

# **SIMULACION HIDROLÓGICA DE LA MICROCUENCA DEL RÍO EL CUBO, CON EL USO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICOS**

*Francisco J. Flores López, Christopher A. Scott'*

## **Resumen**

La estimación en tiempo y espacio de los volúmenes escurridos en las cuencas hidrológicas es de suma importancia; ya que en la medida en que se conozcan estos volúmenes, se puede realizar una planeación mejor para la distribución del recurso agua en las fuentes de demanda. Con el uso de los Sistemas de Información Geográficos (SIG) y modelos hidrológicos de escurrimiento superficial es posible simular el comportamiento del agua superficial en las cuencas hidrológicas. En el presente estudio se aplican las técnicas de los SIG y un modelo de simulación hidrológico para simular el comportamiento del escurrimiento superficial en la microcuenca del río El Cubo, afluente del río Guanajuato y a su vez del río Lerma, con datos meteorológicos y aforos realizados en el año de 1999.

Se utilizó el modelo de elevación digital de INEGI 1:250,000 con una resolución de 60 m, una imagen de satélite clasificada para los tipos de cubierta con una resolución de 30 m y se realizaron pruebas de infiltración en campo en las diferentes unidades de suelo existentes para determinar los coeficientes de permeabilidad. El modelo de simulación predice un volumen total escurrido muy similar al volumen total aforado, siendo de  $3.9 \times 10^6 \text{ m}^3$  y  $4.1 \times 10^6 \text{ m}^3$  respectivamente para el día juliano 260 (17 de septiembre de 1999, fecha en la cual terminaron los escurrimientos). Se pudo observar que el modelo de simulación **no** es sensible a los coeficientes de permeabilidad, en cambio, si lo es a las profundidades de los diferentes tipos de suelos. Hay un suministro estimado del volumen de agua percolado hacia los acuíferos de aproximadamente  $70 \times 10^6 \text{ m}^3$  hasta el día juliano 260, esto indica que los niveles freáticos de los acuíferos en la microcuenca están por abajo del punto más bajo del cauce del río.

---

<sup>1</sup> Asociado de Investigación (fco.flores@excite.com) e Investigador y Líder Interino del Programa en México del Instituto Internacional del Manejo del Agua (IWM), CIMMYT, Texcoco, Mex. MEXICO (c.scott@cgiar.org).

## Introducción

El agua es **un** recurso natural y finito. La cantidad de agua total existente en el planeta no aumenta ni disminuye. El número de seres humanos y sus neccsidades aumentan con el tiempo, pero los recursos hídricos de los que depende **no**. Contrariamente a lo que puede parecer a simple vista, existe una cantidad fija de agua en el planeta –casi 1,400 millones de kilómetros cúbicos– que no puede aumentar ni disminuir. La mayor parte de ella (97.5 por ciento) es agua salada y de escasa utilidad directa para la población. Otro 1.76 por ciento se encuentra encerrado en el permagélido, los casquetes de hielo y los glaciares. Casi todo el resto del agua es subterránea, quedando solamente 136,000 kilómetros cúbicos –menos del 0.4 por ciento del agua dulce del planeta– en los ríos, lagos, depósitos, suelo, pantanos, la atmosfera y **en** los organismos vivos (FAO, 1994).

El agua es un bien indispensable, pero escaso y desigualmente repartido en forma natural. Se ha propiciado en México **una** constante y creciente explotación, muchas veces en forma incontrolable e **incluso** perjudicial para la recuperación del equilibrio en el ciclo natural. Se requiere, sin duda, **un** conocimiento real y estricto del panorama y las condiciones de los factores que intervienen en el comportamiento del agua y su renovación, así como la perspectiva espacial de todo ello a distintas escalas, de acuerdo con los requerimientos del planteamiento. Por esta razón, si bien es cierto que un estudio hidrológico no debería circunscribirse a **unidades** espaciales con límite político-administrativo, porque la naturaleza marca los **su-**yos propios, también es verdad que las necesidades del hombre, exigen establecer fronteras que permiten el estudio, conocimiento y toma de decisiones sobre un espacio determinado (INEGI, 1988).

Ante esta situación que se ha desarrollado en las cuencas hidrologicas del país, el IWMI inició diversos estudios sobre los procesos que se desarrollan en la Cuenca Lerma-Chapala, y el estado de Guanajuato **en** específico. Existe una limitante en la disponibilidad de las aguas superficiales y la sobre-explotación de los acuíferos, así que es importante entender el comportamiento de un afluente del río Lerma con la intención de simular el comportamiento hidrológico de los escurrimientos generados **en** la cuenca de captación. Para esta investigación se seleccionó la microcuenca de el río El Cubo, afluente de el río Guanajuato. Dicha microcuenca fue seleccionada por su tamaño, por contar con una estación de aforo y descargar sus aguas a la presa La Purísima. Esta presa suministra los volúmenes necesarios para el módulo de riego La Purísima, perteneciente al Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, en el estado de Guanajuato, y esta conectada hidrológicamente con los pozos de agua potable de la ciudad de Guanajuato.

