



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**INSTITUTO DE GEOLOGÍA
MANEJO INTEGRAL DE ECOSISTEMAS**

**SISTEMAS DE FLUJO SUBTERRÁNEO Y SU RELACIÓN CON LA RECARGA DE
AGUA Y EL PAGO POR SERVICIOS AMBIENTALES HIDROLÓGICOS EN LA
SUBCUENCA DE VALLE DE BRAVO-AMANALCO**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
(Biología Ambiental)**

PRESENTA:

MARIEL NAVARRO VÁZQUEZ

**TUTOR PRINCIPAL : DR. LEOPOLDO GALICIA SARMIENTO
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA**

**COMITÉ TUTOR: DR. JOSÉ JOEL CARRILLO RIVERA
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA**

**DR. ARTURO FLORES MARTÍNEZ
SEMARNAT**

MÉXICO, D.F

NOVIEMBRE, 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**INSTITUTO DE GEOLOGÍA
MANEJO INTEGRAL DE ECOSISTEMAS**

**SISTEMAS DE FLUJO SUBTERRÁNEO Y SU RELACIÓN CON LA RECARGA DE
AGUA Y EL PAGO POR SERVICIOS AMBIENTALES HIDROLÓGICOS EN LA
SUBCUENCA DE VALLE DE BRAVO-AMANALCO**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
(Biología Ambiental)**

PRESENTA:

MARIEL NAVARRO VÁZQUEZ

**TUTOR PRINCIPAL : DR. LEOPOLDO GALICIA SARMIENTO
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA**

**COMITÉ TUTOR: DR. JOSÉ JOEL CARRILLO RIVERA
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA**

**DR. ARTURO FLORES MARTÍNEZ
SEMARNAT**

MÉXICO, D.F

NOVIEMBRE, 2013



Dr. Isidro Ávila Martínez
Director General de Administración Escolar, UNAM
Presente

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 3 de junio del presente, se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **Maestra en Ciencias Biológicas (Biología Ambiental)** de la alumna **MARIEL NAVARRO VÁZQUEZ** con número de cuenta **401052815** con la tesis titulada **"Sistemas de flujo subterráneo y su relación con la recarga de agua y el pago por servicios ambientales hidrológicos en la subcuenca de Valle de Bravo-Amanalco"**, realizada bajo la dirección del **DR. LEOPOLDO GALICIA SARMIENTO**:

Presidente: DRA. MARISA MAZARI HIRIART
Vocal: DR. JOSÉ MANUEL MAASS MORENO
Secretario: DR. ARTURO FLORES MARTÍNEZ
Suplente: DRA. ANA LAURA BURGOS TORNADÚ
Suplente: DRA. MARCIA LETICIA DURAND SMITH

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 11 de octubre de 2013.

DRA. MARÍA DEL CORO ARIZMENDI ARRIAGA
COORDINADORA DEL PROGRAMA

c.c.p. Expediente

Agradezco a todas las personas e instituciones que contribuyeron para que este trabajo se realizara:

-Al Posgrado de Ciencias Biológicas, UNAM por cobijarme con su Programa y darme la oportunidad de seguir consolidando mi formación académica.

-Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haberme otorgado la beca de maestría CVU/Becario 215949/207158 (2007-2009).

-Al proyecto “Respuesta del ciclo de carbono al cambio de uso de suelo y manejo forestal en paisajes de bosques templados”. Periodo: enero de 2012 a diciembre de 2014. Financiado por la Dirección General de Apoyo a Proyectos Académicos (DGAPA-PAPIIT); clave del proyecto: IN105712; por su apoyo para analizar los datos de isótopos.

-Al proyecto “Efectos del uso del suelo sobre la provisión de servicios ambientales hidrológicos: monitoreo del impacto del PSAH. Realizado por el INECOL A.C., proyecto #10205.

-A los miembros del jurado: Dra. Marisa Mazari Hiriart, Dr. José Manuel Maass Moreno, Dr. Arturo Flores Martínez, Dra. Ana Laura Burgos Tornadú y Dra. Marcia Leticia Durand Smith por su valioso tiempo y los comentarios que aportaron para mejorar el trabajo.

-Muy especialmente agradezco al Dr. Leopoldo Galicia Sarmiento y al Dr. José Joel Carrillo Rivera por toda la paciencia y el apoyo que me brindaron durante la realización de la investigación, haciendo aportaciones muy generosas para que el trabajo pudiera terminarse.

-A Gabriela Diego por todo su empeño y dedicación, apoyando desde la oficina del Posgrado de Ciencias Biológicas ubicada en el Instituto de Geología .

A Domingo

por despertar esta fuerza desconocida en mí

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 El agua subterránea como servicio ambiental	1
1.2 Sistemas de flujo	2
1.3 Isótopos	6
2.ANTECEDENTES	9
2.1 Servicios Ecosistémicos	9
2.2 La Valoración de los Servicios Ecosistémicos y el Pago por Servicios Ambientales (PSA)	11
2.3 Servicios Ecosistémicos Hidrológicos.....	13
2.4 Esquema de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) en México	15
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS.....	17
3.1 Objetivo general.....	19
3.2 Objetivos particulares	19
4.MÉTODOS Y ÁREA DE ESTUDIO.....	20
4.1 Aspectos físicos y territoriales de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco ...	20
4.2 Aspectos socioeconómicos de la subcuenca.....	24
4.3.Diseño de Muestreo	26
4.3.1 Medición de parámetros físicos y químicos	27
4.3.2 Trabajo en laboratorio	29
4.4 Análisis de datos	30
5. RESULTADOS.....	31
5.1 Parámetros medidos en campo	31
5.2 Clasificación de tipos de agua.....	35
5.3 Isótopos y cálculo de la altitud de recarga.....	41
5.4 Litología.....	48
5.5 Análisis de aplicación del PSAH en la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco.	53
5.6 Comparación altitudinal del PSAH respecto a zonas de recarga	58
7. DISCUSIÓN.....	61
7.1. Flujos de agua subterránea	61
7.2. Agua subterránea como servicio ecosistémico	63
8. CONCLUSIONES	69
9. BIBLIOGRAFÍA.....	70

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.	Variación de los parámetros físicos entre manantiales fríos y geotermales.....	6
Tabla 2.	Relación de acrónimos empleados para las localidades de estudio.....	26
Tabla 3.	Parámetros medidos en campo en los manantiales de la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco. En cada localidad se midió temperatura (°C), pH, conductividad eléctrica (CE) y Eh.....	32
Tabla 4.	Clasificación de agua de acuerdo a su concentración de seis iones. Los iones predominantes determinan la familia en que se agrupa el agua de cada manantial.....	37
Tabla 5.	Concentraciones isotópicas para los manantiales muestreados.....	42
Tabla 6.	Valores de altitud de recarga para los manantiales muestreados.....	45
Tabla 7.	Valores de altitud de recarga para las muestras de origen no meteórico.....	48
Tabla 8.	Tipo de roca que corresponde a cada manantial.....	50
Tabla 9.	Síntesis de los 17 beneficiarios inscritos en el PSAH en el periodo 2003-20011 dentro de la subcuenca Valle de Bravo Amanalco. Fuente IFAI- CONAFOR Solicitud 1616100004213.....	54

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.	Sistemas de flujo según Toth. (Modificado de Toth, 1999).....	4
Figura 2.	Litología de la Subcuenca de Valle de Bravo-Amanalco.....	21
Figura 3.	Precipitación para la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco.....	22
Figura 4.	Tipos de vegetación y tipos de uso de suelo en la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco.....	23
Figura 5.	Hidrología de la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco.....	24
Figura 6.	Distribución de los valores de temperatura de manantiales dentro de la subcuenca Valle de Bravo - Amanalco, categorizados en rangos percentiles.....	33
Figura 7.	Distribución de los valores de pH de manantiales dentro de la Subcuenca Valle de Bravo - Amanalco, categorizados en rangos percentiles.....	34
Figura 8.	Diagrama de Piper, mostrando la clasificación de las colectas en cuatro grupos de agua a partir de la relación de Cationes (Ca ⁺ , Mg ²⁺ y Na+K) y Aniones (HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻ y SO ₄ ²⁻).....	39
Figura 9.	Relación Na+K vs SO ₄ +Cl, indicando los manantiales que tienen más recorrido y han estado en contacto con la roca durante más tiempo.....	41
Figura 10.	Comparación de datos con respecto a la LMG (Datos Esperados ($\delta D\%_{0+5}$) y LML. (Datos Esperados +10), donde los datos observados se comportan más semejantemente a la LMG (Datos Esperados ($\delta D\%_{0+5}$)).....	43
Figura 11.	Representación cartográfica de la distribución de manantiales analizados, respecto de a los rangos altitudinales encontrados en la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco.....	46
Figura 12.	Representación cartográfica de la distribución de los manantiales analizados, respecto de la litología de la subcuenca Valle de Bravo Amanalco.....	49
Figura 13.	Perfil basado en un corte transversal con orientación Oeste-Este de la zona de estudio. Muestra los recorridos de circulación de algunos manantiales muestreados.....	52
Figura 14.	Distribución espacial de áreas adscritas a PROARBOL en período 2003-2011; 17 predios beneficiarios por el PSAH dentro de la subcuenca.....	55
Figura 15.	Superficie inscrita (hectáreas) en el PSAH 2003 - 2011 dentro del área de la subcuenca Valle de Bravo - Amanalco (fuente CONAFOR – IFAI, 2013).....	57
Figura 16.	Monto total asignado a cinco años (\$ millones pesos mexicanos) por el PSAH 2003 - 2011 dentro del área de la subcuenca Valle de Bravo - Amanalco (fuente CONAFOR – IFAI, 2013).....	57
Figura 17.	Distribución de altitudes de recarga (Grupo1) respecto a altitudes promedio de predios beneficiados por PSAH (Grupo 2).....	58

Figura 18.	Comparación estadística t de altitudes de recarga(calculados) respecto a altitudes de los predios beneficiados por PSAH (registrados), se observa alta similitud en a distribución media de los puntos.....	58
Figura 19.	Coincidencia de las zonas de recarga y los predios beneficiarios del PSAH. Se observa que la mayoría de los beneficiarios se localizan por encima de 2700 msnm dentro de las áreas de recarga. Se identifican cuatro beneficiarios por debajo de dicha cota.....	60
Figura 20.	Mostrando la escala a la que funciona el sistema de flujos subterráneos. Modificado de Leemans (2000).....	66

Resumen

El agua subterránea es la principal fuente de agua dulce asequible para la vida (99% del total), sin embargo, su exclusión de estudios y publicaciones relacionadas con servicios ecosistémicos es notable. De acuerdo con lo anterior, los sistemas de agua subterránea no han sido aplicados al programa de Pago de Servicios Ambientales Hidrológicos en México. Por lo tanto el objetivo de la presente investigación fue la determinación de zonas de recarga y su relación con el esquema de pago de servicios ambientales hidrológicos en la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco. Para ello se eligieron 15 sitios o zonas de descarga, y se tomaron muestras en 26 manantiales y dos en la Presa Valle de Bravo. En primer lugar, se realizó un análisis de la litología del sitio con la finalidad de caracterizar químicamente todo el sistema de flujo de agua subterránea. En segundo lugar, se determinaron las características químicas e isotópicas del agua de los manantiales para determinar el tipo de flujo del agua subterránea. En los 28 sitios de muestreo se realizaron mediciones de temperatura, pH, Eh, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto. Además se muestreo para la determinación de aniones (F, Cl, I, SO₄, NO₃, NO₂, HCO₃, CO₃) e isótopos estables ($\delta^{18}O$ y δ^2H). El análisis de los principales iones indica que los flujos de agua subterránea circulan a poca profundidad, son someros y tienen poco contenido de sólidos totales disueltos. Es decir, que estos flujos se recargan en una zona aledaña y dependen completamente de la precipitación para mantener su flujo. Por otra parte, el análisis de los isótopos permitió identificar que las zonas de recarga asociadas se distribuyen en altitudes de 2800 msnm a 3600 msnm. Las zonas de recarga frecuentemente coinciden con áreas altas que tienen un buen estado de conservación. Esto resulta

probablemente de la inaccesibilidad de las zonas y a que es difícil desarrollar actividades agropecuarias en pendientes pronunciadas. Derivado del análisis de los registros de la CONAFOR se identificó que dentro de los límites de la Subcuenca Valle de Bravo–Amanalco el ejercicio del PSAH en el periodo 2003-2011 ha implicado un total de 17 beneficiarios con una superficie acumulada de 5,235 hectáreas y un presupuesto total asignado de diez millones de pesos (solicitud de información 1616100004213, IFAI-CONAFOR). De estos 17 beneficiarios, 14 coinciden geográficamente con las zonas de recarga determinadas en el presente trabajo, aunque el esfuerzo no es suficiente para abarcar la conservación de las zonas de recarga. Los estudios del funcionamiento de flujos de agua subterránea y en particular la identificación de zonas de recarga no han sido utilizados de manera sistemática y formal dentro del PSAH. Sin embargo, nuestro conocimiento sobre los tipos de flujo de agua subterránea constituyen una herramienta clave y novedosa que puede repercutir no solamente en el tema de servicios ambientales hidrológicos, sino en otros ámbitos de la planeación territorial, con la finalidad de garantizar el acceso de la población al agua. Los usuarios del agua son cada vez más numerosos, mientras que las disponibilidades del recurso en muchas partes no sólo no permanecen iguales sino que van mermando en numerosas regiones del país. Por lo tanto, surge la necesidad de establecer una mejor gestión del agua que permita explotar las fuentes sin agotarlas con diferentes mecanismos de gestión y protección de los ecosistemas que lo proveen.

Palabras clave: agua subterránea, bosques de alta montaña, servicios ambientales hidrológicos, zona de recarga.

ABSTRACT

Groundwater is the main source of fresh water affordable for human use (99% of total), however, its exclusion of studies and publications related to ecosystem services is remarkable. Groundwater systems have not been applied as part of the public payment Program on Hydrological Environmental Services in Mexico (PSAH by its Spanish initials). Therefore the aim of this investigation was to determine recharge areas and their relation to the scheme of PSAH in the subwatershed Valle de Bravo-Amanalco. This was done by choosing 15 sites of discharge; and sampling at 26 springs as well in the Valle de Bravo reservoir (2 additional samples). As first, an analysis of the lithology of the site was done in order to chemically characterize the whole system of groundwater flow. Secondly, it was determined the chemical and isotopic characteristics of spring water to define the rate of groundwater flow. Temperature, pH, Eh, electrical conductivity and dissolved oxygen was measured for all the 28 sampling sites, as well as sampling for the determination of anions (F, Cl, I, SO₄, NO₃, NO₂, HCO₃, CO₃) and stable isotopes ($\delta^{18}O$ y δ^2H). The major ions analysis indicates that groundwater flows are shallow and have little total dissolved solids content. This means that these flows are recharged in near areas and depend entirely on rainfall to sustain its flow. Moreover, isotope analysis identified the associated recharge areas are distributed in altitudes of 2800m to 3600m. Recharge areas often coincide with areas that have a good state of conservation. This probably results from the inaccessibility of the area as it is difficult to develop agricultural activities on steep slopes. Following the analysis, CONAFOR records show that within the limits of subwatershed Valle de Bravo-Amanalco, PSAH public budget exercise for the period 2003-2011 has involved a total of 17 beneficiaries with total surface area of 5,235 hectares and a total budget

of ten million pesos (1616100004213 inquiry, IFAI-CONAFOR) . Of these 17 beneficiary, 14 geographically coincide with recharge areas identified in this work, but the effort is not enough to cover the conservation of recharge areas. Studies of how groundwater flows and in particular the identification of recharge zones have not been used systematically and formally within the PSAH. However, the growing knowledge about the types of groundwater flow is a key and incoming tool that can impact not only on the issue of watershed services, but in other areas of planning, with the aim of ensuring water access for human use in a growing population condition. Water users are becoming more numerous, while the availability of the resource is declining in many parts of the country. Thus arises the necessity of a better water management, without exhausting sources and protection of ecosystems that provide it.

Key words: groundwater, high mountain forest, hydrological ecosystem services, recharge areas.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 El agua subterránea como servicio ambiental

En el ciclo hidrológico el agua que se precipita se infiltra a través del suelo, una parte de esta percola al subsuelo hasta llegar a un acuífero determinado; a este proceso se le llama recarga. Se tiene conocimiento de que la recarga de agua se da de manera diferenciada. Por otra parte, el flujo de agua de superficie del suelo es la parte de la precipitación que se infiltra en la parte superficial del suelo y se mueve lateralmente a través de los horizontes superiores somera y efímeramente. En contraste, el flujo subterráneo es la parte de la infiltración que actúa en una percolación profunda del agua infiltrada (Soliman *et al.*, 1998). Las áreas donde se facilita la infiltración profunda son llamadas zonas de recarga, éstas se distinguen por tener flujo vertical descendente, mientras las zonas de descarga tienen flujo vertical ascendente. Las zonas de recarga ofrecen el servicio ecosistémico de mantener o aumentar la recarga del agua subterránea de la cual depende la mayor parte de la población mundial (70% del agua que se consume en el mundo es agua subterránea), por lo que conocer su ubicación espacial y asegurar su conservación resulta crítico. La recarga debe ser considerada como un servicio ecosistémico indirecto que actúa como intermediario en la producción biofísica natural de recursos consumidos por los seres humanos (Kaiser y Roumasset, 2002).

A pesar de que los servicios ecosistémicos relacionados con el agua benefician a poblaciones bien definidas dentro de una cuenca abastecida por un acuífero, no resulta sencillo definir a los prestadores del servicio, y por ende a los posibles receptores del pago sufragado por los usuarios (Muñoz *et al.*, 2005). Aquellas personas que utilizan el agua subterránea como fuente principal de abastecimiento

pueden ser consideradas como usuarios. Mientras aquellas que tengan terrenos que funcionen como zonas de recarga pueden ser considerados como los prestadores del servicio ambiental. Por otra parte, las personas que manejan el agua subterránea comúnmente se preguntan cuánta agua puede ser tomada del acuífero, manteniendo un riesgo bajo para la vegetación, ya que hay ecosistemas que dependen del agua subterránea. Los científicos están muy interesados en medir y cuantificar el requerimiento que tiene la vegetación del agua existente en un acuífero (Eamus y Froend, 2006), a lo cual se le ha llamado gasto ecológico, sin embargo, todavía falta mucho por avanzar en este campo del conocimiento. El agua subterránea es la principal fuente de agua dulce asequible, con el 99% del total, sin embargo, su exclusión de estudios y publicaciones relacionados con servicios ambientales es notable (UNAM-INE, 2006).

1.2 Sistemas de flujo

Actualmente existe el conocimiento suficiente que permite modelar algunas características físicas y químicas, así como el comportamiento del agua subterránea. La composición química del agua subterránea está controlada por varios factores como la evaporación, precipitación, disolución, erosión de silicatos, reacciones de óxido-reducción y de intercambio de iones permite identificar su dinámica. Chebotarev (1955) fue el primero en reconocer que el agua subterránea tiende a evolucionar químicamente en los sistemas de flujo largo. El cambio sistemático en la composición química de los acuíferos es conocido como la secuencia de Chebotarev. Esta secuencia se da naturalmente, siempre y cuando el sulfato y la clorita estén presentes en la litología del acuífero. La evolución química

de los cationes (Ca^{2+} , Mg^{+} , K^{+} , Na^{+}) conforme avanza el tiempo, varía más que la de los aniones (HCO_3^{-} , SO_4^{2-} , Cl^{-}) por el intercambio de iones, la precipitación y otros procesos. Lo anterior puede traducirse en la longitud relativa de recorrido del agua y el tiempo que permaneció en contacto con la roca de manera comparativa con otros flujos, el primer indicio para identificar zonas de recarga.

Por otro lado, Toth (1963, 1995, 2000) modeló el funcionamiento de los flujos de agua subterránea y los clasificó en: local, intermedio y regional. El flujo subterráneo es de tipo local cuando la recarga alcanza niveles poco profundos y descarga en una zona topográfica más baja y contigua a la zona de recarga. El flujo intermedio ocurre cuando la recarga alcanza una profundidad media con respecto al basamento y descarga en zonas más bajas y lejanas de la contigua. El de tipo regional es cuando el agua alcanza el nivel más profundo del sistema y descarga a gran distancia.

El agua que pasa por los diferentes tipos de flujo tienen características geoquímicas particulares de acuerdo principalmente al tipo de roca con la que está en contacto, el tiempo de residencia y la profundidad a la que llegó dentro de una unidad geológica. De acuerdo al corto periodo de tiempo que un flujo local pasa en el acuífero, nunca evolucionará de la fase bicarbonatada de la secuencia de Chebotarev, es decir no tendrá contenido de SO_4^{2-} o Cl^{-} y por lo tanto significa que su zona de recarga es aledaña o muy cercana. Mientras que la velocidad y profundidad de los sistemas intermedios y regionales hace más factible que estos alcancen las fases de sulfatos o cloruros, encontrando sus zonas de recarga a mayor distancia. Por ejemplo, en un estudio realizado en una cuenca del estado de Nevada (Thomas *et al.*, 1989) se reporta datos de agua muy parecidos a la meteórica, caracterizada como NA-Ca-HCO_3 con un promedio de sólidos disueltos

de 2 a 3 en 110 mg/L y valor de Cl= 0.58 mmol/L, mientras en otro extremo se encontró agua muy salina caracterizada como Na-Cl con un promedio de sólidos disueltos de 10-16 en 27,000 mg/L y Cl de 33.93 mmol/L. Esto sugiere, que comparativamente la última denota un tiempo mayor de recorrido y contacto con la roca.

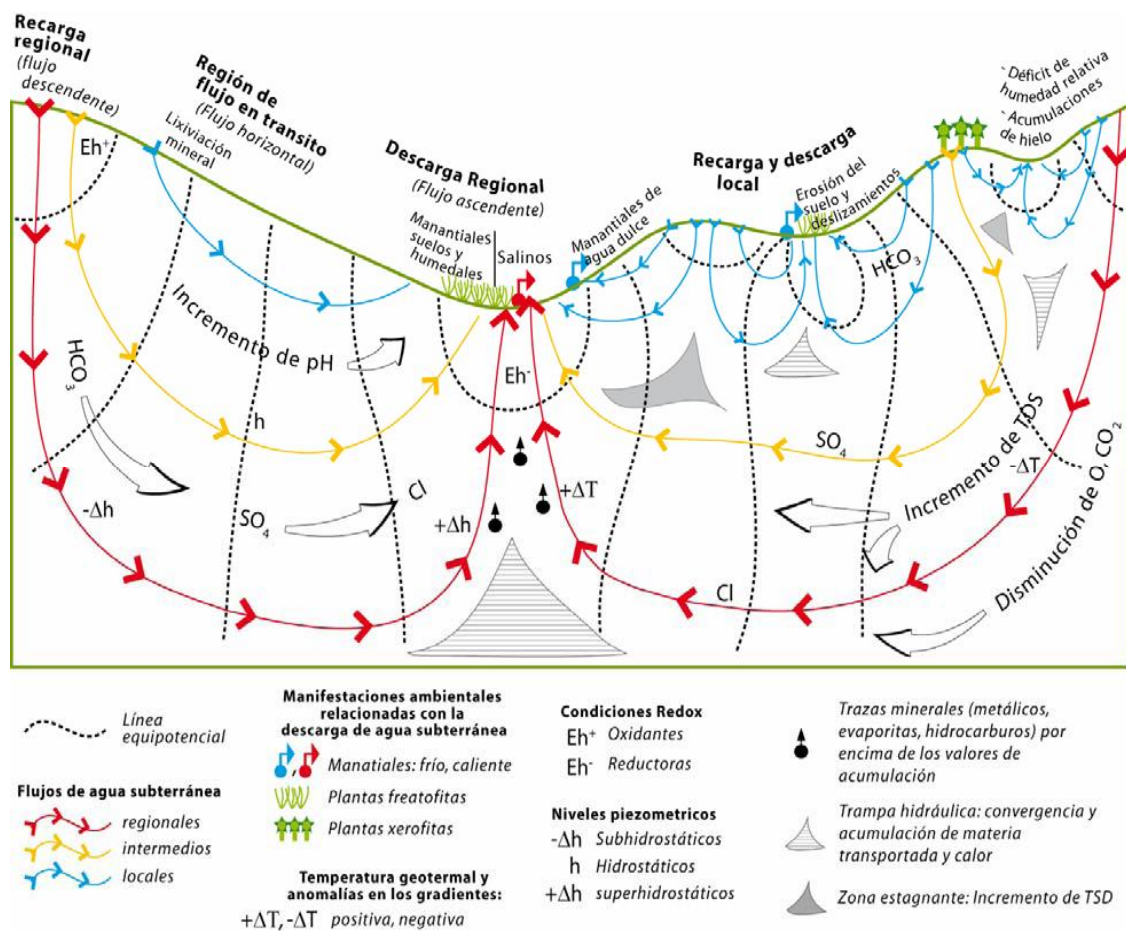


Figura 1. Sistemas de flujo según Toth. (Modificado de Toth, 1999).

La hidrogeoquímica del agua subterránea ha sido usada para investigar el origen, tiempo y localización de la infiltración; así como la dirección del flujo de agua (Kharaka y Carothers, 1986; Lambert, 1991; Chaudhuri *et al.*, 1992; Varsányi

et al., 1999; Carrillo-Rivera *et al.*, 2002). Adicionalmente a la química, la medición y análisis de parámetros físicos del agua como la temperatura, pH, Eh y conductividad eléctrica (CE) contribuyen a la clasificación del agua en un determinado sistema de flujo subterránea. Asimismo, la temperatura del agua subterránea es fundamental para la interpretación hidrogeoquímica, ya que varía muy poco, por lo tanto; la detección de un incremento importante puede ayudar en la determinación de diferentes profundidades de circulación. El pH de una solución es el logaritmo negativo de la actividad del ión hidrógeno en moles por litro. La variable del ión hidrógeno en los acuíferos es particularmente importante porque interviene en la mayoría de reacciones químicas que afectan la composición química del agua. La utilidad de la medición de este parámetro es definir, con base en modelos químicos, la especiación y la actividad de las diferentes especies en solución.

El Eh es una medida de la tendencia de la solución a donar electrones, que para efectos prácticos se debe considerar como una medida cualitativa. Esta medida está relacionada con reacciones de oxidación y reducción que controlan directa o indirectamente la movilidad de muchos elementos del agua. Si se registra el pH, el Eh se tiene como una herramienta adicional para caracterizar las condiciones químicas del agua. Algunas reacciones dependen del pH o Eh por separado, sin embargo, otras son función de ambos parámetros. La conductividad de una solución es la capacidad de ésta para transportar la corriente eléctrica y está expresada en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Debido a que la electricidad se transporta por la migración de los iones en solución, la conductividad se relaciona con la concentración iónica total.

En Turquía, en la región de Anatolia Central se realizó un análisis (Afsin y Allen, 2012) en donde los valores de parámetros físicos varían considerablemente para manantiales fríos y manantiales geotermales. Se determinó la concentración de Ca^{2+} y HCO_3^- como iones dominantes en manantiales fríos así como Na^+ y Cl^- como iones dominantes para manantiales geotermales. De acuerdo con información sobre hidrogeoquímica y su temperatura es posible sugerir cual es el sistema de flujo (local, intermedio y regional) del que proviene el agua de una descarga (manantial). Sus componentes fisicoquímicas determinan su edad relativa (tiempo de residencia) así como la profundidad de circulación (Edmunds *et al.*, 2002; Van-Lanen y Carrillo Rivera, 1998). Cada uno de estos elementos apunta hacia la zona donde se recargó el agua.

Tabla 1. Variación de los parámetros físicos entre manantiales fríos y geotermales reportada en Anatolia Central (Afsin y Allen, 2012).

Parámetro físico	Manantiales fríos	Manantiales geotermales
Temperatura	10.4°C	19-86°C
pH	5.97-7.25	5.57-6.44
CE	207-214 $\mu\text{S}/\text{cm}$	586-6910 $\mu\text{S}/\text{cm}$

1.3 Isótopos

Los isótopos han sido empleados en el estudio del agua subterránea, su aplicación y uso en campos del conocimiento relacionados con la hidrogeología se ha incrementado en los últimos años. Esto ha sido posible debido a que permite definir patrones de circulación, evolución en la calidad de agua, los orígenes del agua y los solutos que en ella se encuentran, así como tiempos de residencia y

paleohidrología (Mazor, 1991 y Gat, 1996). El lapso que transcurre desde la filtración del agua hasta su descarga puede tener un efecto considerable en su composición.

