

VISUAL MODFLOW APLICADO AL MULTI-ACUÍFERO DE PENJAMO, GTO.

Juan Manuel Lesser Illades
David González Posadas
Luis E. Lesser Carrillo
Lesser y Asociados, S.A. de C.V.

RESUMEN

El subsuelo del Valle de Pénjamo-Abasolo está constituido por una alternancia de capas horizontales, de materiales permeables e impermeables las que permiten la formación de 3 acuíferos independientes denominados acuífero superficial, acuífero intermedio y acuífero profundo. Se modeló el flujo del agua subterránea en dichos horizontes acuíferos, separados por una capa de arcillas que funciona como acuitardo. Se consideraron cinco capas dentro del modelo. La primera de ellas corresponde a los aproximadamente 100 metros superficiales y comprende a la porción donde se alojan los horizontes acuíferos *somero e intermedio*. La segunda capa tiene un espesor aproximado de 15 metros y representa a la zona arcillosa que divide a los acuíferos anteriores. La principal zona acuífera corresponde al acuífero *profundo* y se dividió en tres capas denominadas capa 3, capa 4 y capa 5. Se elaboró un balance de agua subterránea tanto para el acuífero intermedio como para el profundo. A cada capa del modelo se le asignaron sus propiedades, cargas iniciales, así como su base y cima. La conductividad hidráulica varió de 1×10^{-5} m/día en la capa 1 a 0.015-5 m/día en las capas 3, 4 y 5. En rendimiento específico (S_y) que predominó varió de 0.05 a 0.10 para la capa 1 que corresponde a acuífero libre. Las capas 3 y 4 funcionan como semiconfinadas, predominando un coeficiente específico (S_s) de 0.0002 a 0.00003. Las capas 2 y 5 tienen valores de 0.002 y 3.3×10^{-5} de S_s y de 0.06 a 0.0015 para S_y .

Palabras clave: modelo matemático, acuífero, agua subterránea, rendimiento, específico, conductividad hidráulica, semiconfinado, modflow.

Introducción

La Comisión Estatal de Agua y Saneamiento de Guanajuato (CEASG), actualiza los estudios geohidrológicos de los acuíferos existentes en el estado. El presente trabajo es un

resumen de resultados del modelo matemático de los acuíferos ubicados a diferentes profundidades dentro del Valle de Pénjamo-Abasolo, (CEASG, 1998).

El valle se encuentra explotado por 2926 aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales 2769 corresponden a pozos, 152 a norias y 5 a manantiales. De los 2926 aprovechamientos, 2519 se encuentran activos y el resto inactivos. Entre los inactivos, 24 se encontraban en perforación, 74 en rehabilitación o cambio de equipo de bombeo, 158 abandonados y 151 no operan por diferentes razones, en algunos casos por problemas mecánicos del equipo y en otros por problemas constructivos. Del total de los aprovechamientos activos, 2099 se utilizan para la agricultura, 309 para agua potable, 36 en la industria y 75 en abrevadero.

La precipitación *media anual* para la zona de estudio es de *636 milímetros*; la temperatura media mensual varía de medias mensuales de 15 °C para el mes de enero a 17.5 °C para mayo y junio. La evaporación media anual es de 2038 mm.

Geología

La zona estudiada forma parte del Eje Neovolcánico caracterizado por la presencia de numerosos volcanes. Las sierras se encuentran constituidas por lavas y tobas, tanto de composición basáltica del Cuaternario, como riolitas del Terciario. Los valles corresponden a zonas planas donde se presentan acumulaciones de sedimentos lacustres del Terciario cubierto por aluviones del Cuaternario SARH (1981), CNA (1993). Se encuentran fallas de gran magnitud entre las que destacan aquellas que dan origen a los gravens de Numarán y Pénjamo-Abasolo. Fallas y fracturas de menor magnitud afectan a las rocas volcánicas que constituyen a las sierras. Las principales unidades geomorfológicas identificadas en el área de trabajo corresponden a: Sierras volcánicas; valles; conos volcánicos mayores; conos volcánicos menores; lomeríos y; mesetas

Funcionamiento de los Acuíferos

La zona de estudio corresponde al valle de Pénjamo-Abasolo, el cual tiene una forma prácticamente plana. El subsuelo está constituido por una alternancia de materiales aluviales, sedimentos lacustres y coladas de lava que en su mayoría se comportan como permeables y permiten la infiltración y circulación de agua en el subsuelo. Presentan

intercalaciones de horizontes arcillosos que provocan la formación de acuíferos a diferentes profundidades.

