarítmica la distribución de probabilidad para la variable lámina de escurrimiento bajo los diferentes escenarios de simulación. En ella puede observarse que, en términos generales, no se evidencian grandes cambios en el comportamiento estadístico del sistema frente a la acción de riego. La situación que se diferencia por sobre las restantes es la hipótesis de riego No. 1, principalmente para las bajas recurrencias.

En relación a la percolación (figura 2), el cambio de comportamiento de la variable ante los diferentes escenarios planteados es también notable, incluso más acentuado para la primera hipótesis de riego. P/ej. un valor de percolación al acuífero de 80 mm, ocurriría con períodos de retorno de 1 cada 100 años en el caso si riego, mientras que para el primer escenario de riego, este valor de percolación sería tan frecuente a tal punto de ocurrir una vez cada 2,5 años. Aquí radica al mayor peso de los cambios hidrológicos observados, quizás, el impacto más negativo del riego sin control, dado que éstas modificaciones en la distribución de los flujos de humedad podrían resultar en incrementos notables de los niveles freáticos, principalmente en las zonas de descarga del acuífero. Sin embargo, las hipótesis de riego 2 y 3 no evidencian cambios estadísticos en las respuestas de las variables hidrológicas estudiadas, hecho que demuestra que si las dosis de riego son controladas pueden minimizarse los cambios de respuesta del prototipo.

## 5. CONCLUSIONES

Se ha simulado el comportamiento hidrológico de un sistema de llanura, mediante un modelo matemático de flujos verticales de humedad basado en el esquema de Richards, de parámetros concentrados y operación continua en el tiempo, que brinda información sobre perfiles de humedades volumétricas en toda la zona vadosa, flujos de intercambio con la zona saturada (ZS), tanto procesos de percolación como de ascenso y redistribución de humedades por capilaridad, intercambio de agua con superficie, tanto procesos de infiltración por riego o precipitación como de evaporación y evapotranspiración, contemplando la zona radicular como extractora de humedad. Con el anexo de un modelo de interceptación y almacenamiento superficial, quedó conformada una herramienta de gran potencialidad (SHPLAN\_2) para el análisis de movimientos verticales de humedad en las interfaces atmósfera-suelo-vegetación-acuífero. El modelo ha sido previamente calibrado en el sistema del Ludueña, bajo diferentes usos del suelo, reproduciendo satisfactoriamente la respuesta del prototipo, hecho por el cual garantiza su identificación.

Se han planteado cuatro escenarios de simulación, bajo los parámetros característicos del sistema acorde con las respuestas hidrológicas actuales. Se han realizado simulaciones bajo las condiciones actuales de explotación agrícola, sin riego alguno, y bajo tres escenarios hipotéticos de riego, con diferentes grados de suministro de humedades al perfil del suelo.

La hipótesis que mayor alteraciones presenta en los procesos hidrológicos del sistema es

la de abastecer el perfil en forma permanente al 90% de su capacidad de campo (CC). Queda demostrado que la principal variación se da en los montos de percolación, que de ser movimientos de humedad predominantemente ascendentes pasan a dominar los flujos hacia el acuífero con magnitudes de un orden superior. También aumentan las frecuencias de escurrimiento de mayor magnitud aunque no en los de gran magnitud. La frecuencia de humedades elevadas aumenta ostensiblemente.

Las láminas de escurrimiento bajo los diferentes escenarios de simulación, no evidencian grandes cambios en el comportamiento estadístico del sistema frente a la acción de riego. La situación que se diferencia por sobre las restantes es la hipótesis de máxima dosis de riego, principalmente para las bajas recurrencias. La situación más comprometedora, desde el punto de vista de los efectos que induce en el sistema hidrológico natural, no involucra un cambio sustancial en la respuesta estadística de los volúmenes de crecidas, incluso, en menor medida para los eventos de alta recurrencia. En relación a la percolación, el cambio de comportamiento de la variable ante los diferentes escenarios planteados es también notable, muy acentuado para la hipótesis de máximo riego. Recurrencias del orden de 100 años para valores de percolación actuales, significarían tiempos de retorno de 2,5 años, para un escenario de riego intensivo, manteniendo el 90% de CC en forma permanente.

Aquí radica al mayor peso de los cambios hidrológicos observados, quizás, el impacto más negativo del riego sin control, dado que éstas modificaciones en la distribución de los flujos de humedad podrían resultar en incrementos notables de los niveles freáticos, principalmente en las zonas de descarga del acuífero. Si bien, la profundidad del acuífero freático adoptada para las simulaciones, quizás sea más representativa de las áreas de descarga que de las áreas de recarga, no invalida los resultados alcanzados hasta el momento. Un área típica de recarga, presenta mejor drenaje hacia el acuífero y, consecuentemente, menor escurrimiento superficial, que un área de descarga. Esto reafirma, aún más, los efectos dominantes de las recargas del acuífero freático por encima de los escurrimientos en superficie, que por otro representa una situación típica en sistemas hidrológicos de llanura, con predominio de movimientos verticales de humedad y vapor. Esto último también reafirma la validez del modelo de parámetros concentrados, empleado en las simulaciones. La posibilidad de representar conjuntamente el comportamiento de las diferentes áreas del sistema debe ir acompañada con un planteo distribuido del modelo de simulación, inalcanzable en esta primera fase del trabajo, hecho que plantea la perspectiva futura de una modelación de este tipo.

