

XIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA – CÓRDOBA 2000

APLICACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO SHALL3 EN EL SISTEMA HIDROLÓGICO DEL A^o Ludueña, SANTA FE, ARGENTINA

Dr. Ing., Erik Daniel Zimmermann
Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales.
CONICET. Rosario. Argentina

RESUMEN

Se describen los criterios adoptados y tareas realizadas para la puesta en operación del modelo de simulación hidrológica cuasi-3D de celdas SHALL3 en el sistema del arroyo Ludueña, provincia de Santa Fe, Argentina.

Se presentan los resultados de la calibración del modelo, que fue realizada en dos etapas con diferentes grados de agregación espacial. En principio el modelo fue ajustado discretizando espacialmente el sistema con 13 celdas, permitiendo tiempos de máquina accesibles. La calibración final fue realizada bajo un esquema compuesto por 79 celdas.

Los resultados alcanzados son satisfactorios y validan al modelo para posteriores simulaciones.

ABSTRACT

The adopted criteria and tasks carried out for the implementation of the hydrological model quasi-three-dimensional 3D of cells SHALL3 to the system of the Ludueña basin, Santa Fe province, Argentina, are described.

The results of the model's calibration which was carried out in two stages with different degrees of space aggregation, are presented. Firstly, the model was fitted using a spatial discretization of the system with 13 cells, allowing accessible times of machine. The final calibration was carried out under a scheme composed by 79 cells.

The reached results are satisfactory and they validate the model for later simulations.

INTRODUCCION

Bajo el marco de un trabajo de investigación que tiene por objetivo, en esta primera fase, la detección de los cambios inducidos en los procesos hidrológicos de un sistema de llanura por acción de riegos extensivos, se ha desarrollado el modelo de flujos superficiales y subterráneos SHALL3 (Zimmermann y Riccardi, 2000).

Se presenta aquí la información y el procesamiento de datos que fue necesario realizar para la constitución del modelo en la cuenca del arroyo Ludueña (Pcia. de Santa Fe), junto con las tareas realizadas para calibrar el modelo en el sistema de estudio.

INFORMACION PROCESADA

La operación continua del SHALL3 requirió del correspondiente procesamiento continuo de información pluviográfica y limnigráfica. Parte de las tareas se llevaron a cabo con anterioridad al presente trabajo, para el análisis de identificación de modelos hidrológicos no lineales (Zimmermann y Caamaño, 1990). Para la calibración del modelo, se procesó información de registros pluviográficos de las estaciones Rosario Aéreo y Zavalla, y pluviométricos (en forma discontinua) de Casilda y Pérez; de registros de evaporación en tanque "A" de la estación agroexperimental de Zavalla y limnigramas de la estación Circunvalación, disponible en forma continua durante el período 1982-1984 (Figura 1).

La información limnigráfica, que fue previamente tratada a intervalos mensuales (Zimmermann, 1994a, 1994c), fue nuevamente procesada en intervalos diarios y separada por tormentas. Los datos de evaporación disponibles en intervalos diarios fueron los de tanque tipo "A".

Se construyeron hietogramas de tormentas con paso horario, partiendo de información pluviográfica disponible. Para algunos registros faltantes se adoptó una distribución temporal del evento en forma triangular, la cual es la más frecuente de acuerdo a un análisis probabilístico realizado en una estación de la región (Zimmermann, Navarro y Silber 1996, Zimmermann 1988a). Se consideraron 103 eventos.

Dado que la respuesta hidrológica del sistema del Ludueña ha cambiado sensiblemente con las prácticas agrícolas desde los 70 a la fecha (Zimmermann, 1991, 1995), se ha desestimado información disponible para anteriores períodos.

Como información complementaria, que fue empleada en el proceso de calibración del modelo, se cuenta con (a) profundidades freáticas, a intervalos diarios durante el período 1973-1992, y (b) humedades en peso tomadas a 0,15 m, 0,30 m y 0,60 m de profundidad, con intervalos asistemáticos (cada tres días en promedio), durante el período 1973-1986. Ambas series fueron registradas en la estación Agroexperimental de Zavalla y digitalizadas para el período 1982-1984.