En la mayor parte de la zona de estudio existe una capa de arcillas impermeables entre los 40 y 50 metros de profundidad, que ocasiona la formación de un horizonte acuífero superficial cuyo nivel se establece a entre 2 y 20 metros de profundidad. Se le denominó horizonte *acuífero somero*.

Entre los 80 y 120 metros de profundidad, se encuentra otro horizonte arcilloso impermeable que en ocasiones pasa lateralmente a un basalto compacto también impermeable. Estos materiales ocasionan la formación de una zona acuífera denominada *acuífero intermedio*, cuyo nivel se encuentra a profundidades variables, predominando el rango de 25-50 metros. Los pozos que se encuentran explotando a este acuífero alcanzan profundidades del orden de 80-120 metros. Durante la década de los 70's, el Valle de Pénjamo-Abasolo se encontraba explotado por un gran número de pozos que extraían agua de este horizonte acuífero, empezando a mostrar signos de sobreexplotación que repercutían en el abatimiento de los niveles. Por ello, la exSecretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos estableció veda a la perforación de nuevos pozos. Ya para dicha década de los 70's, se conocía que a mayor profundidad existían sedimentos lacustres y lavas riolíticas de alto potencial geohidrológico y que frecuentemente presentaban termalismo. La exSARH emitió criterios para el otorgamiento de permisos para perforación, que indicaban que los pozos nuevos deberían explotar la zona acuífera de mayor profundidad, para lo cual debería cementar la porción superficial del pozo y evitar así aumentar la sobreexplotación de los acuíferos superficiales.

En la mayor parte de la zona de trabajo, los horizontes acuíferos identificados como *somero* e *intermedio* han quedado agotado y en otras, se encuentran a punto de secarse. Actualmente el horizonte de mayor extracción corresponde al denominado acuífero *profundo*.

Existen áreas donde los pozos tienen profundidades de alrededor de 50 metros y presentan niveles estáticos del orden de 20 metros. Junto a estos pozos se han construido otros a mayor profundidad, en los que se detectan los niveles correspondientes a los horizontes acuíferos *intermedio* y *profundo* (figura 1).

Una vez analizados cada uno de los pozos y separados de acuerdo al acuífero al que representan, se trazaron configuraciones que se presentan la figura 2a, 2b y 2c. Por lo que respecta al horizonte *somero*, este incluye datos que permitieron el trazo de curvas exclusivamente en los alrededores del poblado y estación de ferrocarril Corralejo, donde se marcó la curva 15 metros de profundidad. Por lo que respecta al acuífero *intermedio*, éste se detectó y configuró en la parte central norte del valle de Pénjamo-Abasolo, donde se marcaron las curvas de 35 y 40 metros de profundidad.

En relación al *acuífero profundo*, este se detecta en prácticamente todo el valle, con una profundidad al nivel estático entre 60 y 100 metros. Los valores menores se encuentran en los alrededores de Cuerámara, donde tiende a confundirse con el *acuífero intermedio*.

Elevación del Nivel Estático y Dirección de Flujo

La elevación del nivel estático respecto al nivel del mar, se obtuvo para los *acuíferos intermedio* y *profundo*. Por lo que respecta al *intermedio* (figura 3a), se presentan curvas de 1680 a 1620 msnm en las que se establece una dirección de flujo de las elevaciones topográficas hacia el centro de los valles. En la configuración de la elevación del nivel estático sobre el nivel del mar para el *acuífero profundo* (datos de julio de 1998, figura 3b). La forma del esquema del flujo subterráneo, permite dividir a la zona en tres subsistemas acuíferos. El primero corresponde al área de Pénjamo-Abasolo; el segundo a la zona de Tacubaya y el tercero al Valle de Numarán. Existe independencia entre ellos debido a la modificación del esquema de flujo originado por el bombeo.

Caudales de Extracción

Para cada uno de los aprovechamientos inventariados se calculó el volumen de extracción anual tomando en cuenta el caudal y el tiempo de operación. Los volúmenes de extracción por horizonte son: *acuífero somero* 18 millones de m³/año, *acuífero intermedio* 157 millones de m³/año y horizonte *acuífero profundo* 546 millones de m³/año. La extracción total que asciende a 721 millones de metros cúbicos al año que se reparte de acuerdo a su uso en: 673 en la agricultura, 42 en potable, 2 en abrevadero y 3 en industrial, cifras todas ellas en millones de metros cúbicos por año.

