

III.3 Referente hidrogeoquímico

III.3.1 Trabajo de campo

Teniendo en cuenta que uno de los principales objetivos del PSAH es identificar posibles áreas de recarga, y considerando que el agua guarda en sus moléculas el historial de su recorrido, se considero necesario que el presente estudio incluyera la toma de muestras de agua subterránea para su análisis físico, químico e isotópico, cuya interpretación no sólo permitirá definir dichas áreas de recarga sino también las correspondientes áreas de descarga y tránsito, así como, el comportamiento del flujo en el subsuelo y su interacción con diversos elementos superficiales como suelo y vegetación. En el presente reporte se presentan resultados del muestreo en campo, se incluyen los análisis de laboratorio y se da el estado de avance del manejo inicial de dichos análisis en gabinete.

Es de hacer notar que en estudios de este tipo es deseable tener un historial lo más completo posible de datos sobre el contenido químico, físico e isotópico no sólo del agua subterránea, sino también del agua de lluvia, la cual es el referente de inicio de estudios sobre hidrogeoquímica y sobre todo isotópico. En este sentido se considera necesario indicar que los cinco meses de duración del estudio y el apoyo financiero para efectuar las acciones del estudio permiten un manejo limitado de la información asequible y la obtenida durante el presente trabajo.

III.3.1.1 Toma de muestras para análisis físico, químico e isotópico

La toma de muestras en campo implica dos acciones que se manejan en forma casi simultánea, una es la toma de la muestra en si y la otra es la determinación de los valores de las características que cambian, o que pueden cambiar, después del tiempo de toma de la muestra como temperatura, pH, Eh, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y alcalinidad.

Toma de muestras.- Una parte importante de la información que se requiere para alcanzar los objetivos de definir zonas de recarga consiste en identificar las características físico-químicas e isotópicas del agua superficial y subterránea. Por esta razón, las muestras se tomarán en aprovechamientos seleccionados con base en criterios basados en la información existente (corte litológico, diseño constructivo, historial de la evolución química del agua, accesibilidad, tipo de manantial, temperatura y salinidad del agua, permiso de acceso, etc). Una parte importante del muestreo está en que el agua muestreada y analizada sea lo más representativa de las condiciones a las que está el agua en el subsuelo. Por lo que es necesario tomar en cuenta protocolos y requerimientos establecidos para evitar que la concentración química y características originales del agua se modifiquen. Por esta razón es deseable que se tomen muestras en sitios seleccionados y siguiendo un riguroso control de todas las acciones involucradas.

Las muestras se colectan en envases nuevos de polietileno, con tapa y contratapa hacia fuera (esto para evitar la presencia de burbujas de aire). Las botellas se prelavaban en laboratorio con una solución débil de ácido clorhídrico y agua destilada, enjuagándolas tres veces con agua destilada. Durante la toma de la muestra se evitó la permanencia de burbujas de aire en el seno del líquido para limitar la modificación potencial de la calidad química original del agua durante su almacenamiento y traslado. El volumen de agua que se toma es en envases de 60 ml, los cuales son a su vez etiquetados en cada sitio de muestreo con tinta indeleble, con el fin de llevar un control sistemático del muestreo.

En lo particular un sitio de muestreo incorpora la toma de al menos cuatro botellas de acuerdo con lo siguiente: *i*) una botella para iones mayores (aniones), *ii*) una botella para metales, *iii*) una botella para isótopos estables, *iv*) una botella testigo. En el caso que se requiera determinar ^{13}C y el contenido de isótopos radiactivos como ^3H , ^{14}C , ^{222}Rn , ^{226}Ra , se necesitará seguir protocolos particulares que dependerán del método a seguir en el laboratorio, lo mismo si se desea determinar ciertos elementos como el As (en especial por generación de hidruros).

El primer paso que se realizará al llegar al sitio de muestreo es el enjuague del envase con agua del aprovechamiento (un mínimo de tres veces) para quitar cualquier posible residuo que pueda existir en el mismo, controlando así la calidad del agua. La muestra para aniones se tomará sin añadir ningún tipo de conservador ni filtrado. La muestra para metales se filtra utilizando una membrana de acetato de celulosa de $0.45\mu\text{m}$ agregándose unas 13 gotas de ácido nítrico de alta pureza a la muestra después de ser filtrada en campo acidificándola ($\text{pH}\approx 2$). Por su parte, la botella para isótopos (estables ^{18}O , ^2H) se toma sin añadir ningún tipo de conservador. Es recomendable tomar al menos una muestra de agua adicional, sin acidificar ni filtrar, como medida preventiva, ya que podría necesitarse en caso de presentarse algún contratiempo.

Al finalizar, es preciso mantener en una hielera portátil las muestras tomadas a una temperatura de $<4^\circ\text{C}$ hasta que lleguen al laboratorio, esto ayudará a evitar cualquier tipo de reacción y alteración de la muestra de agua.

Es de hacer notar que la selección de sitios a muestrear se basó en resultados de un estudio previo de condiciones geológicas e hidrogeológicas del área de estudio, distribución de aprovechamientos existentes, condiciones apropiadas de las instalaciones para la colecta de muestras, acceso y permiso de propietarios de ejidos.

