

---

# HYDRODYNAMIC AND POLLUTION OF THE URBAN AQUIFER SYSTEM OF SALAMANCA, GTO. THE SALAMANCA CASE 1

MEJÍA Juan Angel <sup>1</sup>, RODRÍGUEZ Ramiro <sup>2</sup> and BERLIN Joel <sup>3</sup>

<sup>1</sup>Consejo Técnico de Aguas Irapuato - Valle de Santiago,

<sup>2</sup>Instituto de Geofísica UNAM,

<sup>3</sup> Dir. de Ecología Municipio Salamanca.  
jangel@salamanca.ugto.mx

## ABSTRACT

Groundwater is the only one water supply source for Salamanca area. The well density is very high. There are more than 1600 active wells in 560 km<sup>2</sup>. The intense abstraction had provoked subsidence and a fault system. The main fault is hydraulic connecting two of the three components of the aquifer system. The shallow one, not exploited, is receiving pollutants from different sources. A piezometrical and hydrogeochemical analysis permitted to propose a functional model that explains the pollution processes dynamics.

**KEY WORDS:** subsidence, aquifer pollution, Salamanca Mexico.

## RESUMEN

El agua subterránea es la única fuente de abastecimiento de agua para la zona de Salamanca. La densidad de pozos es muy alta. Hay más de 1600 pozos activos en 560 km<sup>2</sup>. El intenso régimen de extracción ha provocado subsidencia y la aparición de un sistema de fallas. Una de ellas esta permitiendo la comunicación hidráulica entre dos de los tres componentes del sistema acuífero. El somero, no explotado, esta recibiendo contaminantes de diferentes fuentes. Un análisis piezométrico e hidrogeoquímico permitió proponer un modelo funcional que explica la dinámica de los procesos de contaminación.

**PALABRAS CLAVE:** subsidencia, contaminación acuífera, Salamanca México.

## INTRODUCCIÓN

La única fuente de abastecimiento de agua para usos urbano e industrial en la zona de Salamanca lo constituye el sistema acuífero local. Los caudales que circulan por el Río Lerma son únicamente utilizados para riego por el nivel de contaminación que presentan sus aguas. Eso explica en parte la gran densidad de pozos activos en esa área. El intenso

régimen de extracción ha provocado problemas de subsidencia lo que ha dado lugar a la aparición de un sistema de fallas que afecta la infraestructura urbana. Éstas facilitan la incorporación de contaminantes superficiales al sistema acuífero.

## MARCO GEOLÓGICO

Salamanca se ubica dentro del valle de Irapuato – Valle de Santiago. La competencia cada vez mayor por el uso del agua (poblacional agrícola, ganadero, industrial y de servicios) ha ocasionado que la extracción del agua subterránea se incremente año con año, a costa del almacenamiento acuífero. Este Valle se ubica geográficamente en la porción sur oriental del Estado de Guanajuato y pertenece a la región del Bajío Guanajuatense, con una superficie de 1683 Km<sup>2</sup>. Las ciudades más importantes que se encuentran en la zona son además de Salamanca son: Irapuato, y Valle de Santiago, las cuales cuentan con 806.818 habitantes.

La estructuración del modelo conceptual que ha permitido estudiar la hidrodinámica del sistema acuífero se efectuó mediante la recopilación de información geológica del área de estudio. Se compilaron columnas estratigráficas y registros geofísicos en pozos.

Los controles estructurales y la distribución de las unidades geológicas, son gobernados por la actividad tectónica de la Placa del Pacífico, en colisión con la Placa de Norteamérica. Las unidades litológicas observadas en el territorio del estado abarcan un intervalo de tiempo desde el Mesozoico hasta el presente.

Los eventos geológicos que actuaron en la región durante el Cenozoico la caracterizan como una zona altamente fragmentada, donde la deformación distensiva dio lugar a la formación de grandes bloques limitados generalmente por fallas normales, asimismo el desarrollo de arcos volcánicos como la Sierra Madre Occidental en el Mioceno y el Eje Neovolcánico en el Plio Cuaternario, originan el depósito de grandes volúmenes de materiales volcánicos, formando cuencas cerradas que con la continuación de los eventos tectónicos y por los procesos erosivos han permitido la formación de amplios valles con importantes espesores permeables.