De esta forma, los objetivos planteados fueron los siguientes:

1. Simular el comportamiento hidrológico de los escurrimientos generados en la microcuenca del río El Cubo, con el uso de los SIG.

2. Estudiar la respuesta de los tipos de suelos identificados y las velocidades de infiltración obtenidas en campo, con el comportamiento de los escurrimientos simulados.
3. Vincular la generación de escurrimiento superficial con la recarga de los acuíferos.

### Descripción de la Zona de Estudio

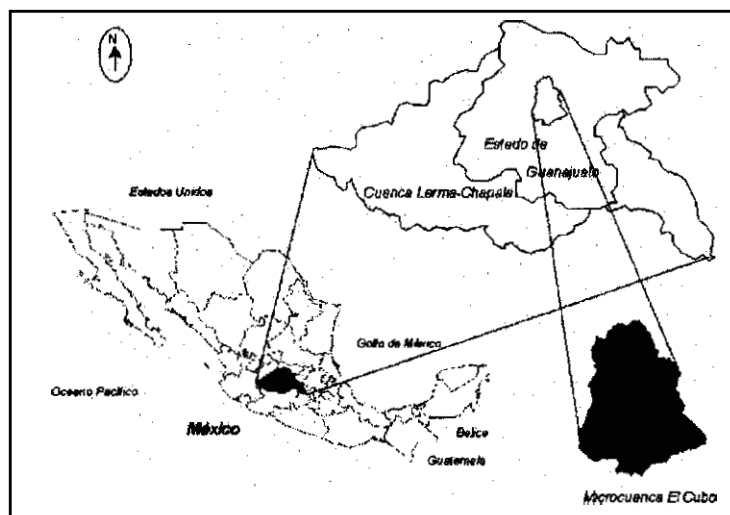
El área de estudio se ubica en la parte media del estado de Guanajuato, en el municipio de Guanajuato. La microcuenca del río El Cubo tiene una superficie de  $226.4 \text{ km}^2$  y la estación de aforo El Chapin<sup>2</sup>, que cuantifica los escurrimientos generados en la microcuenca está ubicada en el paralelo  $20^{\circ} 52' 11''$  de latitud norte y el meridiano  $101^{\circ} 14' 12''$  de longitud oeste, a unos metros aguas arriba de la desembocadura del río El Cubo en la presa La Purísima, y a 1850 msnm (ver Figura 1).

Los datos reportados en el Cuadro 1 corresponden a la estación meteorológica Guanajuato, que es la más cercana a la microcuenca, tomándose esta estación como representativa del Brea de estudio referente a información meteorológica y de la cual se tiene una serie histórica aceptable. Dicho lo anterior el Brea de estudio presenta una temperatura media anual de  $18.2^{\circ}\text{C}$ . La precipitación media observada es de 691.4 mm anuales y la evaporación media anual es de 2,262 mm, como se observa en el Cuadro 1. Es conveniente aclarar que los datos que alimentaron al modelo de simulación (precipitación y evaporación) fueron lecturas reales tomadas por personal de la Comisión Nacional del Agua (CNA) en la estación meteorológica El Chapin, que se ubica en la parte baja de la microcuenca a unos metros de la desembocadura del río con la presa La Purísima, precisamente en el mismo lugar en que se localiza la estación de aforo del mismo nombre. Los datos meteorológicos para la estación El Chapin, no se presentan ya que no se cuenta con una serie histórica que sea representativa del área de estudio.

---

<sup>2</sup>

Se agradece la amplia colaboración de la Ing. Mirna Juárez de la Gerencia Estatal de CNA, por la información meteorológica e hidrométrica proporcionada para esta investigación.