Mediciones de campo.- Algunos parámetros físicos y químicos pueden sufrir variación durante el intervalo de tiempo entre la recolección de la muestra y su manejo en el laboratorio. De este modo, es muy importante el registro de algunos parámetros de campo que, en este caso, incluyen la medición de temperatura, pH, potencial de óxido-reducción (Eh), oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD) y alcalinidad. Para la medición de los primeros seis parámetros se utiliza una celda de aislamiento que no permite que el agua reaccione con los compuestos del aire, a dicha celda fluye el agua del aprovechamiento en forma continua y allí es donde se realizan las mediciones con el tiempo hasta lograr valores estables. Esto es de particular importancia en agua de pozo y manantial la cual que puede estar en condiciones diferentes a las atmosféricas. En el caso de la determinación del pH es importante calibrar el aparato tanto en laboratorio (para verificar su funcionamiento correcto) como ya en el sitio de muestreo, para lo cual las soluciones (pH 4, 7 y 10) para calibración del aparato se llevan a la misma temperatura que la del agua subterránea. Así, el medidor de pH, es calibrado en campo utilizando dos de tres soluciones con pH de 4 y 10 ó con pH de 7 y 10, dependiendo del rango del pH que se espera tener en el agua de la muestra. El equipo de oxígeno disuelto es calibrado con respecto a la altitud de cada sitio a muestrear. Los aparatos para Eh, CE y STD deben ser calibrados en laboratorio previo a la salida de campo.

La alcalinidad es un parámetro, que al igual a los señalados previamente, es también recomendable evaluar directamente en campo, ya que si existen cambios de contenido de CO_2 en la muestra por equilibrarse este gas con la concentración del mismo en la

atmósfera entonces la alcalinidad determinada en laboratorio será diferente al valor real del agua subterránea. La técnica estándar que se utilizará es el Método de Gran, titulando un volumen de muestra establecido (30 ml) con ácido sulfúrico de normalidad conocida que se aplicará gradualmente con un titulador digital Hach y medidor de pH portátil hasta alcanzar un pH \approx 2-3. Posteriormente, siguiendo el mismo Método de Gran, se determina un punto de equivalencia, a partir de la gráfica “*volumen de ácido añadido en ml vs función de Gran*”, valor que finalmente, mediante cálculo estandarizado permitirá obtener alcalinidad total y bicarbonato en la muestra de agua.

Los datos de control de campo se colectan de acuerdo con la planilla indicada en el Anexo III.3.2.1 donde se presentan los datos colectados.

III.3.2 Trabajo de gabinete

III.3.2.1 Resultados.- Para esta fase del estudio se colectaron 18 muestras, de las cuales 15 corresponden con manantiales y tres con agua de la presa Valle de Bravo (Figura III.3.1).

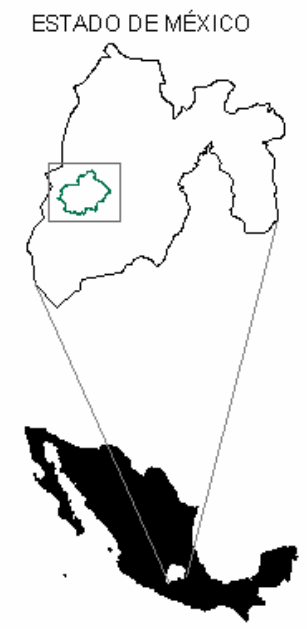
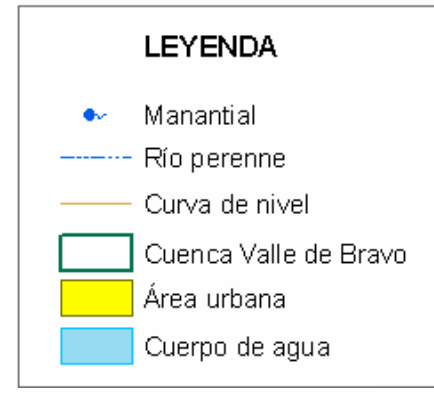
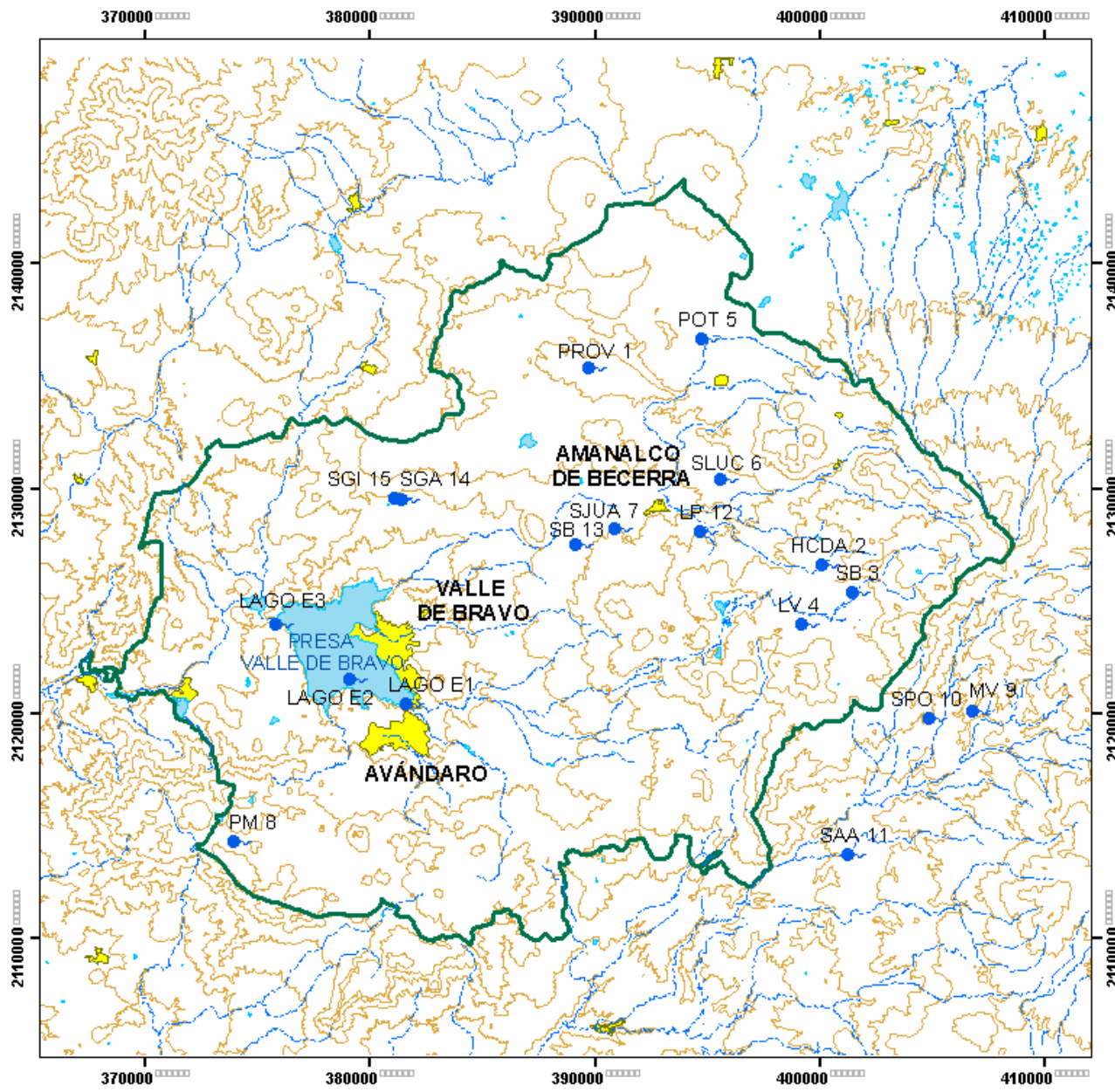
Para cada muestra colectada se hizo un posterior análisis en laboratorio de aniones (F, Cl, I, SO₄, NO₃, NO₂, HCO₃, CO₃), isótopos (estables $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) y metales (Li, Na, K, Mg, Ca, Sr, Mn, Fe NH₄, Ba, Zn, Cu, Zr).