Las recomendaciones que se pueden sugerir, a partir de los resultados alcanzados, podrían sintetizarse en: a) la factibilidad de un riego controlado, administrando las dosis de riego de manera de alterar mínimamente el balance hidrológico natural del sistema. En este sentido, podría tomarse como límite una humedad promedio del 75% de la capacidad de campo durante el ciclo de riego y b) tomar como fuente de alimentación el acuífero freático, que evitaría su recarga excesiva mediante una *recirculación* del agua, esto si la calidad química del recurso lo permite.

## **6. AGRADECIMIENTOS**

La información de carácter agronómica fue consultada a los Ings. Agr. Sergio Montico titular de la cátedra de Manejo de Suelos y Jorge Postma, prof. Adjunto de la cátedra de Edafología, Facultad de Ciencias Agrarias, UNR. Consecuentemente se les agradece la colaboración.

## 7. REFERENCIAS

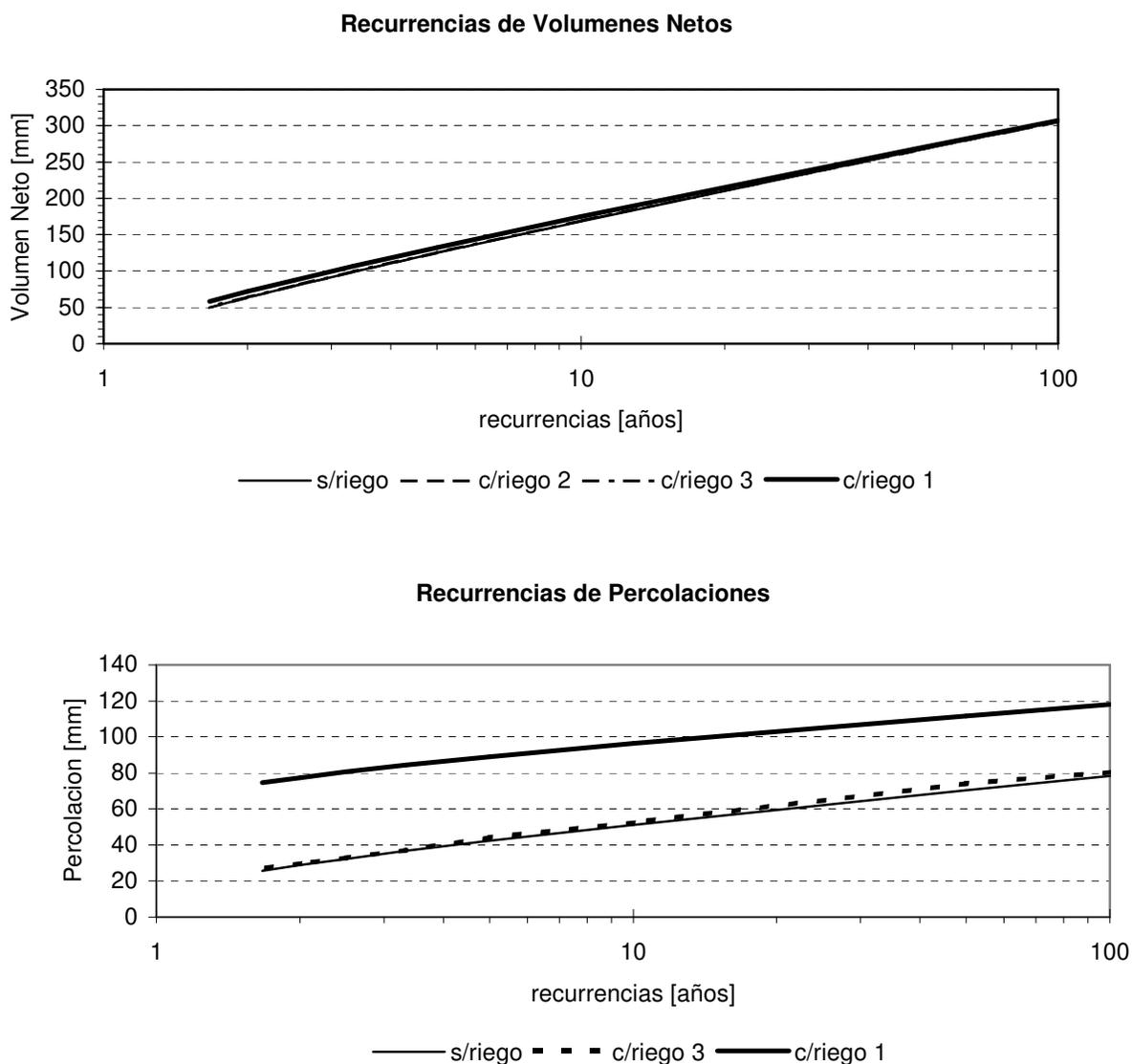
Zimmermann E; 1993; Informe Anual correspondiente al período 1992-1993; Extensión de Beca de Perfeccionamiento CONICET, Depto. Hidráulica e Ing. Sanitaria, FCEIA-UNR, Rosario, inédito.

Zimmermann E, Navarro R, Silber M; 1996; "Un Modelo Probabilístico para la Generación Sintética de Tormentas", XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica; IAHR; Guayaquil; Ecuador.

Zimmermann E; 1997; Informe Anual Carrera de Investigador CONICET, inédito; Departamento de Hidráulica - CURIHAM, FCEIA-UNR, Rosario.

Zimmermann E; 1998; *Synthetic storm generation in a flatland region (Santa Fe, Argentina)*. Journal of Environmental Hydrology. Vol.6, paper 2. IAEH.

**Figura 1**



**Figura 2**