A través de los isótopos es posible medir el tiempo de residencia del agua en un acuífero. Hay isótopos estables y otros (radioisótopos) que cambian por decaimiento radioactivo a isótopos de otros elementos. La velocidad de decaimiento varía de un isótopo a otro, pero para cada isótopo es más o menos constante y se conoce con bastante exactitud. Esto significa que si el radioisótopo de un elemento particular está presente en el agua que se recarga en una proporción dada con respecto al isótopo estable del mismo elemento, entonces durante su movimiento a través del acuífero la proporción del radioisótopo decrecerá a medida que el isótopo decae. De esta manera, es posible determinar cuanto tiempo le ha tomado al agua recargada llegar a un punto en el acuífero, midiendo la nueva relación entre el radioisótopo y el isótopo estable en ese punto (Edmunds, 2005).

Por otro lado, los isótopos estables también son útiles en estudios hidrológicos porque se fraccionan y no son radioactivos, por lo tanto no cambian con el tiempo. Para estudios hidrológicos se emplean principalmente el O^{18} y H^2 (Deuterio), estos tienen menos posibilidades de evaporarse debido a lo grande de sus masas, y por lo tanto se espera que se condensen más que los isótopos O^{16} y H^1 . Craig (1961) trabajó sobre la correlación global que existe entre O^{18} y H^2 en el agua dulce a nivel mundial. Tomando datos de precipitación de todo el mundo estableció una Línea Meteórica Global (LMG) que revela el comportamiento predecible de las concentraciones de dichos isótopos ambientales. La relación entre las concentraciones de O^{18} y H^2 está influenciada por la temperatura, por lo

que las cantidades isotópicas disminuyen en aguas asociadas a regiones frías o polares y aumentan en regiones cálidas. Otro estudio en Manitoba, Canadá, reporta la composición isotópica de un manantial con valores de $\delta^{18}\text{O} = -20\text{‰}$ (Gayscone, 2003), estas concentraciones sugieren que el agua fue recargada durante un período frío, posiblemente en el Pleistoceno, con por lo menos 10 mil años de antigüedad. Mientras en la Cuenca de México el promedio isotópico para los manantiales es de $\delta^{18}\text{O} = -10.7\text{‰}$ y $\delta\text{D} = 73\text{‰}$ (Cortés *et al.*, 1989).

Otro factor que tiene influencia sobre el contenido isotópico es la altitud, a medida que el mar se evapora y se mueve tierra adentro para iniciar su recorrido a través del ciclo hidrológico, ocurren diferentes fenómenos de condensación y evaporación. En general, entre más se aleja el agua de los océanos más reducida es la concentración de estos isótopos pesados. La evaporación del agua en altitudes mayores produce el fraccionamiento de los isótopos (Price, 2003). En las áreas con diferencias topográficas importantes (relieves altos), el contenido de isótopos ambientales $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ es muy diferente al que puede ser encontrado en zonas bajas. Cuando las masas de aire se mueven sobre las diferentes montañas esto da como resultado que el contenido de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ disminuya proporcionalmente en la precipitación conforme la elevación incrementa. Por esta razón el contenido de isótopos pueden ser inversamente proporcional a la elevación de la recarga de agua subterránea (Kehew, 2001).

Es por esto que puede existir una fuerte correlación entre el contenido de Oxígeno 18 y Deuterio con la elevación. Mientras que en la parte occidental de Arabia Saudita los cambios en las concentraciones isotópicas por altitud son de -0.08‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y de -0.38‰ para deuterio por cada 100 msnm (Almayani, 2001); en Piemonte, Italia son de -0.31‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -2.5‰ por cada 100 msnm

(Bortolami,1979); y en la Selva Negra en Suiza de -0.19‰ de $\delta^{18}\text{O}$ por cada 100 msnm (Dubois y Flück, 1984). A partir de los valores de isótopos en muestras de agua subterránea es posible estimar la elevación de la recarga (Clark y Fritz; 1997). El conocimiento de la relación de los isótopos del agua subterránea puede aportar información sobre el área de recarga donde ésta se generó, o en cuencas grandes, sobre las proporciones de agua de diferente origen y los diversos grados de mezcla, principalmente permiten identificar la elevación topográfica de la zona de recarga correspondiente (Cortés y Durazo, 2001; Mazor, 2004).

2.ANTECEDENTES

2.1 Servicios Ecosistémicos

Actualmente el impacto que las actividades humanas tienen sobre los ecosistemas se ha constituido como un tema de preocupación en el escenario internacional, reconociéndose que en los últimos cincuenta años la humanidad ha alterado los ecosistemas más rápidamente que en cualquier otro período en la historia (Millenium Ecosystem Assessment, 2003). Incluso existe un vasto reconocimiento de las repercusiones directas que tienen los ecosistemas sobre el bienestar humano relacionadas con la gran dependencia por parte de la sociedad de los servicios que estos proveen (Balmford y Bond, 2005). Particularmente, uno de las principales consecuencias de la destrucción de los ecosistemas es que genera cambios en las variables del balance hidrológico que se reflejan también en la disponibilidad de agua. Por ejemplo, el cambio de uso de suelo favorece el aumento de la temperatura, que la evapotranspiración se incremente y que la humedad en el

suelo disminuya, afectando directamente al sector de mayor consumo del recurso: la agricultura y la disponibilidad de agua para la población.

Asimismo, desde hace más de una década se ha definido a los servicios y bienes que nos brindan los ecosistemas bajo el término de servicios ecosistémicos, con la finalidad de ir clarificando la manera en que la sociedad se relaciona con el ambiente. Los servicios ecosistémicos son todos los beneficios que la sociedad obtiene de la naturaleza (Daily, 1997), incluyendo los procesos que realizan los ecosistemas y de los cuales se derivan beneficios intangibles e indirectos. Entre los beneficios obtenidos a través de los ecosistemas se encuentran principalmente: la conservación de la biodiversidad, la captura de carbono atmosférico, el valor escénico o recreativo y la protección de los recursos hidrológicos (SEMARNAT, 2004).

El Millenium Ecosystem Assessment (2003) propone la siguiente clasificación de los servicios ecosistémicos: de provisión, que son los productos que las personas obtienen de los ecosistemas, como el agua para uso doméstico que consumimos diariamente en nuestras casas y que proviene de fuentes superficiales y subterráneas. De regulación, que son beneficios que las personas obtienen de los procesos de los ecosistemas, como el mantenimiento en la calidad y cantidad del agua, que depende por una parte de la infiltración del agua en el suelo y subsuelo. De soporte, que son necesarios para la producción de todos los demás servicios ecosistémicos como la realización del ciclo hidrológico, que además de estar vinculado a la producción de agua, tiene influencia sobre la cantidad de nutrientes que entran y salen de un ecosistema. Por último, los culturales, que son los beneficios espirituales y valores estéticos que la sociedad obtiene de los ecosistemas.

2.2 La Valoración de los Servicios Ecosistémicos y el Pago por Servicios

Ambientales (PSA)

La valoración de los servicios ecosistémicos fue una de las alternativas sugeridas por el MEA para revertir el deterioro ambiental. Existen diferentes tipos de valor que se han asociado a la naturaleza como: el valor de uso, el valor de existencia y el valor intrínseco. El valor intrínseco de la naturaleza tiene un sentido subjetivo y depende fuertemente de un componente cultural. En cambio el valor de uso tiene que ver con la utilidad de la naturaleza a los seres humanos medida desde una perspectiva económica (Turner *et al.*, 2003). Se ha sugerido que el establecer el valor económico de los beneficios directos e indirectos que provee la naturaleza a la sociedad ayudaría a reforzar las acciones de conservación (MEA, 2003), aunque no sea el único valor atribuible a ella (otros valores sociales y culturales no pueden ser expresados del todo de una forma monetaria). Esta propuesta se basa en la premisa de que las deficiencias en la conservación de los recursos naturales surgen porque su valor monetario no está incluido dentro de un mercado, y por lo tanto no se les toma en cuenta en las decisiones económicas y políticas.

El valor económico de un servicio ecosistémico está relacionado con la contribución que hace al bienestar humano (Bocksteal *et al.*, 2000). Los servicios no sólo incluyen productos terminados, sino también servicios indirectos como la calidad del suelo y la reposición de agua subterránea. Estos últimos se evalúan marginalmente como el valor de su contribución a un producto final. En muchos casos, la dificultad de realizar estudios de valoración tiene que ver por un lado con la naturaleza indirecta de la contribución del servicio (Kaiser y Roumasset, 2002);

y por otro, con el poco entendimiento de como se produce. Batagoda *et al.* (2000) han señalado que es necesario diferenciar entre un servicio *in situ* y otro que se da por el flujo de los elementos a través de un ecosistema, subrayando que una valoración apropiada está condicionada por otros factores como la escala de identificación del servicio. Por estas razones, las contribuciones marginales deben ser determinadas incluyendo en el proceso de valoración un entendimiento de las propiedades científicas del servicio ambiental. Una motivación para realizar estudios de valoración es generar mejor información que pueda ser comprensible para formular políticas y sentar bases que ayuden en el proceso de toma de decisiones, no simplemente poner precios al ambiente o a sus componentes (Hanley y Shogren, 2002).

Uno de los mecanismos para valorar los servicios ecosistémicos es el Pago por Servicios Ambientales (PSA). El principio central del PSA es que quienes suministren el servicio ambiental deben ser compensados por ello, y quienes reciban dichos servicios deben pagar el suministro (Pagiola y Platais, 2002). De manera que los programas están basados en la voluntad para pagar por su provisión o en la voluntad para aceptar una compensación por su pérdida (Turner *et al.*, 2003). Para el diseño de un esquema PSA se ha sugerido que se realicen análisis costo-beneficio, estos análisis pueden ayudar en la identificación de las áreas que se deben conservar y quién debe pagar por ello (Naidoo y Ricketts, 2006).

El éxito en la implementación de los programas de pago por servicios ambientales depende del asegurar que el servicio ambiental se reciba a cambio del pago, según el reporte GEF-Nasi 2002 los usuarios del servicio ambiental (aprovisionamiento de agua) deben estar conscientes de las externalidades

vinculadas al servicio del que se benefician. Además solo estarán dispuestos a dar un pago si tienen la certeza de que a través de esa acción, asegurarán su acceso al servicio ambiental en cuestión. A su vez, el proveedor de servicios ambientales (dueño de los terrenos) estará satisfecho sólo si el pago es suficientemente motivante para evitar que modifique las condiciones naturales de su terreno por un objetivo comercial más redituable. El aseguramiento de la provisión de un servicio ecosistémico implica una adecuada modelación y monitoreo de las características biofísicas que regulan dicho servicio (Tognetti, 2003).

2.3 Servicios Ecosistémicos Hidrológicos

Los servicios ecosistémicos hidrológicos abarcan todos los beneficios relacionados con el agua superficial y subterránea. Son importantes para su identificación tres ramas del conocimiento: la meteorología, la hidrología superficial y la hidrogeología (De Wiest, 1965), las cuales abarcan el ciclo hidrológico en su totalidad. El ciclo hidrológico es el mecanismo por el cual se regulan y se mantienen este tipo de servicios. De esta manera, la precipitación, evapotranspiración, escorrentía e infiltración son procesos que tienen una incidencia directa sobre la disponibilidad de los recursos hidrológicos. En general los servicios ecosistémicos relacionados con el agua deben ser medidos dentro de una escala regional. Otro aspecto importante es que el agua superficial y el agua subterránea frecuentemente están vinculadas, por lo que no se puede realizar una evaluación independiente a menos que se establezca que el intercambio entre ellas es mínimo (Soliman *et al.*, 1998). Los servicios hidrológicos que han sido

identificados y por lo tanto, aquellos que pueden entrar en un esquema de PSA son los siguientes (Tognetti, 2003):

- i. La producción total de agua.
- ii. Regulación del flujo de agua.
 - a. Mantenimiento del flujo durante la temporada de secas.
 - b. Control de las inundaciones y de la erosión.
- iii. Mantenimiento de la calidad de agua.

En cuanto, a los servicios ambientales hidrológicos mencionados: la regulación del flujo de agua tiene que ver con la medición de la esorrentía y la infiltración (dos componentes del ciclo hidrológico que son complicados de calcular y medir). Mientras el servicio de mantenimiento de la calidad de agua está en función de la fuente de agua dulce que se aproveche y cómo se relaciona ésta con contaminantes, sedimentos, etc. Los servicios hidrológicos se caracterizan por sistemas heterogéneos, con procesos conflictivos y alta incertidumbre por la cantidad de variables que deben ser consideradas (Brauman *et al.*, 2007).

No obstante los pocos estudios ecológicos y económicos, las iniciativas para desarrollar PSA generalmente están basados en mitos sobre relaciones entre el agua y la vegetación, que dan como resultado soluciones inapropiadas o parciales, que no solamente fallan para resolver el problema de la degradación sino que además lo exacerban (Kaimowitz, 2001). Una solución a este ejercicio puede residir en el redescubrimiento y avance en el conocimiento del ciclo hidrológico (Jewitt, 2001) como marco de referencia y parámetro para el conocimiento científico sobre el cual está basado el PSA. Tomando en cuenta que este conocimiento también tiene implicaciones en los costos y en los arreglos institucionales.

2.4 Esquema de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) en México

Desde hace 10 años existe un esfuerzo gubernamental y social por crear así como por mantener un mercado de servicios ambientales. De hecho, Costa Rica fue un país pionero en la introducción de un programa de pago de servicios ambientales desde 1997 (CINPE-UNA, 2002; Daily, 2000). En México existía un antecedente de PSA en el municipio de Coatepec, Veracruz, ya que en el año de 1998 la población sufrió una escasez inédita de agua. En parte ocasionada por el fenómeno del “Niño” pero en parte los habitantes percibieron que era una consecuencia de la deforestación. El presidente municipal implementó entonces un pago de \$1 peso como donativo en el recibo de agua mensual para conservar los terrenos que se encontraban cuenca arriba. Esto tuvo como consecuencia dos antecedentes en la estructuración del programa a nivel federal, darse cuenta que la sociedad tenía la voluntad de contribuir con el pago de este tipo de servicios y la evaluación de la condición de cobertura vegetal de los predios a través de imágenes satelitales (Muñoz *et al.*, 2005).

El esquema y resultados obtenidos en Costa Rica y en el municipio de Coatepec le sirvieron a México de ejemplo para atender el compromiso de pago de servicios ambientales que se tenía establecido. Durante el 2001 al 2003 el INE y la CONAFOR se encargaron del diseño del programa de Pago de Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) siendo este último el encargado de operar el Programa. Se estableció que la continuidad en los pagos era una parte clave del funcionamiento del PSAH. Por lo que se creó el Fondo Forestal Mexicano (en el que participan gobierno Federal, organismos de la sociedad, académicos, productores y

especialistas) como instrumento fiscal y esquema administrativo que fortaleciera el PSAH.

En el 2003 (SEMARNAT, 2003) se establecieron los puntos de partida y las pautas para el “Programa de Pago por Servicios Ambientales (PSA)” como producto de un acuerdo parlamentario. En este marco uno de los Programas que actualmente está en marcha y continúa implementándose en todo el país, es el de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH), que se centra en esquemas regionales que aseguren el acceso de la población al recurso agua. A efecto de reducir la discrecionalidad en el funcionamiento del PSAH se publicaron las Reglas de Operación en el Diario Oficial de la Federación (2003), éstas disponen los criterios básicos por medio de los cuales se determina la elegibilidad de los beneficiarios del PSAH, se refieren a continuación: “Que las áreas beneficiadas cuenten cuando menos con un 80% de la superficie total con cubierta forestal correspondiente a bosques o selvas; que estén localizadas en zonas críticas para la recarga de acuíferos, catalogados como sobreexplotados; que se localicen en zonas con aguas superficiales donde haya problemas de escasez, de calidad de agua, de sedimentos, o en zonas de riesgo de desastres hidrológicos y que estén vinculadas con el abastecimiento de agua a centros poblacionales de más de 5,000 habitantes, o que se ubiquen en las montañas listadas en el Anexo 2 de las Reglas de Operación (DOF, 2003).”

Las Reglas de Operación han sido y pueden ser modificadas con el objetivo de mejorar el Programa de PSAH, adicionalmente en ellas reside la dirección ambiental que tome dicho Programa. Además de cumplir con las expectativas de abastecimiento de agua, el PSAH fue pensado para propietarios de la tierra cuyos terrenos se encuentran en buen estado de conservación, pero por su composición

de especies y localización no son lo suficientemente competitivos para realizar una extracción forestal sustentable. El PSAH ocupa un lugar entre las políticas de prohibición de cambio de uso de suelo y las de fomento al aprovechamiento forestal sustentable.

Durante los últimos años los terrenos que se adicionaron al Programa PSAH estuvieron relacionados con el cambio de uso de suelo y las zonas con alto o muy alto grado de marginación. La elección de los predios todavía tiene un importante sesgo hacía el riesgo de deforestación. Por lo que PSAH ha resultado exitoso mitigando el impacto sobre el cambio de uso de suelo forestal, pero todavía existe una omisión de indicadores específicos para los criterios relacionados con agua, establecidos en las reglas de operación. La principal fuente de confusión está en la falta de definiciones precisas para el concepto “zona de importancia para el agua”, lo que complica definir e identificar a los posibles prestadores del servicio (Muñoz *et al.*, 2006). El Instituto Nacional de Ecología ha dado seguimiento al PSAH y ha sugerido formalizar y ampliar los criterios de calificación con base en un sistema de puntaje que introduzca grados de importancia de los servicios hidrológicos para maximizar los beneficios a usuarios de agua (Muñoz *et al.*, 2006).

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS

El agua subterránea se puede valorar, aprovechar y controlar como cualquier recurso natural y su conocimiento presenta las mismas dificultades y limitaciones de estudio que el agua superficial. Sin embargo, son distintos los principios y las técnicas, pero existen modelos de flujo subterráneo que se utilizan rutinariamente para analizar el comportamiento de los acuíferos y sus relaciones con otros

componentes del ciclo hidrológico (ríos, lagos, atmósfera y zona no saturada). De acuerdo con la información anterior existen todavía campos del conocimiento del agua subterránea que no han sido aplicados al programa de Pago de Servicios Ambientales Hidrológicos. Esta información técnica puede llegar a representar información clave sobre la aplicación del concepto de Servicios Ambientales Hidrológicos. Además del uso de técnicas que generen información acerca del agua subterránea pueden ser aplicados e integrados a otro tipo de políticas e instrumentos ambientales, fungiendo como una base para la planificación del territorio. Por otra parte, existe una percepción generalizada de que los bosques juegan un papel importante en proteger las fuentes de agua. Sin embargo, hasta la fecha no ha habido estudios que comprueben esta relación, sobre todo porque los estudios deben realizarse a largo plazo y a gran profundidad de lecho geológico (Carrillo-Rivera, 2002). Kaimowitz (2001) afirma que la creencia de que los bosques contribuyen al abastecimiento de agua es un mito útil, puesto que ha propiciado que se haga una gran inversión pública dirigida a la protección ambiental. Aunque la relación causa-efecto entre los tipos de uso del suelo y los efectos precisos en la cantidad y calidad del agua sigue siendo un tema de gran discusión en cuanto a la implementación de programas de pago de servicios ambientales (Pagiola et al., 2002).

La subcuenca Valle de Bravo-Amanalco pertenece a una de las regiones hidrológicas más importantes del país, tanto por su extensión, como por el volumen de sus corrientes superficiales y sus 541 manantiales permanentes ya identificados (Ecociencia S.C., 2003), es una de las generadoras de agua más importantes de las seis subcuencas que conforman el Sistema Cutzamala, el cual abastece poco más del 20% del agua para consumo humano en el área

metropolitana de la Ciudad de México y Toluca ($\approx 12 \text{ m}^3/\text{seg}$). La Presa de Valle de Bravo, al aportar el 38% del agua del Sistema (máximo $6 \text{ m}^3/\text{seg}$) es la más grande y relevante del mismo; además, su belleza escénica ha permitido un desarrollo turístico muy relevante para la región, utilizada al principio para generar electricidad y posteriormente para aportar agua para uso y consumo humano a la Ciudad de México y parte del Estado de México a través del sistema Cutzamala. Otros cuerpos de agua son la Laguna de San Simón, ya azolvada, y la Laguna Capilla Vieja, también azolvada y seca durante la temporada de estiaje. Esta cuenca recibe pago por servicios ambientales hidrológicos por parte de la CONAFOR, sin embargo, estos han sido otorgados sin una evaluación y/o determinación previa de la recarga de agua en esta zona. Por ello, esta subcuenca es un modelo ideal para integrar el conocimiento del agua subterránea al programa de Pago de Servicios Ambientales Hidrológicos en México.

3.1 Objetivo general

Determinación de zonas de recarga en la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco y su relación con el esquema de PSAH.

3.2 Objetivos particulares

- 1) Caracterizar el sistema de flujos subterráneos analizando los atributos hidrogeoquímicos y físicos del agua en la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco.
- 2) Analizar la distribución de zonas de recarga en la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco.

- 3) Determinación de la relación geográfica de las zonas de recarga con los proveedores del servicio ecosistémico de recarga del acuífero.

4.MÉTODOS Y ÁREA DE ESTUDIO

La subcuenca de Valle de Bravo-Amanalco se ubica en la región poniente del Estado de México, ligeramente al oeste de su capital Toluca, es tributaria del río Balsas y cuenta con una superficie total de 775.6 km². Comprende los municipios de Amanalco en su totalidad y Valle de Bravo en un 66.11%, así como porciones territoriales de los municipios de Donato Guerra, Villa de Allende, Villa Victoria, Temascaltepec, Zinacantepec y Almoloya de Juárez. La subcuenca Valle de Bravo-Amanalco es una cuenca de segundo orden (o subcuenca) de la cuenca Cutzamala (la cual constituye una cuenca de primer orden o macrocuenca). A su vez esta subcuenca se divide en siete cuencas de tercer orden (o microcuencas). Se localiza en las coordenadas 19^o 05' y 19^o 23' N y 99^o 52' y 100^o 12' O del meridiano de Greenwich. Presenta una forma ovalada con una orientación de noreste a suroeste y limita con la cuenca del río Lerma.

4.1 Aspectos físicos y territoriales de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco

En esta zona existen dos ensambles de rocas, uno de rocas metasedimentarias (EMS) y otro de rocas metavolcánicas (EMV). El primero está compuesto por filita calcárea intercalada con caliza, además de filita con serita+calcita+cuarzo± clorita, filita carbonosa con láminas de sulfuro, metagrauvaca volcánica, y algunos cuerpos de caliza bioclástica, con fragmentos de corales, pelecípodos y gasterópodos que

han sido asociados por su composición dominante calcárea a facies sedimentarias de talud de plataforma (Sánchez-Zavala, 1993). El ensamble de rocas metavolcánicas está formado por lava andesítico-basáltica y depósitos volcánicos asociados, cuerpos de pedernal intercalados con radiolarita, limonita y arenisca de grano fino rica de fragmentos volcánicos y que corresponden a facies típicas de fondo volcánico. La edad de estas rocas ha sido ubicada en el Aptiano mediante el análisis micropaleontológico de radiolarios en capas de pedernal intercaladas con capas de ambas asociaciones (Guerrero et al., 1993; Salinas-Prieto, 1994).

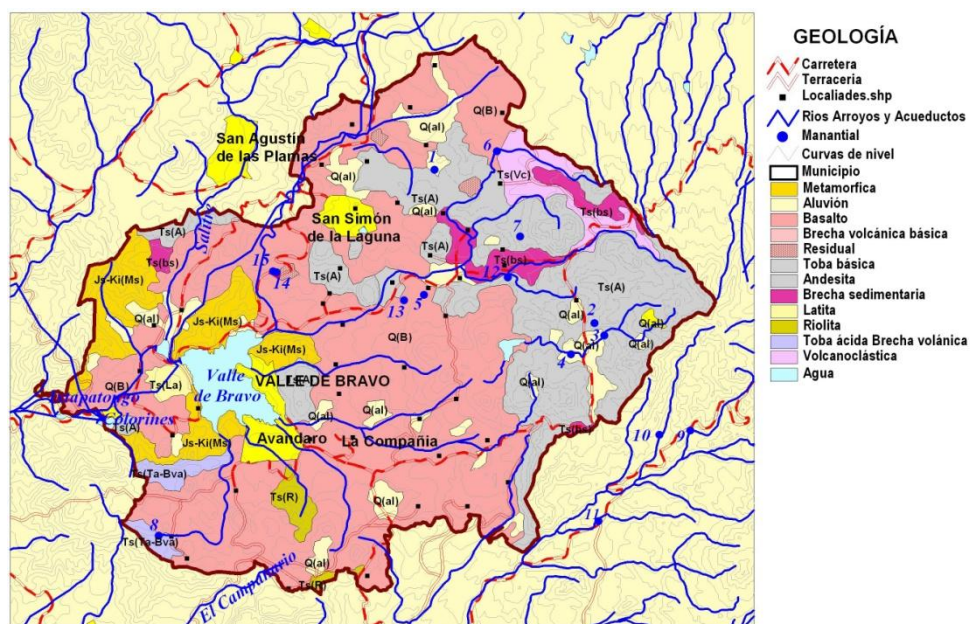


Figura 2. Litología de la Subcuenca de Valle de Bravo-Amanalco.

A escala regional, ambos conjuntos rocosos se extienden hacia el sur por más de 100 km desde la zona de estudio y a lo largo de dos franjas paralelas que constituyen los subterrenos de Teloloapan y Arcelia-Palmar Chico, los cuales forman parte del sector occidental del terreno Guerrero (Fitz, 2004).

Dominan los suelos de origen volcánico ya que 74% de la superficie total de la Subcuenca está cubierta por cenizas volcánicas (Andosoles). El tipo de suelo previo a la acumulación sedimentaria provocada por la presa es Acrisol órtico con un poco de Andosol húmico. Como ya se mencionó el 74% de la subcuenca es dominada por Andosoles y por tal razón el mayor porcentaje del sedimento acumulado en el embalse es Andosol húmico, seguido por Acrisol órtico, Litosol y Feozem háplico (SEMARNAT *et al.*, 2005).

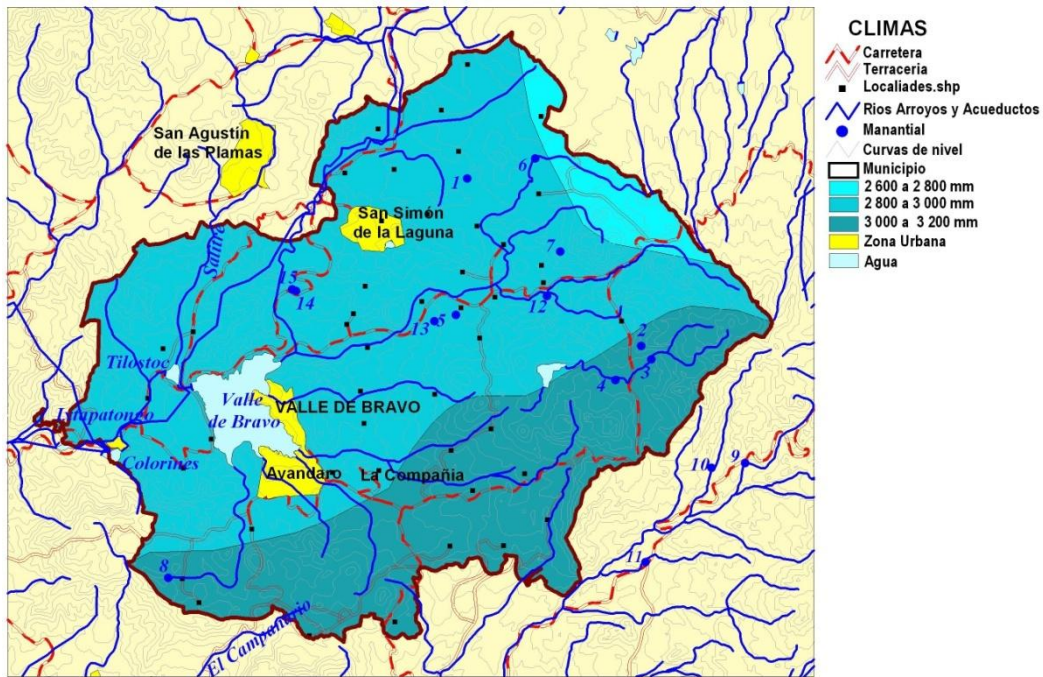


Figura 3. Mapa de la distribución espacial de la precipitación para la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco.

El 53% de la subcuenca está ocupada con bosques; el 32% por agricultura; el 6% por mancha urbana; el 4% por pastizales; el 3% por cuerpos de agua y el 2% restante por diversos usos. La vegetación comprende bosque templado de pino-

encino, encino-pino, pino, encino, oyamel, bosque mesófilo de montaña y selva baja caducifolia. Estas masas forestales se encuentran dispersas en toda la subcuenca, pero son dominantes en el sur y el oriente. La agricultura en toda la subcuenca es llevada a cabo en las pendientes más bajas; en las llanuras, hasta en pendientes de 50%, en este último caso produciendo enormes cantidades de azolves.