Los datos de la alcalinidad medida en campo a través del método de titulación de Gran, donde a partir de una gráfica de los resultados de campo se determina un punto de equivalencia, que es incorporado a la fórmula de dicho método, En el Anexo III.3.2.1 se tiene la hoja de campo, donde se presenta el registro de observaciones y mediciones realizadas para determinar la alcalinidad en cada aprovechamiento. Finalmente, el procedimiento general de cálculo para obtener el valor de alcalinidad total y bicarbonatos, se presenta en el Anexo III.3.2.2.

Las muestras de agua se remitieron a dos laboratorios: uno para el análisis de isótopos en Arizona, USA (Departamento de Geociencias de la Universidad de Arizona) y el segundo localizado en Ontario, Canadá (Activation Laboratories Ltd) que se encarga del análisis de metales y cationes. Los resultados analíticos de estos laboratorios se aprecian en la *tabla del Anexo III.3.2.3*.

III.3.2.2 Análisis hidrogeoquímico inicial.- El estudio de los resultados físico-químicos de laboratorio y campo, permiten identificar diferentes grupos de agua, que a su vez llevan a la identificación de flujos de agua subterránea. Es el caso de la temperatura del agua, la cual es considerada como trazador natural, donde temperaturas frías corresponde con flujos someros y temperaturas altas con flujos profundos (Edmunds *et al.*, 2002; Van-Lanen y Carrillo-Rivera, 1998).

En general, desde el punto de vista de los aniones las muestras de agua subterránea colectadas corresponden de acuerdo con lo mostrado por el diagrama de Piper con agua bicarbonatada (Figura III.3.2), lo que de acuerdo con el análisis indica que dicha agua corresponde con sistemas de flujo (Tóth, 2000) local. En efecto, la concentración de este anión prevalece a la del sulfato, y la de éste a la del cloruro. En respecto con los cationes el agua es de tipo mixto, indicando que no prevalece el calcio al magnesio, ni al sodio.



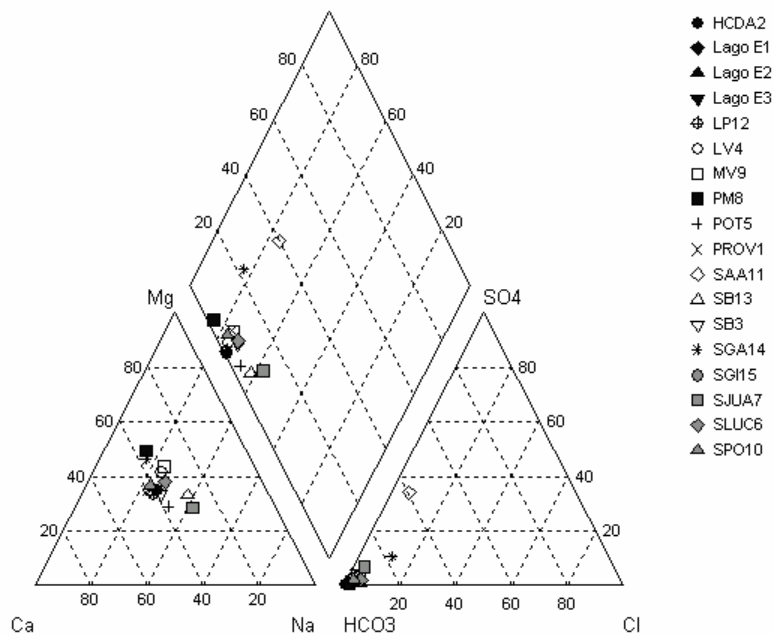


Figura III.3.2. Muestra preponderancia de bicarbonato en el agua colectada.