**Figura 1. Ubicación del área de estudio.**

### **Cuadro 1. Datos meteorológicos medios de la estación Guanajuato.**

Municipio: Guanajuato; Estación: Guanajuato; Número: 24

Latitud: 21-01 N; Longitud: 101-15 W; Altitud **2037**

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Med./ Total
Temp. max (°C)	21.5	23.0	26.5	28.7	29.5	27.8	25.8	25.6	25.1	24.8	23.2	21.7	25.3
Temp. min (°C)	6.7	7.2	9.9	12.0	13.7	14.6	13.9	13.7	13.5	11.5	8.7	7.6	11.1
Temp. med (°C)	14.1	15.1	18.2	20.4	21.6	21.2	19.9	19.7	19.3	18.2	16.0	14.7	18.2
Precip. (mm)	10.9	5.5	5.9	13.9	32.6	131.1	144.7	135.7	135.9	48.1	15.1	12.0	691.1
Evap. (mm)	137	164	235	255	255	207	190	189	170	177	149	134	2262

**Fuente: SARH, 1988.**

El territorio del estado de Guanajuato pertenece a dos regiones hidrológicas; Lerma-Santiago (RH12), cuyas aguas fluyen hacia el Océano Pacífico, la cual comprende cerca del 83.6% del territorio estatal y contribuye con más del 90% del volumen total de agua –escurrimiento superficial y recarga de acuíferos– y la región hidrológica del Pilnucu (RH26). El río El Cubo se origina dentro de la región hidrológica Lerma-Santiago; se clasifica de acuerdo al tiempo en que transporta agua como una corriente efímera. El nivel freático está siempre abajo del punto más bajo del cauce y transporta agua inmediatamente después de una tormenta y alimenta a los almacenamientos de aguas subterráneas.

## Materiales y Métodos

La selección de la microcuenca se llevó a cabo evaluando ciertos factores positivos: cuenta con una estación de aforo y una estación meteorológica (El Chapín) en las cuales se toman lecturas diariamente, es una microcuenca de un clima aceptable, no presenta hordos de almacenamiento que retengan los escurrimientos, no hay un uso agrícola intensivo (sólo presenta un área de agricultura de temporal), etc.

Se utilizó el modelo de elevación digital (DEM) de INEGI 1:250,000 con una resolución de 60 m. Para determinar el tipo de cubierta vegetal presente en la cuenca, se utilizó la imagen de satélite con clasificación supervisada de Flores y Scott (2000); la cual corresponde al ciclo agrícola otoño-invierno 98/99 (marzo y mayo de 1999), que fue obtenida a partir de las imágenes de satélite Landsat TM con una resolución de 30 m para estimar las superficies cultivadas en el estado de Guanajuato. En el Cuadro 2 se presentan los tipos de cubierta identificados en la imagen de satélite, así como, las superficies estimadas para cada tipo de cubierta.

**Cuadro 2. Tipos de cubierta y superficies en la microcuenca.**

Tipo de cubierta	Superficie (ha)
Alfalfa	26.28
Cebolla / Ajo	0.36
Fresa	8.64
Varias Hortalizas	6.64
Vegetación Natural Predominan Encinos	750.60
Vegetación Natural Predominan Pinos	424.08
Zona Urbana	123.48
Monte	21,300.48
Total	22,642.56

**Fuente:** Flores y Scott, 2000.

Para determinar el coeficiente de permeabilidad ( $K_{sat}$ ) o conductividad hidráulica saturada de las diferentes unidades de suelo identificadas en las cartas edafológicas de INEGI en la cuenca del río Guanajuato, en los meses de agosto a octubre de 1998 se realizaron 41 pruebas de infiltración utilizando el método de doble cilindro. En el Cuadro 3 se presentan un análisis estadístico de los resultados de dichas pruebas y con los cuales se alimentó al modelo de simulación, siendo el valor medio el utilizado. Los coeficientes de evapotranspiración de cultivo ( $K_c$ ), para los diferentes tipos de cubierta identificados en la microcuenca de estudio se determinaron para periodos mensuales y junto con los métodos utilizados para su determinación se presentan en el Cuadro 4.

**Cuadro 3. Análisis estadístico de los coeficientes de permeabilidad ( $K_{sat}$ , cm/día).**

Unidad de suelo	Vertisol	Litosol	Fluvisol	Regosol	Castañozem	Luvisol	Cambisol	Phaeozem
Máximo	133.1	133.1	66.2	448.1	801.1	702.7	503.3	184.2
Mínimo	8.5	36.0	5.3	121.5	478.4	276.0	240.3	21.7
Media	45.8	69.2	29.1	248.2	642.1	420.4	325.0	91.6
Mediana	34.6	64.7	15.7	211.6	646.6	282.5	290.0	70.1
Desviación Std.	50.7	38.5	32.6	144.0	161.4	244.5	107.3	73.9
Coef. Variación	1.11	0.56	1.12	0.58	0.25	0.56	0.33	0.81
% Superf. microcuenca	0.0	24.0	1.5	0.0	0.0	5.6	31.6	37.3