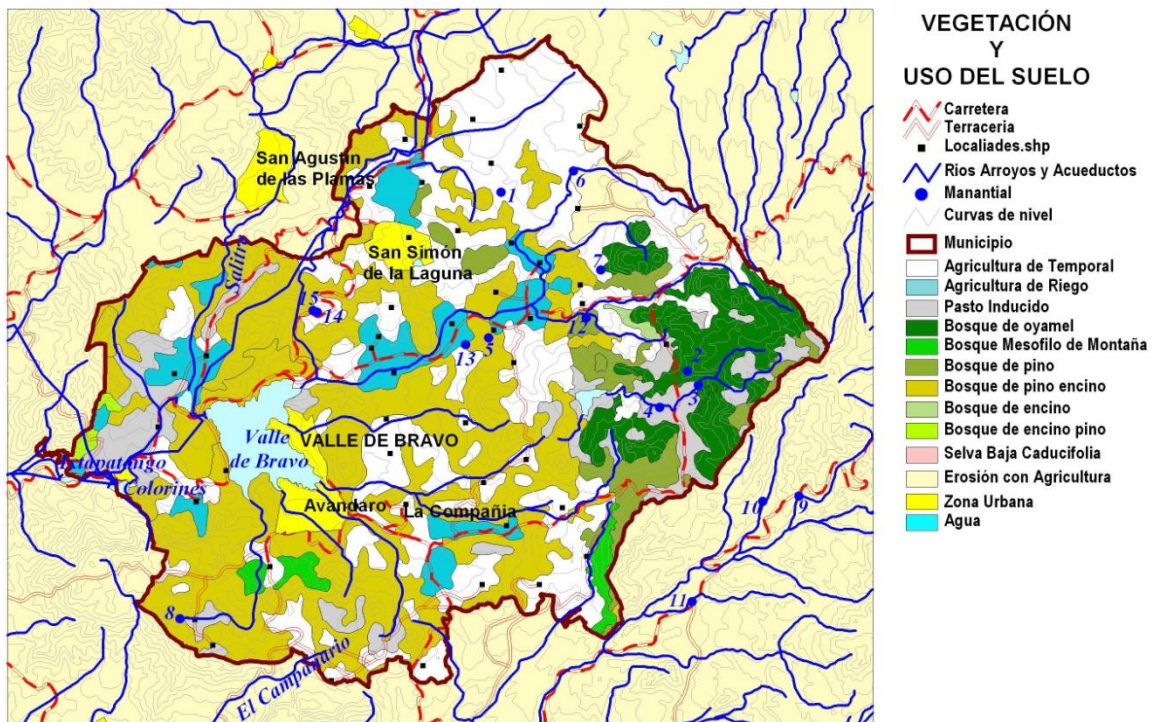


Figura 4. Mapa de los tipos de vegetación y tipos de uso de suelo en la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco.

Los pastizales inducidos se encuentran en superficies mayores en las llanuras de la laguna de Cuadrilla de Dolores, además en las grandes llanuras de las cuencas altas del Río Los Hoyos, al norte y oriente del cerro Piedra Herrada y en torno a los poblados de Capilla Vieja, Corral de Piedras y Hacienda Vieja. También en el extremo sur de la Cuenca, al sur de la comunidad de la Huerta de San Agustín.

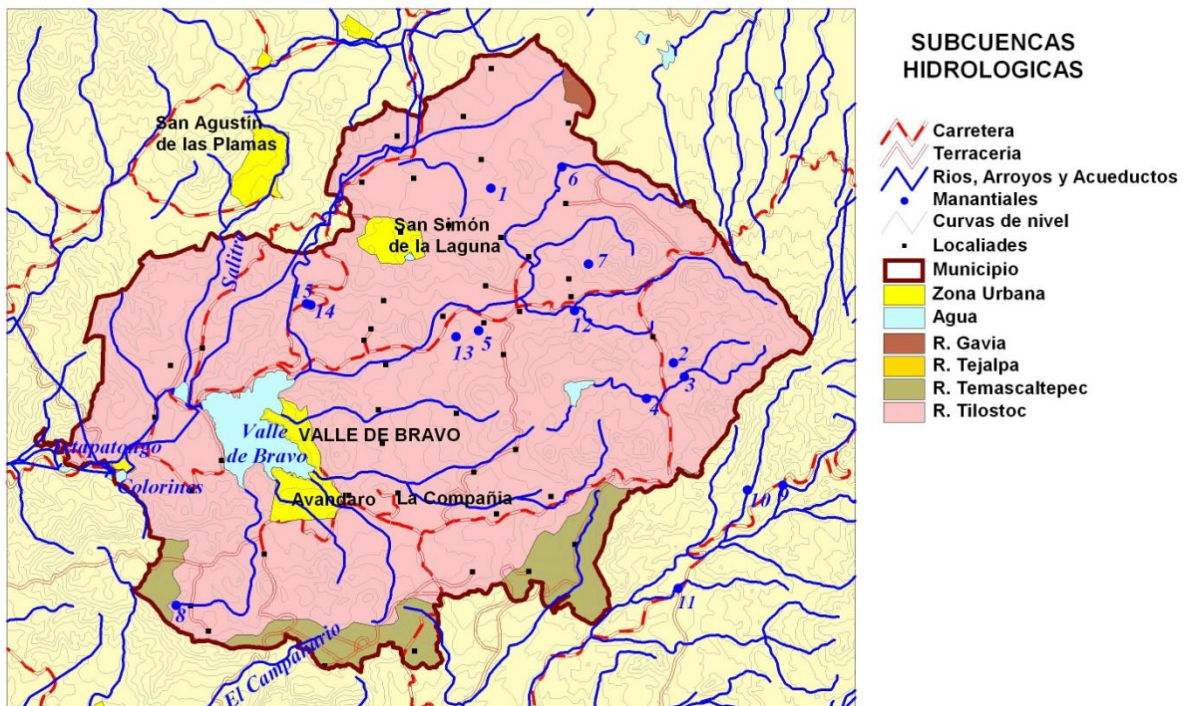


Figura 5. Mapa de la hidrología de la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco.

4.2 Aspectos socioeconómicos de la subcuenca

La subcuenca de Valle de Bravo-Amanalco está constituida por complejas redes sociales que incluyen a ejidatarios, comuneros y grupos étnicos mazahuas y otomíes. Además de contar con población flotante relevante causada por el turismo. El municipio de Amanalco resalta por la alta organización de los ejidatarios, ya que estos además de tener los comisariados ejidales correspondientes, se han organizado para realizar el aprovechamiento de los recursos naturales que les corresponden. En cambio, Valle de Bravo, cuenta con una mayor extensión de propiedad privada sobre todo para fines turísticos, esto ha afectado a comuneros y ejidatarios que a pesar de esta situación se han mantenido como un grupo de características específicas.

La población flotante (6,500 ha aprox. según INEGI) es muy importante para el municipio de Valle de Bravo, ya que ha determinado cambios sociales, económicos, políticos y ambientales significativos. Desde la construcción de la presa en 1947, el municipio se ha convertido en un centro turístico dedicado al sector terciario. Aunque esta población tiene permanencia inconstante en el municipio, su incidencia en varios aspectos de la vida de la comunidad es innegable por lo que sería importante volver a valorar su significado en términos de la distribución y apropiación del territorio.

Los grupos étnicos forman un conjunto de personas con particularidades, insertas en una sociedad más amplia, y cuya cultura es diferente a esta última. Los territorios indígenas y las cuencas hidrológicas aledañas al Valle de México han sido afectados por las políticas de trasvase de agua. Ello ha venido en detrimento de las condiciones ambientales, sociales, culturales y económicas de los pueblos originarios y de la región; y contribuido al surgimiento de numerosos problemas por el agua y numerosas resistencias campesinas cada vez más organizadas. En el 2003, los indígenas de la región mazahua, aledaña al sistema Cutzamala, se organizaron para la Defensa de los Derechos Humanos de sus Pueblos y demandaron: la restitución de sus tierras y aguas; la realización del Plan Integral de desarrollo sustentable para la región, con el objetivo de detener el deterioro de la cuenca, la pobreza y el daño ambiental, social y cultural, la dotación adecuada de agua en calidad y cantidad para todas las comunidades de la región, y el reconocimiento inmediato del agua como derecho humano para todos (Caso trasvase de agua hacia la cuenca del Valle de México, 2006). Por estas razones, los grupos indígenas tienen cada vez más divergencia con la autoridad en sus tres niveles de gobierno en la apropiación de la tierra y el manejo de los recursos

naturales, como lo demuestra el caso de la Lucha del Frente Mazahua (Gómez, 2010)

4.3. *Diseño de Muestreo*

En este trabajo se tomó el inventario de CONAGUA de 243 manantiales como base para realizar un trabajo de campo en 15 sitios o zonas de descarga y se tomó en cuenta una base de datos con un esfuerzo de muestreo previo por el Laboratorio de Química del Instituto de Geografía con 13 sitios. El presente trabajo consideró 26 manantiales y dos muestras en la Presa Valle de Bravo, resaltando que dentro de los 28 puntos muestreados, 7 manantiales están ubicados fuera de la subcuenca para darle una aproximación regional al estudio. Se realizó un análisis de la geología del sitio con la finalidad de caracterizar químicamente todo el sistema de flujo de agua subterránea.

A continuación para facilitar la identificación de los 28 sitios de muestro se agrega una tabla con los nombre de las localidades de cada manantial y su respectivo acrónimo.

Tabla 2. Relación de acrónimos empleados para las localidades de estudio.

LOCALIDAD	ACRÓNIMO	LOCALIDAD	ACRÓNIMO
Agua Blanca	AB1	Presa de Valle de Bravo	Presa 2
Las Lagrimas	LAG1	Providencia	PROV1
Los Cajones	Cajón-1	Hacienda Nueva	HCD2
Granja de la Cruz	G.Cruz	Ejido San Bartola	SB3
Los Adobes	ADOBES	Presa Corral de Piedra	LV4
Rancho Feshi	RANFE	El Potrero	POT5
San Bartolo 1	SB1	San Lucas	SLUC6
San Bartolo 2	SB2	San Juan Amanalco	SJUA7
Cruz de Piedra	CP1	Pinal del Marquezado	PM8
Rancho el Manzano	MANZ10	Monte Viejo	MV9
San Gabriel Ixtla 14	SGI142007	San Francisco Oxtotiplan	SP010
San Gabriel Ixtla 15	SGI152007	La Peña	LP12
Ixtapan de la Sal	Ixtapan	San Antonio Albardanes	SAA11
Presa de Valle de Bravo	Presa 1	San Bartola	SB13

4.3.1 Medición de parámetros físicos y químicos

Se realizaron dos salidas de campo. La primera, en el mes de noviembre del 2007, y la segunda en el mes de agosto del 2008. Los manantiales en donde se realizó la toma de muestras no estaban entubados para poder extraer el agua, y por lo tanto obtener la información físico-química necesaria. En la primera salida se registraron cuatro manantiales, y en la segunda se muestrearon otros nueve, dando un total de 13 manantiales muestreados y analizados y muestreados. Por otra parte, se realizaron mediciones directas de propiedades del agua: temperatura, pH, Eh, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto en 28 sitios, las cuales cambian en el corto plazo cuando el agua se deja expuesta a las condiciones ambientales. Estas características no podrían ser medidas en el laboratorio debido a que no son representativas de las condiciones del campo. Moore (2002), sugiere que es importante que los muestreos se realicen en donde el agua corre libremente y estar lo más cerca posible de la salida del agua, para el control de calidad de la información. La temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto fueron medidos por dos aparatos portátiles digitales, uno modelo PC18 y el otro Ox25, ambos marca Conductronic. Los electrodos de estos aparatos deben estar en una celda de aislamiento en la que se limita la interacción con la atmósfera, previniendo de cambios que puedan afectar las mediciones finales.

En cada sitio de muestreo se realizó una calibración del aparato mediante una corrección basada en el cambio de presión barométrica y en la altitud a la que se encontraba el sitio. Para calcular el dato de alcalinidad, en el lugar de estudio se realizó la titulación de un volumen de agua de 20 mL en un matraz Erlenmeyer de

50 mL. Aplicando el método de titulación de Gran (1952) se incorporó gradualmente ácido sulfúrico de normalidad conocida (0.16N) por medio de un titulador digital hasta que el agua alcanzó un pH aproximado de 3.0. Para cada incorporación de ácido se midió el cambio en el pH de la solución, anotando cuidadosamente los datos, mismos que después sirvieron para calcular la cantidad de bicarbonatos por medio del método de Gran (1952).

En cada manantial elegido se tomaron cuatro botellas de agua para conocer las características del agua subterránea. Las botellas eran nuevas, de polietileno, para un volumen de 60 ml y fueron etiquetadas en cada manantial con tinta indeleble, llevando un control sistemático. Estas botellas se lavaron en el laboratorio antes de salir al campo con una solución débil de ácido clorhídrico y agua destilada y en el manantial se enjuagaron tres veces con el agua del lugar con la finalidad de controlar la calidad del agua y no alterar los resultados. Se tomó una botella para aniones (F^- , Cl^- , I^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , HCO_3^- , CO_3^{2-}) y una botella para isótopos estables ($\delta^{18}O$ y δ^2H), cuidando que no existieran burbujas en el interior del envase que podrían haber alterado la química original del agua. Posteriormente se llenó una botella con agua filtrada con una membrana de acetato de celulosa de $0.45\mu m$ para el análisis de los metales (Li^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Sr^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , NH_4^+ , Ba^{2+} , Zn^{2+}) que se acidificó con 13 gotas de ácido nítrico de alta pureza; al igual que las botellas anteriores, en la de metales se requirió eliminar las burbujas que puedan quedar en el recipiente. También se tomó una botella testigo que puede llegar a ser utilizada en caso de presentarse algún contratiempo. Las botellas de cada manantial se mantuvieron a $4^\circ C$ hasta que llegaron al laboratorio.

4.3.2 Trabajo en laboratorio

Una vez en laboratorio se realizó otra titulación para corroborar los datos obtenidos en el campo. Este método es llamado viraje de indicador de pH (Mackereth *et al.*, 1978), de acuerdo al cual se colocó un volumen de 80 mL de la muestra, se le añadieron 4 ó 5 gotas de verde de bromocresol. La muestra adquirió entonces, un color azul verdoso y se comenzó la titulación agregando el ácido sulfúrico (H₂SO₄) de 0.02N con un titulador hasta que la solución se volvió rosa pálido. Se apuntó el volumen de ácido utilizado para el viraje de color. Y se calculó la alcalinidad de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$ALC\ TOTAL = (V_A N_A \times 1000) / V_M$$

Donde: V_A- El volumen de ácido utilizado durante la titulación

N_A- La normalidad del ácido

V_M- El volumen inicial de la muestra

Las botellas fueron enviadas a dos laboratorios: uno para el análisis de isótopos en Arizona, USA (Departamento de Geosciences) y el segundo en Ontario, Canadá (Activation Laboratories Ltd) que se encarga del análisis de metales y cationes. Los resultados se aprecian en el Anexo II.

Con los datos tomados en campo para la titulación se construyeron las gráficas para determinar el punto de equivalencia (Anexo I), que es el punto al cual el ácido y la solución se encuentran en equilibrio y se utiliza para calcular indirectamente el volumen total de ácido usado en la titulación (Butturini *et al.*, 2009). Una vez obtenido el punto de equivalencia se aplica la siguiente fórmula:

$$ALC\ TOTAL = [(Peq \times N_A) \times 50\ 000] / V_M$$

Donde: Peq- Es el punto de equivalencia

4.4 Análisis de datos

Para procesar los datos químicos y físicos obtenidos se utilizaron como apoyo tres softwares que están diseñados para análisis de agua:

1. AquaChem V4.0- Es utilizado para realizar gráficas y modelar a partir de datos químicos y físicos del agua. El programa facilita el cálculo de Índices de Saturación y porcentajes de error. También genera diagramas de Piper y Durov. Facilita la comparación y clasificación de agua de diferente procedencia.
2. Hidrogeoquim- Sirve para hacer Modelos Tillman-Trombe, cálculo de conductividad teórica por dos modelos y cálculos de relaciones iónicas.
3. PHREEQC- Es para el cálculo de especies y reacciones hidrogeoquímicas involucradas en la evolución del agua subterránea (Parkhurst, 1985). Con este programa de cómputo se calcularon los índices de saturación a partir de un archivo de entrada de AquaChem.

Los tres programas en conjunto permitieron clasificar las muestras en grupos de acuerdo con sus características afines. Se realizó el cálculo de las altitudes de recarga a partir de las concentraciones isotópicas. Después se realizó un breve análisis de la litología donde se distribuyen las muestras, determinamos con qué tipo de roca estuvo en contacto el agua y el basamento impermeable. De

acuerdo con las curvas de nivel y la altitud de recarga calculada se indicó la dirección desde donde fluye la recarga.

Se solicitó a la CONAFOR por medio del Instituto de Acceso a la Información (IFAI) lo relativo al ejercicio del PSAH en el territorio nacional la cual fue atendida a través de la solicitud 1616100004213. La información fue procesada y analizada con parámetros geográficos y económicos para identificar a los beneficiarios dentro de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco. A partir de lo cual fue posible ubicar espacialmente a los predios beneficiados por el PSAH.

5. RESULTADOS

5.1 Parámetros medidos en campo

En este apartado se analizan los parámetros físicos, a partir de los cuales se elaboraron mapas que representan la tendencia de los datos. Los valores de temperatura asociados a los manantiales muestreados en Valle de Bravo fluctúan entre 10.2°C y 21.4°C, mientras que el manantial geotermal de Ixtapan de la Sal situado fuera de la subcuenca tuvo una temperatura de 36°C (Tabla 2, Figura 6). La temperatura del agua es considerada como un trazador natural donde las temperaturas frías corresponden a flujos someros y las temperaturas calientes a flujos profundos (Edmunds *et al.*, 2002; Van- Lanen y Carrillo-Rivera, 1998). El promedio de temperatura de los manantiales de Valle de Bravo es de 13.6°C, lo cual sugiere que son flujos someros. Cabe señalar que los datos de temperatura registrados en Ixtapan de la Sal son elevados debido a que es un manantial geotermal, por lo que corresponde a un flujo profundo.

Tabla 3. Parámetros medidos en campo en los manantiales de la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco. En cada localidad se midió temperatura (°C), pH, conductividad eléctrica (CE) y Eh.

LOCALIDAD(por acrónimo)	COORDENADAS		DATOS DE CAMPO			
	X	Y	TEMP. °C	pH	CE	Eh (mV)
AB1	411310	2109277	10.2	6.35	92.0	40
LAG1	410881	2105227	12.0	6.04	72.0	49
Cajón-1	407495	2106720	16.8	5.47	46.0	68
G.Cruz	385248	2126485	15.4	6.52	190.0	70
ADOBES	385359	2126237	13.3	6.82	108.0	13
RANFE	395447	2129034	13.3	6.81	108.0	12
SB1	388462	2128494	14.7	6.13	194.0	83
SB2	388403	2128344	14.8	6.42	153.0	24
CP1	398392	2124961	10.7	5.93	112.0	56
MANZ10	393441	2129660	13.7	6.62	119.0	27
SGI142007	381715	2129527	18.2	5.61	279.0	78
SGI152007	381447	2129581	18.8	7.05	202.0	3
Ixtapan	428792.34	2083590.22	36.9	6.61	*	23
Presa1	381939	2120471	21.2	7.37	*	21
Presa2	379404	2121572	21.4	7.48	*	26
PROV	390068	2135378	14.4	6.33	64.0	26
HCDA2	400400	2126638	11.4	7.05	125.0	-18
SB3	401778	2125432	11.0	7.02	7.0	-29
LV4	399481	2123995	12.0	6.89	89.0	-4
POT5	395902	2130405	13.8	7.35	120.0	-37
SLUC6	391173	2128246	14.2	6.54	97.0	32
SJUA7	395088	2136667	13.1	7.05	590.0	-9
PM8	374250	2114355	15.5	6.32	93.0	53
MV9	407106	2120141	15.2	6.89	190.0	1
SPO10	405166	2119804	13.9	6.77	147.0	6
SAA11	401545	2113760	14.8	6.34	135.0	8
LP12	394967	2128115	14.7	6.76	115.0	6
SB13	389449	2127518	13.2	7.03	96.7	-17

*Durante las visitas a la Presa de Valle de Bravo y de Ixtapan de la Sal el conductímetro se descompuso por lo que fue imposible tomar los datos correspondientes.

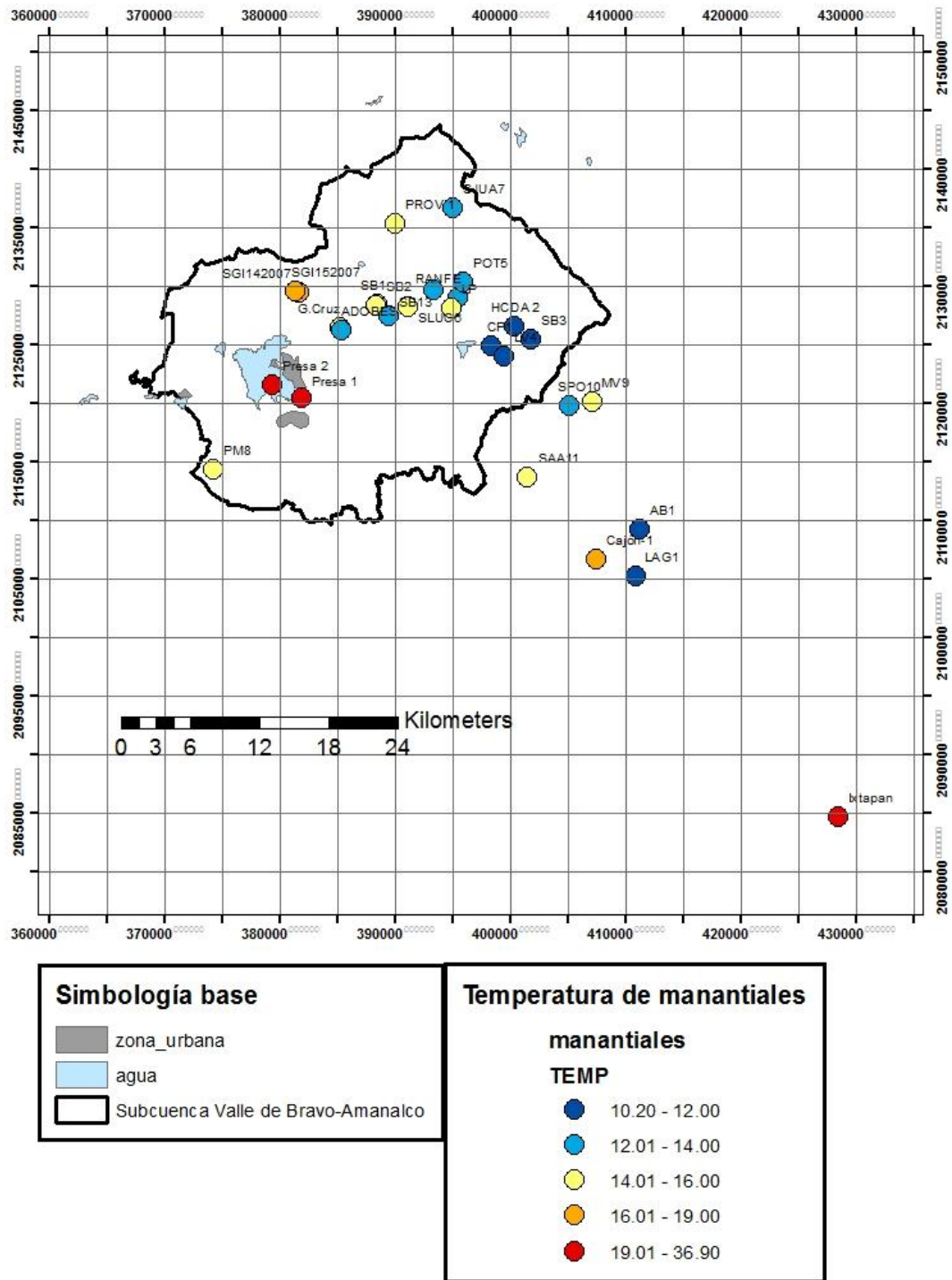


Figura 6. Distribución de los valores de temperatura de manantiales dentro de la subcuenca Valle de Bravo - Amanalco, categorizados en rangos percentiles.

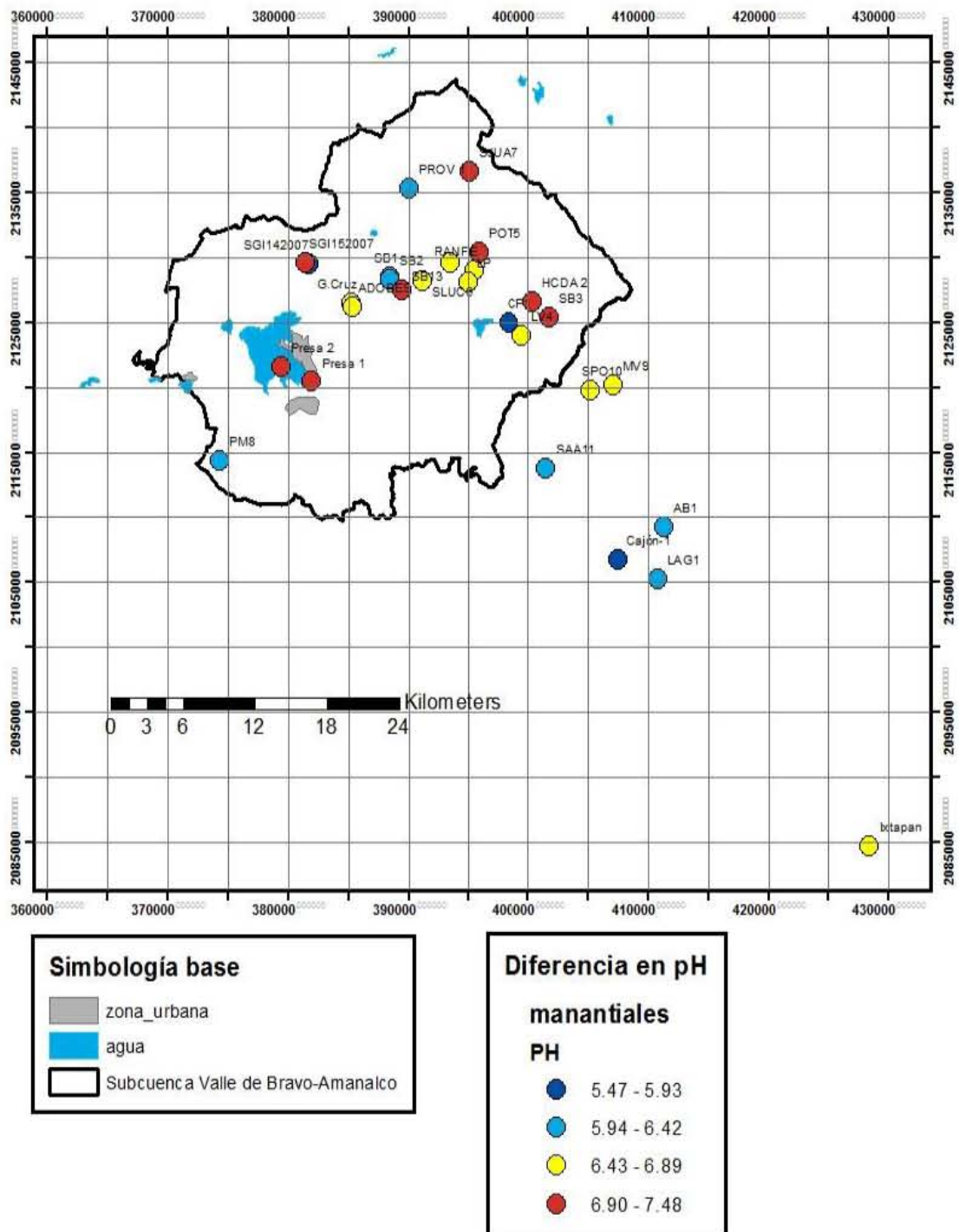


Figura 7. Distribución de los valores de pH de manantiales dentro de la Subcuenca Valle de Bravo - Amanalco, categorizados en rangos percentiles.

Los valores de pH asociados con los manantiales muestreados en la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco fluctúan entre 5.47 a 7.35 (Tabla 2) con un promedio de 6.5. En la Figura 7 se muestra la distribución espacial de los valores de pH. Es importante resaltar que el agua de lluvia tiene valores de pH que tienden a ser ácidos porque fluctúan entre 4.5 y 5.6. Por otro lado, los valores de pH registrados para los 25 manantiales tienden a la acidez o a la neutralidad, esto nos indica que el agua de los manantiales probablemente tiene su origen en el agua de la lluvia.