El análisis de diferentes elementos y compuestos químicos de las muestras de agua permite establecer que el agua subterránea de los aprovechamientos seleccionados en el presente estudio se divide en tres grupos de agua (*Tabla III.3.2.1*), estos son:

GRUPO I.- Es un flujo local con agua rica en bicarbonato, con temperatura de 14 a 16°C, indica el valor más bajo de sodio (2 a 3 mg/l), cloruro (≤ 0.5 mg/l) y litio (< 0.001 mg/l).

GRUPO II.- Igualmente esta agua representa flujo local, es rica en bicarbonato con temperatura es de 11 a 15°C, concentración muy baja en sodio (4.6 a 7 mg/l), cloruro (< 1.5 mg/l) y litio (0.001 - 0.003 mg/l); lo que representa agua con poco recorrido.

GRUPO III.- Al igual que los grupos anteriores, esta agua se considera pertenece a un flujo local, la diferencia con los grupos I y II es la cantidad adicional de cloruro presente (1.8 a 10.2 mg/l) ya que la temperatura es muy similar (14 a 17°C (sin incluir el agua de la presa). En cuanto al litio, los puntos de muestreo (San Antonio Albardones, SAA11 y Mesón Viejo, MV9) tienen el valor más alto obtenido (0.006 y 0.007 mg/l), lo que sugiere que el agua de este grupo representa un mayor recorrido aparente. Por otro lado, las muestras SGA14 y SGI15 tienen una concentración de litio menor al límite de detección del equipo de laboratorio y proponen un tiempo de residencia del agua muy corto como para estar clasificadas en este grupo, por lo que entonces sugieren que han tomado una característica química adicional pero que no ha alterado su edad.

GRUPO	T (°C)	Na	Li	HCO ₃	SO ₄	Cl
I	14.4 - 15.5	2.4 - 2.7	< 0.001	18.9 - 42.5	0.1 - 0.6	0.4 - 0.5
II	11.0 - 14.7	4.6 - 7.1	0.001 - 0.003	23.4 - 107.4	0.1 - 1.8	0.1 - 1.3
III	14.2 - 17.4 Presa ~18.7	7.0 - 9.9	< 0.001 - 0.007	41.0 - 110.3	1.9 - 18.5	1.8 - 10.2

Tabla III.3.2.1. Principales características químicas por grupo (en mg/l).