PUESTA EN OPERACIÓN DEL MODELO SHALL3

Modelo de la zona saturada

El sistema hidrológico del arroyo Ludueña fue subdividido en un conjunto de celdas de características ó parámetros homogéneos. Para el flujo subterráneo, se realizó una discretización espacial equivalente con topologías de celdas en superficie, implementadas en anteriores simulaciones (Zimmermann y Riccardi, 1995a, 1995b). Así, la estructuración del modelo permitió una simulación *tridimensional* del flujo, con celdas de superficie vinculadas con sus pares subterráneas mediante los esquemas de movimiento de flujo vertical. El conjunto de celdas se vinculan entre sí, simulando el almacenamiento subterráneo y el intercambio de flujos horizontales en el acuífero freático.

La zona saturada (ZS) fue caracterizada por la conductividad hidráulica horizontal y el coeficiente de almacenamiento del medio permeable. Tales parámetros fueron calibrados previamente con la operación del modelo GW8 (Zimmermann 1994b). Los valores calibrados se tomaron como referencia y fueron posteriormente sometidos a ajustes.

Las características de las recargas del acuífero en el sistema del arroyo Ludueña fueron estudiadas previamente, empleando el modelo de balance TEMEZ, el cual tras ser calibrado fue posteriormente explotado para estimar la evolución de las recargas a lo largo del período 1973-1992 (Zimmermann, 1994c).

El sistema del Ludueña se modeló con un total de 79 celdas, 27 de las cuales conforman condiciones de contorno interno y externo (niveles establecidos) y 114 vinculaciones entre ellas (Figura 1).

Modelo de la zona no saturada (ZNS)

El conjunto de nodos que se vinculan en la ZNS simulan los almacenamientos de humedad e intercambios de flujos verticales entre las celdas de superficie y del acuífero freático.

La zona vadosa fue modelada con profundidades cercanas a los 18 metros (contemplando 70 nodos verticales, parte de los cuales se encuentran *sumergidos* en la zona saturada). Se adoptó un intervalo de discretización vertical Δz de 0,25 m e intervalos temporales entre 360 seg. (durante eventos de lluvia) y 1800 seg. (entre eventos de lluvia) los que garantizan condiciones de estabilidad y convergencia del esquema numérico de resolución (Zimmermann 1998b). Los parámetros físicos y las curvas de retención del suelo se adoptaron basándose en ensayos experimentales realizados por INTA Oliveros (Pcia. de Santa Fe).

Las conductividades hidráulicas verticales se adoptaron como parámetros a ajustar. Se asoció cada celda superficial con un valor de conductividad hidráulica propio afectado por un coeficiente corrector único para todo el conjunto de celdas, el cual fue sujeto a calibración. En consecuencia, la distribución espacial de las conductividades hidráulicas adoptada a priori no fue modificada.

Para la asignación de una conductividad hidráulica característica de cada celda se propuso una metodología de ponderación areal para conductividades hidráulicas verticales de suelos heterogéneos no saturados (Zimmermann 2000). El valor ponderado representa la conductividad hidráulica equivalente que provoca un volumen infiltrado, evaluado a través de la ecuación de Green y Ampt, igual a la suma de los producidos en cada subdivisión homogénea. En este análisis, se tuvo en cuenta las series de suelos presentes en la cuenca, las asociaciones de dichas series, sus composiciones texturales, el contenido salino y el pH para definir las conductividades hidráulicas características, humedades de saturación y potenciales de succión del frente húmedo. La información fue extraída de cartas de suelo del INTA con el apoyo de aerofotografías en escala 1:50000. Para predefinir las conductividades hidráulicas en función de las composiciones texturales y pH se utilizaron los ábacos de Rauls y Brankensiek (Tucci 1989) y trabajos actuales de Suárez y otros (USDA). El resultado de aplicar estas metodologías se grafica en la Figura 2.

Modelo de procesos superficiales

Las cotas de centros de celdas se obtuvieron utilizando cartografías del Instituto Geográfico Militar, en escala 1:50000.

Los parámetros de superficie como almacenamientos por intercepción se estimaron en base a tipos de cultivos presentes, recurriendo a valores citados bibliográficamente (Chow *et al* 1994). Los porcentajes de cobertura del suelo, utilizados por el modelo de intercepción, se estimaron considerando como variables los factores de cultivo -definidos como la relación

entre el área cultivable y el área total de cada celda-, los tipos de cultivos y su grado de crecimiento según día del año. Los porcentajes de ocupación de cada cultivo fueron estimados en base a censos de producción agrícola realizados por la Facultad de Ciencias Agrarias (Figura 3) y las curvas de desarrollo del cultivo fueron propuestas en base al ciclo vegetativo de cada cultivo.