El modelo de simulación se basa en la ecuación de balance de masas por pixel:

$$V_{s,t} = V_{s,t-1} + P_t - E_t - Es_t - I_t + DL_t$$

Donde:

- $V_{s,t}$  = Volumen de humedad almacenado en el periodo t
- $V_{s,t-1}$  = Volumen de humedad almacenado en el periodo t - 1
- $P_t$  = Precipitación en el periodo t
- $E_t$  = Evaporación en el periodo t
- $Es_t$  = Escurrimiento en el periodo t
- $I_t$  = Infiltración o percolación en el periodo t
- $DL_t$  = Suma del flujo lateral de pixeles adyacentes en el periodo t

**Cuadro 4. Coeficientes de evapotranspiración de diferentes tipos de cubierta ( $K_c$ ).**

Mes	$K_c$ Suelo Desnudo <sup>a</sup> (FAO24)	$K_c$ Alfalfa (Cropwat 5.7)	$K_c$ Varíos <sup>b</sup> (Cropwat 5.7 y FAO24)	$K_c$ Arboles <sup>f</sup> (Sintético)	$K_c$ Ciudad <sup>h</sup> (Sintético)
Ene	0.31	0.95	0.31	0.47	0.01
Feb	0.21	0.95	0.21	0.37	0.01
Mar	0.18	0.95	0.18	0.35	0.01
Abr	0.32	0.95	0.32	0.23	0.01
May	0.46	0.95	0.46	0.19	0.01
Jun	0.88	0.95	0.73	0.36	0.05
Jul	1.17	0.95	0.87	0.51	0.05
Ago	0.93	0.95	0.98	0.75	0.05
Sep	0.95	0.95	1.05	1.00	0.05
Oct	0.27	0.95	0.90	0.79	0.03
Nov	0.55	0.95	0.53	0.81	0.01
Dic	0.34	0.95	0.34	0.47	0.01

a: El  $K_c$  se ajustó en un 30% de más para los meses de Junio-Noviembre, siendo estos los meses con lluvia y por lo tanto, hay humedad en el suelo.

b: En *italicas* corresponde al  $K_c$  obtenido de Cropwat 5.7 para el sorgo y el resto se obtuvo de FAO24.

f: El  $K_c$  se obtuvo de trabajos realizados en Ithaca New York USA dichos coeficientes se despiizaron dos meses para ajustarlos al periodo vegetativo de Mexico.

h: El  $K_c$  se obtuvo a partir de generación sintética.

El escurrimiento es el componente más importante del ciclo hidrológico, se define como la parte de la precipitación que fluye por gravedad por la superficie del terreno (escurrimiento superficial) o por el interior del mismo hasta aparecer en una corriente de agua. El escurrimiento superficial es igual a la precipitación menos la retención superficial y la infiltración (paso o movimiento del agua a través de la superficie del suelo). Es una función de la intensidad y duración de la precipitación, permeabilidad de la superficie del suelo, tipo y extensión de la vegetación, área de la cuenca de captación, geometría de los cauces, profundidad de la superficie freática, pendiente del terreno, etc.

Al producirse una tormenta, una buena parte de la precipitación es captada por la vegetación y los árboles por interceptación. Si la tormenta es de poca intensidad y duración, un alto porcentaje del agua precipitada, y que fue interceptada por la vegetación, vuelve a la atmósfera por evaporación. El agua restante, al infiltrarse, llena oquedades y depresiones en el terreno. Una vez que éstas se han llenado, y si la tormenta es suficiente fuerte, superior a la capacidad de infiltración del suelo, se inicia el flujo sobre el terreno. Parte del agua infiltrada se mueve lateralmente en los estratos superiores del terreno hasta alcanzar alguna corriente, es el así llamado flujo subsuperficial. El resto de la infiltración fluye hasta llegar a la superficie freática del acuífero subyacente, y deja en su recorrido una parte de su volumen que incrementa el contenido de humedad de la zona no saturada.

## Resultados

La simulación se realizó para el año de 1999, en el cual se tomaron lecturas diarias en la estación El Chapin de precipitación, evaporación; se aforó tres veces al día y cuando se presentaron avenidas se tomaron aforos en periodos cortos para tener una mejor descripción de estas, etc. El modelo de simulación fue alimentado con los datos antes descritos; el periodo de análisis es de un día y los resultados que se obtienen del modelo de simulación son escurrimientos y percolación que estima el modelo en la microcuenca. En la Figura 2 se presentan el hidrograma de los escurrimientos aforados y simulados para el periodo de lluvia en los cuales hubo escurrimientos.