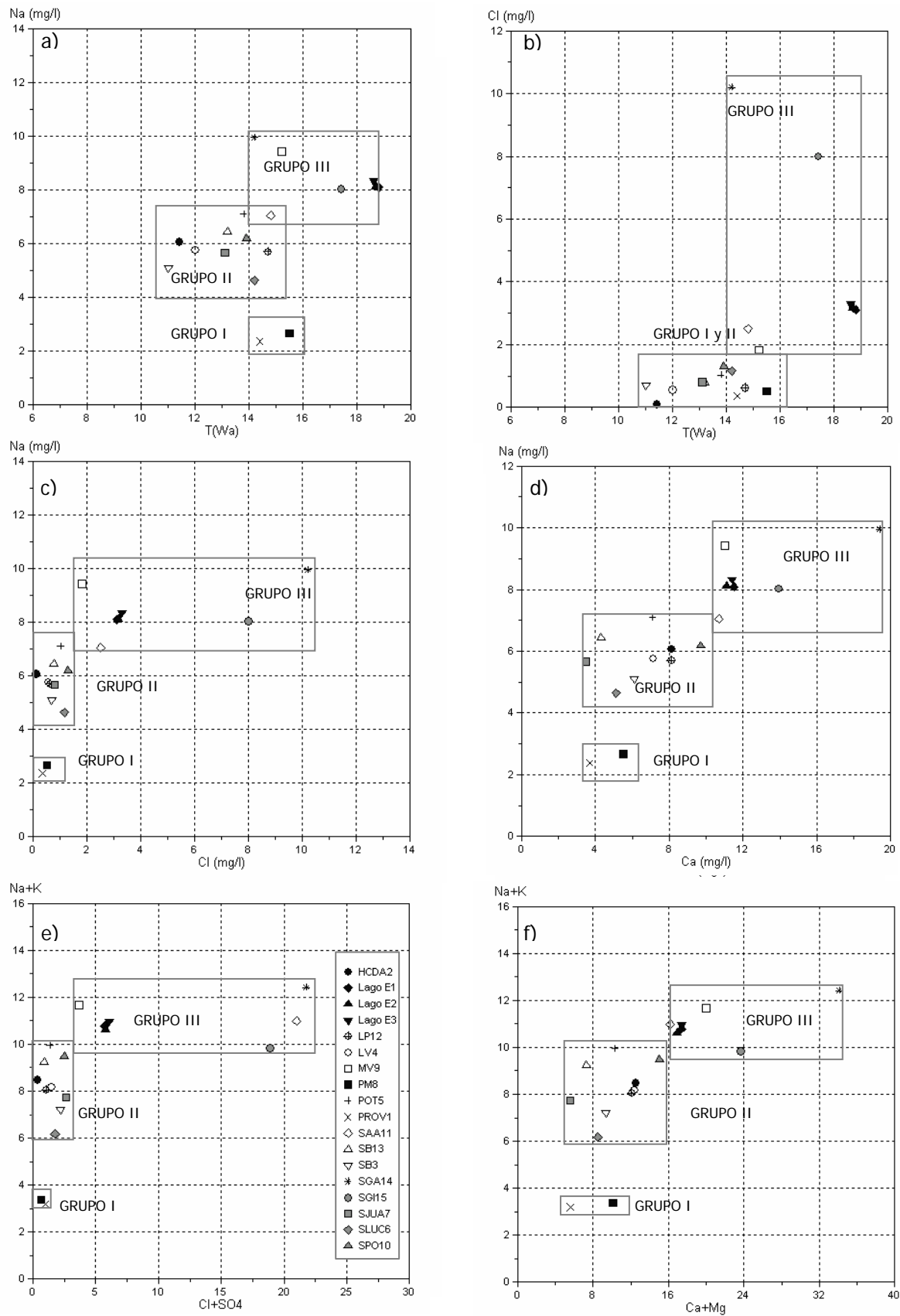


Figura III.3.3, indica la relación: a) temperatura del agua T(wa) y Na, b) T(wa) y Cl, c) Cl y Na, d) Ca y Na, e) Cl+SO₄ y Na+K, f) Ca+Mg y Na+K; (T(wa) en °C; iones, mg/l).

La definición de los grupos arriba propuestos se basó en la interpretación de las figuras III.3.3 y III.3.4. Las características químicas expresadas en estas figuras proponen que el agua de la presa de Valle de Bravo se ajusta al Grupo III; su temperatura es, sin embargo, más elevada al estar sujeta a radiación solar directa. Información colectada para el referente económico (III.1.3.3) sugiere que la calidad química del agua pueda relacionarse con contaminación ligada a efluentes derivados de actividad agrícola y del criadero de trucha. Esto es, el litio es un elemento que proporciona la edad relativa del agua, no se precipita ni hay fuente adicional en la región de estudio, por lo que este elemento indica cambio en la composición original del agua por procesos externos (contaminación). El estado de avance del estudio sugiere que aunque no todas las muestras del Grupo III han estado sujetas a contaminación, ésta se encuentra presente en agua del manantial SGA14 y del SHI15 como se constata con la Figura III.3.5.