Igual tratamiento que el grado de cobertura se dio a la estimación de la profundidad radicular, con el fin de determinar los nodos de la ZNS afectados por la evapotranspiración. Se contemplaron los factores de cultivo y las áreas de ocupación, grado de crecimiento y profundidad radicular de cada cultivo en particular

Las capacidades de almacenamiento superficial se estimaron por medición de las áreas de almacenamiento detectadas mediante aerofotografías, suponiendo para cada receptáculo una volumetría cónica inversa cuyas generatrices mantienen la pendiente topográfica local (Figura 4).

Condiciones iniciales

En el arranque de las simulaciones deben conocerse las cotas freáticas de las celdas subterráneas y los perfiles de humedad a lo largo del espesor de suelo no saturado.

Los niveles freáticos iniciales del período de simulación fueron extractados de las salidas del modelo bidimensional GW8, aplicado en el sistema de estudio durante el período 1973-1992 (Zimmermann 1994b). A los fines de estimar una condición inicial en el período de calibración del SHALL3, se seleccionaron los nodos cercanos a los centros de celdas y se extractaron los niveles correspondientes al comienzo del período de calibración.

Los perfiles iniciales de humedad fueron calculados mediante simulaciones de los modelos de flujo en la ZNS. Se generaron sintéticamente condiciones climáticas extremas, húmeda y seca, adoptándose una condición intermedia. Las tres condiciones iniciales fueron puestas a prueba iniciando la simulación con los datos del período de calibración (1982-1984). Pudo comprobarse que al finalizar el segundo mes de simulación prácticamente no existían diferencias sustanciales entre los perfiles de humedad de cada celda, adoptándose la situación intermedia.

CALIBRACIÓN DEL SHALL3

El modelo SHALL3 fue concebido con una base racional, de manera tal que los procesos que simula estén representados por ecuaciones cuyos parámetros tienen una interpretación física y están sujetos a mediciones in situ o en laboratorio. No obstante, ajustes sobre algunos de los parámetros adoptados son convenientes, sobre todo aquellos que presentan incertidumbres o heterogeneidades importantes en el terreno.

Como parámetros de calibración se tomaron las conductividades hidráulicas verticales (en cada celda) y horizontales (en cada vinculación subterránea entre celdas). Los ajustes de tales parámetros se hicieron mediante dos coeficientes, ckv y ckh , que multiplican los valores previamente definidos. Es decir que las conductividades hidráulicas no se ajustaron en forma individual (para cada celda o vinculación) sino que se calibraron en conjunto, como se adelantara en los párrafos anteriores.

Las tareas de calibración se llevaron a cabo en dos etapas sucesivas. En una primera, el sistema fue discretizado espacialmente con un grado de desagregación inferior, totalizando 13 celdas de simulación. Dichas celdas fueron representativas de áreas hidrológicamente homogéneas. El objetivo de la agregación realizada sobre la discretización que inicialmente se adoptó fue disponer de un esquema simplificado que permita un gran número de simulaciones con un consumo de tiempo de máquina operativo. Posteriormente se realizó un ajuste detallado con el grado de discretización originalmente adoptado.

Calibración bajo el esquema agregado (13 celdas)

Se realizó un primer análisis de sensibilidad en el largo plazo, tomando como información de entrada una serie sintética de tormentas (1293 eventos) generada estadísticamente [Zimmermann 1998a] junto a otra serie sintética de evapotranspiración potencial (7300 datos diarios) generada mediante un modelo determinístico-estadístico [Zimmermann 1998c]. La simulación se realizó a lo largo de veinte años permitiendo analizar el comportamiento del SHALL3 en el largo plazo.

Las permeabilidades horizontales del acuífero freático fueron calibradas con un parámetro ckh unitario, es decir se respetaron los valores originales calibrados con el modelo GW8. Las conductividades hidráulicas verticales fueron afectadas por coeficientes ckv entre 10 y 40.