5.2 Clasificación de tipos de agua

A partir de los datos de laboratorio y su análisis químicos se caracterizaron los tipos de agua que se encontraron en los manantiales de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco, y se clasificaron en grupos. Se realizó un análisis de confiabilidad a partir de los iones mayores (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , $\text{Na}+\text{K}$, Mg^{2+}). Se calculó el balance de electro-neutralidad, utilizando la concentración en miliequivalentes de aniones y cationes de las muestras para obtener el porcentaje de error de cada una de ellas (Freeze & Cherry, 1979), para lo cual se empleó la siguiente fórmula (meq/L):

$$\% \text{ERROR} = \frac{(\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}) 100\%}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}}$$

Todas las muestras presentaron un error menor al 10%, por lo que se considera que los datos están dentro de un porcentaje de error aceptable y se encuentran dentro de un rango de precisión requerida para ser usados como datos confiables. Se llevaron a cabo diversos análisis para la clasificación de los tipos de agua, sin embargo, el factor que tuvo mayor relevancia fue el porcentaje de iones

mayores contenido en las muestras (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , $\text{Na}+\text{K}$, Mg^{2+}). Aunque cabe resaltar que en todos los manantiales muestreados dentro de la Subcuenca Valle de Bravo, se encontró una mayor proporción en el contenido de bicarbonatos con respecto a cloruros y sulfuros.

El análisis de aniones (Tabla 3) en conjunto con el diagrama de Piper (Figura 8) y de Stiff confirman que el agua subterránea colectada es agua bicarbonatada. El agua bicarbonatada según la teoría de Toth corresponde a flujos de índole local, ya que, en el agua predomina el HCO_3^- más que el SO_4^{2-} ó Cl^- . Aunque 5 manantiales (San Bartolo 1, San Bartolo 2, San Gabriel Ixtla 14, San Gabriel Ixtla 15 y San Antonio Albarranes) presentan una cantidad de SO_4^{2-} que parece indicar un mayor trayecto de recorrido.

Tabla 4. Clasificación de agua de acuerdo a su concentración de seis iones. Los iones predominantes determinan la familia en que se agrupa el agua de cada manantial. Resalta la dominancia del ión HCO_3^- seguido por $\text{Na}+\text{K}$. Se identificaron datos anormales de SO_4^{2-} en 5 localidades.

LOCALIDAD	% HCO_3^-	% SO_4^{2-}	%Cl	% $\text{Na}+\text{K}$	%Ca	%Mg	IONES PREDOMINANTES	FAMILIA
Granja de la Cruz	87.23	7.17	5.60	44.34	31.32	24.34	HCO_3^- - NNaNa > Ca > Mg	Bicarbonatada
Los Adobes	90.67	3.70	5.63	45.84	29.07	25.08	HCO_3^- - Na > Ca > Mg	Bicarbonatada
Rancho Feshi	97.07	1.42	1.51	38.80	37.58	23.62	HCO_3^- - Na > Ca > Mg	Bicarbonatada Mixta
San Bartolo 1	79.05	13.68	7.27	46.34	32.53	21.13	HCO_3^- - Na > Ca > Mg	Bicarbonatada Mixta
San Bartolo 2	80.03	11.17	8.81	46.47	33.44	20.10	HCO_3^- - Na > Ca > Mg	Bicarbonatada Mixta
Rancho el Manzano	93.50	3.15	3.35	39.60	34.96	25.44	HCO_3^- - Na > Ca > Mg	Bicarbonatada Mixta
Hacienda Nueva	99.46	0.38	0.16	40.42	38.61	20.97	HCO_3^- - Na > Ca > Mg	Bicarbonatada Mixta
Presa Cor. de Piedra	97.65	1.44	0.90	39.85	34.55	25.60	HCO_3^- - Na > Ca > Mg	Bicarbonatada Mixta
San Lucas	95.23	1.63	3.14	42.12	34.81	23.07	HCO_3^- - Na > Ca > Mg	Bicarbonatada Mixta
Mesón Viejo	94.86	2.60	2.54	36.88	34.77	28.35	HCO_3^- - Na > Ca > Mg	Bicarbonatada Mixta
San Gabriel Ixtla 15	73.11	15.92	10.97	31.89	38.96	29.15	HCO_3^- - Ca > Na > Mg	Bicarbonatada Mixta
Cruz de Piedra	92.43	3.34	4.23	33.52	41.01	25.47	HCO_3^- - Ca > Na > Mg	Bicarbonatada Mixta
Presa de V. de Bravo	90.59	4.27	5.14	38.53	39.86	21.62	HCO_3^- - Ca > Na > Mg	Bicarbonatada Mixta
Presa de V. de Bravo	91.44	3.88	4.68	38.75	40.06	21.19	HCO_3^- - Ca > Na > Mg	Bicarbonatada Mixta
Providencia	95.03	3.16	1.81	36.45	42.14	21.41	HCO_3^- - Ca > Na > Mg	Bicarbonatada Mixta
Pinal del Marquezado	98.47	0.35	1.18	25.06	40.77	34.17	HCO_3^- - Ca > Mg > Na	Bicarbonatada Mixta
San Fco. Oxtotilpan	96.89	1.50	1.61	38.77	39.62	21.61	HCO_3^- - Ca > Na > Mg	Bicarbonatada Mixta
Agua Blanca	92.13	2.48	5.39	62.55	24.72	12.73	HCO_3^- - Na > Ca	Bicarbonatada Mixta
Las Lagrimas	90.25	3.74	6.01	60.23	29.23	10.54	HCO_3^- - Na > Ca	Bicarbonatada Mixta
San Bartolo	96.38	0.45	3.17	55.97	26.04	17.99	HCO_3^- - Na > Ca	Bicarbonatada Mixta
Ejido San Bartolo Amanalco	95.17	3.30	1.53	43.63	36.86	19.52	HCO_3^- - Na > Ca	Bicarbonatada Mixta
El Potrero	97.75	0.58	1.66	49.01	35.01	15.98	HCO_3^- - Na > Ca	Bicarbonatada
San Juan Amanalco	92.09	5.52	2.39	58.28	26.36	15.36	HCO_3^- - Na > Ca	Bicarbonatada Mixta
La Peña	99.02	0.41	0.57	40.04	40.24	19.72	HCO_3^- - Ca > Na	Bicarbonatada Mixta
Los Cajones	85.51	10.23	4.26	42.80	44.42	12.78	HCO_3^- - Ca > Na	Bicarbonatada Mixta
San Gabriel Ixtla 14	59.02	22.67	18.31	26.68	41.39	31.94	HCO_3^- > SO_4^{2-} - Ca > Mg > Na	Bicarbonatada Mixta
San Ant. Albarranes	66.12	29.84	4.03	40.46	39.40	20.14	HCO_3^- > SO_4^{2-} - Na > Ca > Mg	Bicarbonatada Mixta
Ixtapan de la Sal	34.99	19.0	46.0	78.09	17.9	4.00	Cl - HCO_3^- - Na	Clorurada Sódica

Con excepción del manantial ubicado en Ixtapan de la Sal, en el cual predomina el anión cloruro y su química corresponde a un flujo de índole regional que se encuentra fuera de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco. En cuanto a los cationes la mayoría del agua es mixta, es decir que no prevalecen ni el sodio-potasio (Na+K), ni el magnesio (Mg) ni el calcio (Ca). Sólo en cuatro manantiales se estableció una predominancia del Na+K cuyo contenido era mayor al 50%: Agua Blanca (62.5%), Las Lagrimas (60.2%), San Juan Amanalco (58.2%) y San Bartolo (55.9%) (Tabla 3). Los análisis químicos de elementos y compuestos seleccionados permitieron dividir a los manantiales en cuatro grupos de agua, los cuáles son:

Grupo 1. (equivalente al grupo C en la Figura 8). En este grupo se encuentra la mayoría de los manantiales muestreados: Granja de la Cruz, los Adobes, Rancho Feshi, Rancho el Manzano, Hacienda Nueva, Presa Corral de Piedra, San Lucas, Mesón Viejo, Cruz de Piedra, Providencia, Pinal del Marquezado, San Francisco Oxtotiplan, Ejido San Bartolo Amanalco, El Potrero, San Juan Amanalco, La Peña, Los Cajones y los puntos que corresponden a la Presa de Valle de Bravo. Su contenido de HCO_3^- (85.51% a 97.75%), es mayor que los SO_4^{2-} ó Cl^- . Corresponden a flujos locales con agua rica en bicarbonato con valores de temperatura que van desde 10.7°C a los 16.8°C, lo que sugiere flujos someros con poco recorrido.

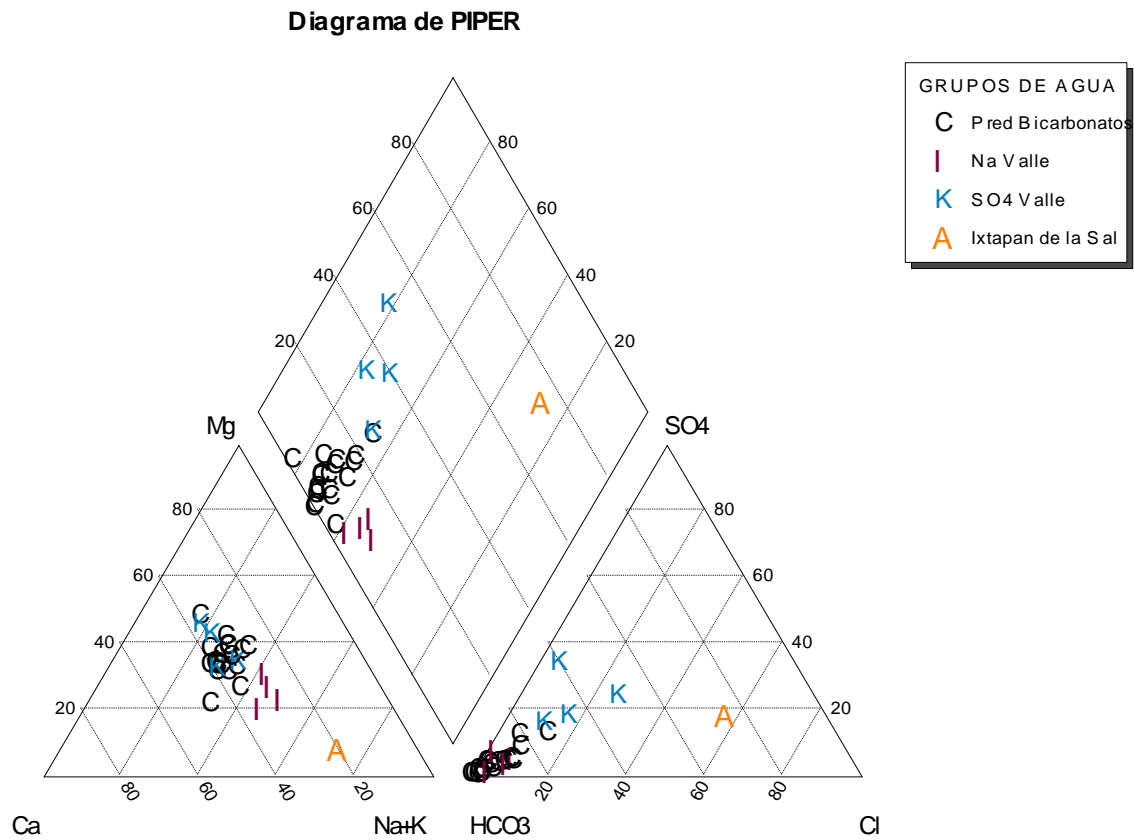


Figura 8. Diagrama de Piper, mostrando la clasificación de las colectas en cuatro grupos de agua a partir de la relación de Cationes (Ca⁺, Mg²⁺ y Na+K) y Aniones (HCO₃⁻, Cl⁻ y SO₄²⁻).

Grupo 2. (equivalente al grupo I en la Figura 8). Este grupo alberga cuatro manantiales: Las Lagrimas, Agua Blanca, San Juan y San Bartolo. Con alto contenido de bicarbonatos (90.2%-96.38%) y una cantidad importante de Na+K (55.9%-62.5%), por arriba de 50% con respecto a los otros cationes (Ca⁺ y Mg⁺). Como se mencionó anteriormente el contenido de cationes varía más fácilmente que el de aniones. Una posible explicación para el alto porcentaje de Na+K en los cuatro manantiales (LAG1, AB1, SJUA7 y SB13) podría ser las unidades rocosas por las que transitó el agua. Su temperatura va de 10.2°C a 13.1°C Considerando su

contenido de bicarbonatos y su temperatura se sugiere que son flujos locales de carácter somero con poco recorrido.

Grupo 3. (equivalente al grupo K en la figura 8). Este grupo tiene cinco manantiales: San Bartolo 1, San Bartolo 2, San Gabriel Ixtla 14, San Gabriel Ixtla 15 y San Antonio Albarranes, considerados de flujo local por sus valores de HCO_3^- (59.02% al 80.03%); sin embargo, contienen una cantidad de SO_4^{2-} que los caracteriza (11.1% al 29.8%) y que puede sugerir un recorrido ligeramente más largo del agua por la roca con respecto a los demás manantiales muestreados. Las temperaturas del agua en este grupo van de 14.7°C a 18.8°C.

Grupo 4. (equivalente al grupo A en la Figura 8). El manantial ubicado en Ixtapan de la Sal conforma una cuarta división, ya que es un manantial completamente diferente a todos los demás, tiene altas concentraciones de Cl^- (46%) y de $\text{Na}+\text{K}$ (78%). Debido principalmente al contenido de Cl^- y a la temperatura de 36.9°C que indica una gran distancia de recorrido este manantial es considerado de flujo regional (Figura 9).

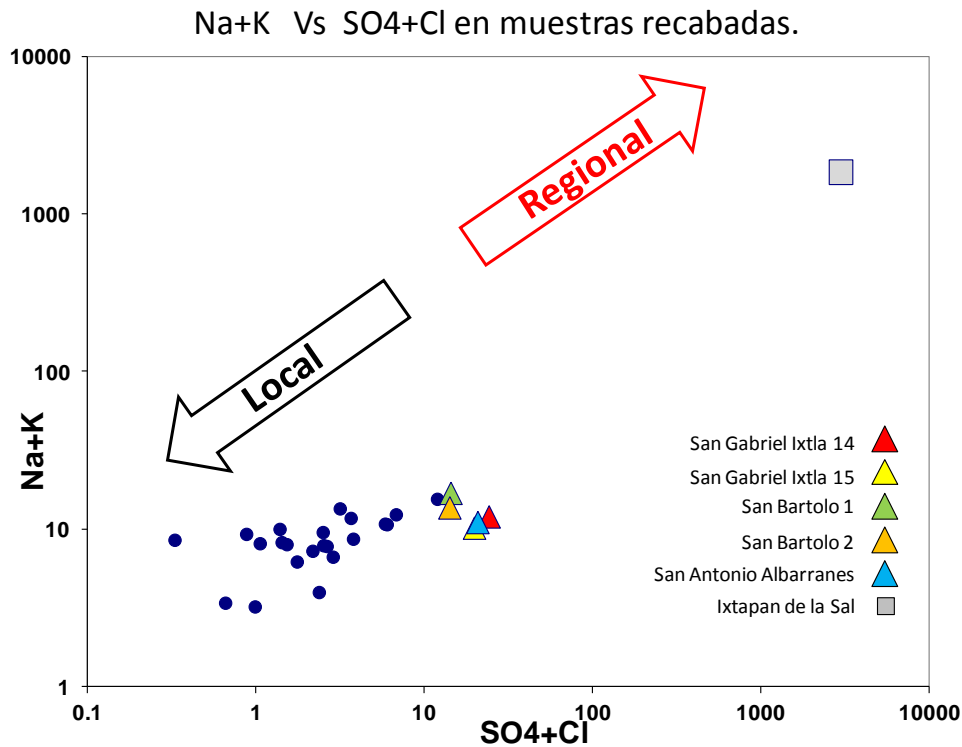


Figura 9. Relación Na+K vs SO₄+Cl, indicando los manantiales que tienen más recorrido y han estado en contacto con la roca durante más tiempo.

5.3 Isótopos y cálculo de la altitud de recarga

Los isótopos estables utilizados en este análisis ($\delta^{18}O$ y δ^2H) sirven para establecer el origen y los procesos en los que el agua estuvo involucrada, pero principalmente son utilizados para establecer la altitud topográfica en donde se llevó a cabo la recarga de agua. Los resultados del contenido de isótopos obtenidos en el laboratorio (Tabla 4) permitieron calcular el promedio isotópico para la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco de $\langle\delta^{18}O\rangle = -9.3\text{‰}$ y para el $\langle\delta^2H\rangle = -65\text{‰}$. Valores que en general denotan una precipitación en posición topográfica alta, retirada de la línea de costa, y con escasa influencia de la evaporación. Se aprecia una diferencia marcada entre los datos colectados en la Presa Valle de Bravo y los manantiales.

Tabla 5. Concentraciones isotópicas para los manantiales muestreados.

Muestra	Concentración	
	$\delta^{18}O$ ‰	δD ‰
AB1	-10.2	-71
LAG1	-9.5	-64
Cajón-1	-10.1	-71
G.Cruz	-9.7	-67
ADOBES	-9.6	-68
RANFE	-10.0	-70
SB1	-9.4	-65
SB2	-9.5	-66
CP1	-9.6	-66
MANZ10	-10.2	-70
SGI142007	-9.1	-65
SGI152007	-8.8	-64
Ixtapan	-8.9	-69
Presa 1	-7.2	-54
Presa 2	-7.1	-54
PROV1	-9.4	-68
HCDA2	-10.9	-72
SB3	-10.8	-71
LV4	-10.0	-67
POT5	-9.8	-71
SLUC6	-10.1	-70
SJUA7	-9.4	-65
PM8	-9.1	-63
MV9	-10.5	-72
SP010	-9.1	-65
SAA11	-9.3	-64
LP12	-9.7	-68
SB13	-9.0	-66

En la Figura 10 podemos observar que la tendencia de los datos es similar al de la Línea Meteorológica Global (LMG) establecida por Craig, lo cual da certidumbre sobre el origen meteórico del agua muestreada. Excepto por los puntos Presa 1 y Presa 2 que se encuentran en un extremo por debajo incluso de la Línea Meteorológica Local (LML) y que fueron afectados por la evaporación y probablemente están mezclados con agua cuyo origen es diferente a la precipitación. El punto de Ixtapan de la Sal tiene una tendencia diferente y muestra un trayecto típico de un agua geotermal.

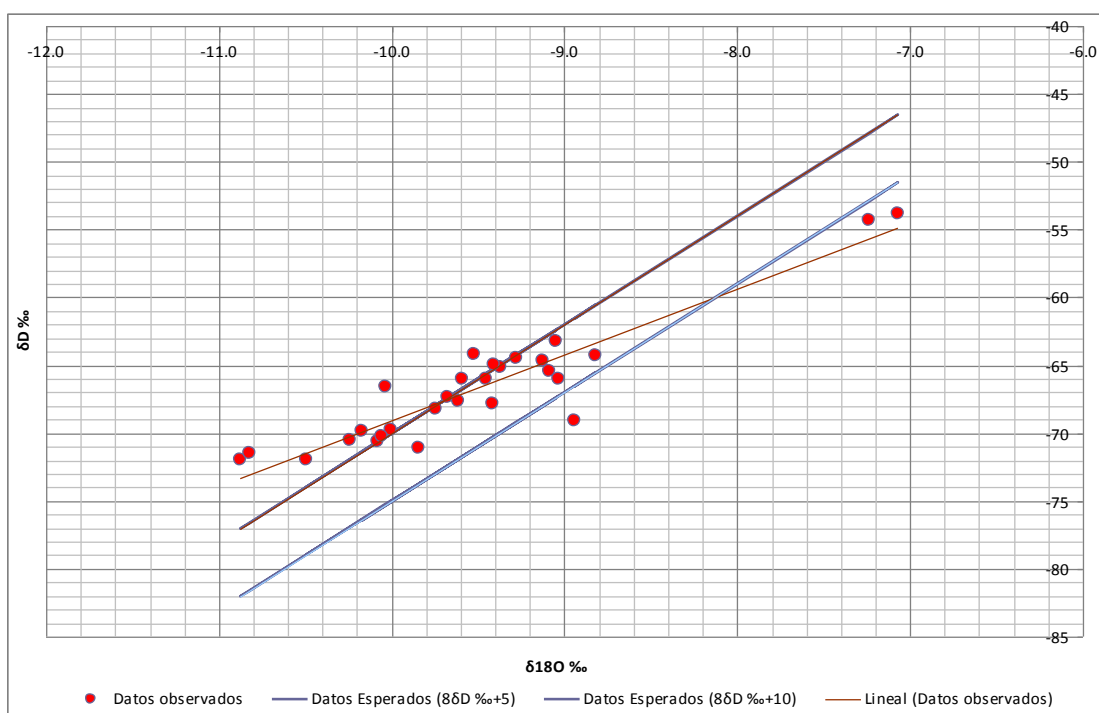


Figura 10. Comparación de datos con respecto a la LMG (Datos Esperados ($\delta D \text{ ‰} + 5$) y LML. (Datos Esperados +10), donde los datos observados se comportan más semejantemente a la LMG (Datos Esperados ($\delta D \text{ ‰} + 5$)).

Cortés y Durazo (2001) establecieron que la concentración isotópica media del ^{18}O ‰ de la precipitación en la región montañosa de la parte central de México sólo depende de la elevación topográfica de la zona donde se produce.

Determinaron que la concentración de $\delta^{18}\text{O}$ disminuye en una relación de -2.13‰ por cada kilómetro de elevación. Propusieron la siguiente ecuación que permite calcular la concentración de $\delta^{18}\text{O}$ para sitios ubicados en el centro de México:

$$\delta^{18}\text{O}^*(X, Y) = 2.13 Z(X, Y) - 3.2$$

$$4.72 \geq Z > 0$$

donde:

$\delta^{18}\text{O}^*$ - concentración isotópica de ^{18}O de la precipitación (‰ versus Viena-SMOW)

Z – elevación altitudinal sobre el nivel del mar.

(X, Y) – referencias geográficas

Tabla 6. Valores de altitud de recarga para los manantiales muestreados. Los resultados de la aplicación de la fórmula apuntan a altitudes de recarga que se encuentran localizadas entre los 2700 y los 3300 metros sobre el nivel del mar.

Muestra	Altitud descarga (msnm)	$\delta^{18}O$	Altitud calculada de recarga (kmsnm)
Agua Blanca	3156	-10.2	3.3
Las Lagrimas	2967	-9.5	3.0
Los Cajones	3000	-10.1	3.2
Granja de la Cruz	2043	-9.7	3.0
Los Adobes	2045	-9.6	3.0
Rancho Feshi	2435	-10.0	3.2
San Bartolo 1	2250	-9.4	2.9
San Bartolo 2	2250	-9.5	2.9
Cruz de Piedra	2862	-9.6	3.0
Rancho el Manzano	2354	-10.2	3.3
San Gabriel Ixtla 14	2153	-9.1	2.8
San Gabriel Ixtla 15	2140	-8.8	2.6
Providencia	2660	-9.4	2.9
Hacienda Nueva	2837	-10.9	3.6
Ejido San Bartolo Ama	2877	-10.8	3.6
Presa Corral de Piedra	2839	-10.0	3.2
El Potrero	2500	-9.8	3.1
San Lucas	2375	-10.1	3.2
San Juan Amanalco	2657	-9.4	2.9
El Pinal del Marq	2346	-9.1	2.7
Mesón Viejo	2834	-10.5	3.4
San Francisco Oxtó	2660	-9.1	2.8
San Antonio Albar	2460	-9.3	2.9
La Peña	2475	-9.7	3.1
San Bartolo	2337	-9.0	2.7

Los resultados del calculo altitudinal de la precipitación para los manantiales muestreados son expuestos en la Tabla 5 y nos dan indicios de las zonas de recarga. Se registran valores altitudinales de los manantiales para zonas de descarga (Figura 11) y zonas de recarga.

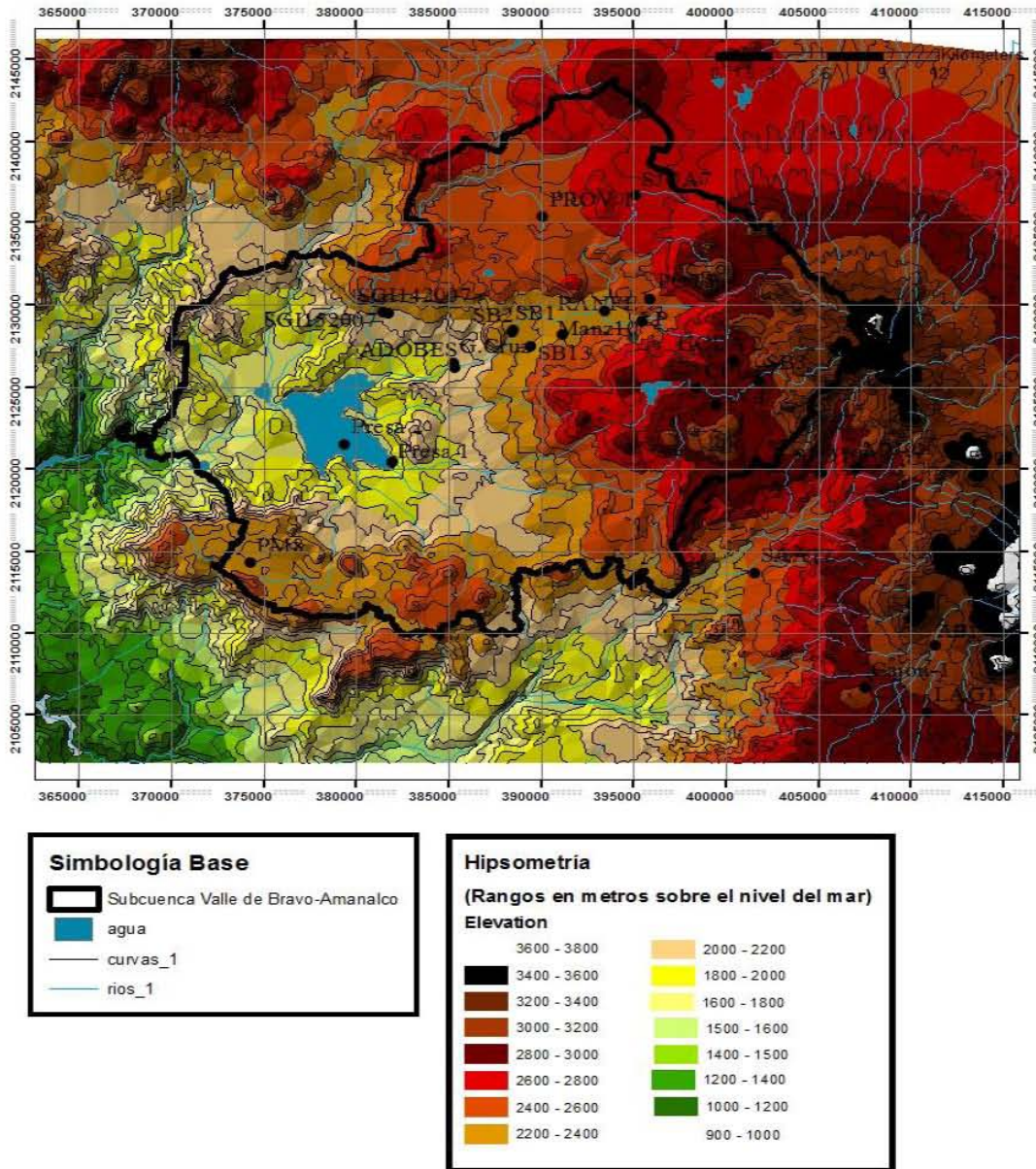


Figura 11. Representación cartográfica de la distribución de manantiales analizados, respecto de a los rangos altitudinales encontrados en la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco.

Esto excluyendo a los puntos Presa 1, Presa 2 e Ixtapan de la Sal para la cual aplicamos el método de Durazo (2007), que desarrolló específicamente para agua afectada por la evaporación, y que consiste en recalcular el valor de $\delta^{18}O$ a partir de la pendiente de la línea de evaporación. Con $m= 4.8467$ se vuelve a calcular el valor de $\delta^{18}O$ y se sustituye en la primera ecuación dando las siguientes altitudes (Tabla 6). Aunque se aplicó la corrección calculando la concentración del isótopo para LMG y LML, es importante resaltar que los datos de la altitud de precipitación obtenidos con la LMG son correctos para aquellas muestras que no fueron afectadas por evaporación.