Como se puede observar en la Figura 2, el modelo presenta una simulación aceptable de los escurrimientos generados; se puede decir que el modelo reproduce la respuesta de la cuenca a los escurrimientos; sólo que hay algunos puntos del hidrograma en los cuales el modelo estima caudales mayores a los aforados como en el pico del día juliano 184, 201 y 212. Estos picos se pueden deber a que los aforos realizados no se llevaron a cabo cuando se presentaron los caudales máximos. Otra causa probable pudiera ser debida a los valores de los coeficientes de permeabilidad que se puede considerar que han sido subestimados ya que arrojan escurrimientos mayores a los aforados. Es importante señalar que los escurrimientos simulados son mayores a los aforados en algunos puntos hasta el día juliano 212, esto se puede deber a que hay poca humedad en el suelo y las primeras lluvias no ocasionan escurrimientos ya que estas únicamente mojan los suelos; a partir de ese día, los escurrimientos simulados se hacen menores a los aforados. Los volúmenes escumados acumulados tanto simulados, como aforados son muy similares,  $3.9 \times 10^6 \text{ m}^3$  y  $4.1 \times 10^6 \text{ m}^3$  respectivamente. En la parte inferior de la Figura 3 se muestran los volúmenes acumulados de escurrimiento y se puede observar un comportamiento propiamente igual en ambos escurrimientos. Se puede decir que, independientemente de las diferencias que hay entre los picos de la simulación y aforos que se muestran en la Figura 2, el volumen total escurrido coincide o incluso se puede decir que es el mismo, ya que sólo hay un diferencial del 5%, el cual se puede considerar no significativo.

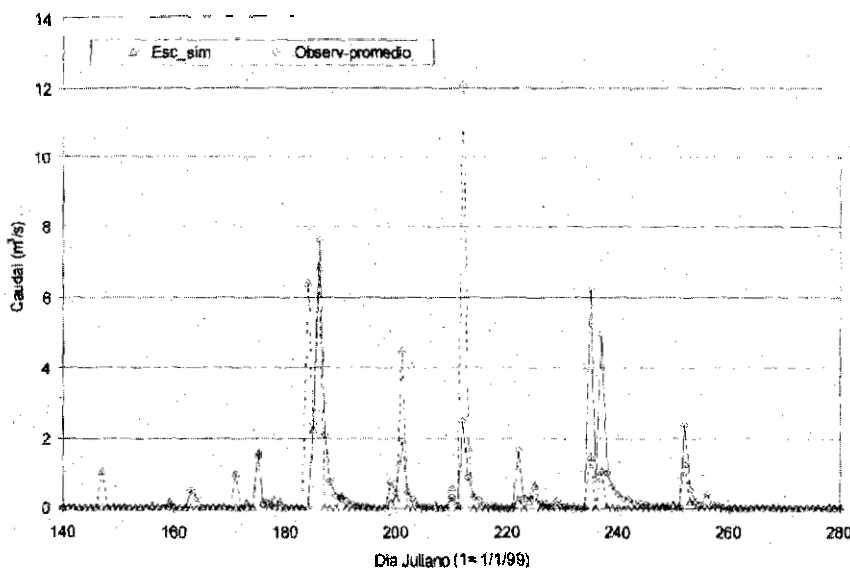
Es conveniente señalar que el tiempo de respuesta de los algoritmos del modelo de simulación es diario. Esto es aceptable en microcuencas como esta, en las cuales las precipitaciones que se presentan en la microcuenca, son observadas propiamente al poco tiempo de ocurrida (en el mismo día) como escurrimientos en las partes más bajas de ésta. En base a la distancia máxima de flujo y la velocidad media en el punto de aforo, se obtiene el tiempo en el cual los escurrimientos llegan al punto más bajo de la microcuenca o tiempo de respuesta.

$$\text{Tiempo de Respuesta} = \frac{\text{Distancia Maxima de Flujo}}{\text{Velocidad Media Aforada}}$$

$$\text{Tiempo de Respuesta} = \frac{19,568 \text{ m.}}{0.278 \text{ m/s}} = 70,388 \text{ s} = 19.5 \text{ hrs.}$$



Como se puede observar, el tiempo en el cual llegan los escurrimientos a la parte más baja es de 19.5hrs, considerando la velocidad media en el punto de aforo. Hay que tomar en cuenta que el tiempo debe ser menor a este por varios factores, el principal es, la velocidad que se considera; dicha velocidad es la menor que se presenta en la microcuenca debido a que es tomada en la parte con menor pendiente, y en las partes más altas o con mayor pendiente la velocidad se incrementa y por consiguiente el tiempo de respuesta debe ser menor al de 19.5 hrs.