Como resultado de este análisis de sensibilidad, la evapotranspiración real (ETR) presentó un suave incremento frente a los aumentos de ckv , con una evolución casi idéntica a la del proceso de infiltración. Los aumentos en las conductividades hidráulicas, provocan mayor infiltración y mayor disponibilidad de humedad en el perfil para ser capturada por la evapotranspiración. Pudo observarse que prácticamente la totalidad del agua infiltrada es tomada por la ETR , denotando un predominio de movimientos verticales en las direcciones del flujo. Los volúmenes de escurrimiento (Q) decrecieron frente a los aumentos del ckv con una marcada sensibilidad. El proceso de percolación (B) experimentó un aumento absoluto significativo.

Cuadruplicando las conductividades hidráulicas verticales permanecen constantes, a los fines prácticos, las variables I y ETR , denotando una baja sensibilidad al parámetro de ajuste (Figura 5). Ocurre lo contrario para las variables B y Q que, en ese orden, presentan cambios muy significativos al aumentar ckv . La percolación B aumenta en valor absoluto un orden de magnitud, mientras que el escurrimiento Q disminuye unas 6,5 veces. Las magnitudes de los procesos de I y ETR marcan un predominio por sobre los restantes, B y Q , en términos de volúmenes anuales. En las redistribuciones de humedad, pequeños cambios en los primeros significaron importantes cambios en los segundos.

Análisis para el periodo 1982-1984

Lo descrito para el análisis en el largo plazo se reprodujo para la serie observada de septiembre 1982 a marzo 1984. Las sensibilidades relativas al parámetro ckv establecieron que los procesos de escurrimiento y percolación son los más afectados ante cambios en las conductividades hidráulicas. La sensibilidad de los niveles freáticos se ubicó en valores intermedios.

Los escurrimientos superficiales disminuyen ante los aumentos del ckv , en mayor medida para las celdas de divisorias (Figura 1) que para las deprimidas del sector Salvat-Ibarlucea y del arroyo Ludueña. Las celdas ubicadas en las zonas deprimidas del sistema del arroyo Ludueña y el sector Salvat-Ibarlucea producen casi la totalidad de los volúmenes de escurrimiento (Tabla 1) ocupando un 67% del área total. Las celdas del sector norte (canal Salvat e Ibarlucea) producen más del 60% del escurrimiento total ocupando el 39% del área del sistema.

Tabla 1. Producción de volúmenes de escurrimiento por celdas.

Celda	Proporción del área total	Proporción del volumen total $ckv = 10$	Proporción del volumen total $ckv = 40$
Celdas de cabecera	33%	9%	0%
Celdas del área deprimida	28%	30%	30%
Celdas del área norte	39%	61%	70%

El valor óptimo hallado de ckv fue de 10. La Tabla 2 muestra la comparación entre volúmenes acumulados de escurrimiento superficial estimados y observado para la serie 1983-1984, de pudiéndose apreciar un grado de ajuste satisfactorio.

Tabla 2. Escurrimientos calculados para diferentes ckv

	$Ckv = 10$	$Ckv = 15$	$Ckv = 20$	$Ckv = 30$	Observado
Escurrimiento acumulado, período 09/83- 03/84 (mm)	102.9	50.45	24.7	5.41	100,3

Calibración bajo el esquema desagregado (79 celdas)

Tomando como partida el valor óptimo de ckv ajustado para el esquema agregado se realizaron corridas del modelo para el esquema desagregado, compuesto por 79 celdas, con ckv igual a 10, 11 y 12. Finalmente, el valor óptimo de ckv calibrado fue de 12, el cual permite alcanzar a un buen ajuste de volúmenes de escurrimiento superficial (Figura 6), descrito por un coeficiente de determinación entre serie observada y calculada de $r^2 = 0.9747$.

Se analizó la evolución de los niveles freáticos a lo largo del período de calibración y en la celda 524, adyacente a la estación agroexperimental de Zavalla (Figura 1). Si bien la dinámica de las cotas freáticas se reprodujeron para todos los valores de ckv , la opción seleccionada ($ckv = 12$) provocó un mejor ajuste con los niveles observados (Figura 7). El coeficiente de determinación entre serie observada y calculada resultó $r^2 = 0.8917$.

Las humedades del perfil estimadas por el modelo SHALL3 en las celdas 524 y 525 para un metro de profundidad, fueron chequeadas con las medidas en la estación agrometeorológica de Zavalla, la cual se encuentra en el límite entre ambas celdas. Las humedades volumétricas, no fueron estrictamente observadas sino que se obtuvieron mediante promedios de mediciones por método gravimétrico que se realizaron sobre muestras tomadas a 0,15 – 0,30 y 0,60 m de profundidad, estimando la densidad seca de la fracción sólida del suelo. Los registros de humedades tienen validez puntual y presentan grandes variaciones espaciales, por lo cual el objetivo de este ajuste fue reproducir las tendencias generales en la evolución de humedades del perfil. Bajo estas condiciones, el ajuste se consideró satisfactorio (Figura 8).