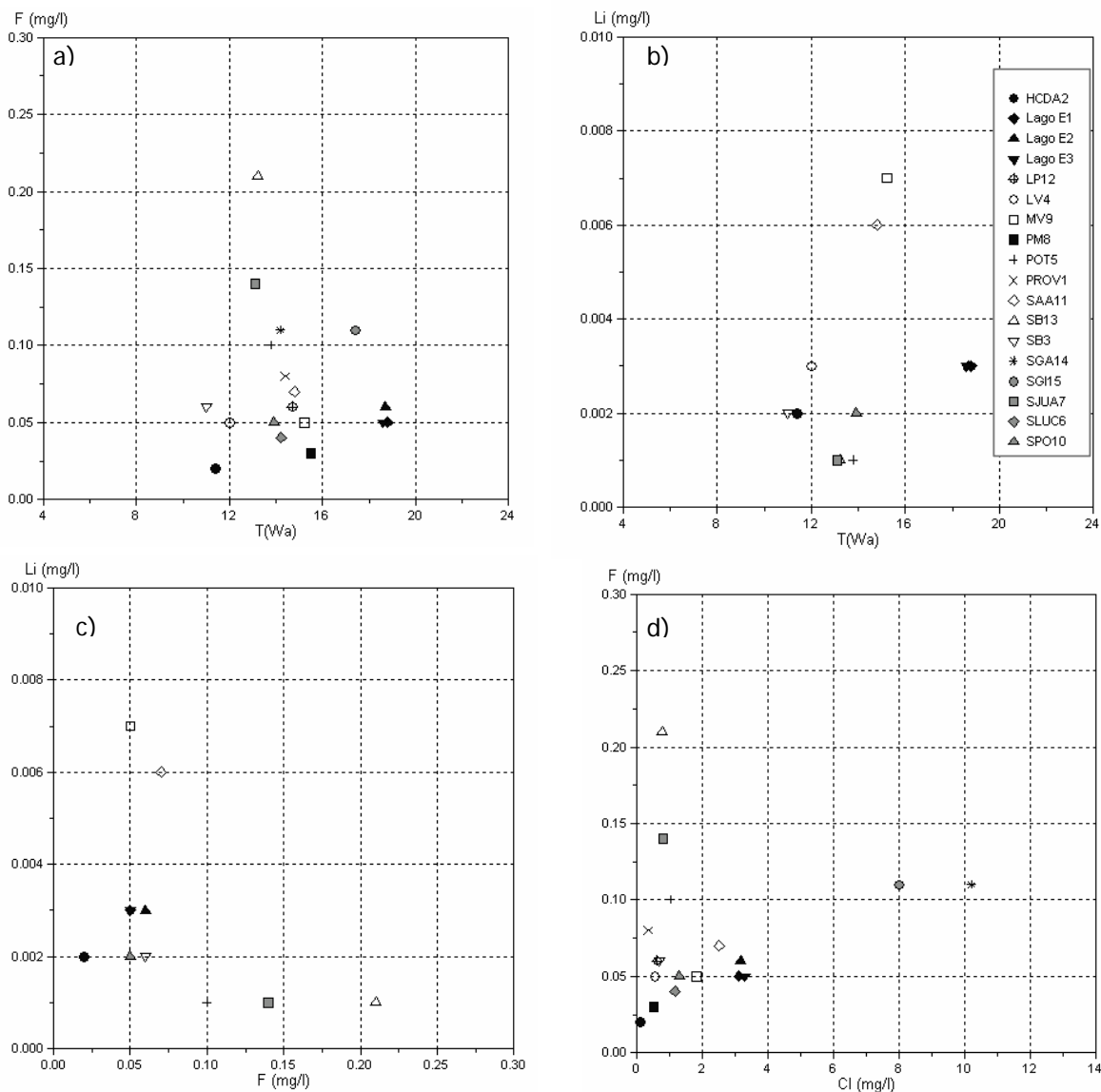


Figura III.3.4. Se muestran relaciones de: a) T(wa) y F, b) T(wa) y Li; c) F y Li, d) Cl y F; (T(wa) en °C, iones en mg/l)

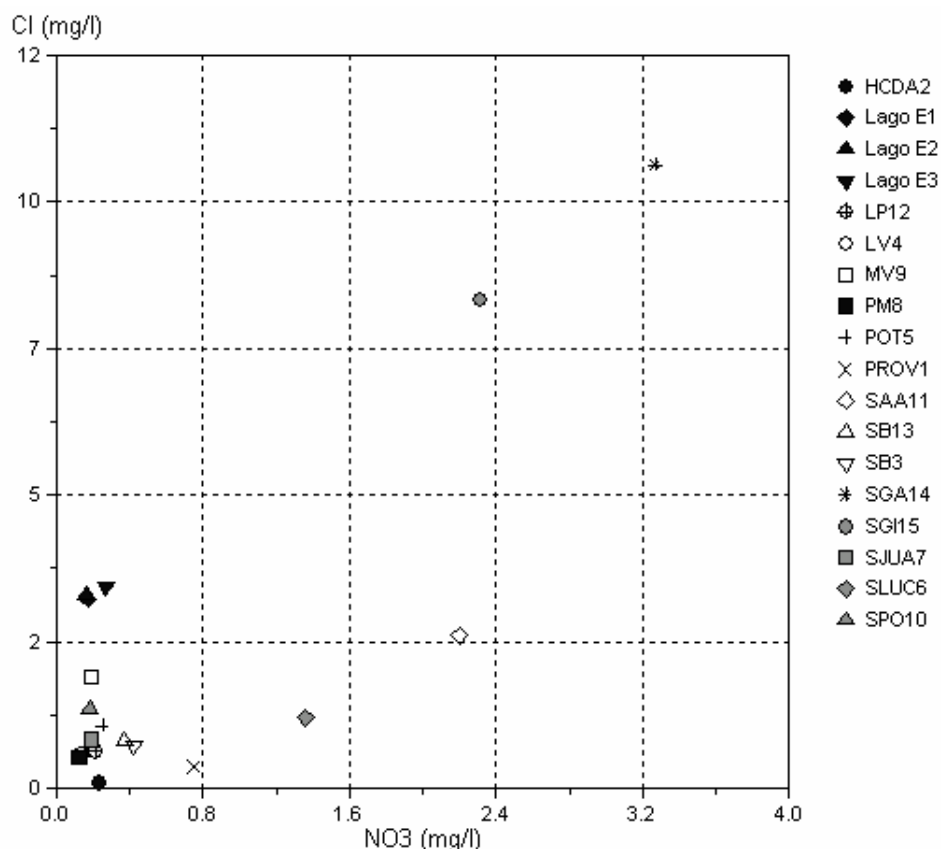


Figura III.3.5, Relación de NO₃ con Cl en las muestras colectadas.

III.3.2.3. Origen del agua subterránea.- Las gráficas arriba presentadas muestran valores de concentración de diversos elementos que ratifican el origen meteórico del agua estudiada, esto queda más claro al consultar los análisis físico-químicos de la tabla del Anexo III.3.3.3, ya que se manifiestan concentraciones que tienden a la del agua de lluvia. En este sentido, otra herramienta útil en la determinación del origen del agua subterránea es el uso de isótopos ambientales estables ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$), los cuales se consideran permiten establecer el origen y procesos en los que el agua participó. A su vez pueden ayudar a definir la altura topográfica donde la recarga se llevó a cabo, entre otros.

Los resultados isotópicos de laboratorio permiten calcular el promedio (isotópico) para el agua subterránea de la Cuenca de Valle de Bravo-Amanalco de $\langle\delta^{18}\text{O}\rangle = -9.3\text{‰}$ y para el $\langle\delta^2\text{H}\rangle = -65\text{‰}$. Valores que en general denotan una precipitación en posición topográfica alta, retirada de la línea de costa, y con escasa influencia de evaporación. Caso contrario los valores serían más positivos.

Se aprecia una diferencia marcada entre los valores isotópicos de las muestras de la presa de Valle de Bravo y las correspondientes con manantiales. En efecto al seguir la línea de evaporación sugerida por el agua de la presa (Figura III.3.6), hasta llegar a la línea de precipitación, el punto de contacto ($\delta^{18}\text{O} = -10.5\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -71\text{‰}$) en la línea meteórica local (LML) lo que sugiere una altitud similar a la de las muestras HCDA2, MV9 y SB3, la cual es en lo particular más elevada que la posición topográfica en la que se generó el agua de los otros manantiales. En general se puede comentar que el valor isotópico de los manantiales están cercanos (valor máximo y mínimo de $\delta^{18}\text{O}$ de -8.7‰ a -

10.9 y $\delta^2\text{H}$ de -63 a -72‰), sugiriendo que sus zonas de recarga están en altitud similar. Estudios realizados en la vecina cuenca de México indican que para el $\delta^{18}\text{O}$ se tiene una constante de -2.13‰ por kilómetro de elevación (Cortes y Durazo, 2001; Peñuela y Carrillo-Rivera, 2007).