La información de subsuelo en la zona de estudio es escasa y la profundidad de esta es muy somera, sólo se encontró un pozo cercano a la Ciudad de Salamanca que reporta un corte litológico de 700 m de profundidad. De acuerdo con las características de las unidades reportadas no se encuentra un basamento bien definido, pero se establece que en este podría más somero en el Bloque Alto Sierra de las Codornices-San Roque, y en el Bloque Alto Sur de Salamanca, aunque no se logro determinar su profundidad. En la Depresión Valle de Santiago – Salamanca – Villagran el basamento se profundiza por debajo de los 700 m, ya que de acuerdo con la información del pozo I0348-A, el cual en su parte más profunda corta una secuencia de basaltos interdigitado con arenas gruesas, la cual puede continuar a mayor profundidad. No se tiene información del basamento hidrogeológico, toda la columna cortada por el pozo puede estar saturada y presentar condiciones favorables al flujo subterráneo.

Localmente, la mancha urbana de Salamanca se localiza en un valle originado por una fosa tectónica. El tipo de roca superficial prevaleciente son alternancias de sedimentos lacustres, aluviones y suelos residuales de grano fino a medio. En el área se encuentran distribuidas rocas volcánicas y rocas sedimentarias, cuyas edades van del Terciario al reciente.

Las rocas más antiguas reconocidas en los afloramientos superficiales y en reportes de cortes litológicos en el Valle pertenecen a la Unidad Ignimbrita Cuatralba (Tic) (Quintero, 1987) que comprende todas las rocas de naturaleza piroclástica y composición félsica, en ocasiones presenta abundante brechamiento y fracturamientos. Dada su variación vertical en la región de León, se ha dividido en dos miembros a esta unidad (Rodríguez *et al.*, 1991). En la parte superior predominan ignimbritas consolidadas con textura porfírica con fenocristales de cuarzo, sanidino y escasa plagioclasa, inmersos en una matriz vítrea. La parte inferior predominan tobas masivas, poco consolidadas de coloración félsica, compuesta por cenizas volcánicas escasos fragmentos líticos pómez. El miembro superior se reporta en el Valle que comprende Salamanca – Querétaro.

Una secuencia de rocas basálticas y andesíticas, algunas veces riolíticas, estas unidades han sido identificadas en diferentes localidades como Basaltos Río Lerma y Andesita Ordeña, en general se encuentran cubriendo a la Ignimbrita Cuatralba

Cubriendo a basaltos e ignimbritas se encuentra el Terciario Granular Indiferenciado (Tci) (Rodríguez *et al, op cit.*). Esta unidad consiste de conglomerados polimícticos con clastos subredondeados, pobremente clasificados. Al parecer estos depósitos sedimentarios rellenaron las depresiones tectónicas presentes en el valle, en ambientes de abanicos aluviales.

Los Sedimentos Cuaternarios incluyen todos los depósitos continentales clásticos no consolidados (gravas, arenas, limos, arcillas y suelo residual), se localizan en la planicie y pie de monte de las partes altas (Qal). Este paquete es clasificado como tobas en las descripciones de columnas de pozos. Los estratos de arcillas, gravas y arenas varían en espesor de centímetros a un par de metros en la parte superior, los primeros 50 m.

El Cerro Gordo, al noreste de la zona urbana está compuesto por basaltos y flujos de lavas basálticas. Al sur del cauce del Río Lerma se localizan dos conos cineríticos constituidos por brechas volcánicas. Hacia el sur oriente se localizan rocas basálticas Cuaternarias de la Formación Campo Volcánico Michoacán Guanajuato, CVMG. Sobre esta formación descansa el paquete granular.

## **EL SISTEMA ACUÍFERO**

Desde el punto de vista regional (GUYSA, 1998), en el área de Salamanca la explotación del agua del subsuelo, se produce de dos acuíferos con diferentes características geohidrológicas: Un acuífero superior constituido por materiales granulares del Terciario y

principios del Cuaternario, estos materiales presentan intercalaciones de basalto fracturado, con espesor de hasta 40 m. La temperatura media de este acuífero es de 24° C, y en él se encuentran perforados la mayoría de los pozos de la zona; con profundidad promedio de 150 m y un gasto medio de 40 lps. Subyaciendo al acuífero anterior, se encuentra un segundo acuífero formado por rocas riolítica fracturada del Terciario, y en él se encuentran la mayoría de los pozos de uso industrial. Las características medias de los pozos son: profundidad 300 m; nivel estático 30 m; nivel dinámico 48 m; gasto 45 lps. La calidad del agua presenta mineralización y termalismo, con temperaturas que varían entre 29 y 38° C.