El balance hidrológico medio de la cuenca durante el período de calibración se refleja, también, en la gráfica de variables acumuladas de la Figura 9. Como puede apreciarse, los procesos que involucran movimientos verticales en los flujos de intercambio son predominantes (ETR e I). La evapotranspiración real presenta dos períodos con tasas elevadas de demanda (veranos). En el primero, más seco, la tasa es mayor (pendiente de la curva acumulada) que en el segundo, el cual es más húmedo. La infiltración acumulada reproduce la evolución de las precipitaciones (P) con una pequeña atenuación. Durante los primeros 100 días de simulación, la precipitación supera la demanda atmosférica por evapotranspiración, almacenándose un superávit de humedad en el perfil con recargas dominantes del acuífero freático (B). Aproximadamente a los 50 días, la tasa de precipitación se iguala a la de evapotranspiración, dando comienzo al decremento de la percolación. Sin embargo el acuífero se sigue recargando merced al almacenamiento de humedad en la ZNS, aún cuando existe un déficit de humedad en la superficie ($ETR > P$).

El escurrimiento (Q) también se manifiesta sensible a la evolución de ETR y P . En los comienzos del período de simulación, el escurrimiento acumulado presenta prolongadas “mesetas” con pequeños “escalones” en eventos de gran intensidad (que se manifiestan como saltos bruscos en el diagrama de precipitaciones acumuladas). Cuando la precipitación acumulada tiende a alcanzar la evapotranspiración acumulada, en los finales del período, se produce un incremento sostenido de Q que prácticamente duplica el volumen acumulado durante los primeros 500 días.

En la tabla 3, se presentan los acumulados de diferentes variables hidrológicas para el período de calibración y sus respectivos porcentajes respecto a la precipitación total.

Tabla 3. Totales acumulados y porcentuales de variables hidrológicas en el período de calibración

Precipitación P	Evapotranspiración ETR	Percolación B	Almacenamientos superficial e intercepción AS + F	Escurrimiento Q	Infiltración I
1565,8 mm	1576,7 mm	-44,4 mm	181,7 mm	90,4 mm	1264,8 mm
100%	101%	3%	12%	6%	81%

Análisis distribuido del sistema

La calibración del SHALL3 bajo un esquema desagregado ha permitido un mayor detalle en las características espaciales o zonales de los procesos hidrológicos que se dan a nivel del sistema. Se han trazado mapas de la distribución espacial de diferentes procesos hidrológicos, tomando como base los valores puntuales en cada celda de simulación. Se trazaron curvas de nivel aplicando la técnica de interpolación por *kriging*.

La producción de montos de escurrimiento se concentra en los sectores deprimidos del sistema (Figura 10), donde las permeabilidades verticales son menores. Existe una entera correspondencia entre los mapas de conductividades hidráulicas y escurrimientos.

Los sectores de la cabecera del sistema hidrológico, representan la zona de recarga por excelencia, en donde se concentran los valores negativos de percolación (Figura 11). Los sectores deprimidos representan las descargas de la freática por ascenso capilar, por excelencia, según puede apreciarse en la figura.

La evapotranspiración acumulada durante el período es mayor en los sectores deprimidos de la cuenca, en donde se encuentra el acuífero freático a menor profundidad (Figura 12). Las tasas de evapotranspiración disminuyen en gran medida en los sectores de cabecera de cuenca, donde el acuífero se encuentra a profundidad.

CONCLUSIONES

La puesta en operación y las tareas de calibración del modelo hidrológico, SHALL3, en el sistema del arroyo Ludueña puso en evidencia que las conductividades hidráulicas verticales ajustadas resultaron ser de un orden de magnitud mayor a las estimadas previamente con los ábacos de Rauls y Brakensiek, poniendo de manifiesto que la conformación textural del suelo, sobre las que se basan los ábacos, no es la única variable que controla la conductividad hidráulica. Los ajustes en los escurrimientos, niveles freáticos y humedades medidas durante el período de calibración pueden considerarse como satisfactorios, validando al modelo SHALL3 para posteriores simulaciones.