Grupo	Muestra	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	δD ‰
I	PM8	-9.1	-63
	PROV 1	-9.4	-68
II	SB13	-9.0	-66
	SP010	-9.1	-65
	SJUA7	-9.4	-65
	LP12	-9.7	-68
	POT5	-9.8	-71
	LV4	-10.0	-67
	SLUC6	-10.1	-70
	SB3	-10.8	-71
	HCDA2	-10.9	-72
III	Lago E1	-7.4	-55
	Lago E2	-7.4	-54
	Lago E3	-7.2	-55
	SGI5	-8.7	-63
	SGA14	-9.1	-65
	SAA11	-9.3	-64
	MV9	-10.5	-72

Tabla III.3.2.2. Valores de isótopos ambientales para muestras colectadas (Precisión analítica $\delta\text{D}\text{‰}=\pm 0.9$ y $\delta^{18}\text{O}\text{‰}=\pm 0.08$)

La Figura III.3.6 exhibe la distribución isotópica de las muestras de agua del presente estudio, en ésta se tienen algunas que se ajustan o aproximan a la línea meteórica global (LMG) (Craig, 1961) y otras se ajustan o aproximan a la línea meteórica local (LML) (Cortés, y Farbolden, 1989), revelando que en ambos casos esa agua no fue afectada por el proceso de evaporación durante la infiltración en su zona de recarga. Por el contrario, el agua que está influenciada por evaporación en el área de estudio corresponde a aquella de las muestras PROV1, POT5, SPO10, SB13, SGA14, SGI15 y las tres de la presa.

Es de anotar que no todos los efectos de evaporación pueden significar que el agua estuvo expuesta en forma normal a un proceso natural de equilibrio de humedad con el medio asociado. La evaporación puede suceder al escurrir antes de su infiltración o cuando el agua sufre una lenta infiltración al subsuelo. Un proceso similar también se manifiesta cuando se tiene agua que ha estado en contacto con líquidos contaminantes que han estado sujetos a procesos productivos como la agricultura, piscicultura u otro tipo de industria que maneje agua en cantidad importante y con un área de influencia que permita a sus residuos líquidos migrar hacia el agua subterránea y contaminarla. De acuerdo con el tema que aquí se trata, el de servicio ambiental hidrológico, reviste de gran importancia la oportunidad de definirlo pues a través del uso conjunto de análisis fisicoquímicos e isotópicos, ya que permiten definir la presencia de procesos naturales por los que el agua subterránea transitó así como los procesos inducidos por el hombre.

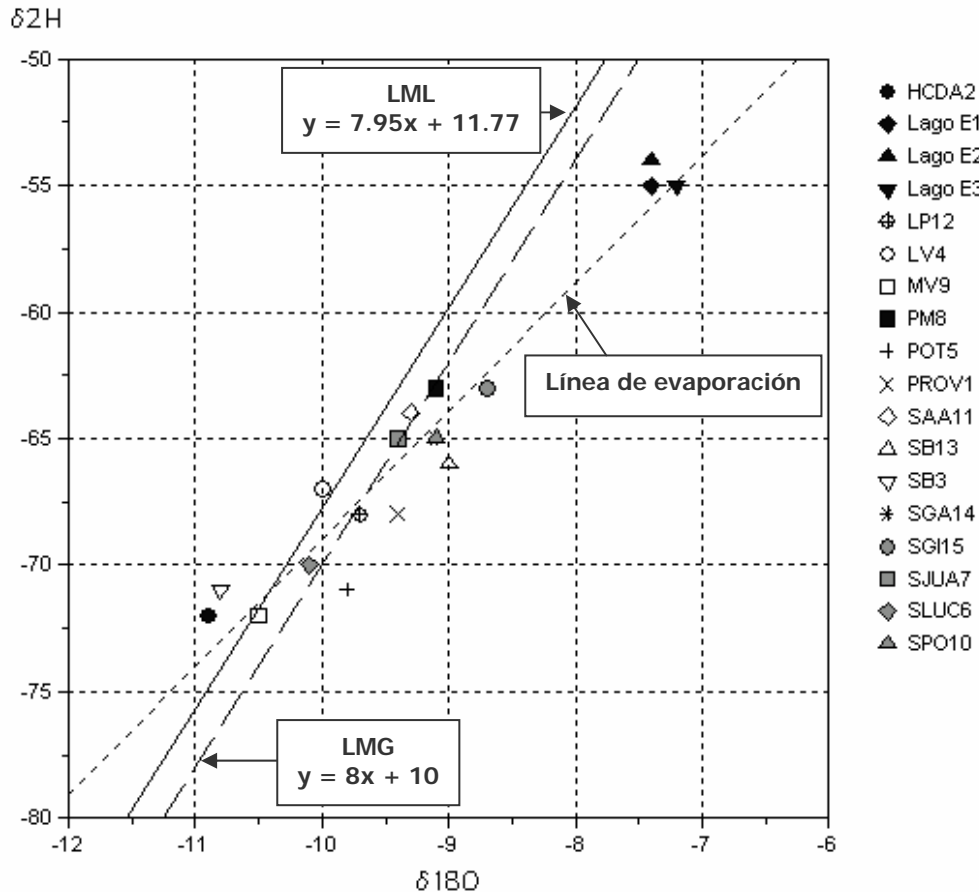


Figura III.3.6, Valores (en ‰) de $\delta^{18}O$ y δ^2H para muestras de agua colectadas y su relación con la línea meteórica global (LMG), y la línea meteórica local (LML). Se incluye la línea de evaporación del agua de la presa.