Tabla 7. Valores de altitud de recarga para las muestras de origen no meteórico.

Muestra	Altitud (msnm)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	M	LMG		LML	
					P. inferida	Elev. Prec.	P. inferida	Elev. Prec.
Ixtapan de la Sal	1875	-8.9	-69	4.8467	-11.314	3.8	-12.067	4.2
Presa de Valle de B.	1823	-7.2	-54	4.8467	-9.266	2.8	-9.985	3.2
Presa de Valle de B.	1803	-7.1	-54	4.8467	-9.374	2.9	-10.095	3.2

5.4 Litología

Las condiciones geológicas locales están marcadas por la convergencia de tres unidades tectónicas con características específicas: Terreno Guerrero, los conjuntos Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico Transmexicano, en esta porción el terreno Guerrero se divide en los sub-terrenos Arcelia y Teloloapan. Las rocas más antiguas que afloran en el área son del Mesozoico, en los alrededores de la presa (Elías *et al.*, 1993; Morán, 1994).

La Figura 12 muestra que los manantiales se encuentran en cinco afloramientos de roca: diez en basalto, seis en andesita, cinco en brecha basáltica, dos en aluvi3n y dos en toba (Tabla 7). De acuerdo a la informaci3n de temperatura y clasificaci3n de agua, los manantiales muestreados circularon por profundidades someras como se representa en la Figura 13; tienen un periodo corto de recorrido principalmente por basaltos y andesitas. A continuaci3n se describe la litología más reciente y de mayor interés para el estudio (periodo Terciario y Cuaternario).

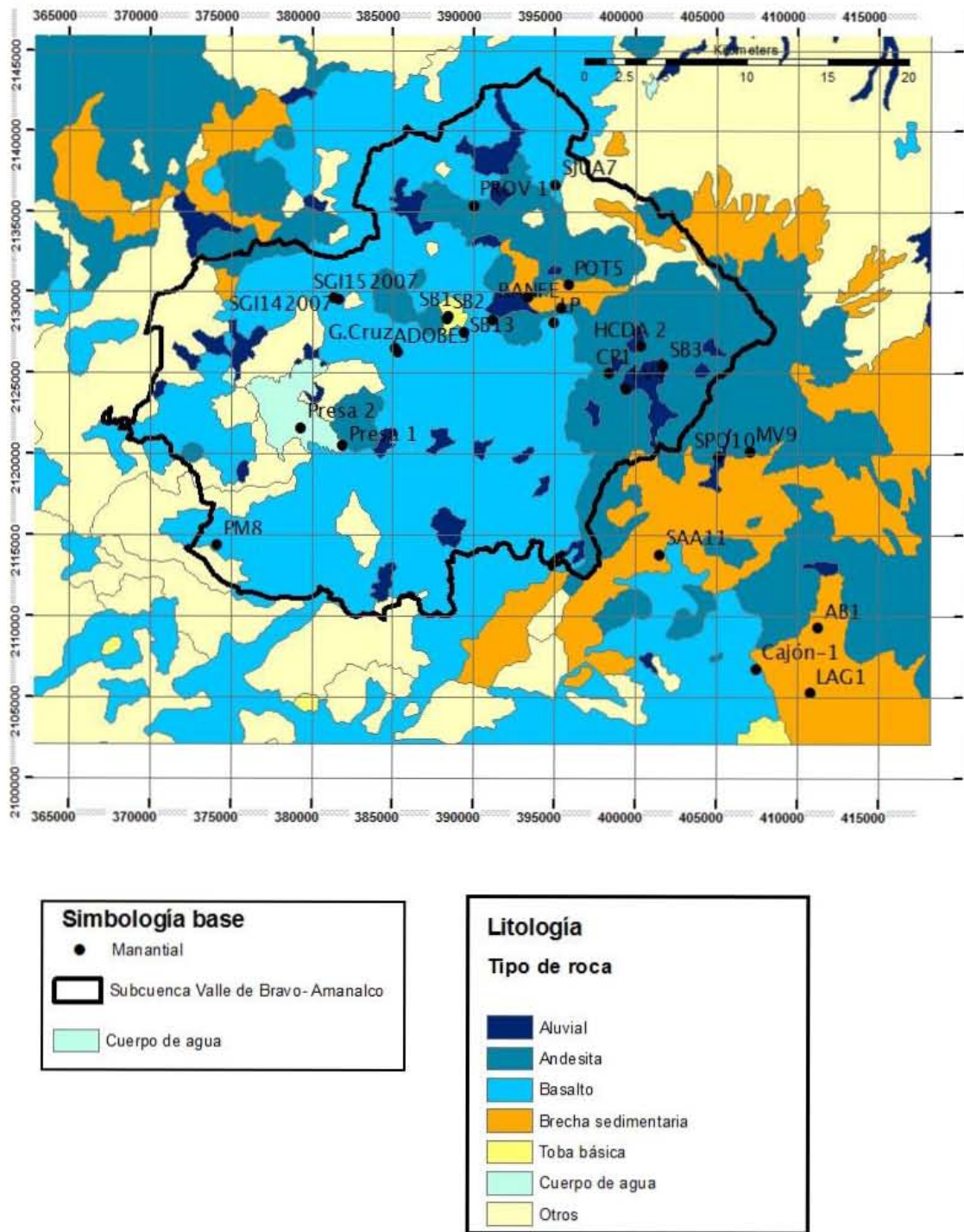


Figura 12. Representación cartográfica de la distribución de los manantiales analizados, respecto de la litología de la subcuenca Valle de Bravo Amanalco

Tabla 8. Tipo de roca que corresponde a cada manantial.

Tipo de roca	Basalto	Andesita	Brecha basáltica	Aluvial	Toba
	Adobes	PROV1	POT5	LV4	SB1
	G de Cruz	CP1	Manz10	SPO10	SB2
	SGI142007	RANFE	SAA11		
	SGI152007	SB3	AB1		
	SB13	HCD2	LAG1		
	SLUC16	MV9			
	LP				
	PM8				
	Cajón-1				
	SJUA7				

Durante el Terciario se registró actividad volcánica en la región, el material de edad Miocénico-Pliocénica emitido sepulta en algunos sitios a roca del Mesozoico; sus afloramientos se ubican en el límite de la Presa Valle de Bravo y alrededor de ésta. Las unidades terciarias consisten en roca continental de la Formación Balsas, constituida de conglomerados poligmítico con fragmentos de caliza, arenisca, esquisto y pizarra, e intercalaciones de arenisca, limonita y toba en estratos delgados, así como la Formación Tizapotla compuesta de brecha volcánica riolítica, toba lítica soldada, riolita con textura esfereulítica, toba riolítica y dacítica, así como toba fina de composición riolítica a dacítica (IGECEM, 1993).

El Cuaternario está representado por depósito de lahar que consta de fragmentos mal clasificados de andesita y basalto, sobre los que descansan los depósitos piroclásticos, representados por toba basáltica, ambas de edad Pleistoceno. Durante el Holoceno se deposita la unidad de basalto de olivino y/o piroxeno, andesita basáltica o basalto andesítico y una serie de conos cineríticos constituidos de brecha volcánica tipo escoria y lapilli de composición basáltica, así

como estructuras dómicas de andesítica porfídica. Se tienen depósitos de talud derivados de procesos erosivos, constituidos por fragmentos angulosos mal clasificados cuyo tamaño varía de bloque a grava, finalmente se tienen depósitos aluviales con arena, arcilla, grava y conglomerado no consolidado (IGECEM,1993; INE, 2006).

Se trazó un transecto en la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco y de acuerdo con esta información, valores de altitud de descarga y recarga así como la columna estratigráfica se generó una representación de la circulación de los manantiales por la roca (Figura 13), confirmando su recorrido por basaltos y andesitas principalmente.

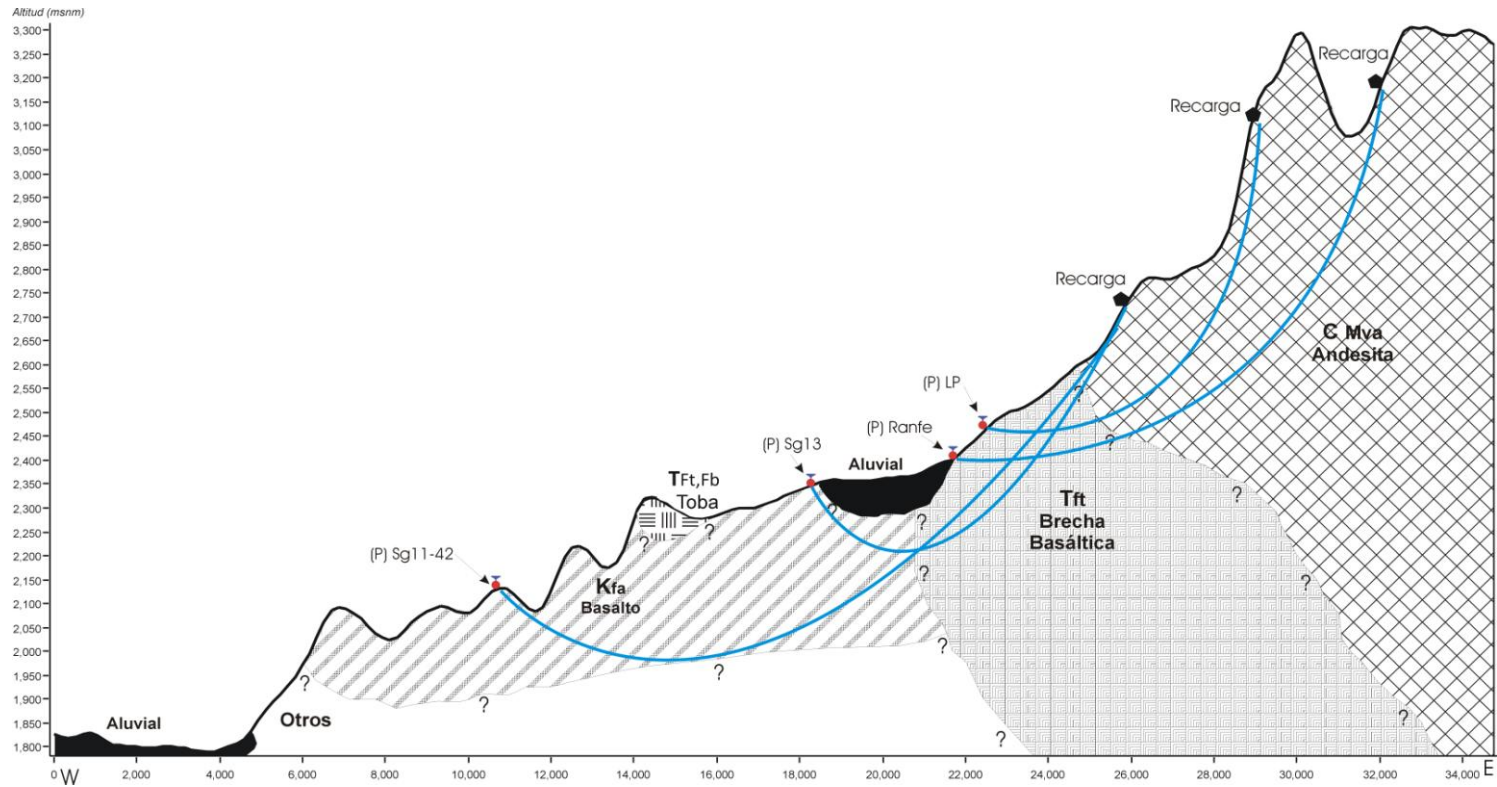


Figura 13. Perfil basado en un corte transversal con orientación Oeste-Este de la zona de estudio. Muestra los recorridos de circulación de algunos manantiales muestreados.

5.5 Análisis de aplicación del PSAH en la Subcuenca Valle de Bravo-Amanalco

Derivado del análisis de los registros de la CONAFOR se identificó que dentro de los límites de la Subcuenca Valle de Bravo–Amanalco el ejercicio del PSAH en el periodo 2003-2011, ha implicado un total de 17 beneficiarios con una superficie acumulada de 5,235 hectáreas y un presupuesto total asignado de \$10´406,899, en la siguiente tabla se ilustra la distribución de dichos recursos en el periodo de reporte.

Tabla 9. Síntesis de los 17 beneficiarios inscritos en el PSAH en el periodo 2003-20011 dentro de la subcuenca Valle de Bravo Amanalco. Fuente IFAI- CONAFOR Solicitud 1616100004213.

Año	Folio de solicitud	Municipio	Predio/Ejido	Superficie inscrita al PSAH (ha)	Monto total asignado a cinco años (MXN)
2003		Amanalco	Ejido El Capulín		\$858,360.00
2004	IV-15-004-04	Temascaltepec	Ejido La		\$670,500.00
2006	S20061500191	Almoloya de	Ejido El Estanco		\$83,985.38
2006	S20061500177	Amanalco	Ejido Agua		\$420,339.51
2006	S20061500181	Amanalco	Ejido San		421,439.88
2008	S20081500495	Temascaltepec	Ejido San Mateo		\$203,010.55
2008	S20081500046	Valle de Bravo	Los Saucos Y La		\$449,644.50
2009	S20091500005	Amanalco	Bienes		\$468,540.00
2009	S20091500024	Amanalco	Bienes		\$963,120.14
2009	S20091500159	Temascaltepec	Ejido La		\$899,908.89
2010	S201015000184	Almoloya De	Ejido Arroyo		\$994,467.70
2010	S201015000323	Amanalco	Ejido San		\$578,548.01
2010	S201015000106	Amanalco	Ejido El Capulin		\$1,378,083.97
2010	S201015000324	Amanalco	Ejido Agua		\$830,781.65
2011	S201115000238	Amanalco	Ejido Agua		\$463,315.80
2011	S201115000216	Amanalco	Ejido San		\$449,353.70
2011	S201115000401	Valle De Bravo	Fracción Del		\$273,500.00
Acumulado				5,235.64	\$10,406,899.68
				Superficie inscrita al PSAH (ha)	Monto total (pesos mexicanos) asignado a cinco años

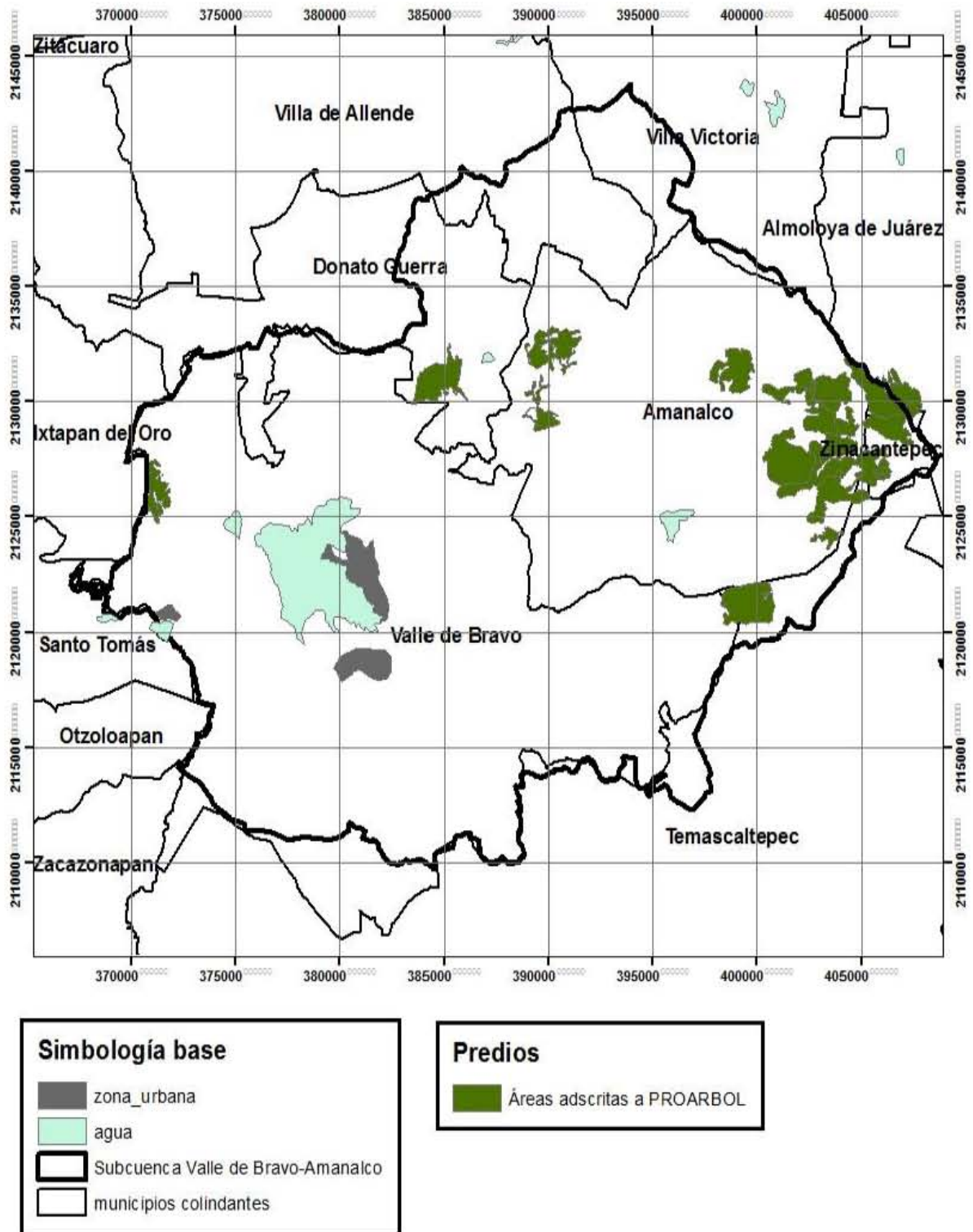


Figura 14. Distribución espacial de áreas adscritas a PROARBOL en período 2003-2011; 17 predios beneficiarios por el PSAH dentro de la subcuenca.

Resalta que de los 17 beneficiarios, 15 de ellos corresponden a modalidades colectivas de tenencia de la tierra (13 ejidos y dos terrenos comunales); mientras que otro dos beneficiarios corresponden a propiedades privadas. Por ello, la distribución de superficies resulta en un 94.2% del total inscritas dentro del PSAH en la subcuenca corresponde a modalidades colectivas de tenencia de la tierra y sólo el 5.8% corresponde a modalidades privadas. De acuerdo también con los registros de la CONAFOR, y como resultado de la aplicación de las Reglas de Operación que año con año son publicadas en el Diario Oficial de la Federación, el 100% de las áreas inscritas en el PSAH dentro de la subcuenca, corresponden a áreas con uso de suelo forestal (Figura 14).

Con el propósito de realizar el ejercicio del PSAH dentro de la subcuenca para analizar el desempeño nacional se procedió a un análisis comparativo de superficies inscritas y montos asignados en el periodo de referencia 2003 – 2011. La asignación de recursos a la subcuenca es en promedio el 0.195% del total nacional, en el ejercicio anual el periodo con mayor asignación a la subcuenca fue 2010 con \$3'781,881 equivalente al 0.339% del ejercicio nacional para dicho año. En cuanto a la superficie inscrita al PSAH dentro de la subcuenca se observa el mismo comportamiento, siendo que el promedio del ejercicio del PSAH en el periodo 2003-2011 corresponde al 0.254% de la superficie nacional e igualmente en 2010 se registró un máximo con 1,764.04 hectáreas inscritas equivalentes al 0.532% del ejercicio total nacional.

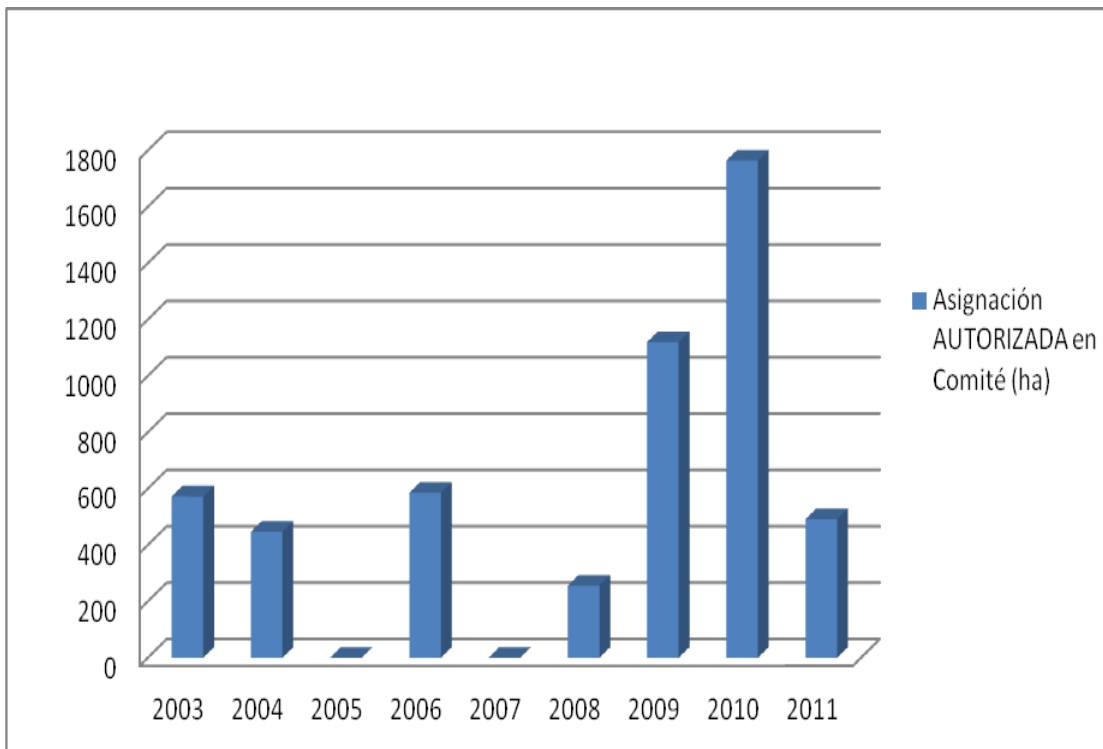


Figura 15. Superficie inscrita (hectáreas) en el PSAH 2003 - 2011 dentro del área de la subcuenca Valle de Bravo - Amanalco (fuente CONAFOR – IFAI, 2013).

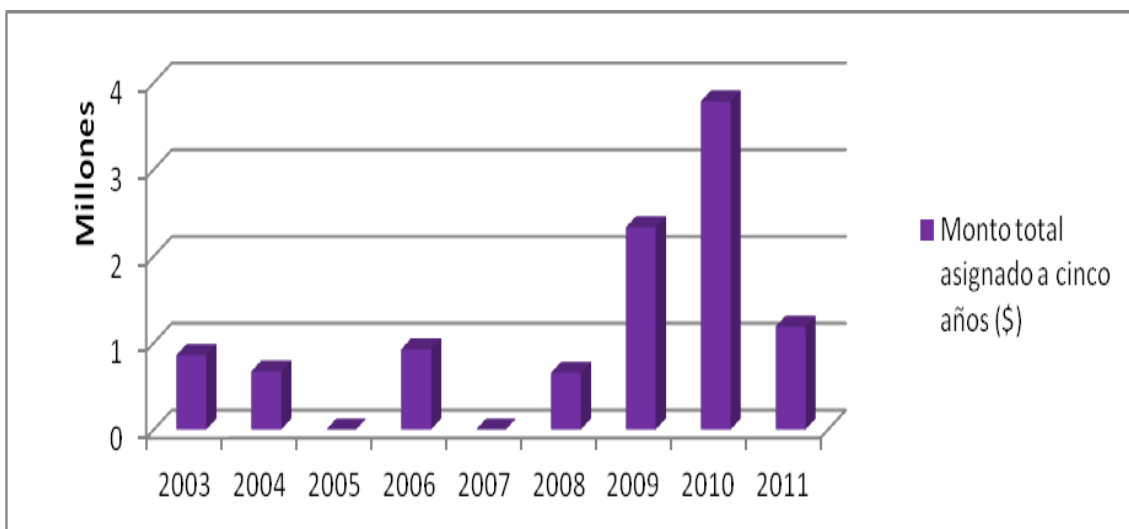


Figura 16. Monto total asignado a cinco años (\$ millones pesos mexicanos) por el PSAH 2003 - 2011 dentro del área de la subcuenca Valle de Bravo - Amanalco (fuente CONAFOR – IFAI, 2013).

5.6 Comparación altitudinal del PSAH respecto a zonas de recarga

A partir del cálculo de las altitudes de recarga se realizó una comparación estadística con las altitudes promedio de los predios beneficiados por el PSAH a través de una prueba estadística T, obteniendo un alta similitud ($p=0.95533295$).

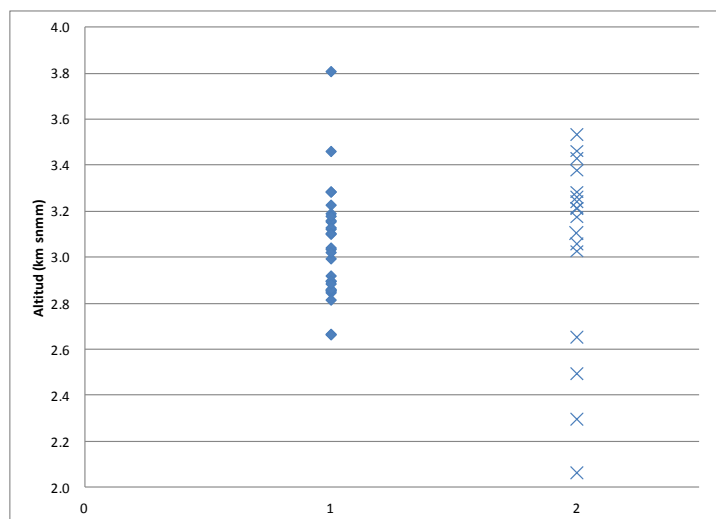


Figura 17. Distribución de altitudes de recarga (Grupo1) respecto a altitudes promedio de predios beneficiados por PSAH (Grupo 2).

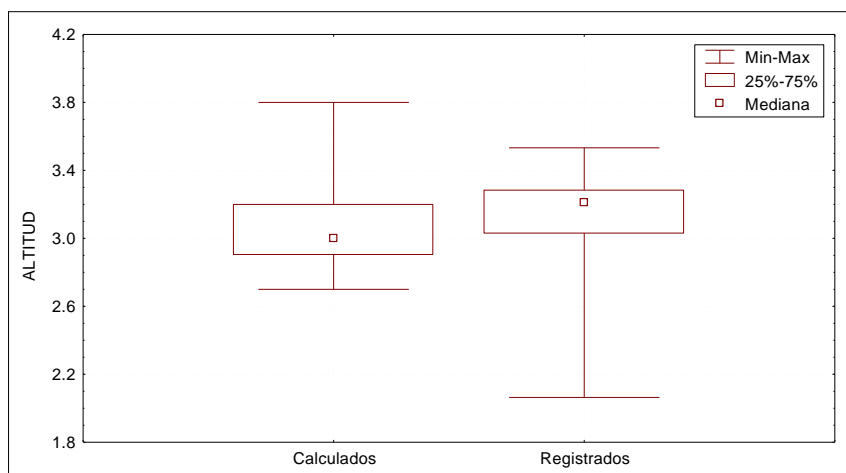


Figura 18. Comparación estadística t de altitudes de recarga(calculados) respecto a altitudes de los predios beneficiados por PSAH (registrados), se observa alta similitud en a distribución media de los puntos.

A partir de la información de altitudes de recarga y la de CONAFOR (2013) se realizó una comparación geográfica entre las zonas recarga y los predios beneficiados por el PSAH. Los 17 predios beneficiados se encuentran en los municipios Amanalco, Donato Guerra, Valle de Bravo, Temascaltepec y Almoloya de Juárez. En la Figura 19 se observa que de los 17 predios elegidos dentro del PSAH 14 coinciden y están dentro del polígono de las zonas de recarga.