Subyaciendo a las formaciones anteriores se encuentra un acuífero somero emplazado en materiales granulares que ha sido el mas vulnerable a la contaminación local.

De acuerdo a los resultados de temperatura del agua de los pozos de la zona de estudio, se hace evidente la intercomunicación entre los dos acuíferos, el 50% de los pozos agrícolas, con profundidades máximas de perforación de 120 m mantienen temperaturas del agua en un rango de 24 a 29 °C; EL 25% son de agua termal, superior a 29°C y el 25% restante son de agua fría menor a 24° C.

La sobreexplotación del acuífero por la explotación de 1 600 pozos activos que en conjunto extraen 560 millones de m<sup>3</sup>, ha generado abatimientos importantes, en el periodo de 1976 a 1986 la evolución del nivel estático fue de 5 a 20 m. Los efectos directos al uso indebido del recurso, han impactado localmente el flujo subterráneo, estos cambios son evidentes al sur de Juventino Rosas. De igual manera los cambios piezométricos que se han suscitado en las áreas circundantes a Salamanca, son muestra evidente del impacto negativo de la sobreexplotación del acuífero.

Localmente en la Cd. De Salamanca el río Lerma delimita al sistema acuífero, En la parte Norte del cauce se tiene ese arreglo de una formación somera, una intermedia y una profunda, en tanto que en la zona sur no esta bien definida la formación somera, existiendo formaciones colgadas de extensión reducida y geometría irregular, así como un acuífero que pasa de condiciones libres a semiconfinadas y confinadas.

La hidroestratigrafía local está fuertemente controlada por alternancia irregular de material de grano muy fino a grueso, secuencia que incluye paleocanales de diferente geometría y magnitud, la permeabilidad de los mismos facilita la movilidad de flujos someros. Capa de arcilla impermeable pueden estar sosteniendo también acuíferos colgados de dimensiones variables. No se conoce con precisión los espesores de la formación somera, su profundidad al nivel estático varia de 18 a 19 mts y como ya se comentó se emplaza en material aluvial, se destaca que esta formación actualmente no se encuentra en explotación.

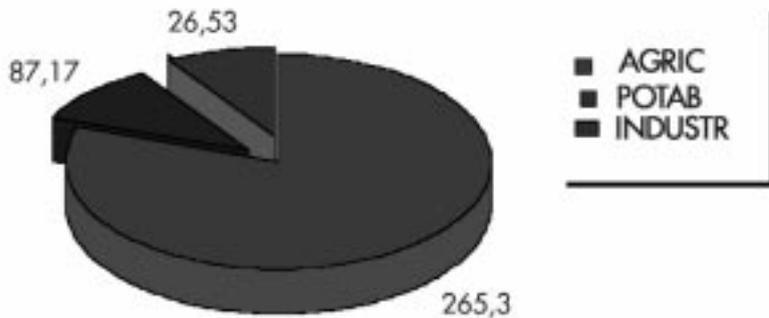
La formación intermedia sustenta la explotación de los 33 pozos del organismo operados CMAPAS, los 70 pozos industriales y los agrícolas que en conjunto extraen alrededor de 380 millones de m<sup>3</sup> por año del sistema, en el Municipio de Salamanca. La composición

geológica de este acuífero corresponde a materiales de grano medio a grueso y estratos discontinuos de arcilla y rocas de origen volcánico, el nivel piezométrico varia de 40 a 70 mts.

De la formación profunda se tiene poca información, sólo la obtenida por la CFE, quien tiene pozos construidos hasta los 700 mts. de profundidad y cuyo comportamiento pareciera ser diferente a los construidos por CMAPAS en el acuífero intermedio, lo que puede hacer pensar que en efecto existe un acuífero profundo, cuya composición estratigráfica pudiera ser de rocas volcánicas fracturadas pleistocénicas y miocénicas, los niveles estáticos para esta formación se encuentran entre los 70 y 75 mts.