**Figura 2. Esgurrimiento aforado y simulado, estación hidrométrica El Chapín con valores medios del coeficiente de permeabilidad.**

En la Figura 3 están graficados los volúmenes acumulados de percolación y escurrimientos simulados por el modelo. Esta figura es muy importante, ya que se puede apreciar el volumen total percolado que da como resultado el modelo de simulación, así como, el comportamiento de los volúmenes acumulados a lo largo del tiempo. El volumen percolado total simulado en el año es de aproximadamente  $70 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  (18 veces más que el escurrimiento). Por ser un volumen percolado se considera que este es una fuente de recarga hacia los acuíferos de la zona de estudio, ya que de lo contrario, dicho volumen estaría presente en los escurrimientos generados en la microcuenca, y en el hidrograma de la Figura 2 se podría apreciar un caudal base para aquellos periodos en los cuales no hay escurrimientos debidos a precipitaciones en la microcuenca. Consideramos que dicho volumen es de suma importancia dentro del balance hidrológico, ya que representa una cantidad significativa de agua, que pasa a formar parte de los de los acuíferos como una recarga y que posteriormente, van a ser explotados.

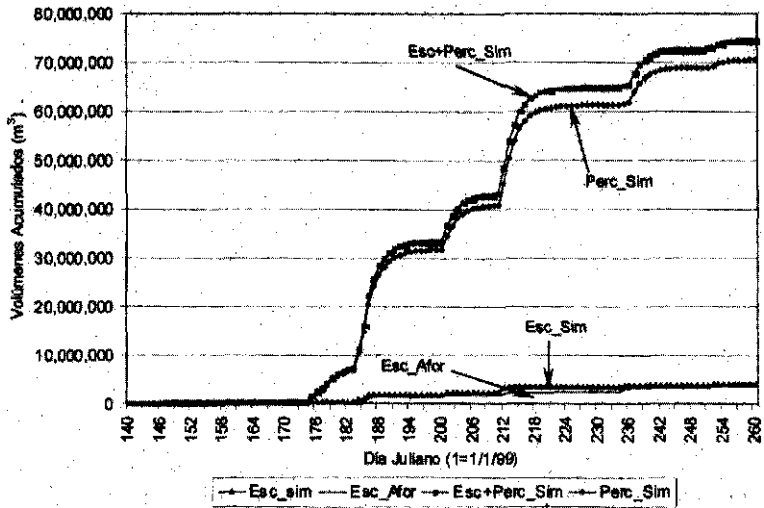


Figura 3. Percolación y escurrimientos simulados acumulados.

Es importante hacer notar la importancia que tienen los volúmenes percolados en relación a un posible manejo que se le pudiera dar a la microcuenca; si no existiera una sobre-explotación de los acuíferos en la zona y por lo tanto, los niveles freáticos no estarían tan profundos (el nivel freático estaría al nivel del cauce como se muestra en la Figura 4), se traduciría la percolación como un caudal base o aportación en los escurrimientos generados por la microcuenca, en el período de lluvias o por más tiempo. Lo que está pasando con el escurrimiento que se genera y el cual forma parte de los volúmenes de recarga hacia los acuíferos, a través de la percolación, es que existe un aporte directo de los escurrimientos hacia los acuíferos a lo largo de toda el cauce del río, por lo que en el punto de aforo, sólo llega una parte de los escurrimientos generados, como se observa en la Figura 5. Algo importante de hacer notar es que, almacenar agua en los acuíferos elimina las pérdidas por evaporación, en comparación con almacenar volúmenes de agua en presas o lagos; pero en los acuíferos implica costos de bombeo para ser aprovechada, los cuales son considerables, además de la inversión que implica tener un pozo de bombeo.