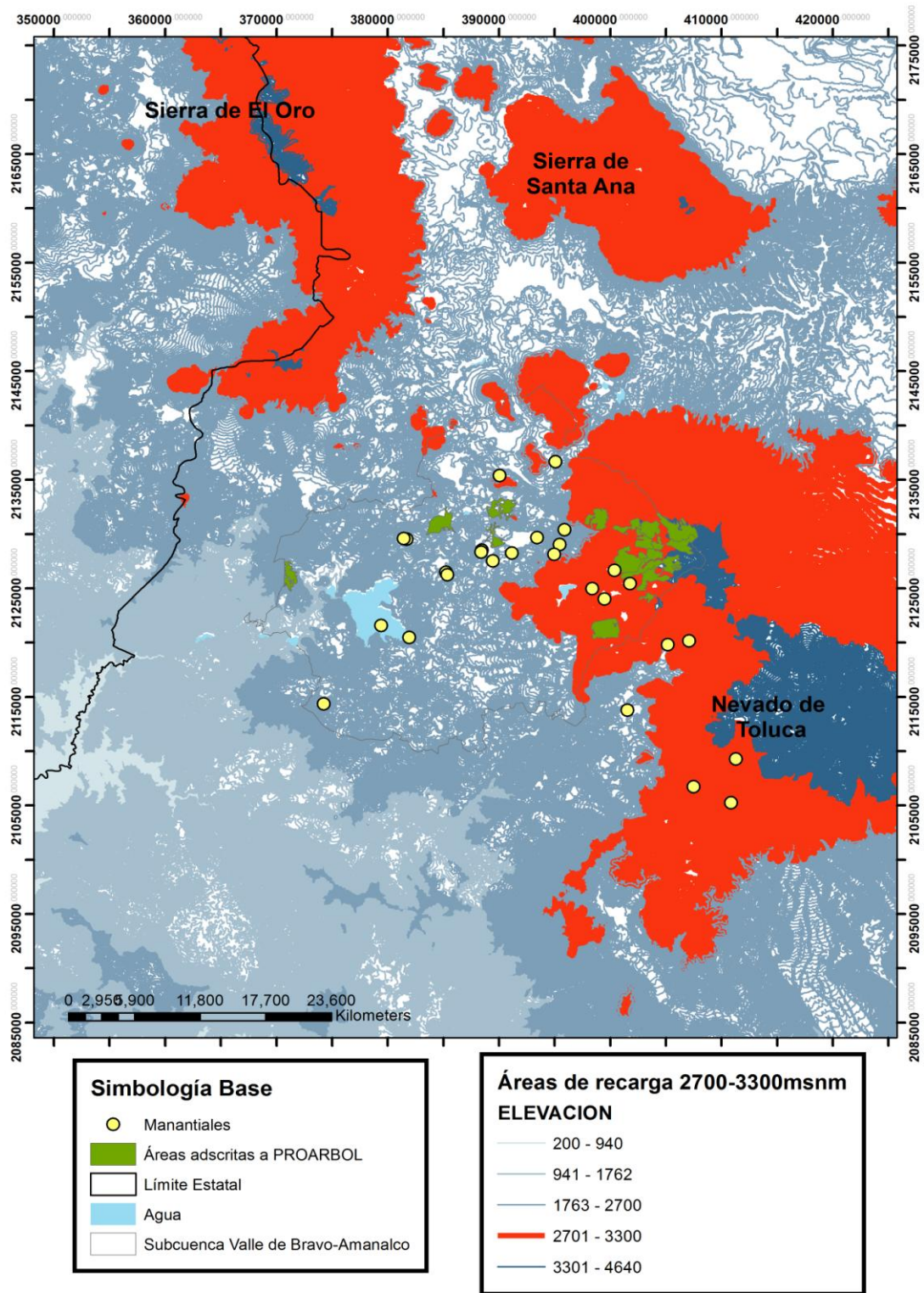


Figura 19. Coincidencia de las zonas de recarga y los predios beneficiarios del PSAH. Se observa que la mayoría de los beneficiarios se localizan por encima de 2700 msnm dentro de las áreas de recarga. Se identifican cuatro beneficiarios por debajo de dicha cota.

7. DISCUSIÓN

7.1. Flujos de agua subterránea

El muestreo del agua de los 28 sitios, 20 dentro de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco y 8 fuera de ella permiten tener una aproximación regional del funcionamiento de flujo de agua subterránea. Los valores de temperatura y HCO_3^- de los manantiales muestreados de acuerdo con el esquema de Toth (2000) señalan flujos locales. Asimismo, el análisis de los principales iones indican que el comportamiento del $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ y $\text{HCO}_3\text{-Na+K}$ corresponde a flujos de agua que circulan a poca profundidad, son someros, tienen poco contenido de sólidos totales disueltos, se recargan en una zona aledaña y dependen completamente de la precipitación para mantener su flujo. Estos resultados son consistentes con otros estudios, que han reportado que la mayor parte del agua subterránea se debe a la infiltración de agua de lluvia, aunque también hay agua subterránea debida a otros fenómenos como el magmatismo y el vulcanismo (aguas juveniles), pero su cantidad en la subcuenca no es detectable en relación con las que provienen de la infiltración.

En este trabajo el análisis de los isótopos ayudó a identificar zonas de recarga asociadas principalmente a altitudes de 2,800 msnm a 3,600 msnm. Resultados similares han sido reportados en la zona de Valle de Monte Alegre, Ajusco, la cual es una zona de captación natural de agua con ocho manantiales perennes ubicados a más de 3000 m de altitud (Morales-Luis *et al.*, 2010). Las zonas de recarga frecuentemente coinciden con sitios altos que tienen un buen estado de conservación de la vegetación. Esto es debido probablemente a la inaccesibilidad de las zonas y a que es difícil desarrollar actividades agropecuarias

en pendientes prolongadas y a elevada altitud, como ocurre en la subcuenca del presente estudio. En la evaluación de los flujos de agua subterránea es importante considerar cual es su relación con la precipitación local, si se toma en cuenta que la mayor parte del agua del subsuelo proviene de la infiltración de la lluvia. Morales-Luis *et al* (2010) han propuesto que las zonas altas lluviosas constituyen áreas de alimentación del agua subterránea, por lo que en las zonas áridas el agua subterránea no proviene de la infiltración directa, procede de regiones lejanas o cercanas, en donde la lluvia se infiltra y llega lentamente hasta ellas.

Por lo que se refiere a las condiciones hidrogeológicas, la forma del terreno (geomorfología) es importante porque el agua tendrá mayor o menor oportunidad de infiltrarse dependiendo de las propiedades hidráulicas de los materiales aflorantes (porosidad, conductividad hidráulica y pendiente) y, además porque el agua infiltrada va a seguir una trayectoria determinada por la distribución de la conductividad hidráulica. Así, en una región montañosa la pendiente del terreno por una parte, dará más facilidad al agua para escurrir que para infiltrarse y, por otra, el agua infiltrada que llegue a la zona de saturación tendrá un movimiento hacia las zonas más bajas en donde el movimiento del agua será más lento. Existen cuatro manantiales con un mayor contenido de Na+K posiblemente su paso por andesita esté relacionado con su contenido de Na+K (Cortés 1989). A partir de la descripción litológica se comprobó que están ubicados en dos tipos de roca; Agua Blanca y Las Lágrimas en brecha basáltica; San Juan y San Bartolo se encuentran en basalto. Otros cinco manantiales con tienen un contenido anómalo de SO₄, esto sugiere un recorrido del agua ligeramente mayor a la de los demás manantiales. El manantial ubicado en Ixtapan de Sal proviene de un flujo de carácter regional cuya zona de recarga no pudo ser identificada en este trabajo. Sin embargo, no se

descarta la posibilidad de que los manantiales con SO_4 podrían ser una fase en la evolución química del agua entre los de comportamiento $\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$ y los de comportamiento Cl-Na .

7.2. Agua subterránea como servicio ecosistémico

Existe una fuerte dependencia de la sociedad con el agua subterránea; esta es la principal fuente de provisión para el servicio ecosistémico del agua debido a varios factores. Por ejemplo, es asequible todo el año; se encuentra en todo el país incluso en las zonas desérticas; implica construcción mínima de infraestructura, no hay pérdidas por evaporación, la calidad del agua varía poco y puede controlarse (Glennon, 2002). Los servicios ecosistémicos son suministrados a diferentes escalas espaciales y temporales, lo que tiene un fuerte impacto sobre la valoración que se les asigna (Hein *et al.*, 2006). El agua subterránea se caracteriza por una mayor constancia en calidad y suministro con respecto a la superficial, esto hace que la escala temporal y espacial de funcionamiento del agua superficial y subterránea generalmente no coincida. De manera general los manantiales de índole local pueden equipararse a los efímeros ya que dependen de procesos estacionales, en particular de la lluvia, si hay un cambio drástico en el régimen de precipitación estos manantiales podrían desaparecer en años subsecuentes, aunque el cambio no será inmediato como se podría observar en una corriente efímera superficial. En el caso del agua subterránea, el suministro del servicio ecosistémico y los beneficios obtenidos de él no están sincronizados, hay un retraso de tiempo entre la alteración del proceso (por causa natural o humana) y la percepción de cambios en el suministro de agua. Estos retrasos en la respuesta

generan una falsa sensación de seguridad en el suministro del servicio (Maass *et al.*, 2005). La variación en flujos locales tiene impacto en una escala espacial local y en una escala temporal corta (Turner *et al.*, 2000; Limburg *et al.*, 2002;).

El diseño del muestreo del agua de la presente investigación tiene como objetivo acercarse a una aproximación regional de la calidad fisicoquímica de los flujos de agua subterránea y del potencial por pago de servicios ambientales. Las zonas de recarga determinadas en este trabajo no solamente son importantes para mantener flujos locales o efímeros dentro de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco, sino que se estima que tienen una función de recarga para flujos intermedios o regionales que hasta ahora no han sido identificados. Los flujos locales pueden servir como indicadores para todo el sistema de flujo subterráneo en cuanto a la disponibilidad en el sistema. El polígono marcado en el área de la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco es importante como zona de recarga y en la provisión de agua, tiene como beneficiarios directos a los habitantes de la subcuenca. En una escala socioeconómica afecta por lo menos a tres municipios (Valle de Bravo, Amanalco y Temascaltepec), aunque desconocemos los detalles de beneficios que está aportando en otros sistemas socioeconómicos como el Estado de México y otras entidades de la República Mexicana. A partir de lo anterior es más claro que el servicio ecosistémico de recarga abarca varias escalas espaciales, temporales y gubernamentales (Figura 20). El hecho de que los beneficios completos que suministra la zona de recarga en la subcuenca permanezcan desconocidos indica que el muestreo y evaluación de los datos debe abarcar un territorio de mayor extensión.

Por otra parte, se han realizado otros estudios (INE, 2009 y Bunge *et al.*, 2012) en el sistema Cutzamala sobre agua superficial implementado el balance

hídrico. En particular para la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco se encontró que existe un excedente de agua durante todo el año, excepto en la época de estiaje cuando la subcuenca presenta déficit. Bunge (2012) también menciona que en el 2009 se reportaron mínimos históricos en los niveles de la presa Valle de Bravo, es interesante hacer notar que durante ese año la precipitación anual registrada es de 894.9 mm, un valor mayor al promedio de precipitaciones anuales registradas a partir del 1969. Para interpretar las variaciones en los niveles de la presa es necesario analizar si la presa tiene aporte de agua subterránea, porque dicho aporte puede estar desfasado con el aporte de agua superficial cuya percepción es inmediata. Si se presume, que durante el año 2009, no se realizó una exportación de agua de la presa de forma extraordinaria, entonces estudios detallados del comportamiento químico, isotópico e hidrológico del agua en la presa pueden aportar información sobre la importancia del agua subterránea en el volumen total que está siendo almacenado.

Se ha sugerido que la producción de agua puede ser medida cuantitativamente utilizando el balance hídrico. Ya que es una herramienta que se utiliza para calcular las entradas y salidas de agua de un sistema. Aunque existen varias limitaciones inherentes al uso del balance hídrico como: 1. Existencia de estaciones meteorológicas cercanas al sitio de estudio que disponga de datos continuos en el tiempo de precipitación. 2. Hasta ahora no se han podido hacer generalizaciones aceptadas científicamente sobre la relación de la infiltración y la evapotranspiración al tipo y distribución de la vegetación. Se ha destacado que en este tema hay una gran variabilidad de información (Brown *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2001). 3. Una vez que el agua pasó por todo el proceso de infiltración, incorporándose a un flujo subterráneo, la vegetación puede estar aprovechando el

agua y menguando su cantidad. El agua aprovechada por la vegetación es un dato que ha sido estimado (lo que se ha llamado gasto ecológico). Por consiguiente esto da como resultado que no se tenga un dato preciso de la cantidad de agua que se puede aprovechar, y que el balance hídrico arroje valores con errores de magnitudes significativas para el adecuado manejo del agua.

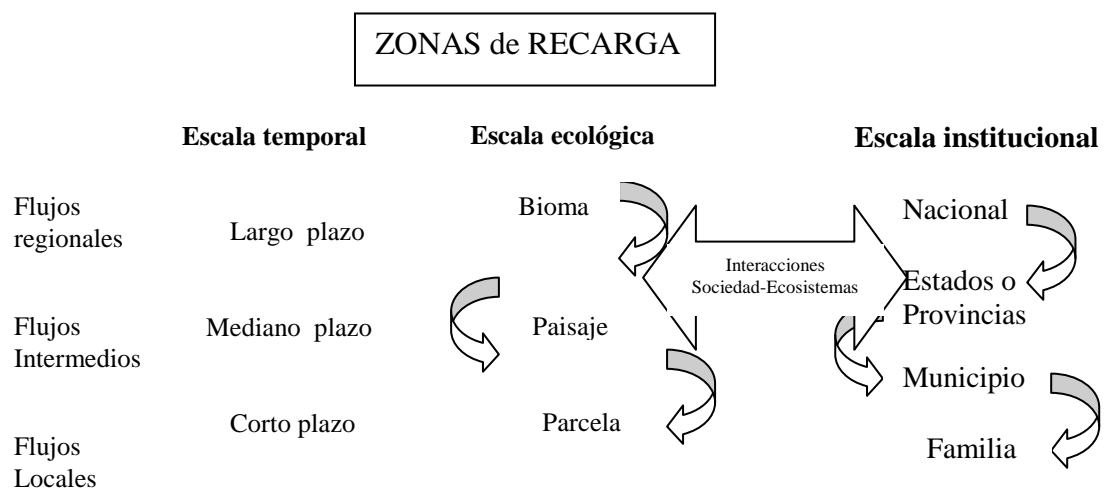


Figura 20. Mostrando la escala a la que funciona los sistemas de flujo subterráneos. (Modificado de Leemans, 2000.)

El Programa de Pago por Servicios Hidrológicos (PSAH) beneficia 17 predios en el área de estudio, de los cuales 14 coinciden con el polígono de recarga delimitado en este trabajo. Desde la perspectiva de la aplicación del PSAH se observó concordancia entre las altitudes de infiltración y los predios beneficiados por los fondos del Programa. Dentro de los criterios de elegibilidad del PSAH se contempla la valoración de áreas de recarga, a pesar de ello y siguiendo su metodología es claro que en la ejecución del Programa no están siendo tomadas en cuenta o evaluadas. Uno de los principales objetivos del PSAH a través de

PROARBOL es evitar el cambio de uso de suelo, así como conservar y mantener la cobertura forestal. De hecho, al ser un programa inscrito en los criterios de PROARBOL, la elegibilidad de los predios beneficiados esta mayormente relacionada a la presencia de cobertura forestal. Los cambios en el uso del suelo afectan a las aguas superficiales y subterráneas; y sus consecuencias van desde la disminución de caudales y aumento de salinidad de los ríos por el consumo y derivaciones de agua, hasta la creación de problemas de drenaje y salinización de suelos y agua por la infiltración de retornos de riego (Sauquillo, 2009). Dada la dimensión de la subcuenca y la predominancia de un uso de suelo agrícola y urbano es factible que los beneficiarios del PSAH hayan sido elegidos por el porcentaje de cobertura forestal que presentan sin tomar en cuenta su condición como zonas de recarga.

La CONAFOR ha promovido el inicio de la focalización de pagos diferenciados basándose en dos criterios principales: el tipo de vegetación y el Índice de Presión Económica a la Deforestación en que se encuentre el polígono que presenta el predio del solicitante. Diferenciar los pagos tiene como objetivo una valoración singular de cada servicio ecosistémico, recalcando cual es que tiene mayor potencial en cada una de las áreas. Para ello, la CONAFOR ha unido las modalidades de conservación de la biodiversidad y servicios hidrológicos. De manera simplificada, la elegibilidad dentro del territorio nacional se clasifica en seis tipos de vegetación, de los cuales a tres se les atribuye mayor potencial para los servicios ambientales hidrológicos, y a otros tres se les atribuye mayor potencial para servicios ambientales relacionados con la conservación de la biodiversidad. De acuerdo con la valoración realizada por el PSAH una hectárea de bosque templado tiene un valor más alto que una hectárea de selva caducifolia.

Algunos autores han coincidido en que hay servicios ecosistémicos que tienen un doble valor porque tiene impacto fuera de la subcuenca que no puede ser valorado y además provee de un beneficio directo a los habitantes de la zona (MEA, 2003., Turner *et al.*, 2003, Hein *et al.*, 2006), este es el caso de una zona de recarga que debe ser valorada de esta manera independientemente del tipo de vegetación donde se encuentre. Sin embargo, se ha reportado que en México el pago de servicios ambientales proporcionados por los bosques templados de México son reconocidos políticamente y forman parte de los programas estratégicos a nivel nacional para proteger o mejorar los servicios que se reconocen a nivel internacional. En concreto, el pago de servicios ecosistémicos en México reconoce el hidrológico, el almacenamiento de carbono y de hábitat (McAfee y Shapiro, 2010). Del mismo modo, las políticas nacionales de áreas protegidas (implementados por CONANP) reconocen principalmente la provisión de hábitat y servicios culturales de los bosques. Sin embargo, en la práctica este programa está unido a otros que ofrecen ayuda asistencial a las poblaciones marginadas, lo que limita su alcance en los aspectos de proteger las funciones de los ecosistemas como el hidrológico, el almacenamiento de carbono y la protección del hábitat (Wynne-Jones, 2012).

Los criterios de elegibilidad para el PSAH han sido desarrollados con la mejor información geográfica (cobertura vegetal e hidrología superficial) disponible para su respectiva ejecución federal. Para la elegibilidad de las zonas de recarga y descarga no existe una base de datos nacional que permita discriminarlas a nivel federal, por lo tanto los estudios del funcionamiento de los flujos de agua subterránea y en particular la identificación de zonas de recarga no pueden ser utilizados de manera formal dentro del PSAH. Sin embargo, el

conocimiento sobre las relaciones entre los procesos ecológicos y el bienestar humano apenas comienzan a desarrollarse y este tipo de estudios constituyen una herramienta clave y novedosa que puede repercutir no solamente en el tema de servicios ecosistémicos hidrológicos, sino en otros ámbitos de la planeación territorial con la finalidad de garantizar el acceso de la población al agua y cuidar del patrimonio de nuestro país. La metodología interdisciplinaria empleada puede aplicarse a otras zonas (Lubchenco, 1998) del país obteniendo más información sobre sistemas de flujos subterráneos, de los cuales dependemos y que no están a la vista. Estudios y modelos hidrológicos de largo plazo y a diferente escala son críticos para entender las causas y los procesos vinculados al suministro de agua (Maass *et al.*, 2005). De ahí que puede resultar necesario ampliar el análisis de flujos regionales donde se pueda discriminar de mejor manera entre las zonas de recarga y las áreas forestales que por criterios de elegibilidad son preferibles a beneficiarse de PROARBOL.

8. CONCLUSIONES

El agua subterránea es fácilmente accesible y vital para el abastecimiento de la población. Debido a lo anterior, la subcuenca Valle de Bravo-Amanalco es una zona de importancia para el suministro de servicios ecosistémicos hidrológicos, contiene zonas de recarga y descarga. Los resultados de los análisis geoquímicos del agua indican que ésta tiene un lapso de recorrido subterráneo corto, por lo que su composición química es parecida a la del agua de lluvia; esto hace posible asegurar que existe un sistema local de flujo. Los manantiales encontrados en la subcuenca son de índole local y son alimentados por la precipitación. La

clasificación del agua y el análisis isotópico también confirma el origen meteórico de la misma, lo cual permite afirmar que es adecuada como fuente de abastecimiento para uso humano. La zona de recarga identificada beneficia directamente a los habitantes locales, pero también benefician otras áreas que no han podido ser determinadas.

La prospección o búsqueda de sitios idóneos donde extraer el agua subterránea se hace por medio del estudio de las estructuras geológicas, de la vegetación, de los suelos, de la calidad del agua, de la posición de manantiales y de la topografía, y también a través de la perforación de pozos de prueba. Por ello la inclusión de los campos del conocimiento del agua subterránea son clave para estimar los flujos de agua subterránea, que permita tener una mejor gestión y conservación de este recurso. La correcta aplicación del conocimiento del ciclo hidrológico puede ser aplicada al programa de Pago de Servicios Ambientales Hidrológicos en México con el propósito de hacer más transparente y participativo este mecanismo de gestión y conservación. Este tipo de estudios constituyen una herramienta clave y novedosa que puede repercutir no solamente en el tema de servicios ambientales hidrológicos.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Afsin, M. y Allen, D.M. 2012. Hydrochemical and Isotopic Characteristics of Geothermal Waters in Central Anatolia, Turkey. International Association of Hydrogeologists (IAH) 2012 Congress. Canadá.
- Almayani, M.S. 2001. Isotopic composition of rainfall and groundwater recharge in the western province of Saudi Arabia. *Journal of Arid Environments*, 49:751-760.

- Balmford, A. y Bond, W. 2005. Trends in the state of nature and their implications for human well-being. *Ecology Letters*. 8:1218-34.
- Batagoda, B., Turner, R.K., Tinch, R., y Brown, K. 2000. Towards policy relevant ecosystems services and natural capital values: rainforest non-timber products. CSERGE Working paper, Global Environmental Change (GEC) series 2000-06.
- Bortolami, G.C., Ricci, B., Susella, G.F. y Zuppi, G.M. 1979. Isotope hidrology of the Val corsaglia, Maritime Alps, Piedmont, Italy. En: *Isotope Hydrology 1978*, Vol I:327-350.
- Brauman, K., G. Daily, T., Duarte y H. Mooney. 2007. The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. *Annual Review of Environment and Resources*. 32: 67-98.
- Brown, A.E., Zhang, L; McMahon, T.A., Western, A.W. y Vertessy, R.A. 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 310: 28-61.
- Bunge, V., Martínez, J. y Ruiz-Bedolla, K. (2012) Escenarios de la dinámica hídrica de la región de aporte del sistema Cutzamala. Documento de Trabajo de la Dirección General de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México.
- Butturini, A., Sabater, S. y Romaní, A.M. 2009 La química de las aguas. En: *Conceptos de Ecología Fluvial*. Eds: Arturo Elosegí y Sergi Sabater. Fundación BBVA.
- Carrillo-Rivera, J. 2002. Consideraciones Geohidrológicas de la Relación Bosques-agua en la Región Sierra Gorda. Reporte de Investigación. México: INE-DGIPEA.

- Carrillo-Rivera, J., Cardona, A. y Edmunds, M. 2002. Use of abstraction regime and knowledge of hidrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosí, México. *Journal of Hidrology*, 261: 24-47.
- Chaudhuri, S., Furlan, S. y Clauer, N. 1992. The signature of water-rock interactions in formation waters of sedimentary basins: Some new evidence. Paper presented at the 7th International Symposium on Water-Rock Interaction, Park City, Utah.
- CINPE-UNA, 2002. Definición de parámetros hídricos para la valoración del servicio ambiental de protección del recurso hídrico brindado por los bosques y plantaciones forestales de Costa Rica. (Centro Internacional de Política Económica para el Desarrollo Sostenible de la Universidad Nacional), Informe interno para el Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), Costa Rica.
- Clark I.D. y Fritz, P. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Cortés A., Arizabalo R.D. y Rocha R. 1989. Estudio hidrogeoquímico isotópico de manantiales en la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 28(2): 265-282.
- Cortés A. y Durazo J. 2001. Tendencia del oxígeno-18 en la precipitación del centro de México. *Ingeniería hidráulica en México*, 16 (2): 93-102.
- Craig, H. 1961. Isotopic variations in meteoric water: *Science*, 133: 1702.
- Daily, G., Alexander, S; Ehrlich, P; Goulder, L; Lubchenco, J; Matson, P.A; Mooney, H; Postel, S; Schneider, S.H; Tilman, D. y Woodwell, G.M. 1997. *Ecosystem*

- Services: Benefits Supplied to Human Societies by Natural Ecosystems.
 Issues in Ecology. Vol. 1, no. 2: 1-18.
- Daily G.C., Soederqvist, T., Aniyar, S., Arrow, K., Dasgupta, P., Ehrlich, P., Folke, C.,
 Jansson, A.M., Kautsky, N., Levin, S., Lubchenco, J., Maeler, K.G., Simpson, D.,
 Starrett, D., Tilman, D. y Walker, B. 2000. The value of nature and the nature
 of value. Science Vol. 289, 5478: 395-396. Washington D.C.
- Diario Oficial de la Federación. 2003. Acuerdo que establece las Reglas de
 Operación para el otorgamiento de pagos del Programa de Servicios
 Ambientales Hidrológicos.
- De Wiest, R.J. 1965. Geohydrology. Jonh Wiley & Sons, New York.
- Dubois, J.D. y Flück, J. 1984. Geochemistry: utilization of geothermal resources of
 the Baden area. Basel, Swiss National Energy Research Foundation, NEFF
 165-IB-032, 165 p.
- Eamus D. y Froend R. 2006. Groundwater-depend ecosystems: the where, what
 and why of GDEs. Australian Journal of Botany, 54: 91-96.
- Ecociencia S.C., 2003. Programa de conservación y manejo de los manantiales de la
 subcuenca Amanalco-Valle de Bravo. Allied Domecq y la Fundación Pedro y
 Elena Hernández A.C., Reciclagua, Gobierno Municipal Valle de Bravo y
 Amanalco.
- Edmunds W.M., Carrillo-Rivera J.J. y Cardona A. 2002. Geochemical evolution of
 groundwater beneath Mexico city. Journal of Hidrology, Vol. 258, 1-24 pp.
- Edmunds W.M. 2005. Contribution of Isotopic and Nuclear Tracers to Study of
 Groundwaters en P.K. Aggarwal, J.R. Gal. y K.F.O. Froehlich (eds), Isotopes in
 the Water Cycle: Past, Present and Future of Developing Science, 171-192,
 Springer, Netherlands.

- Fitz-Díaz, E. 2004. Historia de deformación de las rocas metasedimentarias cretácicas de Valle de Bravo, Edo. de México, y resultados preliminares de microtermometría de la deformación: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Tesis de Maestría, 92p.
- Gat, J.R. 1996. Oxygen and hydrogen stable isotopes in the hydrologic cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 24:225–62.
- Gascoyne, M. 2003. Hydrogeochemistry, groundwater ages and sources of salts in a granitic batholith on the Canadian Shield, southeastern Manitoba. *Applied Geochemistry* 19:519-560.
- GEF-Nasi R. 2002. Forest Ecosystem Services: Can they pay our way out of deforestation?. Excute Version. Forestry roundtable, New York.
- Glennon, R. 2002. *Water Follies: Groundwater Pumping and The Fate of America's Fresh Waters*, Washington, D.C.: Island Press.
- Gómez Fuentes, A. 2010. Agua y desigualdad social. Caso de los indígenas mazahuas en México. Catarata, Madrid. 118p.
- Guerrero, M., Talavera, O., Ramírez, J. y Rodríguez, J. 1993. Estratigrafía y características de depósito del conjunto petrotectónico de Teloloapan, Terreno Guerrero, Mexico, en *Proceedings of the First Circum-Pacific and Circum-Atlantic Terrane Conference*, Guanajuato, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 61–63.
- Hanley, N. y Shogren, F.F. 2002. *Awkward Choices: Economics and Nature Conservation*, in D.W. Bromley and Paavola, J. (eds.), *Economics, Ethics and Environmental Policy: Contested Choices*. Blackwell Publishing, Oxford.