### ANÁLISIS PIEZOMÉTRICO

Regionalmente a fin de continuar con el análisis acuífero se conformó una red piloto piezométrica para medir las variaciones del sistema acuífero, esta está conformada por 102 pozos productivos, de esta red se tienen resultados de la evolución del sistema desde 1998, de donde se han obtenido las siguientes observaciones:



La mayor profundidad del nivel estático se ha detectado al pie de la Sierra de Guanajuato, Al Norte del canal Ing. A. Coria, fuera de la influencia del distrito de riego 011, en la cual se han encontrado niveles de hasta 100 m de profundidad. Los niveles mas someros se han encontrado en al Norte de la Cd. De Valle de Santiago en el área más favorecida por los Ríos Lerma y Laja y por los canales del distrito de riego 011.

A partir de la configuración de la elevación del nivel estático, se ha detectado la existencia de un cono de abatimiento localizado al sur de la Cd. De Salamanca, donde existe una extracción importante para satisfacer las necesidades de irrigación, en este cono el nivel desciende hasta los 1650 msnm, produciendo que varias líneas de flujo converjan radialmente hacia la parte profunda del cono.

De las sierras que franquean a esta región bajan líneas de flujo que aportan buena cantidad de agua ala acuífero en conjunto con los cauces principales y canales de riego de ha n constituido como las zonas de recarga de toda la región.

En lo que se refiere a la evolución del nivel estático se ha observado que en los periodos de buen temporal de lluvias, áreas contiguas a la donde riego del distrito 011 presentan recuperaciones en el nivel estático de hasta 4 mts., en cambio en zonas donde la explotación del acuífero es demasiado alta y no existe esta influencia llegan a presentarse descensos hasta de 10 m. El promedio regional de descenso se ha mantenido desde 1998 entre los 2 y 3 mts.

Localmente en la mancha Urbana de Salamanca, se han efectuado intentos a través del Organismo operador local de obtener la piezometría sistemáticamente a partir del año 1998, adicionalmente PEMEX con base en los problemas de contaminación presentados, ha construido una red de piezómetros en el área de influencia de la refinería y en el sitio donde se encuentra a falla por subsidencia, es en esta red donde se ha obtenido la mayor parte de la información hidrogeológica de la región apoyada su vez con estudios que esta empresa y la Comisión Federal de Electricidad han efectuado.

A través de la información piezométrica se ha definido que localmente el sistema acuífero en Salamanca presenta un tercer componente correspondiente a una formación somera (colgada). Se utilizó información piezométrica de los 3 componentes del sistema acuífero para estudiar la evolución espacial y temporal de los niveles estáticos somero, intermedio y profundo estableciendo direcciones preferenciales de flujo en los tres casos. El análisis piezométrico consideró la presencia del Río Lerma como una barrera de carga constante, con esta información se pudo obtener las evidencias de la intercomunicación entre las formaciones acuíferas del sistema que de paso le han conferido un alto grado de vulnerabilidad a la zona donde la subsidencia es mayor.

## **PROCESOS DE CONTAMINACIÓN**

En áreas urbanas con desarrollo industrial y colindancia con zonas de uso agropecuario y agrícola intensivo es factible encontrar un complejo abanico de fuentes potenciales de contaminación acuífera. Estas van desde fugas en los sistemas de agua potable y en las tuberías de los drenajes hasta lixiviaciones de contenedores de residuos industriales peligrosos pasando por almacenamientos temporales de insumos o residuos. Los terrenos agrícolas que usan agroquímicos como herbicidas o plaguicidas, representan fuentes de contaminación potencial de tipo difuso. Éstas juegan un papel importante en la incorporación de compuestos orgánicos solubles a los sistemas acuíferos locales.

Esta situación se complica cuando existe una empresa generadora de insumos para diversos tipos de industria de la transformación, como sería el caso de una refinería. Estas empresas adicionalmente representan otro tipo de fuente de tipo lineal y difusa; las fugas en ductos y poliductos. Las fugas pueden tener una gran diversidad de orígenes: rupturas accidentales; fugas provocadas por el robo de productos, la llamada "ordeña" de ductos; afectaciones a las líneas de conducción por fenómenos naturales como sismos, inundaciones, actividad volcánica, reactivación de fallas geológicas, subsidencia. Pueden durar grandes periodos de tiempo antes de ser detectadas.