Evolución de Nivel Piezométrico

La información piezométrica, de volúmenes de extracción y geohidrológica de estudios realizados en años anteriores es de tipo general. Existen registros sobre volúmenes de extracción que engloban a los 3 horizontes acuíferos. La extracción principal en décadas anteriores correspondía a los horizontes *intermedio* y *somero*. Estudio realizado en fechas más recientes correspondientes al programa PROMMA de la CNA, incluye datos piezométricos de gran utilidad para el año de 1996, aunque mezcla valores de los diferentes horizontes acuíferos. Dichos datos se reinterpretaron y a partir de ellos se dedujo la configuración de elevación del nivel estático para el año de 1996, correspondiente al *acuífero profundo*. A partir de ello, se calculó la evolución sufrida por el nivel estático del *acuífero profundo* entre 1996 y 1998. Se obtuvo una variación de almacenamiento para la zona considerada dentro del área de balance geohidrológico de menos 64 millones de m³/año (Domenico, 1990).

Transmisibilidad y Almacenamiento

Con resultados obtenidos en las pruebas de bombeo y tomando en cuenta la variación litológica de los materiales existentes en el área estudiada, se delimitaron zonas con diferente transmisibilidad. Dicha zonificación fue la base para las conductividades hidráulicas de partida utilizadas en la calibración del modelo matemático de simulación de flujo (Fetter, 1988).

Se recurrió a pruebas de bombeo con pozo de observación efectuadas en las zonas aledañas y se le asignaron a la zona de trabajo los valores siguientes: en la porción central donde el *acuífero profundo* se encuentra semiconfinado, se utilizó un valor para el almacenamiento de 0.003, mientras que en una franja que bordea a los valles donde el *acuífero profundo* se confunde con el *intermedio* y se comporta como acuífero libre, se asignó un valor de coeficiente de almacenamiento que asciende a 0.05 (Domenico, 1972).

Balance de Agua Subterránea

En base a la configuración de la elevación de la superficie piezométrica respecto al nivel del mar, se trazaron celdas para el cálculo de la entrada por flujo subterráneo. Se utilizó la fórmula $Q = Tbi$, donde Q es el caudal de agua en litros por segundo, T corresponde a la transmisibilidad del medio en m²/seg; b es el ancho de la celda; i corresponde al gradiente

hidráulico de la celda. De esta manera, la recarga o entrada de agua fue de 225.869×10^6 m^3 /anuales para la zona considerada en el balance. Este volumen corresponde a un caudal de $7.17 m^3$ /seg (Freeze et al, 1979).

La ecuación de balance de agua subterránea establece que las entradas son iguales a las salidas más el cambio de almacenamiento: $E = S + A_s$. Las entradas están constituidas por el flujo subterráneo que alimenta al valle en las estribaciones de las sierras (E_s), así como a la infiltración vertical que recibe el acuífero y que puede corresponder a infiltración por agua de lluvia, a retornos de riego, a infiltración por pérdida en canales, así como a infiltración por aporte de los horizontes acuíferos superficiales que pueden estar drenando hacia mayores profundidades. Todos estos conceptos se englobaron dentro del renglón denominado infiltración vertical (I_v), el cual se consideró como incógnita dentro de la ecuación de balance.

La principal salida como se descarga el acuífero corresponde a la extracción por bombeo (Ext), la que fue calculada y asciende a $440 \times 10^6 m^3$ /anuales para la zona incluida dentro del área de balance y correspondiente al acuífero *profundo*. Se hace notar que la extracción total para la zona en estudio es de $440 \times 10^6 m^3$ /año más $281 \times 10^6 m^3$ /año correspondiente a los acuíferos *superficial e intermedio*, así como a pozos ubicados fuera del área de balance.

Tomando en cuenta los conceptos anteriores, la ecuación de balance queda como sigue: $E_s + I_v = Ext + A_s$; de donde $I_v = Ext - E_s + A_s$. Para el *acuífero profundo*, la entrada subterránea fue de $225 \times 10^6 m^3$ /anuales, la infiltración vertical de 151.2 la extracción $440.2 \times 10^6 m^3$ /año. La diferencia entre la entrada de agua al acuífero que asciende a $376.2 \times 10^6 m^3$ /anuales y la salida en forma de explotación por bombeo que es de 440.2 , corresponde al cambio de almacenamiento o sea $-64 \times 10^6 m^3$ /anuales.