- Hein L., van Koppen K., de Groot R.S. y van Ierland E.C. 2006. Spatial scales, stakeholders and the valuation of ecosystem services. *Ecological Economics* 57:209–28.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Censo y Conteo de Población y Vivienda, 2000, 2005 y 2010. www.inegi.org.mx
- Jaimés-Viera, M.C., Aguirre-Díaz, G.J. y Nieto-Obregón, J. 2003. The Valle de Bravo volcanic field: a new report of a Quaternary monogenetic field in the Mexican volcanic belt, en Geological Society of America, 99th Cordilleran Section Annual Meeting, Libro de resúmenes, 35(4): 8.
- Jewitt, G. 2001. Can integrated water resources management sustain the provision of ecosystem goods and services? 2da WARTSA/Water Net Symposium: Integrated Water Resources Management: theory, practice cases; Cape.
- Kaiser B. y Roumasset J. 2002. Valuing indirect ecosystem services: the case of tropical watersheds. *Environment and Development Economics*, 7:701–14.
- Kaimowitz, D. 2001. Useful Myths and Intractable Truths: The Politics of the Link between Forests and Water in Central America. San Jose, Costa Rica, Center for International Forest Research (CIFOR): 33.
- Kharaka Y.K. y Carothers W. 1986. Oxygen and hydrogen isotope geochemistry of deep basin brines. In P. Fritz y J.C. Fontes (eds), *Hanbook of environmental geochemistry*, vol. 2. The terrestrial Environment, B 305-361, Amsterdam, Elsevier.
- Kehew, A. E. 2001. *Applied Chemical Hydrogeology*. Prentice Hall, New Jersey.
- Lambert, S. J. 1991. Fossil meteoric groundwaters in the Delaware Basin of southeastern in the Taylor, J. O'Neil y I. Kaplan (eds), *Stable isotope*

- geochemistry: A tribute to Samuel Epstein 135-156, The Geochemical Society Special Publication no. 3.
- Leemans, R. 2000. Modelling of global land use: connections, causal chains and integration. Inaugural Lecture, Department of Plant Production Systems Wageningen University, Wageningen, The Netherlands. 85.
- Limburg K.E., O'Neill R.V., Costanza R. y Farber S. 2002. Complex systems and valuation. *Ecological Economics*, 41:409–20.
- Lubchenco, J. 1998. Entering the century of the environment: a new social contract for science. *Science* 279:491–97.
- Maass, J., Balvanera P., Castillo A., Daily G., Mooney H., Ehrlich P., Quesada M., Miranda A., Jaramillo V., García-Oliva F., Martínez-Yrizar A., Cotler H., López-Blanco J., Pérez-Jiménez A., Búrquez A., Tinoco C., Ceballos G., Barraza L., Ayala R. y Sarukhán J. 2005. Ecosystem services of tropical dry forests: insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. *Ecology and Society* 10(1):17.
- Mackereth F.J.K., Heron J. y Talling J. 1978. Water analysis. Freshwater Biological Association, Scientific publication no. 36, Cumbria, Reino Unido.
- Mazor, E. M. 1991. Stable hydrogen and oxygen isotopes. In *Applied Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*, 122–46. London: Halsted
- Mazor, E. M. 2004. *Chemical and isotopic geohidrology*. CRC Press. 352.
- McAfee K. y Shapiro E. 2010. Payments for ecosystem services in Mexico: nature, neoliberalism, social movements, and the state. *Annals of the Association of American Geographers* 100(3): 579-599.

- Millennium Ecosystem Assessment. 2003. Ecosystems and Human Well-being: a framework for assessment. Editado por: Instituto de los Recursos Mundiales.
- Moore, J.E. 2002. Field hydrogeology. A guide for site investigations and report preparation. Lewis Publishers.
- Muñoz C., Guevara A., Torres J.M. y Braña J. 2005. Paying for the Hydrological Services of Mexico's Forest: analysis, negotiations and results. INE, México.
- Naidoo R. y Ricketts T.H. 2006. Mapping the economic costs and benefits of conservation. PLoS Biology, 4:e360.
- Pagiola, S. y Platais G. 2002. Payments for Environmental Services. Environmental Strategy Notes No. 3. Banco Mundial, Washington D.C.
- Pagiola, S., Bishop J. y Landell-Mills N. (eds.).2002. Selling Forest Environmental Services:Market-based Mechanisms for Conservation and Development. Earthscan Publications. Londres, Reino Unido.
- Parkhurst, D. L. 1995. User's guide to PHREEQC- a computer program for speciation, reaction path, advective-transport and inverse geochemical calculations. US Geological Survey, Water-Resources Investigations Report , 99-4529.
- Price M. 2003. Agua subterránea. Limusa Editores, México.
- Sánchez-Zavala, J.L. 1993. Secuencia volcano-sedimentaria del Jurásico superior-Cretácico Arcelia-Otzolopan (Terreno Guerrero), área de Valle de Bravo-Zacazonapan, Estado de México: Petrografía, Geoquímica, Metamorfismo e Interpretación Tectónica.Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Tesis de Maestría, 100 p.

- Salinas-Prieto, J.C., Monod, O. y Faure, M. 2000. Ductile deformations of opposite vergence in the eastern part of the Guerrero Terrane (SW Mexico): Journal of South American Earth Sciences, Special Issue, Geologic evolution of the Guerrero Terrane, western Mexico, 13: 389-402.
- Sahuquillo H. A. 2009. La importancia de las aguas subterráneas. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales España, Vol 103(1) :97-114.
- SEMARNAT. 2004. Introducción a los Servicios Ambientales. Hombre Naturaleza Cruzada por los Bosques y el Agua.
- Soliman M.M., LaMoreaux P. E., Memon B.A., Assaad F. A. y W.L. James. 1998. Environmental Hydrogeology , Lewis Publishers.
- Thomas, J. M., Welch, A. H., y Preissler, A. M. 1989. Geochemical evolution of groundwater in Smith Creek Valley – a hydrologically closed basin in central Nevada, USA. Applied Geochemistry 4: 493–510.
- Tognetti S.S., Mendoza G., Aylward B., Southgate D. y Garcia L. 2003. A Knowledge and Assessment Guide to Support the Development of Payment Arrangements for Watershed Ecosystem Services (PWES). Washington, DC: World Bank Environmental Development.
- Toth, J. 1995. Hydraulic continuity in large sedimentary basins. Hydrogeology Journal, 3: 4-16.
- Toth, J. 2000. Las aguas subterráneas como agente geológico: Causas, procesos y manifestaciones. Boletín Geológico y Minero, 111(4): 9-26.
- Tribunal Latinoamericano del Agua. 2006. Caso trasvase de agua hacia la cuenca del Valle de México. Resolución

- Turner, R.K., van den Bergh, C.J.M., Soderqvist, T., Barendregt, A., van der Straaten, J., Maltby, E. y van Ierland, E.C., 2000. Ecological-economic analysis of wetlands: scientific integration for management and policy. *Ecological Economics* 35: 7 – 23.
- Turner R.K., Paavola J., Cooper P., Farber S., Jessamy V. y Georgiou S. 2003. Valuing nature: lessons learned and future research directions. *Ecological Economics*. 46:493–510.
- UNAM-INE, 2006. Sistema de Información Hidrológica para el diseño de un Programa de Pago de Servicios Ambientales en un Municipio con potencial para la instrumentación de un mercado de servicios hidrológicos.
- Van-Lanen, A.J.H. y Carrillo-Rivera, J.J.1998. Framework for groundwater monitoring in semi-arid regions. UNESCO, libro: Monitoring for groundwater management in semi-arid regions. *Studies & reports in Hydrology* 57: 7-20.
- Vasányi, I., Matray, J. y Kovács, O.L. 1999. Hidrogeochemistry in two adjacent areas in the Pannonian Basin (Southeast-Hungary). *Chemical Geology*, 156: 25-39.
- Wyne-Jones, S. 2012. Negotiating neoliberalism: Conservationists'role in the development of payments for ecosystem services. *Geoforum* 43: 1035-1044.
- Zhang L., W.R. Dawes y G.R. Walker. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale, *Water Resources Research*, 37:701–708.

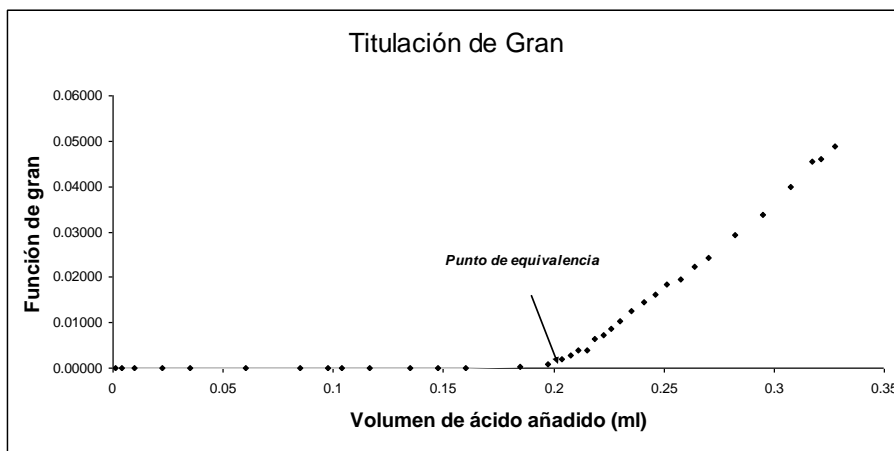
ANEXO I
CÁLCULO DE BICARBONATOS
A PARTIR DEL MÉTODO DE GRAN

CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN

MUESTRA Agua Blanca 1

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6.64	0.00125	0.00000
6.86	0.00375	0.00000
6.96	0.01	0.00000
6.87	0.0225	0.00000
6.76	0.035	0.00000
6.49	0.06	0.00001
6.3	0.085	0.00001
6.3	0.0975	0.00001
6.22	0.10375	0.00002
6.13	0.11625	0.00002
5.99	0.135	0.00003
5.91	0.1475	0.00004
5.82	0.16	0.00005
5.27	0.185	0.00019
4.59	0.1975	0.00092
4.25	0.20375	0.00205
4.11	0.2075	0.00285
3.98	0.21125	0.00389
3.98	0.215	0.00393
3.77	0.21875	0.00643
3.72	0.2225	0.00729
3.65	0.22625	0.00865
3.58	0.23	0.01026
3.5	0.235	0.01249
3.44	0.24125	0.01457
3.4	0.24625	0.01617
3.35	0.25125	0.01837
3.33	0.2575	0.01953
3.28	0.26375	0.02224
3.25	0.27	0.02418
3.18	0.2825	0.02924
3.13	0.295	0.03373
3.07	0.3075	0.03979
3.02	0.3175	0.04560
3.02	0.32125	0.04596
3	0.3275	0.04875

V muestra=	50	ML
Normalidad HSO ₄ =	0.16	
P. Equivalencia=	0.19	ml
Alcalinidad Tot.=	30.40	mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	37.09	mg/l

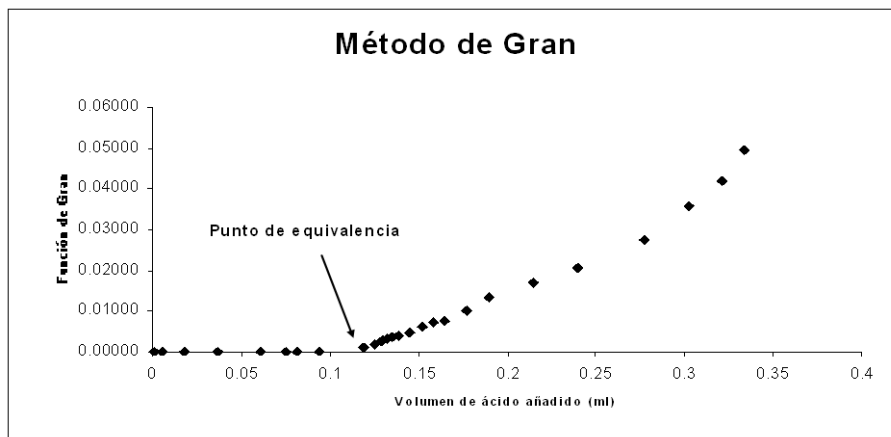


CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN

MUESTRA Las Lágrimas

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6.1	0.00125	0.00001
6.33	0.005	0.00001
6.31	0.0175	0.00001
6.28	0.03625	0.00001
6.1	0.06125	0.00002
5.94	0.075	0.00003
5.88	0.08125	0.00003
5.79	0.09375	0.00004
4.46	0.11875	0.00097
4.21	0.125	0.00176
4.04	0.12875	0.00263
4.01	0.13	0.00283
3.96	0.1325	0.00321
3.93	0.135	0.00347
3.89	0.13875	0.00385
3.82	0.145	0.00462
3.71	0.1525	0.00609
3.64	0.15875	0.00730
3.63	0.165	0.00762
3.52	0.1775	0.01019
3.42	0.19	0.01331
3.34	0.215	0.01714
3.29	0.24	0.02051
3.2	0.2775	0.02760
3.11	0.3025	0.03590
3.06	0.32125	0.04192
3	0.33375	0.04938

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	0.16
P. Equivalencia=	0.12 ml
Alcalinidad Tot.=	19.20 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	23.42 mg/l

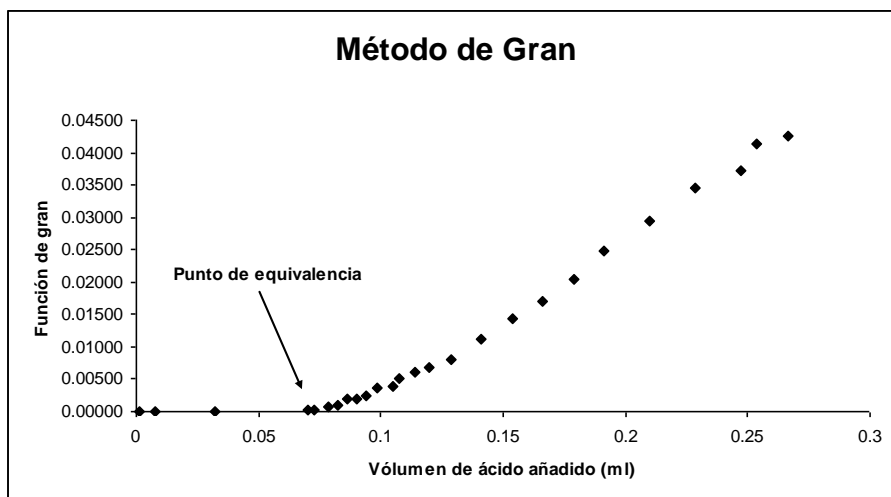


CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN

MUESTRA Los Cajones

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
5.82	0.00125	0.00002
6.09	0.0075	0.00001
5.97	0.0325	0.00002
5.26	0.07	0.00013
5.26	0.0725	0.00025
4.96	0.07875	0.00061
4.59	0.0825	0.00108
4.35	0.08625	0.00191
4.11	0.09	0.00203
4.09	0.09375	0.00254
4	0.09875	0.00365
3.85	0.105	0.00383
3.84	0.1075	0.00510
3.72	0.11375	0.00613
3.65	0.12	0.00687
3.61	0.12875	0.00814
3.55	0.14125	0.01119
3.43	0.15375	0.01434
3.34	0.16625	0.01712
3.28	0.17875	0.02041
3.22	0.19125	0.02487
3.15	0.21	0.02939
3.1	0.22875	0.03465
3.05	0.2475	0.03716
3.04	0.25375	0.04138
3	0.26625	0.04263

V muestra=	50	MI
Normalidad HSO ₄ =	0.16	
P. Equivalencia=	0.072	MI
Alcalinidad Tot.=	11.52	mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	14.05	mg/l

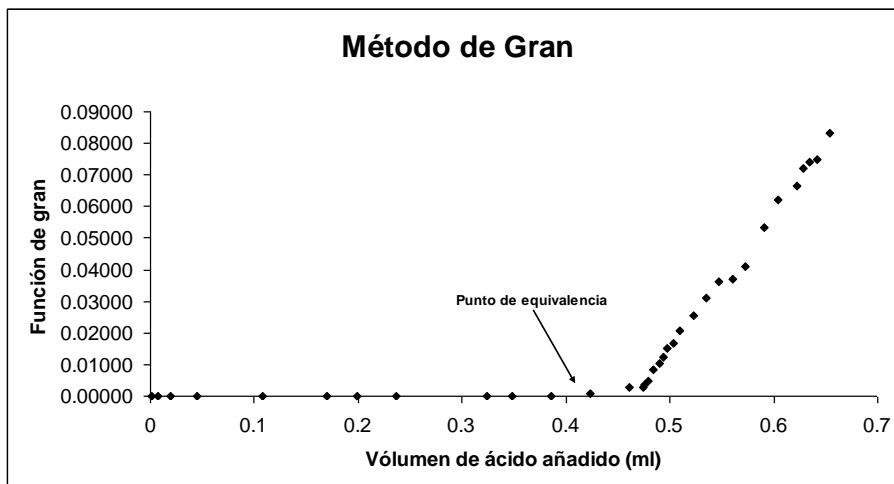


CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN

MUESTRA Granja de la Cruz

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6.67	0.00125	0.00000
6.67	0.0075	0.00000
6.67	0.02	0.00000
6.62	0.045	0.00000
6.5	0.1075	0.00001
6.36	0.17	0.00002
6.27	0.19875	0.00002
6.27	0.23625	0.00004
5.96	0.32375	0.00006
5.91	0.34875	0.00009
5.73	0.38625	0.00018
5.48	0.42375	0.00073
4.9	0.46125	0.00259
4.38	0.47375	0.00296
4.33	0.475	0.00357
4.25	0.47875	0.00496
4.11	0.48375	0.00829
3.89	0.49	0.01054
3.79	0.49375	0.01217
3.73	0.4975	0.01506
3.64	0.50375	0.01667
3.6	0.51	0.02070
3.51	0.5225	0.02536
3.43	0.535	0.03104
3.35	0.5475	0.03628
3.29	0.56	0.03693
3.25	0.5725	0.04119
3.19	0.59125	0.05318
3.15	0.60375	0.06208
3.09	0.6225	0.06660
3.07	0.62875	0.07193
3.04	0.635	0.07419
3.03	0.64125	0.07478
2.99	0.65375	0.08327

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	0.16
P. Equivalencia=	0.42 ml
Alcalinidad Tot.=	67.20 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	81.98 mg/l

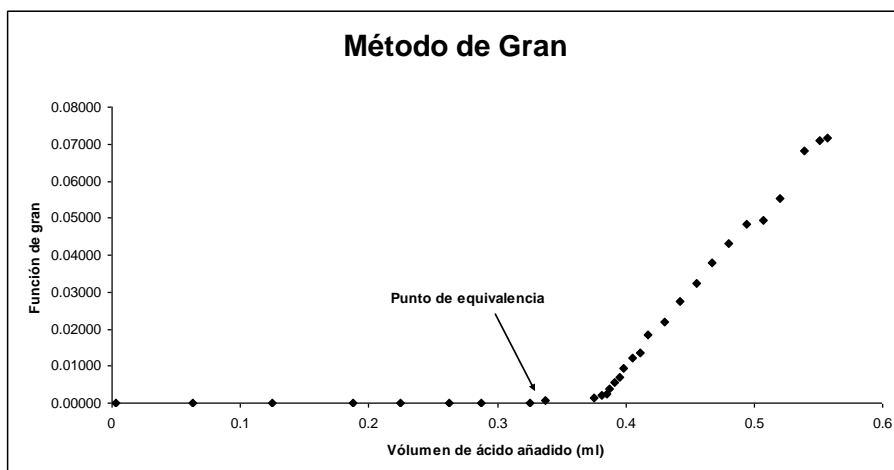


CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN

MUESTRA Los Adobes

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6.84	0.0025	0.00000
6.58	0.0625	0.00001
6.38	0.125	0.00001
6.22	0.1875	0.00002
6.11	0.225	0.00004
5.97	0.2625	0.00006
5.84	0.2875	0.00012
5.56	0.325	0.00012
5.61	0.3375	0.00057
4.94	0.375	0.00123
4.64	0.38125	0.00201
4.43	0.385	0.00261
4.32	0.3875	0.00379
4.16	0.39125	0.00551
4	0.395	0.00683
3.91	0.39875	0.00949
3.77	0.405	0.01208
3.67	0.41125	0.01370
3.62	0.4175	0.01826
3.5	0.43	0.02192
3.43	0.4425	0.02754
3.34	0.455	0.03228
3.28	0.4675	0.03781
3.22	0.48	0.04327
3.17	0.49375	0.04846
3.13	0.5075	0.04948
3.09	0.52	0.05527
3.04	0.53875	0.06828
3.01	0.55125	0.07113
3	0.5575	0.07175

V muestra=	50	ml
Normalidad HSO ₄ =	0.16	
P. Equivalencia=	0.34	ml
Alcalinidad Tot.=	54.40	mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	66.37	mg/l

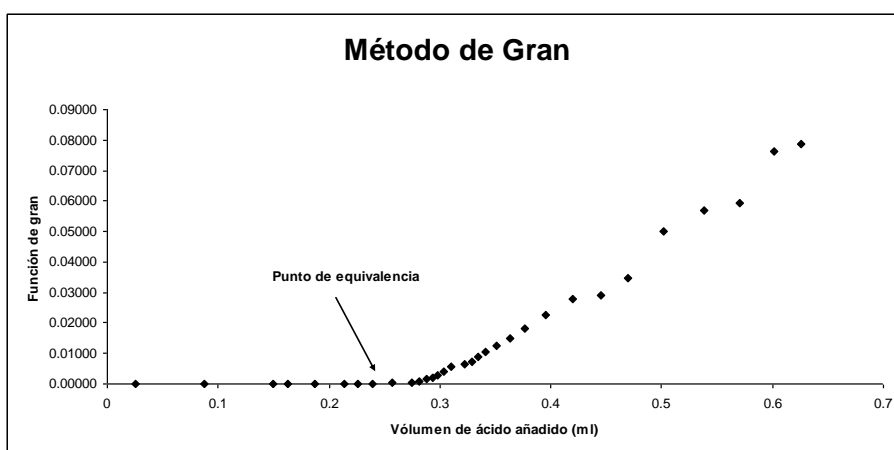


CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN

MUESTRA Rancho Feshi

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6.91	0.025	0.00000
6.62	0.0875	0.00001
6.27	0.15	0.00002
6.26	0.1625	0.00002
6.1	0.1875	0.00004
5.92	0.21375	0.00005
5.87	0.22625	0.00006
5.79	0.23875	0.00010
5.61	0.2575	0.00030
5.15	0.275	0.00047
4.97	0.28125	0.00080
4.74	0.2875	0.00162
4.44	0.29375	0.00203
4.35	0.2975	0.00295
4.19	0.30375	0.00386
4.08	0.31	0.00565
3.92	0.3225	0.00651
3.87	0.32875	0.00740
3.82	0.335	0.00901
3.74	0.34125	0.01047
3.68	0.35125	0.01255
3.61	0.36375	0.01476
3.55	0.37625	0.01817
3.47	0.395	0.02261
3.39	0.42	0.02776
3.32	0.445	0.02896
3.26	0.47	0.03462
3.19	0.50125	0.05016
3.12	0.53875	0.05680
3.09	0.57	0.05934
3.04	0.60125	0.07613
3	0.62625	0.07863

V muestra=	50	ml
Normalidad HSO ₄ =	0.16	
P. Equivalencia=	0.26	ml
Alcalinidad Tot.=	41.60	mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	50.75	mg/l

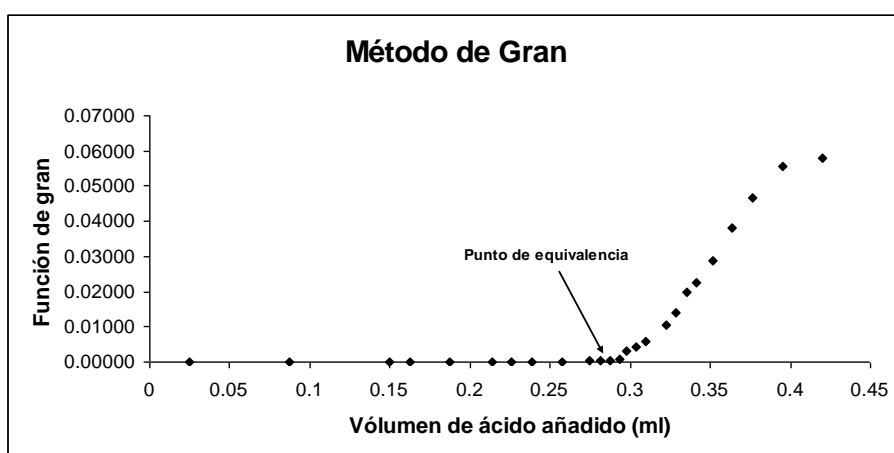


CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN

MUESTRA San Bartolo 1

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6.34	0.025	0.00001
6.39	0.0875	0.00001
6.35	0.15	0.00001
6.27	0.1625	0.00002
6.21	0.1875	0.00003
6.1	0.21375	0.00004
5.98	0.22625	0.00005
5.87	0.23875	0.00008
5.72	0.2575	0.00014
5.46	0.275	0.00020
5.33	0.28125	0.00030
5.17	0.2875	0.00056
4.9	0.29375	0.00081
4.75	0.2975	0.00302
4.18	0.30375	0.00413
4.05	0.31	0.00592
3.9	0.3225	0.01032
3.67	0.32875	0.01410
3.54	0.335	0.01971
3.4	0.34125	0.02239
3.35	0.35125	0.02875
3.25	0.36375	0.03794
3.14	0.37625	0.04671
3.06	0.395	0.05550
3	0.42	0.05800

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	0.16
P. Equivalencia=	0.28 ml
Alcalinidad Tot.=	44.80 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	54.66 mg/l

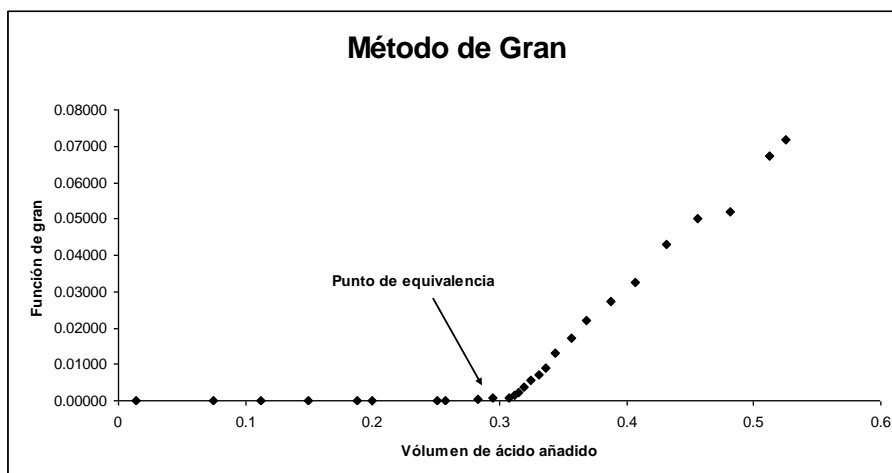


CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN

MUESTRA San Bartolo 2

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6.45	0.01375	0.00001
6.29	0.075	0.00001
6.18	0.1125	0.00002
6.08	0.15	0.00003
5.95	0.1875	0.00004
5.92	0.2	0.00009
5.59	0.25125	0.00009
5.65	0.2575	0.00014
5.47	0.2825	0.00022
5.3	0.295	0.00057
4.9	0.3075	0.00083
4.75	0.31125	0.00163
4.46	0.315	0.00227
4.32	0.31875	0.00380
4.1	0.325	0.00557
3.94	0.33125	0.00710
3.84	0.33625	0.00903
3.74	0.34375	0.01295
3.59	0.35625	0.01709
3.48	0.36875	0.02204
3.38	0.3875	0.02744
3.3	0.40625	0.03258
3.24	0.43125	0.04283
3.14	0.45625	0.05009
3.09	0.48125	0.05212
3	0.5125	0.06725
	0.525	0.07173

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	0.16
P. Equivalencia=	0.29 ml
Alcalinidad Tot.=	46.40 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	56.61 mg/l

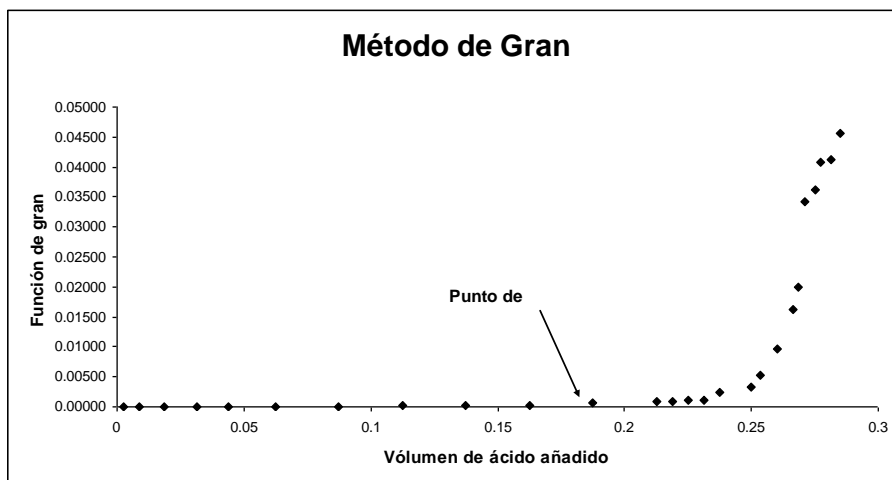


CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN

MUESTRA Corral de Piedra

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
5.95	0.0025	0.00002
5.91	0.00875	0.00002
5.94	0.01875	0.00002
5.88	0.03125	0.00003
5.79	0.04375	0.00004
5.7	0.0625	0.00006
5.58	0.0875	0.00009
5.44	0.1125	0.00014
5.3	0.1375	0.00019
5.19	0.1625	0.00031
5.02	0.1875	0.00059
4.77	0.2125	0.00083
4.65	0.21875	0.00097
4.59	0.225	0.00099
4.59	0.23125	0.00101
4.59	0.2375	0.00251
4.2	0.25	0.00333
4.09	0.25375	0.00533
3.89	0.26	0.00962
3.64	0.26625	0.01621
3.42	0.26875	0.02005
3.33	0.27125	0.03426
3.1	0.275	0.03618
3.08	0.2775	0.04083
3.03	0.28125	0.04118
2.99	0.285	0.04554