Cuando se tiene un caso multifuente con solutos iguales o similares es bastante difícil diferenciar el origen de los mismos. Se tiene que analizar la evolución espacial y temporal de las concentraciones de los solutos considerados como representativos para asociarlo a la actividad de una fuente potencial, lo que tampoco garantiza que se tenga la certeza de que esa es la fuente que originó el soluto. Si se trata de compuestos orgánicos se tiene la complicante adicional de que en muy contadas ocasiones se tienen análisis químicos en donde se reporte la presencia de éstos, en parte por su costo, pero sobretodo por que no existen muchos laboratorios en el sector público que cuenten con la infraestructura necesaria para realizar este tipo de determinaciones.

## **FACTORES QUE CONTROLAN LA MIGRACIÓN DE CONTAMINANTES**

Para un mejor entendimiento de la movilidad de contaminantes en el agua subterránea del sistema acuífero de Salamanca, se han dividido a éstos en dos principales grupos; metales y compuestos orgánicos. Ambos con un posible origen común, fracciones solubilizadas de hidrocarburos, aunque el arsénico pudiera ser de origen natural como más adelante se discutirá. Esta separación obedece también a la fenomenología que gobierna su migración en el agua subterránea.

El benceno y los BTEX son los hidrocarburos aromáticos que más fácilmente se incorporan al agua subterránea debido a su alta solubilidad, 1.8 mg/L y 100 g/m<sup>3</sup> respectivamente (Zemo y Graf, 1993). Una vez incorporados al agua, los hidrocarburos tienden a intemperizarse, dando lugar a productos diferentes a los originales. Los procesos que controlan estos cambios son: evaporación, solubilización y oxidación, tanto química como biológica.

Las variaciones en el régimen de extracción juegan un papel importante en la migración de LNAPL's. La hidrodinámica de los LNAPL's como el diesel y la gasolina en medios con cambios laterales de conductividad hidráulica es bastante compleja. Las depresiones piezométricas facilitan que los LNAPL's "resbalen" hacia los mínimos piezométricos. Los LNAPL's no presentan "mojabilidad" lo que hace que prácticamente no interactúen con la matriz rocosa y se lleguen a desplazar mas fácilmente que el agua. Los DNAPL's pueden migrar incluso en dirección contraria a la del flujo del agua subterránea, cuando se tienen altas porosidades y baja velocidad del agua.

La distribución de Pb, As y B en el agua subterránea indica que localmente el acuífero somero, el intermedio y el profundo están comunicados hidráulicamente (Rodríguez et al op cit). El contenido de As en el acuífero somero es menor que en el intermedio, mientras que el del Pb es mayor en el somero, en el área cubierta por los piezómetros, que en el intermedio. Aunque hacia el centro de la mancha urbana parece ser mayor en el intermedio que en el somero. Aunque no se cuenta con un conjunto suficientemente grande de datos, las configuraciones de As y Pb muestran un gradiente desde el área de la falla hacia los lados, lo que señala a ésta como el área generadora de estos solutos. La

presencia de boro en el somero, el intermedio y el profundo (pozo 9 CFE), sugiere contribuciones del profundo hacia las formaciones superiores. La movilidad de estos contaminantes no parece obedecer a mecanismos de transporte controlados por el flujo preferencial del agua, advectivos, ni por fenómenos dispersivos o difusivos.

Las variaciones temporales y volumétricas en el régimen de extracción juegan un papel importante en la migración de LNAPL's. La hidrodinámica de los LNAPL's como el diesel y la gasolina en medios con cambios laterales de conductividad hidráulica es bastante compleja.

La irregular distribución de estratos arcillosos y su fracturamiento por la subsidencia propicia que se establezcan flujos preferenciales. Las tendencias piezométricas del acuífero somero y del intermedio para 1998 y 1999, presentan depresiones en la zona de la falla, con flujos hacia la Noria 3 localizada sobre la falla, lo que señala que el régimen de extracción del intermedio influye en el somero (Fig. 1) (Rodríguez et al, 2000). Estas depresiones piezométricas se deben a que en esa zona la falla está incrementando la conductividad del somero. En el acuífero somero no existe un intenso régimen de extracción por lo que la superficie del mismo no debería de presentar depresiones. Las isolinéas deberían de presentar una distribución muy regular con un equiespaciamiento amplio.

