



PROYECTOS FUNCIONALES PARA LA REHABILITACIÓN INTEGRAL DE 16 PLANTAS POTABILIZADORAS EN LA CIUDAD DE MÉXICO

IDENTIFICACIÓN DE HORIZONTES SATURADOS CON AGUA DE BUENA CALIDAD EN CINCO POZOS DEL SACMEX

CONVENIO DE COLABORACIÓN No. 0011-10-ED-L-DGAT-IMTA-1-19



INFORME FINAL

**COORDINACIÓN DE HIDROLOGÍA
SUBCOORDINACIÓN DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA**

Miguel Ángel Mejía González y Luis González Hita

México, 2019



1	ANTECEDENTES.....	1
1.1	CLIMA	1
1.2	TEMPERATURA MEDIA ANUAL.....	1
1.3	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL.....	2
1.4	EVAPORACIÓN POTENCIAL MEDIA ANUAL	2
1.5	FISIOGRAFÍA	2
1.6	MODELO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO	4
2	DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN DE LOS POZOS SANTA CATARINA Y TULYEHUALCO	11
2.1	DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE CAMPO	12
2.2	TOMA DE MUESTRAS EN LA VERTICAL	16
2.3	DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS QUÍMICOS EN LABORATORIO	21
2.3.1	<i>Pozo santa Catarina 5</i>	<i>22</i>
2.3.2	<i>Pozo Tulyehualco 6.....</i>	<i>27</i>
2.4	DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN DE LOS POZOS SANTA CATARINA 5 Y TULYEHUALCO 6.	32
2.4.1	<i>Parámetros químicos.....</i>	<i>32</i>
2.4.2	<i>Parámetros isotópicos.....</i>	<i>32</i>
2.4.3	<i>Conclusiones</i>	<i>36</i>
2.5	ELABORACIÓN DE ESTRATOS DE PERFILES GEOLÓGICOS CON BASE EN SONDEOS TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS.	37
2.5.1	<i>Metodología.....</i>	<i>37</i>
2.5.2	<i>Resultados.....</i>	<i>40</i>
2.6	PROPUESTA DE DISEÑO DEL POZO DE REPOSICIÓN SANTA CATARINA 5, DE TAL MANERA QUE EL AGUA ENTREGADA SEA DE BUENA CALIDAD.	41
2.7	PROPUESTA DE REHABILITACIÓN DEL POZO SANTA CATARINA 5 PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA.	45
3	DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN DEL POZO POPOTLA	46
3.1	DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE CAMPO	46
3.2	DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS EN LABORATORIO	50
3.2.1	<i>Diagramas de piper y stiff</i>	<i>51</i>
3.2.2	<i>Diagramas binarios.....</i>	<i>56</i>
3.3	DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN DEL POZO POPOTLA.....	57
3.3.1	<i>Temperatura del agua de los pozos.....</i>	<i>57</i>
3.3.2	<i>Oxígeno disuelto del agua de los pozos.....</i>	<i>57</i>
3.3.3	<i>Conductividad</i>	<i>58</i>
3.3.4	<i>Registro eléctrico del pozo popotla.....</i>	<i>58</i>
3.4	CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES.....	59
3.4.1	<i>Reposición del pozo Popotla.....</i>	<i>59</i>
3.4.2	<i>Sellar a profundidad el pozo Popotla</i>	<i>59</i>
4	DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN DEL POZO JARDINES DEL PEDREGAL 5B	60
	DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE CAMPO Y TOMA DE MUESTRAS.....	61
4.1	DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE LABORATORIO.....	62
4.2	DIAGRAMAS DE PIPER Y STIFF.....	64
4.3	PERFILES DE CALIDAD DEL AGUA	66



4.4	DIAGRAMAS BINARIOS	68
4.5	ISOTOPOS ESTABLES	69
4.6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	69
5	DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN DEL POZO ATORON 6	70
5.1	DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE CAMPO Y TOMA DE MUESTRAS	71
5.1.1	<i>Descarga del pozo</i>	71
5.1.2	<i>Vertical</i>	72
5.2	DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE LABORATORIO	73
5.2.1	<i>Descarga</i>	73
5.2.2	<i>Vertical</i>	74
5.3	DIAGRAMAS BINARIOS	75
5.4	DIAGRAMAS DE PIPER Y STIFF.....	76
5.5	ISÓTOPOS ESTABLES	78
5.6	CONCLUSIONES	78
6	INTERPRETACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LOS PARÁMETROS DE LAS MUESTRAS DE AGUA	79
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
8	ANEXOS.....	94



1 ANTECEDENTES

1.1 CLIMA

Debido a las características topográficas existentes dentro de la Región XIII Valle de México, en este valle se encuentra una gran diversidad de climas. Sin embargo, dentro de esta variedad, predomina el templado o mesotérmico. Los climas templados se concentran en los valles altos de la parte noroeste del Estado de México, así como en el centro y este de la Subregión Valle de México, ocupando más del 45% de la superficie total de la Región XIII; siguen en importancia los climas secos y semisecos que predominan principalmente en la porción centro-norte del Estado de México.

De acuerdo al sistema de clasificación de Köpen modificado, debido a las diferencias de relieve y altitud, para la región en estudio se han identificado siete grupos de climas en la Cuenca del Valle de México. Dentro del acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México se tienen dos tipos de clima que son: un clima templado subhúmedo (Cb (Wo) (W)) y un clima templado subhúmedo (Cb (W) (W)).