Se puso en evidencia que los sectores ubicados en la cabecera de cuenca producen un mínimo porcentaje del escurrimiento, constituyendo la zona de recarga por excelencia del acuífero freático. Los sectores ubicados en la parte deprimida del sistema hidrológico producen los mayores volúmenes de escurrimiento. Este sector conforma la zona de descarga del acuífero freático por ascenso capilar y evapotranspiración.

El modelo matemático SHALL3 se ajusta a las concepciones previas que se tienen del sistema real en cuanto a formas y montos de los diferentes procesos hidrológicos que se simulan.

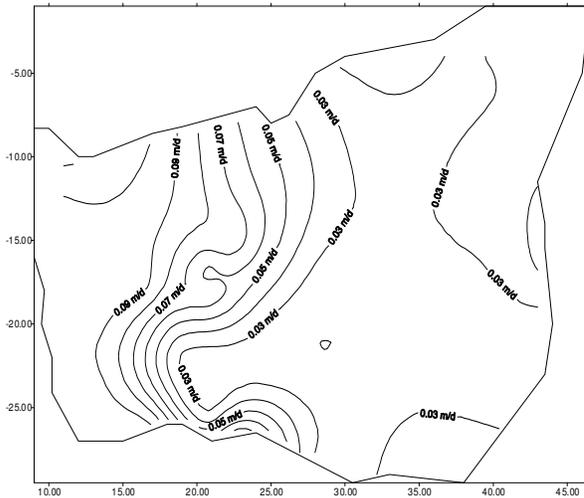


Figura 2. Conductividades Hidráulicas estimadas

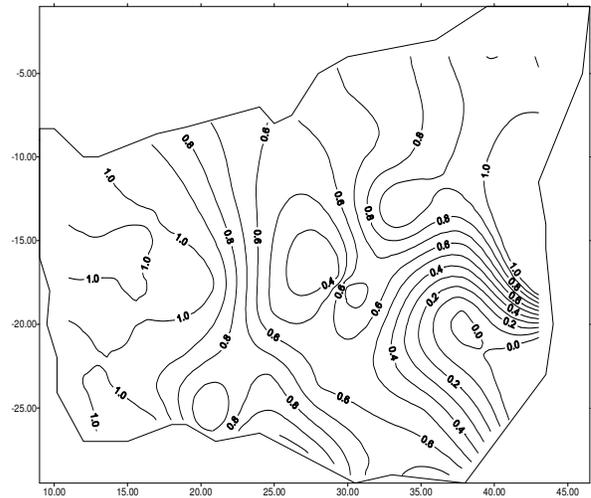


Figura 3. Factores de cultivo

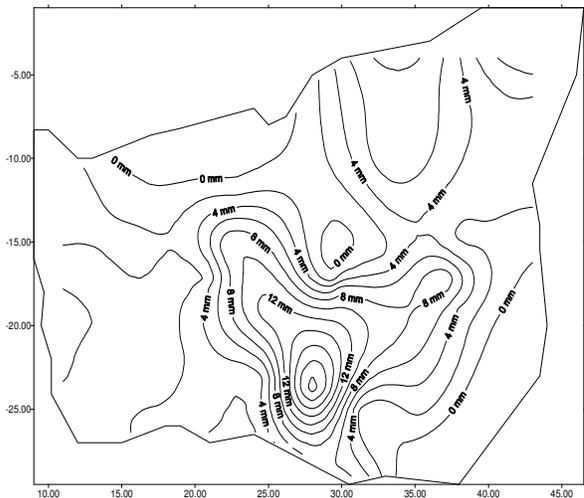


Figura 4. Almacenamientos superficiales

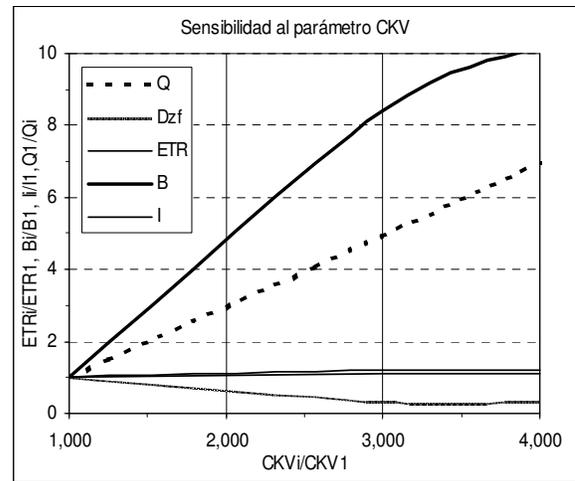


Figura 5. Análisis de sensibilidad de parámetros.