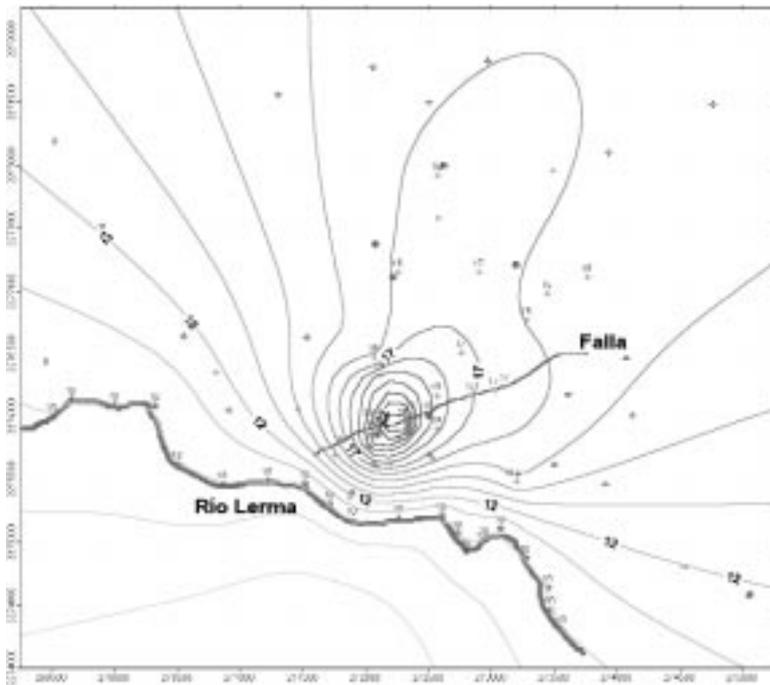
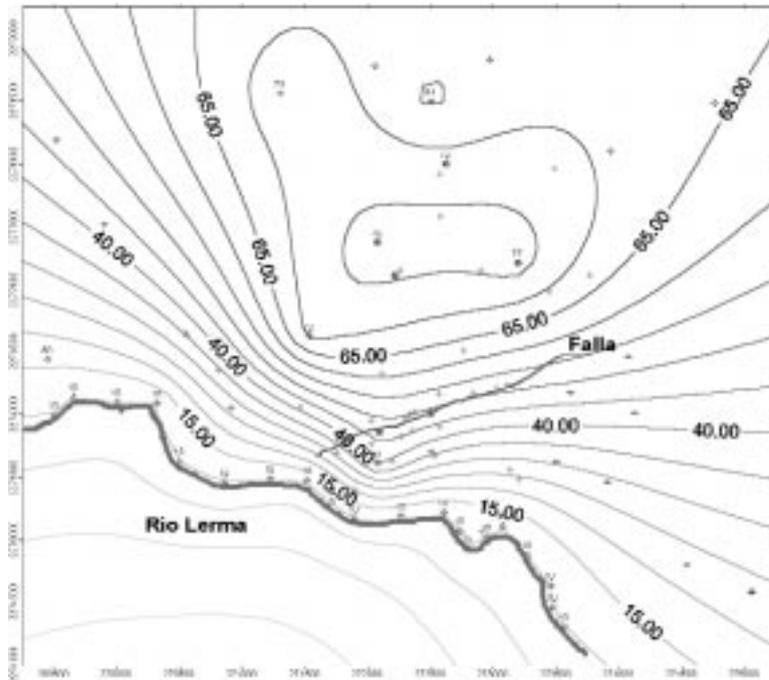


Figura 1. Piezometría acuífero somero Noviembre 1998.

Estos “canales” propician que solutos presentes en el somero migren hacia el intermedio y que la distribución de la fase libre, del índice BTEX y el Pb no sigan un patrón “normal”. La presencia de hidrocarburos en el pozo 11 demuestra lo primero y la fase libre en el pozo TPS y su ausencia en el piezómetro 16, localizado “aguas arriba” confirma lo segundo. De no existir otras fuentes de Pb, la distribución irregular de zonas de alta conductividad también explicaría los contenidos de Pb del pozo Felipe Angeles.