V muestra=	50	ml
Normalidad HSO ₄ =	0.16	
P. Equivalencia=	0.18	ml
Alcalinidad Tot.=	28.80	mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	35.14	mg/l

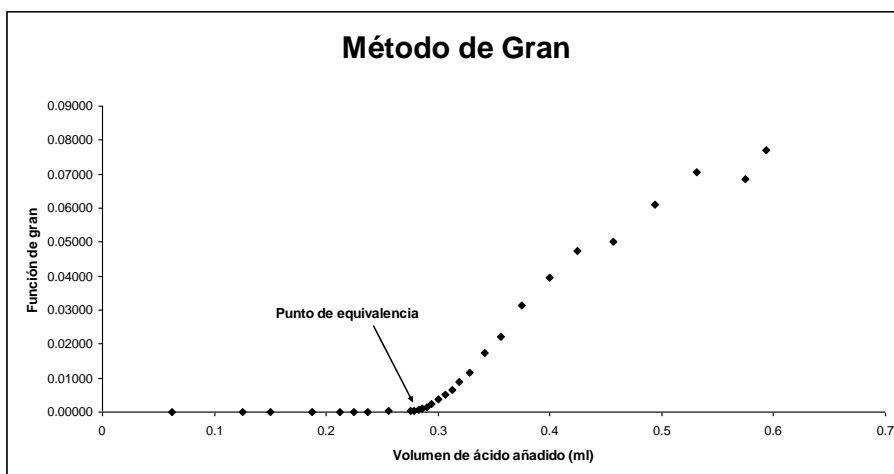


CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN

MUESTRA Rancho el Manzano

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6.49	0.0625	0.00001
6.21	0.125	0.00002
6.27	0.15	0.00002
6.1	0.1875	0.00003
5.98	0.2125	0.00004
5.93	0.225	0.00005
5.87	0.2375	0.00008
5.7	0.25625	0.00024
5.24	0.275	0.00026
5.23	0.27875	0.00045
4.99	0.2825	0.00058
4.88	0.28625	0.00093
4.68	0.29	0.00142
4.5	0.29375	0.00255
4.25	0.3	0.00383
4.08	0.30625	0.00500
3.97	0.3125	0.00652
3.86	0.31875	0.00871
3.74	0.32875	0.01146
3.63	0.34125	0.01738
3.55	0.35625	0.02202
3.46	0.375	0.03150
3.37	0.4	0.03964
3.31	0.425	0.04755
3.23	0.45625	0.05009
3.15	0.49375	0.06101
3.09	0.53125	0.07074
3.03	0.575	0.06859
2.99	0.59375	0.07713

V muestra=	50	ml
Normalidad HSO ₄ =	0.16	
P. Equivalencia=	0.28	ml
Alcalinidad Tot.=	44.80	mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	54.66	mg/l

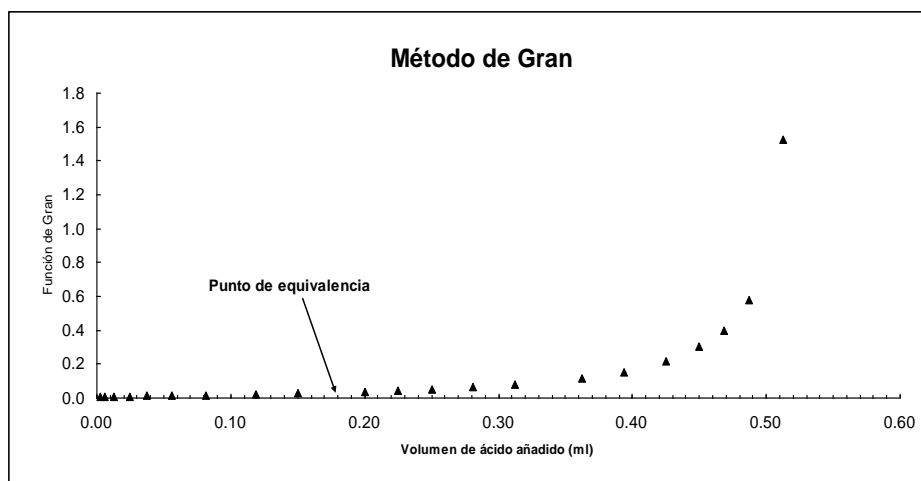


CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN

MUESTRA San Gabriel Ixtla 14

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
5.78	0.0025	0.00830
5.77	0.00625	0.00849
5.75	0.0125	0.00889
5.69	0.025	0.01021
5.64	0.0375	0.01146
5.57	0.05625	0.01347
5.49	0.08125	0.01621
5.37	0.11875	0.02138
5.25	0.15	0.02820
5.11	0.2	0.03897
5.05	0.225	0.04476
4.99	0.25	0.05142
4.89	0.28125	0.06477
4.8	0.3125	0.07974
4.65	0.3625	0.11275
4.52	0.39375	0.15219
4.37	0.425	0.21510
4.22	0.45	0.30399
4.1	0.46875	0.40089
3.94	0.4875	0.57967
3.52	0.5125	1.52545

V muestra=	50	ml
Normalidad HSO ₄ =	0.16	
P. Equivalencia=	0.18	ml
Alcalinidad Tot.=	28.80	mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	35.14	mg/l

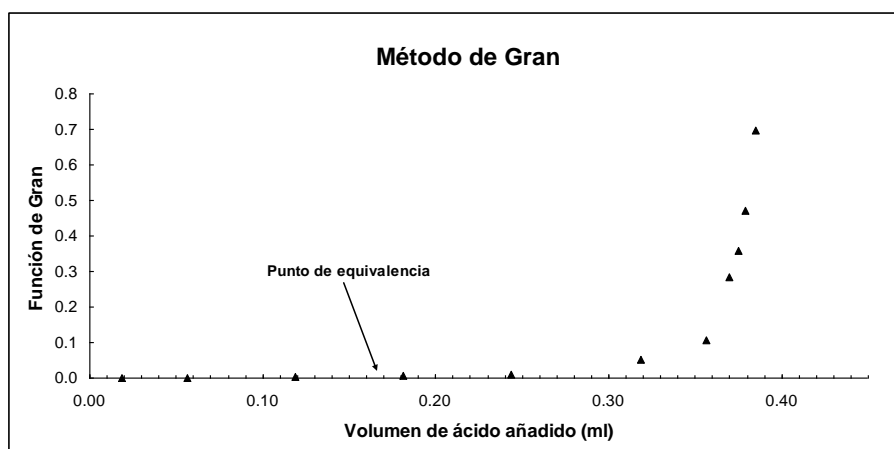


CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN

MUESTRA San Gabriel Ixtla 15

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6.87	0.01875	0.00067
6.62	0.05625	0.00120
6.23	0.11875	0.00295
5.98	0.18125	0.00525
5.69	0.24375	0.01026
5	0.31875	0.05032
4.67	0.35625	0.10766
4.25	0.37	0.28325
4.15	0.375	0.35663
4.03	0.37875	0.47016
3.86	0.385	0.69551

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO₄=	0.16
P. Equivalencia=	0.28 ml
Alcalinidad Tot.=	44.80 mg/l CaCO₃
HCO₃=	54.66 mg/l

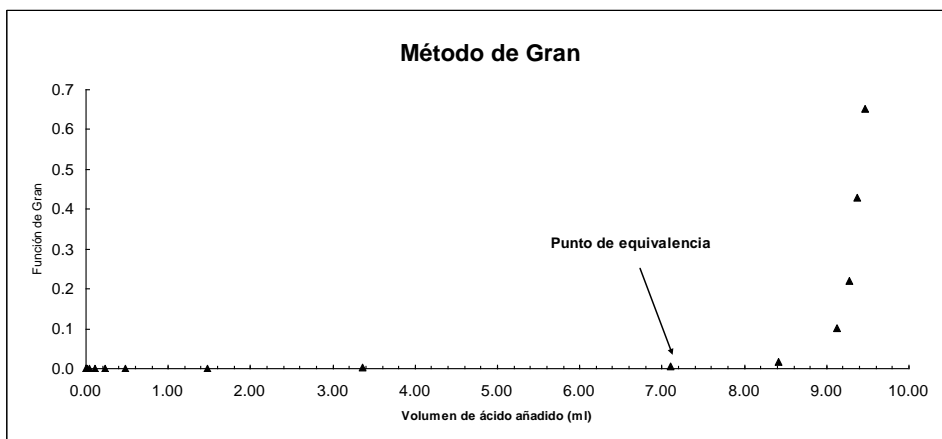


CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN

MUESTRA Ixtapan de la Sal 1

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
6.92	0.00625	0.00060
6.94	0.01875	0.00057
6.95	0.04375	0.00056
6.95	0.10625	0.00056
6.94	0.23125	0.00058
6.93	0.48125	0.00059
6.79	1.48125	0.00083
6.57	3.35625	0.00144
5.98	7.10625	0.00598
5.55	8.4125	0.01646
4.76	9.1225	0.10274
4.43	9.2775	0.22024
4.14	9.37625	0.43014
3.96	9.4725	0.65210

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO₄=	0.16
P. Equivalencia=	8.3 ml
Alcalinidad Tot.=	1328 mg/l CaCO₃
HCO₃=	1620.16 mg/l

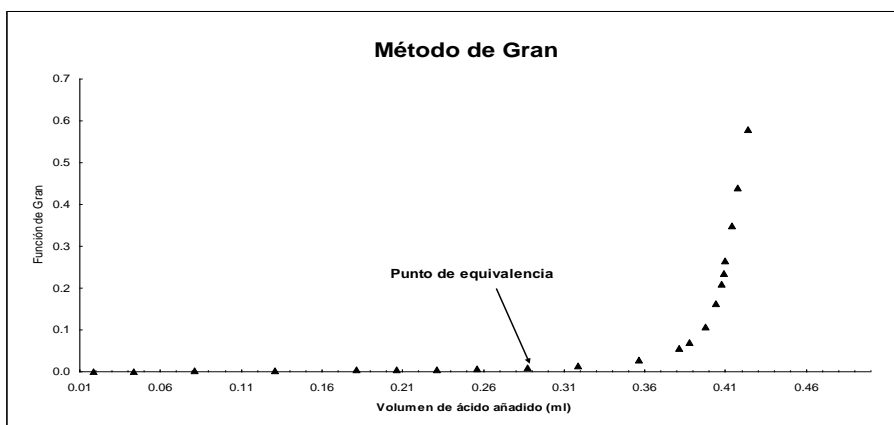


CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN

MUESTRA Presa 1

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
7.28	0.00625	0.00026
7.08	0.01875	0.00042
6.82	0.04375	0.00076
6.58	0.08125	0.00132
6.35	0.13125	0.00224
6.11	0.18125	0.00390
6.03	0.20625	0.00469
5.94	0.23125	0.00577
5.85	0.25625	0.00710
5.71	0.2875	0.00981
5.53	0.31875	0.01485
5.25	0.35625	0.02832
4.95	0.38125	0.05653
4.86	0.3875	0.06955
4.67	0.3975	0.10775
4.49	0.40375	0.16310
4.38	0.4075	0.21013
4.33	0.40875	0.23578
4.28	0.41	0.26456
4.16	0.41375	0.34878
4.06	0.4175	0.43912
3.94	0.42375	0.57894

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO ₄ =	0.16
P. Equivalencia=	0.29 ml
Alcalinidad Tot.=	46.40 mg/l CaCO ₃
HCO ₃ =	56.61 mg/l

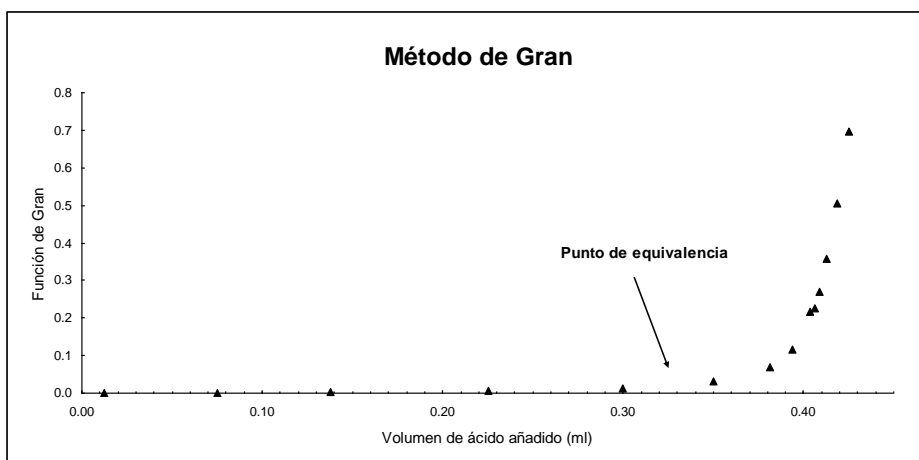


CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN

MUESTRA Presa 2

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
7.16	0.0125	0.00035
6.59	0.075	0.00129
6.28	0.1375	0.00263
5.91	0.225	0.00618
5.56	0.3	0.01385
5.21	0.35	0.03105
4.86	0.38125	0.06955
4.64	0.39375	0.11545
4.37	0.40375	0.21501
4.35	0.40625	0.22516
4.27	0.40875	0.27071
4.15	0.4125	0.35689
4	0.41875	0.50419
3.86	0.425	0.69606

V muestra=	50 ml
Normalidad HSO₄=	0.16
P. Equivalencia=	0.33 ml
Alcalinidad Tot.=	52.80 mg/l CaCO₃
HCO₃=	64.42 mg/l



ANEXO II
CONTENIDO DE METALES Y CATIONES

Símbolo	Coordenadas		pH	Eh	T agua °C	Cond µS/cm	Na µg/L	Li µg/L	Be µg/L	Mg µg/L	Al µg/L	Si µg/L	K µg/L	Ca µg/L	Sc µg/L	Ti µg/L	V µg/L	Cr µg/L	Mn µg/L	Fe µg/L	Co µg/L	Ni µg/L	Cu µg/L	Zn µg/L	Ga µg/L	Ge µg/L	As µg/L	Se µg/L	Br µg/L
Unidades	X	Y																											
Límite de detección							5	1	0.1	1	2	200	30	700	1	0.1	0.1	0.5	0.1	10	0.005	0.3	0.2	0.5	0.01	0.01	0.03	0.2	3
Agua Blanca 1	411310	2109277	6.35	40	10.2	92	9530	10	< 0.1	2730	6	29900	3880	5300	4	2.8	2	0.8	1.7	30	0.043	3.3	0.9	16.1	< 0.01	0.02	0.61	< 0.2	6
Lagrimas 1	410881	2105227	6.04	49	12	72	4020	2	< 0.1	1370	11	22100	3810	3800	3	2.1	0.8	< 0.5	0.9	< 10	0.016	0.7	2.3	33.6	< 0.01	0.02	0.19	< 0.2	3
Los Cajones	407495	2106720	5.47	68	16.8	46	2600	< 1	< 0.1	1180	35	9400	1350	4100	1	1.3	0.2	< 0.5	29.8	30	0.128	0.5	2.4	9.2	< 0.01	0.01	0.11	0.4	14
Granja de la Cruz	385248	2126485	6.52	70	15.4	190	12200	14	< 0.1	8470	33	33300	3230	10900	4	3.4	7.4	1.1	1.6	10	0.019	0.5	1.8	25.9	0.01	0.04	0.18	< 0.2	21
Los Adobes	385359	2126237	6.82	13	13.3	108	9450	8	< 0.1	6730	10	31600	2850	7800	4	2.9	10	1.3	0.4	< 10	0.012	1	0.8	13.4	< 0.01	0.04	0.28	0.3	18
Rancho Feshi	395447	2129034	6.81	12	13.3	108	5920	3	< 0.1	4840	8	27900	2030	7700	4	2.4	4.7	1.3	0.2	< 10	< 0.005	< 0.3	0.4	10.5	< 0.01	0.05	0.14	< 0.2	12
San Bartolo 1	388462	2128494	6.13	83	14.7	194	10600	2	< 0.1	7730	15	32400	6350	11900	4	2.7	2.5	1	0.6	< 10	0.017	0.5	0.5	8	< 0.01	0.03	0.13	0.4	21
San Bartolo 2	388403	2128344	6.42	24	14.8	153	8590	2	< 0.1	5890	13	35600	5030	9800	4	2.8	1.9	1.9	0.2	< 10	0.01	< 0.3	0.7	6.4	< 0.01	0.03	0.08	0.3	13
Corral de Piedra	398392	2124961	5.93	56	10.7	112	5290	< 1	< 0.1	5030	13	24300	1330	8100	3	2.2	3.8	1.1	0.3	< 10	0.006	0.4	1.5	6.4	< 0.01	0.02	0.07	0.2	19
Rancho el Manzano 10	393441	2129660	6.62	27	13.7	119	6380	< 1	< 0.1	5530	5	25900	2230	7600	4	2.5	4.7	2.1	0.1	< 10	< 0.005	< 0.3	0.6	4.2	< 0.01	0.03	0.08	0.4	20
San Gabriel Ixtla 14	381715	2129527	5.61	78	18.2	279	9570	< 1	< 0.1	14200	21	41900	2290	18400	4	3.1	6.8	2.6	34.7	40	0.177	< 0.3	0.5	6.6	< 0.01	0.01	0.47	< 0.2	23
San Gabriel Ixtla 15	381447	2129581	7.05	3	18.8	202	8320	< 1	< 0.1	9280	141	44700	1830	12400	4	5.5	5.8	3	1.4	10	0.061	< 0.3	1.1	24.9	0.02	0.01	0.23	< 0.2	22
Ixtapan de la Sal 1	428792.3	2083590	6.61	23	36.9	9.93	350000	4000	1	94400	< 20	22000	154000	200000	< 10	19	6	17	228	3200	< 0.05	4	26	14	< 0.1	18	1960	24	5440
Presa 1	381939	2120471	7.37	21	21.2		8180	4	< 0.1	6020	6	6700	2550	11100	< 1	0.8	0.8	0.6	3.3	< 10	0.075	< 0.3	1	9.3	0.01	0.01	0.58	< 0.2	12
Presa 2	379404	2121572	7.48	26	21.4		8100	4	< 0.1	5820	6	5700	2540	11000	< 1	0.9	0.7	< 0.5	48.7	70	0.097	< 0.3	0.2	3.8	0.01	0.01	0.66	< 0.2	13

Símbolo	Coordenadas		Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ru	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
Unidades	X	Y	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
Límite de detección			0.005	0.04	0.003	0.01	0.005	0.1	0.01	0.01	0.2	0.01	0.001	0.1	0.01	0.1	1	0.001	0.1	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Agua Blanca 1	411310	2109277	7.65	69.5	0.036	0.01	< 0.005	0.2	< 0.01	< 0.01	< 0.2	0.02	< 0.001	0.3	0.04	< 0.1	1	0.468	13.2	0.058	0.082	0.009	0.035	0.005	0.001	0.005	< 0.001	0.003	< 0.001
Lagrimas 1	410881	2105227	7.86	68.8	0.041	0.02	< 0.005	< 0.1	< 0.01	< 0.01	< 0.2	0.05	< 0.001	0.3	0.04	< 0.1	< 1	0.276	28.1	0.056	0.063	0.009	0.033	0.003	0.001	0.003	0.001	0.003	< 0.001
Los Cajones	407495	2106720	2.38	56.4	0.02	0.05	< 0.005	< 0.1	< 0.01	< 0.01	< 0.2	0.02	< 0.001	0.1	0.03	0.1	13	0.062	31.8	0.034	0.036	0.005	0.025	0.002	0.003	0.003	0.001	0.003	0.001
Granja de la Cruz	385248	2126485	8.58	173	0.036	0.11	< 0.005	0.3	< 0.01	< 0.01	< 0.2	0.01	< 0.001	0.1	0.02	0.1	7	0.38	13.7	0.106	0.058	0.008	0.028	0.007	0.002	0.005	0.001	0.005	0.001
Los Adobes	385359	2126237	7.34	127	0.015	0.01	< 0.005	0.3	< 0.01	< 0.01	< 0.2	0.02	< 0.001	< 0.1	0.03	0.1	4	0.342	6.8	0.023	0.023	0.003	0.011	0.002	< 0.001	0.001	0.001	0.002	0.001
Rancho Feshi	395447	2129034	4.25	126	0.008	0.01	< 0.005	< 0.1	< 0.01	< 0.01	< 0.2	0.01	< 0.001	< 0.1	0.02	0.1	2	0.161	4	0.021	0.017	0.002	0.005	0.001	< 0.001	0.001	0.001	< 0.001	0.001
San Bartolo 1	388462	2128494	13.3	> 200	0.113	0.03	< 0.005	0.2	< 0.01	< 0.01	< 0.2	< 0.01	< 0.001	< 0.1	0.02	0.1	6	0.493	31.9	0.082	0.069	0.015	0.054	0.01	0.003	0.013	0.002	0.01	0.003
San Bartolo 2	388403	2128344	11.1	175	0.124	0.02	< 0.005	< 0.1	< 0.01	< 0.01	< 0.2	0.01	< 0.001	< 0.1	0.03	0.1	3	0.425	27.9	0.061	0.03	0.006	0.032	0.007	0.002	0.008	0.001	0.01	0.004
Corral de Piedra	398392	2124961	2.53	156	0.014	0.02	< 0.005	< 0.1	< 0.01	< 0.01	< 0.2	< 0.01	< 0.001	0.1	0.01	0.1	2	0.129	4.4	0.082	0.121	0.012	0.034	0.001	< 0.001	0.006	< 0.001	0.002	0.001
Rancho el Manzano 10	393441	2129660	5.05	146	0.015	0.01	< 0.005	0.1	< 0.01	< 0.01	< 0.2	< 0.01	< 0.001	< 0.1	0.01	0.1	2	0.077	9	0.024	0.014	0.004	0.012	0.002	< 0.001	0.001	0.001	0.002	0.001
San Gabriel Ixtla 14	381715	2129527	4.62	> 200	0.09	0.03	< 0.005	< 0.1	< 0.01	< 0.01	< 0.2	0.01	< 0.001	< 0.1	0.05	0.1	22	0.066	16.6	0.033	0.029	0.008	0.035	0.012	0.003	0.008	0.001	0.007	0.002
San Gabriel Ixtla 15	381447	2129581	3.11	> 200	0.203	0.06	< 0.005	< 0.1	< 0.01	< 0.01	< 0.2	0.04	< 0.001	< 0.1	0.04	< 0.1	14	0.022	17.9	0.138	0.199	0.037	0.157	0.037	0.011	0.037	0.006	0.026	0.005

Ixtapan de la Sal 1	428792.3	2083590	1070	> 2000	0.53	1.1	0.07	1	< 0.1	0.7	< 2	< 0.1	< 0.01	< 1	34.5	< 1	210	1220	56	0.1	0.14	0.02	0.08	0.02	0.01	0.04	< 0.01	0.05	0.01
Presa 1	381939	2120471	6.19	150	0.008	0.06	< 0.005	0.1	< 0.01	< 0.01	< 0.2	0.01	< 0.001	< 0.1	0.06	0.1	10	0.109	22.1	0.011	0.009	0.001	0.004	0.003	0.003	0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Presa 2	379404	2121572	6.06	148	0.009	0.02	< 0.005	< 0.1	< 0.01	< 0.01	< 0.2	< 0.01	< 0.001	< 0.1	0.06	0.1	12	0.107	22.7	0.011	0.012	0.001	0.006	0.002	0.002	0.001	< 0.001	0.002	0.001

Símbolo Unidades Límite de detección	Coordenadas		Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Th	U	F	Cl	NO2 (as N)	Br	NO3 (as N)	PO4 (as P)	SO4	
	X	Y	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
Agua Blanca 1	411310	2109277	0.003	<	<	<	< 0.001	<	< 0.02	< 0.001	<	< 0.3	0.003	< 0.2	0.004	0.3	< 0.3	<	0.068	0.04	2.17	<	<	0.68	< 0.02	1	
Lagrimas 1	410881	2105227	0.002	<	0.001	0.002	< 0.001	0.001	< 0.02	< 0.001	0.002	< 0.3	< 0.002	< 0.2	0.014	0.67	< 0.3	0.001	0.015	0.01	1.56	<	0.03	0.9	< 0.02	0.97	
Los Cajones	407495	2106720	0.002	<	0.001	0.002	0.001	0.002	< 0.02	< 0.001	0.002	< 0.3	< 0.002	< 0.2	0.017	0.23	< 0.3	0.001	0.002	0.01	0.7	0.01	0.03	1.18	< 0.02	1.68	
Granja de la Cruz	385248	2126485	0.003	<	0.001	0.003	0.001	0.001	< 0.02	< 0.001	0.002	< 0.3	0.004	< 0.2	0.007	0.21	< 0.3	0.001	0.071	0.08	5.26	0.01	0.03	1.25	0.1	6.74	
Los Adobes	385359	2126237	0.001	<	0.001	0.002	0.001	< 0.001	0.001	< 0.02	0.002	< 0.3	0.003	< 0.2	0.005	0.15	< 0.3	0.001	0.056	0.09	4.12	0.01	0.03	0.79	0.18	2.71	
Rancho Feshi	395447	2129034	0.001	<	0.001	0.001	< 0.001	0.001	< 0.02	< 0.001	0.002	< 0.3	< 0.002	< 0.2	0.001	0.11	< 0.3	0.001	0.05	0.03	0.79	0.01	0.03	0.33	< 0.02	0.74	
San Bartolo 1	388462	2128494	0.009	<	0.002	0.014	0.003	< 0.001	0.001	< 0.02	<	< 0.3	0.005	< 0.2	0.012	0.11	< 0.3	0.001	0.078	0.04	5.03	0.01	0.03	3.11	< 0.02	9.46	
San Bartolo 2	388403	2128344	0.018	<	0.004	0.055	0.013	0.001	0.001	< 0.02	<	< 0.3	0.002	< 0.2	0.009	0.14	< 0.3	0.001	0.079	0.03	6.23	0.01	0.03	2.55	< 0.02	7.9	
Corral de Piedra	398392	2124961	0.001	<	0.001	0.001	0.001	< 0.001	0.001	< 0.02	<	< 0.3	< 0.002	< 0.2	0.005	0.28	< 0.3	0.001	0.019	0.01	1.61	0.01	0.03	2.05	< 0.02	1.27	
Rancho el Manzano 10	393441	2129660	0.001	<	0.001	0.001	0.001	< 0.001	0.001	< 0.02	<	< 0.3	< 0.002	< 0.2	0.005	0.06	< 0.3	0.001	0.006	0.04	1.96	0.01	0.03	0.86	< 0.02	1.84	
San Gabriel Ixtla 14	381715	2129527	0.009	<	0.002	0.015	0.003	< 0.001	0.001	< 0.02	<	< 0.3	< 0.002	< 0.2	0.013	0.2	< 0.3	0.001	0.053	0.13	10.9	0.02	0.03	3.29	< 0.02	13.5	
San Gabriel Ixtla 15	381447	2129581	0.016	<	0.002	0.017	0.003	0.002	0.001	< 0.02	<	< 0.3	< 0.002	< 0.2	0.007	0.31	< 0.3	0.002	0.033	0.14	8.2	0.01	0.03	2.46	< 0.02	11.9	
Ixtapan de la Sal 1	428792.3	2083590	0.04	<	0.01	0.03	< 0.01	0.02	0.01	0.4	< 0.01	0.02	< 3	0.08	< 2	0.06	0.1	< 3	0.01	0.9	< 0.5	2130	< 0.5	< 1	< 0.5	< 1	880
Presa 1	381939	2120471	0.002	<	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001	< 0.02	<	< 0.3	< 0.002	< 0.2	0.005	0.27	< 0.3	0.001	0.033	0.06	3.21	0.01	0.03	0.06	< 0.02	2.67	
Presa 2	379404	2121572	0.001	<	0.001	0.002	0.001	< 0.001	0.001	< 0.02	<	< 0.3	< 0.002	< 0.2	0.005	0.13	< 0.3	0.001	0.033	0.06	3.3	0.01	0.03	0.01	< 0.02	2.73	