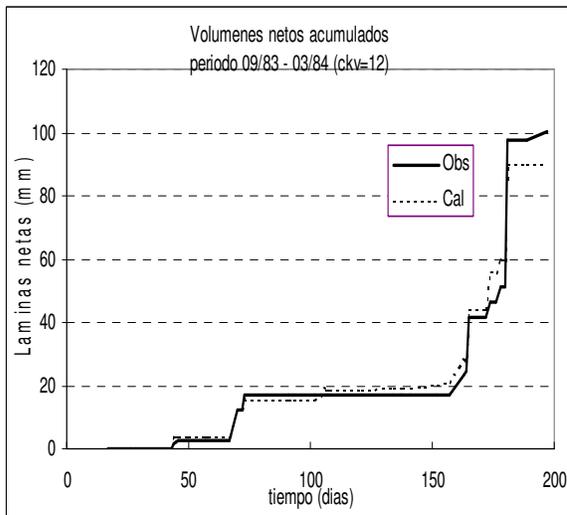


Figura 6. Esguimientos observados y calculados

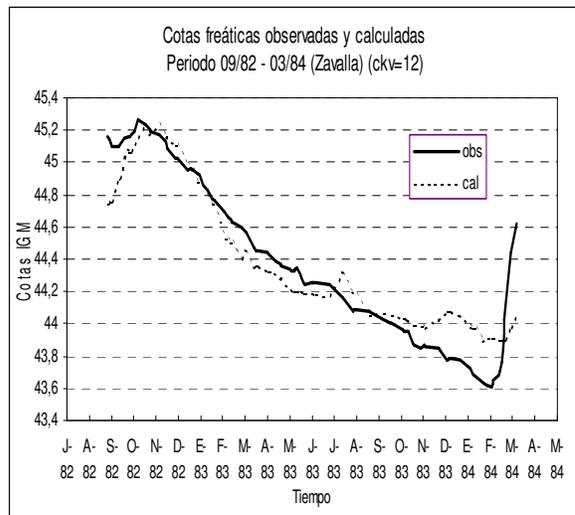


Figura 7. Niveles freáticos observados y calculados.