**Figura 2.** Piezometría acuífero intermedio Noviembre 1998

Por otro lado, si el nivel del agua estuvo aunque sea momentáneamente por debajo de capas arcillosas acarreado consigo los LNAPL's, por los abatimientos propios del régimen de extracción, los LNAPL's que se encontraban flotando sobre ella, al subir el nivel, por disminución o cese del bombeo, pudieron haberse quedado atrapado en estas capas de baja permeabilidad y actuar como fuentes difusas de plomo y benceno, si el hidrocarburo fuera gasolina. La persistencia ambiental de los hidrocarburos contribuye a la generación de volátiles en el agua por prolongados periodos de tiempo. Situaciones como ésta han sido reportadas en otros sitios ( Robbins et al, 1997).

## DISCUSIÓN

La intercomunicación hidráulica entre los acuíferos someros e intermedio queda de manifiesto por la presencia de As y Pb en ambos componentes del sistema acuífero. La hidrodinámica de ambos también demuestra que puede existir comunicación preferencialmente a través de la zona de falla.

La ruptura local de las formaciones que conforman el acuífero somero y de las capas que lo separan del acuífero intermedio a permitido el paso de flujos de uno hacia el otro. La presencia de fase libre en el pozo 11, clausurado a finales de 1998, también evidencian esta comunicación. Este pozo tiene ademe ciego (cerrado) los primeros 30 metros. Los metros de espesor de hidrocarburos detectados en él al momento de su clausura no se incorporaron por problemas de diseño del pozo.

La conformación de los sedimentos cuaternarios también explica en parte la hidrodinámica del flujo y de los contaminantes. Hay evidencias superficiales de antiguos cauces que convergían hacia el Río Lerma. En obras excavadas se han encontrado manifestaciones de paleocanales que seguramente están actuando como canales preferenciales de contaminantes. Al flotar los LNAPL's pueden generar residuales que se desplazan con cambios en las superficies piezométricas a consecuencia de variaciones en el régimen de extracción.

## AGRADECIMIENTOS

El CONACyT, la CEAG y el Municipio de Salamanca financiaron parcialmente esta investigación. El CMAPAS y la CEAG apoyaron la asistencia al Seminario.

## BIBLIOGRAFÍA

- Guysa, 1998; Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del valle de Irapuato-Valle de Santiago. Reporte Técnico CEAS-APA-GTO-97-023. Gyusa, CEASG, México
- Instituto de Física, IF, UNAM, 1979; Estudio isotópico para determinar el origen y causas del geotermismo en la región de la Planta termoeléctrica de Salamanca Gto. Prog. De Hidrología Isotópica, Instituto de Física UNAM. Rep. Tec. 21 pp.
- Lesser y Asoc., 1993; Dictamen para definir los términos de referencia de un estudio integral para la detección de fugas de hidrocarburos al subsuelo y métodos de saneamiento en la zona de Las Llenaderas y sus alrededores en la Refinería de Salamanca Gto. Rep. Tec. PEMEX. México.
- Quintero O., Evolución geológica del Extremo Nor-occidental de la Sierra de Guanajuato. Instituto de Geología, UNAM. Simp. Sobre la Geología de la Sierra de Guanajuato. Resúmenes y Guía de Excursiones 25-29 pp.
- Robbins G. A., Butler M. A., Gilbert E. J., Binkhorst G. K., Troskosky C., 1997; Delineating gasoline entrapped below the water table. In Groundwater in the Urban Environment, Edited by J. Chilton.

Edit. Balkema, UK. 523-527 pp.

Rodríguez R., Armienta A., Villanueva S., Díaz P. y González T., 1991; Estudio Hidrogeoquímico y Modelación Matemática del Acuífero del Río Turbio para definir las acciones encaminadas a proteger de contaminantes la fuente de abastecimiento de la Cd. de León, Gto. Rep. Técnico il 140 pp. IGF-UNAM, CNA-SARH. Jun./91.

Zemo D. A., Graf T. E. and Bruya J. E., 1993; The importance and benefit of fingerprint characterization in site investigation and remediation focusing on petroleum hydrocarbons. Proceedings Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Groundwater, API, NGWA, Nov/93, Houston Texas, USA. 39-45 pp. Groundwater Management, Book 17, NGWA.