De igual manera se efectuó el balance de agua subterránea para el horizonte acuífero *intermedio*, se obtuvo una entrada subterránea de 70.0 millones de m^3 /año, la extracción por bombeo de 235 millones de m^3 /año un cambio de almacenamiento de -118.7 . Por lo que se refiere a la infiltración vertical, le corresponden 46.3 millones de m^3 /año.

Modelo Matemático de Flujo del Agua Subterránea

El desarrollo tecnológico tanto en los paquetes de modelación (Software) como en equipo (Hardware), presenta continuos avances. Se aplicó el modelo de flujo Modflow (McDonald, 1984) versión Visual Modflow 2.72 actualizado en julio de 1998 por Waterloo Hydrogeologic, Inc.

Previamente a la formación del modelo, se construyó un archivo en autocad con los principales rasgos topográficos que permitieran contar con una base de referencia. Sobre ella se trazó una malla de elementos ortogonales de 1000 metros por lado que incluyó 70 columnas y 64 renglones. Se consideraron y marcaron como celdas inactivas a aquellas que forman las principales elevaciones topográficas. Se consideraron cinco capas dentro del modelo. La primera de ellas corresponde a los aproximadamente 100 metros superficiales y comprende a la porción donde se alojan los horizontes acuíferos *somero e intermedio*. La segunda capa tiene un espesor aproximado de 15 metros y representa a la zona arcillosa que divide a los acuíferos anteriores. La principal zona acuífera corresponde al acuífero *profundo*, la que se dividió en tres capas denominadas capa 3, capa 4 y capa 5 (figura 4).

Se capturaron en surfer la superficie del terreno o cima de la capa 1, la base de la capa 1, que correspondió a la posición de los materiales arcillosos que sirven de sello. A la capa 2 se le asignó un espesor homogéneo de 15 metros. La cima de la capa 3 correspondió a la base de la capa 2, mientras que la base de la capa 5 corresponde al basamento. Igual que en los casos anteriores, la superficie del basamento.

Los parámetros utilizados fueron conductividad hidráulica en metros por día, coeficiente específico y rendimiento específico (adimensional). Las fronteras consistieron en recarga tanto lateral como vertical. La conductividad hidráulica para la primera capa varió de 1.3 a 5 m/día y fue deducida de acuerdo al tipo de materiales existentes y a los resultados de las pruebas de bombeo (figura 5). A la capa 2 se le asignó una conductividad de 1×10^{-5} m/día. Por lo que respecta a las capas 3, 4 y 5, la conductividad varió de 0.015 a 5 m/día. El coeficiente específico (Ss) fue obtenido dividiendo el coeficiente de almacenamiento entre el espesor del acuífero. El rendimiento específico (Sy) es igual a la porosidad efectiva en los acuíferos libres. Cuando el acuífero es semiconfinado el modelo utiliza Ss (figura 6). En la capa 1 el acuífero es libre; el valor de Sy que predominó varió de 0.05 a 0.10. Las capas 3 y 4 funcionan como semiconfinado, predominando un Ss de 0.0002 a

0.00003. Las capas 2 y 5 tienen valores de 0.002 y 0.000033 de Ss; 0.06 y 0.0015 para Sy. (Anderson et, al, 1990)

Para la extracción por bombeo, se formó un archivo que incluye 1851 pozos que se encuentran bombeando agua de los acuíferos *profundo* e *intermedio* y de los cuales se conoce su régimen de operación. Para ello se anotó en cada pozo, la profundidad total del mismo y el tramo ranurado, con el objeto de que la extracción de agua del pozo se aplique a la capa o capas correctas.

El horizonte arcilloso (capa 2) que separa a los dos subsistemas acuíferos, ocasiona que el *acuífero profundo*, se encuentre semiconfinado en la mayor parte del área de balance. Existe diferencia de las cargas hidráulicas entre el nivel estático del horizonte *intermedio* y el nivel piezométrico del horizonte *profundo*, lo cual provoca una recarga del *intermedio* hacia el *profundo*. Sin embargo, debido a la baja permeabilidad del horizonte arcilloso que los separa, esta no es de gran magnitud. A la capa 1 del *acuífero intermedio*, se le asignó una recarga lateral, además de una recarga vertical de agua de lluvia y retornos de riego. Esta última se incluyó a través de una lámina media en cada celda. A las capas 3, 4 y 5 correspondientes al *acuífero profundo*, se le asignó recarga lateral mediante pozos de recarga en las celdas perimetrales. La recarga proveniente del *acuífero intermedio* se simuló mediante pozos ficticios.