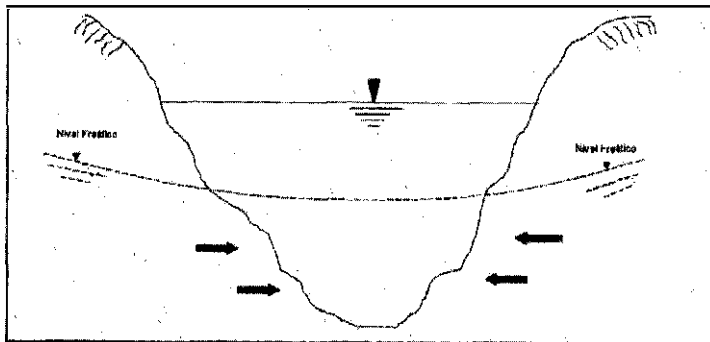
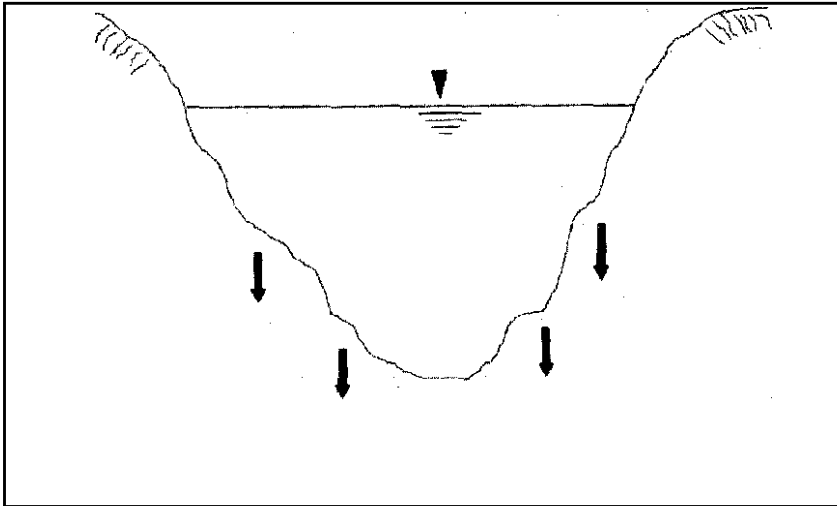


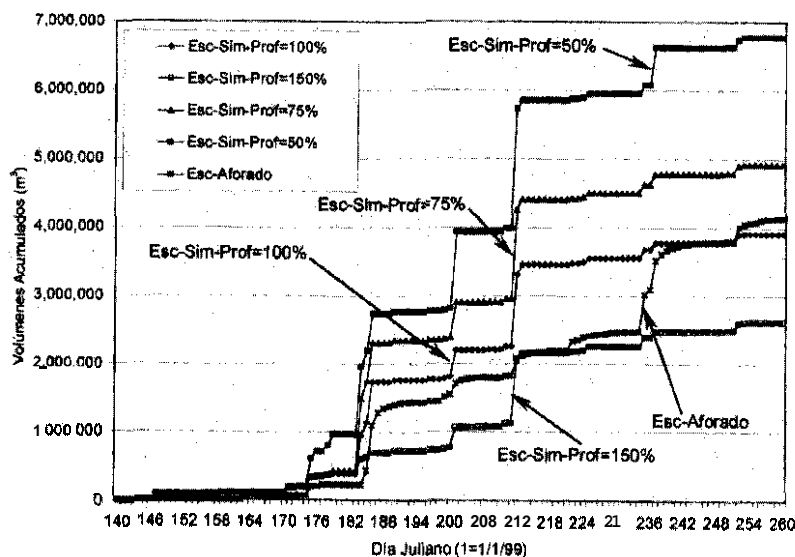
Figura 4. Percolación generando un escurrimiento base en el río.

Cabe hacer mención que se realizaron otras simulaciones en las cuales se vario el coeficiente de permeabilidad por el valor mediano del Cuadro 3, se pudo observar que para esta variable, el modelo de simulación no es sensible, ya que se pudieron observar mínimas variaciones en los resultados con valores de 0.07 a 0.2%. Otra variable que se modificó en las simulaciones, fue la profundidad del suelo; con esta variable se pudo observar que el modelo es muy sensible, como se observa en la Figura 6. Las profundidades de las unidades de suelos identificadas en la zona de estudio, fueron definidas en base a las reportadas por las cartas edafológicas de INEGI. Las profundidades se aumentaron (en un 50%) y disminuyeron (25 y 50%) en el valor reportado por INEGI; el comportamiento de los escurrimientos mantuvo la tendencia en las diferentes profundidades, cambiando únicamente los valores de respuesta como se observa en la Figura 6, en la cual, hubo un mayor volumen escurrido para las simulaciones en las cuales se disminuyó la profundidad del suelo. Este resultado es lógico de entender, ya que al haber menor capa de suelo que saturar, aumentan los escurrimientos y viceversa. Se puede observar que el escurrimiento aforado esta dentro de los escurrimientos simulados con una profundidad de los suelos igual al 100% (reportada por INEGI) y 150%; siendo el total acumulado muy similar al resultado de la simulación con el 100 % de la profundidad



**Figura 5. Aportación de los escurrimientos a los acuíferos a través de percolación.**

Es conveniente hacer mención que un uso potencial a desarrollar de este trabajo es, simular los posibles cambios en el uso del suelo que se puedan dar en un futuro en la microcuenca, como son el aumento o disminución de las superficies cubiertas por bosques o cambios en el uso del suelo y su impacto en los escurrimientos generados así como la recarga de los acuíferos.