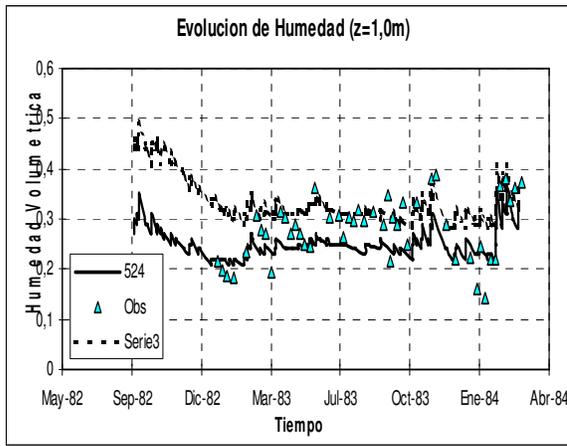


Figura 8. Evolución de humedades a 1 m de profundidad

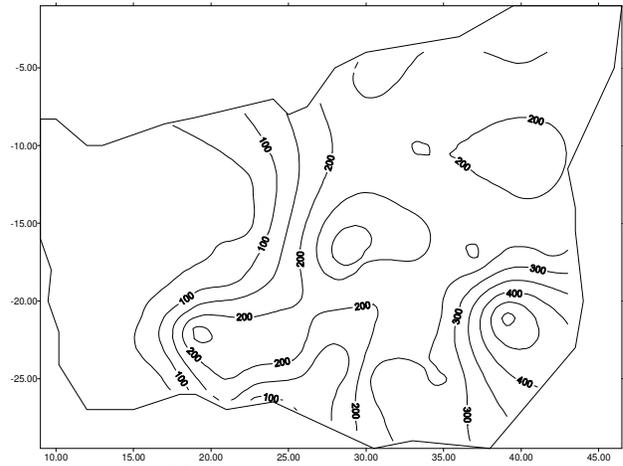


Figura 10. Escurremientos superficiales medios

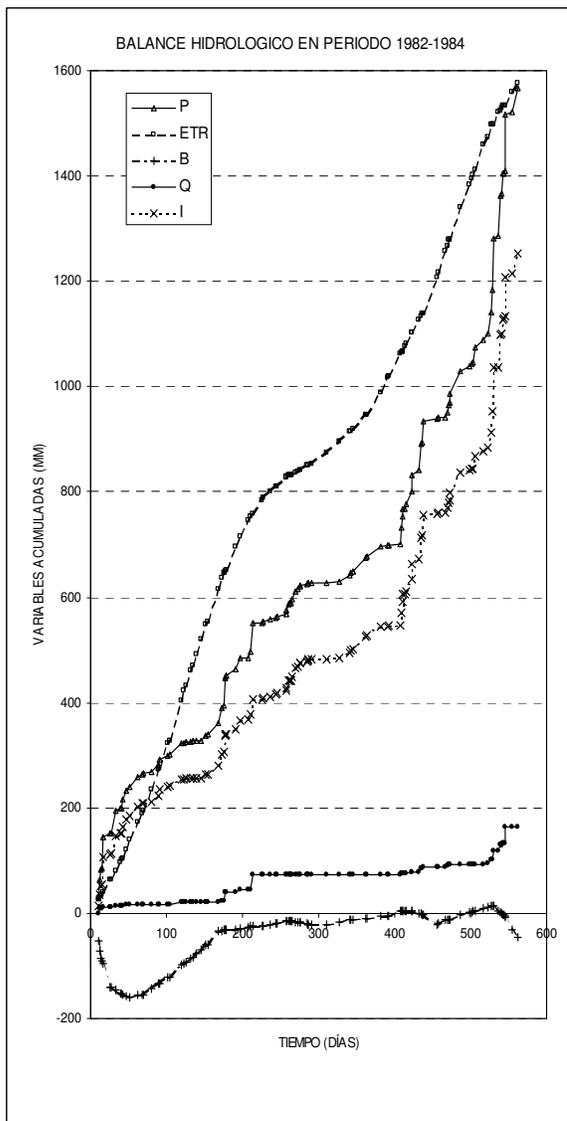


Figura 9. Balance Hidrológico

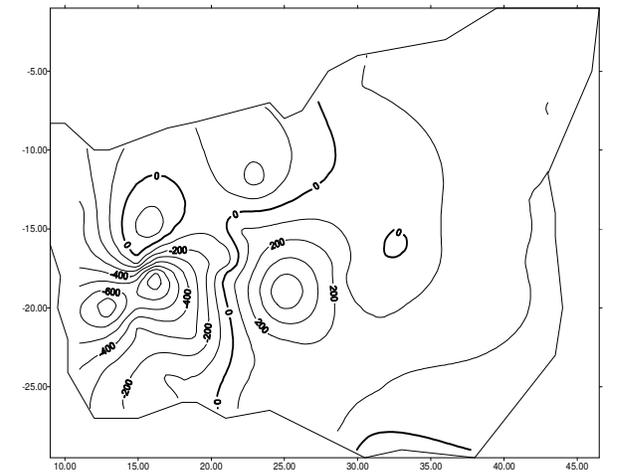


Figura 11. Percolaciones medias

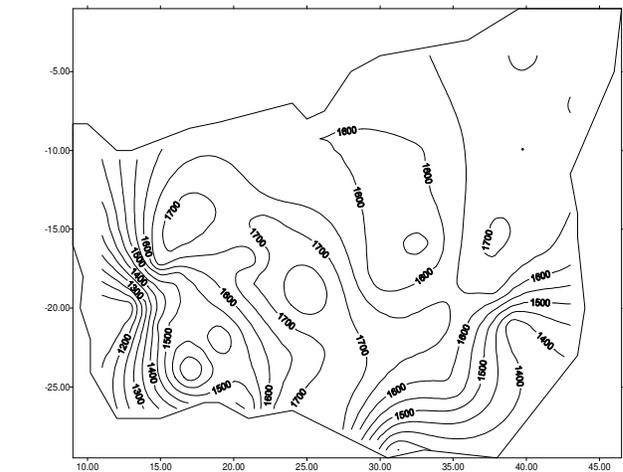


Figura 12. Evapotranspiración media