III.3.2.4, *Discusión*, considerando que el **objetivo principal** de este trabajo es analizar la necesidad de complementar los argumentos científicos por los cuales se decretan los sitios para el PSAH, el análisis realizado sugiere que es factible establecer sitios (zona montañosa) donde se genera la recarga que provee un servicio ambiental a beneficiados que usualmente se localizan en una planicie. Este avance es debido a la factibilidad de definir con base en el contenido de $\delta^{18}O$ y δ^2H la altura a la cual se precipitó el agua de recarga; lo que resta es determinar las curvas de i) $\delta^{18}O$ -altura y ii) δ^2H -altura con base en una medición sistemática de estos isótopos en agua de lluvia colectada a diferente altura, aspecto que aún necesita de implementarse no sólo en la cuenca de interés sino a nivel nacional. La definición de la altura donde se acaece la precipitación que está recargando un sistema dado sólo representa la solución a la mitad del problema pues dada la topografía abrupta del territorio puede haber varios sitios candidato a ser la zona de recarga. Esta interrogante se plantea definir con la medición de ^{14}C , ^{13}C y tritio para determinar la edad del agua de interés. Al conocer la edad del agua y donde se extrajo es factible definir la distancia donde se infiltró basado en la Ley de Darcy que incorpora la velocidad de movimiento del agua subterránea con base en las propiedades hidráulicas del medio por donde el agua circula, las cuales es factible definir con estudios de campo.

Respecto al objetivo secundario la parte química e isotópica permitió analizar la problemática hídrica de la cuenca en estudio determinando que es necesario ejercer

medidas de protección y conservación ya que si bien no se ha dado el avance económico buscado por varios agentes de gobierno federal y estatal, ya se tiene detectado que existe contaminación del agua, aspecto que se debe tener en cuenta si se espera desarrollar un aprovechamiento del agua en este sitio. En principio la calidad química del agua en varios puntos estudiados se relaciona a contaminación ligada a efluentes resultado de actividad agrícola y del criadero de trucha. Situación de gran importancia si se ha considerado que el agua de la Cuenca de Valle de Bravo-Amanalco es un territorio de interés como *cuenca productora de agua para la zona centro del país*. Esto implica que se deberán realizar estudios que incorporen las componentes de flujo de tipo intermedio y las de tipo regional bajo el concepto de *sistemas de flujo de agua subterránea*. La búsqueda de cómo esta cuenca superficial está hidráulicamente conectada con las del centro del país se pone de manifiesto por varias situaciones que se presentan como interrogantes que aún esperan un planteamiento correcto y la solución acorde: *i)* cómo afectará la extracción de agua en la cuenca, a regiones vecinas y *ii)* qué áreas serán afectadas, *iii)* cuáles serían los ecosistemas impactados, *iv)* qué tipo de impacto ambiental sería preponderante: erosión, subsidencia, cambio de la calidad del agua obtenida, entre otros.

La caracterización hidrogeoquímica e isotopía del agua obtenida cubre un objetivo de establecer en forma preliminarmente grupos de agua con característica de circulación común por rocas similares en el subsuelo y lograr un referente de la altura de la precipitación que ha recargado los diferentes flujos. En este grado de avance del proyecto se puede concretar que todos los sistemas de flujo definidos son de tipo local, lo cual representa agua que se ha recargado, transitado y descargado en la misma cuenca en relativamente poco tiempo, esto no permite al agua depurarse de contaminantes en especial los orgánicos que requieren ser estudiados en otro avance del proyecto. Estos sistemas son vulnerables a cambios en el clima (si hay sequía, por ejemplo). También es necesario estudiar la importancia de la recarga que se da en esta cuenca a flujos (intermedio y regional) que se usan “aguas abajo”, esto es, fuera de la cuenca de estudio; lo cual representa una parte fundamental en la definición de los beneficiados por los servicios ambientales que esta cuenca ofrece a otros usuarios del agua que allí se capta.

REFERENCIAS

- Cortes A y Durazo J. 2001. Tendencia del oxígeno-18 en la precipitación del centro de México. *Ingeniería hidráulica en México*, 16 (2) 93-102.
- Cortes A y Farvolden RN. 1989. Isotope studies of precipitation and groundwater in the Sierra de Las Cruces, Mexico. *Journal of Hydrology* 107, pp 147–153.
- Craig H. 1961. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural water. *Science*, 133: 1833-1834.
- Edmunds WM, Carrillo-Rivera JJ y A Cardona. 2002. Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico city. *Journal of Hydrology*, Vol 258, pp 1-24.
- Peñuela ALA y Carrillo Rivera JJ. 2007. Importance of flow systems functioning: recharge and discharge areas in environmental hydrological services payment programmes in Mexico. *Proceedings XXXV IAH-Congress, Lisboa, Portugal*. Presentación aceptada.
- Tóth J. 2000. Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico y Minero de España*, 111 (4) 9-26
- Van-Lanen, AJH y Carrillo-Rivera, JJ. 1998. Framework for groundwater monitoring in (semi-)arid regions. UNESCO, libro: *Monitoring for groundwater management in (semi-)arid regions*. *Studies & reports in hydrology* 57, pp7-20