**Figura 6.** Respuesta de los escurrimientos simulados a diferentes profundidades de suelos.

Es importante mencionar que, este trabajo no cubre las expectativas de los modelos de simulación hidrológicos, al simular únicamente un año; lo recomendable es tener una serie histórica de datos con los cuales se simulen todos los años y observar el comportamiento del modelo a lo largo de todos los eventos y de este modo poder validar el modelo. Se simuló únicamente un año ya que no se contó con escurrimientos a detalle de más años con los cuales se pudiera comparar los resultados de las simulaciones como se **hizo** para el año de 1999.

## Conclusiones

El modelo presenta una simulación aceptable de los escurrimientos generados; se puede decir que reproduce la respuesta de la cuenca a los escurrimientos. El modelo de simulación predice un volumen total escurrido muy similar al volumen total aforado, siendo de  $3.9 \times 10^6 \text{ m}^3$  y  $4.1 \times 10^6 \text{ m}^3$  respectivamente; se concluye que, independientemente de las diferencias que hay entre los picos de la simulación y aforos, el volumen total escurrido coincide o incluso se puede decir que es el mismo, ya que sólo hay un diferencial del 5%, el cual se puede considerar no significativo. Para los picos del hidrograma o avenidas, la simulación en su gran mayoría no coincide con los aforos; pudiéndose deber estas diferencias a los tiempos en los cuales se realizaron los aforos y los tiempos de respuesta de la microcuenca y del modelo.

Se observó que el modelo de simulación no es sensible a los coeficientes de permeabilidad o conductividad hidráulica saturada, observándose variaciones en los resultados de 0.07 a 0.2%. En cambio, sí es sensible a las profundidades de los diferentes tipos de suelos; el comportamiento de los escurrimientos mantuvo la tendencia en las diferentes profundidades, cambiando únicamente los valores de respuesta de acuerdo al comportamiento de los volúmenes escurridos. La profundidad de los suelos que arroja un volumen total simulado muy similar al

aforado, es aquella profundidad que es igual a la reportada por las cartas de tipos de suelos de INEGI (100 %).

Del agua que se infiltra o percola como resultado de una o varias tormentas, parte de ésta fluye hasta alcanzar la superficie freática del acuífero subyacente, agua que eventualmente puede aflorar en el cauce del río, constituyendo el caudal base. Hay un suministro estimado del volumen de agua percolado hacia los acuíferos de aproximadamente  $70 \times 10^6 \text{ m}^3$  en el año, 18 veces más del volumen escumdo, esto indica que los niveles freáticos de los acuíferos en la microcuenca están por abajo del punto más bajo del cauce del río, ya que no se observa un caudal base en los escurrimientos y posiblemente estos estén sobre-explotados.

Los resultados del modelo indican que el escurrimiento superficial se reduce en forma muy significativa, cuando los acuíferos están sobre-explotados con niveles freáticos muy profundos. Lo que está pasando con el escurrimiento que se genera y el cual, forma parte de los volúmenes de recarga hacia los acuíferos, a través de la percolación, es que existe un aporte directo de los escurrimientos hacia los acuíferos a lo largo de toda el cauce del río. Dentro de un manejo de cuencas, algo importante de hacer notar es que, almacenar agua en los acuíferos elimina las pérdidas por evaporación, en comparación con almacenar volúmenes de agua en presas o lagos; pero en los acuíferos implica costos de bombeo para ser aprovechada, los cuales son considerables, además de la inversión que implica tener un pozo de bombeo.

Un uso potencial a desarrollar de este trabajo es, simular los posibles cambios en el uso del suelo que se puedan dar en un futuro en la microcuenca, como son el aumento o disminución de las superficies cubiertas por bosques o cambios en el uso del suelo y su impacto en los escurrimientos generados; la implementación de las superficies de cultivo con el uso de aguas subterráneas o superficiales y el impacto dentro de las relaciones de transferencia de agua entre la superficial y subterránea, etc.

## Bibliografía

- Food and Agriculture Organization (FAO). 1975. Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 24. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 1994. El agua, germen de la vida. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- Flores-López, Francisco J. y Scott, Christopher A. 2000. Superficie agrícola estimada mediante análisis de imágenes de satélite en Guanajuato, México. IWMI, Sene Latinoamericana No. 15. Mexico, D.F., Mexico: Instituto Internacional del Manejo del Agua.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 1998. Estudio hidrológico del estado de Guanajuato. INEGI. Aguascalientes, Mexico.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1988. Elementos climatológicos en el estado de Guanajuato. SARH. Guanajuato, Mexico.
- Smith, M. 1991. CROPWAT, Irrigation planning and management tool. Version 5.7. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.