Se consideró al año de 1996 como las condiciones iniciales, debido a que ésta fue la única fecha que cuenta con datos que permiten la configuración de los acuíferos tanto *profundo* como *intermedio*.

Las cargas iniciales del acuífero *intermedio* y *profundo* (1996) y la elevación del nivel estático para los valores **observados** en el año de 1998, para los acuíferos *intermedio* y *profundo*. Se muestran en la figura 7.

Durante la calibración se realizaron correcciones y ajustes que van desde cargas iniciales hasta parámetros subestimados o sobreestimados. Se utilizaron los criterios que para calibrar dispone el vmodflow, tales como la curva de calculado-observado, la configuración de abatimientos y la configuración de recuperaciones, así como las curvas de abatimiento contra tiempo para cada pozo de observación. Se corrió el modelo dándole un tiempo de 2 años a partir de 1996. Los resultados al año de 1998 fueron comparados con los observados en dicho año. Se efectuaron varias corridas por el método de ensayo y

error, ajustando algunos de los parámetros hidráulicos del acuífero. Se obtuvo una configuración que presentara similitud entre el valor observado y el calculado. Se alimentó al modelo con 63 pozos de observación. La gráfica de calibración que incluye los valores observados contra los calculados para el año de 1998, alcanzó un error de RMS igual a 2.60536. La configuración comparativa entre los valores observados y calculados para el acuífero profundo se muestran en la figura 8.

Para la calibración, también se tomó en cuenta la configuración de la evolución de las cargas hidráulicas de 1996 a 1998 calculado por el modelo.

Existen alrededor de 500 pozos que aún se encuentran explotando agua de los acuíferos *somero* e *intermedio*, que están en proceso de extinción. Ello, ocasiona que existan reposiciones de los pozos que se van agotando. Estas reposiciones se realizan a mayores profundidades, habiéndose estimado que se extrae un caudal de 10 lps por pozo adicional al que se venía extrayendo con los pozos antiguos. Muchos de los pozos observados extraen caudales del orden de 5 lps, en el acuífero intermedio al realizar la reposición del pozo se extrae agua del *acuífero profundo* en 15 lps. En otros casos, los caudales de extracción en los pozos antiguos era de 10 y 15 lps, mientras que una vez construida la reposición se obtienen caudales entre 20 y 25 lps. Lo anterior implica un incremento en los caudales de extracción de aproximadamente 10 lps por cada reposición.

Se estima que se reponen actualmente 100 pozos al año, por lo que para los próximos 5 años existirán 500 pozos adicionales repuestos o profundizados que extraerán un volumen adicional al actual (1998), de $5 \text{ m}^3/\text{seg}$ (500 pozos x 10 lps cada uno de ellos). Se perforarán 100 pozos por año, lo que incrementará la extracción en $1 \text{ m}^3/\text{seg}$ equivalente a $31.5 \text{ Mm}^3/\text{año}$ para 1999. En el siguiente año, la extracción adicional será de $2 \text{ m}^3/\text{seg}$ correspondientes a $63 \text{ Mm}^3/\text{año}$; y así sucesivamente, para dentro de 5 años alcanzar un caudal de extracción de $5 \text{ m}^3/\text{seg}$ equivalente a $157.5 \text{ Mm}^3/\text{año}$.

La simulación efectuada a 2 y 5 años se realizó considerando el incremento en extracción de agua al acuífero mencionada en el párrafo anterior. Presentan evoluciones de entre 1 y 3 metros anuales (figura 9).

CONCLUSIONES

Se identificaron 3 horizontes acuíferos, ubicados a diferentes profundidades y denominados: *acuífero somero*, *acuífero intermedio* y *acuífero profundo*. El modelo matemático incluyó 5 capas que representan a los *acuíferos intermedio* y *profundo*, así como a la capa arcillosa que los separa. A cada capa se le asignaron sus parámetros de conductividad hidráulica y rendimiento específico.

Se censaron 2926 aprovechamientos de los cuales 5 corresponden a manantiales, 152 a norias y los 2769 restantes a pozos. De los 2769 pozos 2383 operan, 148 se encuentran abandonados, 74 en rehabilitación o cambio de equipo, 241 en proceso de perforación y, 140 no operan. La extracción de agua subterránea por bombeo asciende a 721,2 Mm³/año para toda la zona estudiada, que equivale a 22.89 m³/seg. El abatimiento medio anual varía entre 1 y 3 metros por año.

En la actualidad se perforan aproximadamente 100 pozos por año (reposición), con lo cual se incrementa el caudal de extracción en 31.5 millones de m³/año.

Se consideraron cinco capas dentro del modelo. La primera de ellas corresponde a los aproximadamente 100 metros superficiales y comprende a la porción donde se alojan los *acuíferos somero e intermedio*. La segunda capa tiene un espesor aproximado de 15 metros y representa a la zona arcillosa que divide a los *acuíferos* anteriores. La principal zona acuífera corresponde al *acuífero profundo* y se dividió en tres capas denominadas capa 3, capa 4 y capa 5.

Los parámetros utilizados fueron conductividad hidráulica en metros por día, coeficiente específico y rendimiento específico (adimensional). Las fronteras consistieron en recarga tanto lateral como vertical. La conductividad hidráulica para la primera capa varió de 1.3 a 5 m/día y fue deducida de acuerdo al tipo de materiales existentes y a los resultados de las pruebas de bombeo. A la capa 2 se le asignó una conductividad de 1×10^{-5} m/día. Por lo que respecta a las capas 3, 4 y 5, la conductividad varió de 0.015 a 5 m/día. El coeficiente específico (Ss) se obtiene dividiendo el coeficiente de almacenamiento entre el espesor del *acuífero*. El rendimiento específico (Sy) es igual a la porosidad efectiva en los *acuíferos* libres. Cuando el *acuífero* es semiconfinado el modelo utiliza Ss.

En la capa 1 el acuífero es libre; el valor de Sy que predominó varió de 0.05 a 0.10. Las capas 3 y 4 funcionan como acuífero semiconfinado, predominando un Ss. De las capas 2 y 5 tienen valores de 0.002 y 0.000033 de Ss; 0.06 y 0.0015 para Sy.

El horizonte arcilloso (capa 2) que separa a los dos subsistemas acuíferos, ocasiona que el *acuífero profundo*, se encuentre semiconfinado en la mayor parte del área de balance. Existe diferencia de las cargas hidráulicas del acuífero *intermedio* y el nivel piezométrico del acuífero *profundo*, lo cual provoca una recarga del *intermedio* hacia el *profundo*. Sin embargo, debido a la baja permeabilidad del horizonte arcilloso que los separa, esta no es de gran magnitud. A la capa 1 del *acuífero intermedio*, se le asignó una recarga lateral, además de una recarga vertical de agua de lluvia y retornos de riego. Esta última se incluyó a través de una lámina media en cada celda. A las capas 3, 4 y 5 correspondientes al *acuífero profundo*, se le asignó recarga lateral mediante pozos de recarga en las celdas perimetrales. La recarga proveniente del *acuífero intermedio* se simuló mediante pozos ficticios.

REFERENCIAS

ANDERSON, M. P. and W. W. Woessner, (1990), *Applied Groundwater Modeling, Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic press, Inc. 381 p.

CNA (1993). *Diagnóstico de las condiciones geohidrológicas actuales y análisis de operación de los acuíferos de los valles de Pénjamo, Irapuato, Cienega Prieta-Moroleón, Gto. y Atotonilco-Ocotlán, Jal.*, Elaborado por Ariel Consultores, S.A.

DOMENICO, Patrick A. (1972). *Concepts and Models in Groundwater Hydrology*. McGraw-Hill Book Company. 405 p.

DOMENICO, P. A. and F.W. Schwartz, (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*, John Wiley and Sons. 834 p.

FETTER, C. W. (1988). *Applied Hydrogeology*. Macmillan Publishing Company, 592 p.

FREEZE, R.A. and J.A. Cherry (1979). *Groundwater*. Prentice hall, Inc. 604 p.

McDONALD, M. (1984). *Development of a multi-aquifer well option for a modular ground-water flow model*. Proceedings of the conference on practical applications of groundwater models. August, 1984, pp. 786.796

SARH, (1981). *Estudio geohidrológico de los valles de Silao-Pénjamo, Gto*. Elaborado por Consultores, S.A.

Abstract

Dirección institucional de los actores

Juan Manuel Lesser Illades
David González Posadas
Lesser y Asociados, S. A. de C.V.
Río Guadalquivir 3, Col. Pathé
Querétaro, Qro.
Tel. y Fax (4) 2231515 y 2233361
e.mail: lesserjuanm@infosel.net.mx

Luis Ernesto Lesser Carrillo
Department of Earth Sciences
University of Waterloo
← Waterloo, Ontario, Canada N2L3G1
Fax: (519) 746-7484
Tel. (519) 888-4567 ext. 5368
email: lelesser@uwaterloo.ca