Clima templado subhúmedo (Cb (Wo) (W)).

Este tipo de clima es la variante menos húmeda de los templados, con lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal menor de 5%. Es a la vez el tipo más importante de este grupo de climas, pues se le encuentra distribuido en un 22% de la superficie de la Región XIII, se localiza principalmente en la mayor parte de la Ciudad de México, así como en la porción central y oriente del Estado de México, en parte de los municipios de Chalco, Ixtapaluca, La Paz, Texcoco, Atenco, Tepetlaoxtoc y Otumba; se localiza también en la mayor parte de los municipios de Emiliano Zapata, Apan, Almoloya, Tepeapulco, Tlanalapa y Zempoala del Estado de Hidalgo.

Clima templado subhúmedo (Cb (W) (W)).

Este tipo de clima que se presenta en el acuífero es el más húmedo de los templados con lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal menor del 10%. Su distribución es del 13.6 % de la superficie de la Región XIII, se localiza principalmente en la porción occidental del Estado de México, en los municipios de Huixquilucan, Naucalpan, Tlanepantla, Atizapán de Zaragoza, Jilotzingo, Nicolás Romero, Tepotzotlán, Villa del Carbón, Morelos, Chapa de Mota y Jilotepec entre otros.

1.2 TEMPERATURA MEDIA ANUAL

Se definen dos tipos de temperatura predominantes en el valle de México, principalmente asociado a los tipos de clima que predominan. Para la zona donde predomina el tipo de clima templado subhúmedo (Cb (Wo) (W)), se define una temperatura media anual que varía entre 8° y 11° C. Para esta zona, la temperatura media más cálida se presenta en el mes de



junio, con un valor entre 12° y 15° C y la más fría de diciembre a febrero, con valores entre los 3° y los 5° C.

Para la región donde se presenta un clima de tipo templado subhúmedo (Cb (W) (W)), la temperatura media anual oscila entre 12° y 18° C. En estas zonas el mes más cálido es mayo con una temperatura media que varía de 14° a 16° C. El mes más frío es enero, con temperaturas medias de 5° a 8° C.

1.3 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL

La precipitación pluvial en el valle de México oscila entre 500 a más de 700 mm anualmente dependiendo de la zona geográfica, asociado principalmente con los tipos de clima existentes en el valle.

El régimen pluvial que se presenta en las zonas con clima templado subhúmedo (Cb (Wo) (W)), es entre 500 y 600 mm. La mayor precipitación pluvial en estas zonas se registra en los meses de junio con un valor que oscila entre 100 y 110 mm y la mínima en los meses de febrero y diciembre, con valores menores a 5 mm.

Para la región donde se presenta un clima de tipo templado subhúmedo (Cb (W) (W)), la precipitación media anual es mayor de 700 mm. La máxima incidencia de lluvias se presenta en mes de julio, con un valor que fluctúa entre 150 y 160 mm. La menor precipitación se presenta en los meses de febrero y diciembre, con valores menores de 5 mm.

La precipitación media anual es de 768.5 mm.

1.4 EVAPORACIÓN POTENCIAL MEDIA ANUAL

El volumen de evaporación potencial promedio para el periodo de 1978 a 1997 en las estaciones Ajusco-Pueblo, Ciudad Universitaria CU, Col. Santa Úrsula, km 6 + 250, Milpa Alta, San Juan de Aragón, Santa Ana, Sistema Meteorológico Nacional de Tacubaya y Tláhuac; es de 1558.76 mm.

1.5 FISIOGRAFÍA

La Cuenca del Valle de México forma parte del Eje Neovolcánico o Faja Volcánica Transmexicana, la cual se extiende en dirección este-oeste atravesando la República Mexicana y es considerada como una provincia fisiográfica independiente al resto de la República. También es denominada como provincia de Zona de Fosas Tectónicas y Vulcanismo Reciente. Las características para considerarla como una zona fisiográfica diferente es por predominar en ella derrames basálticos, numerosos volcanes y lagos, cuya morfología, orientación y distribución sugieren estar situados en fosas tectónicas y de ahí se le asigna este último nombre.



La Zona Metropolitana de la Ciudad de México se encuentra limitada por elevaciones topográficas de origen volcánico como son la Sierra de Guadalupe al norte, la Sierra de las Cruces al poniente, la Sierra Chichinautzin al sur, el volcán del Ajusco al suroeste y la Sierra Nevada al oriente. Dentro de este valle existen algunos aparatos volcánicos aislados, siendo los principales los que forman la Sierra de Santa Catarina y existiendo algunos otros que aparecen en forma aislada como son el Peñón del Marqués, el Peñón de los Baños y el Cerro de la Estrella.

Lo que ahora constituye el Valle de México, antiguamente drenaba hacia el sur. Las corrientes superficiales que circulaban en dicha dirección fueron interrumpidas por el afloramiento volcánico a través de conos que dieron origen a la Sierra de Chichinautzin, dejando al Valle de México sin drenaje al exterior y convirtiéndolo en una cuenca cerrada, razón por lo que se acumularon materiales vulcanosedimentarios que progresivamente almacenaron agua tanto superficial como subterránea, y formaron en la parte central del valle los lagos de Zumpango, Texcoco, Xochimilco y Tláhuac.

Los materiales que rellenaron el Valle de México y que constituyen el subsuelo corresponden a intercalaciones de productos volcánicos tales como lavas, tobas y cenizas que incluyen materiales granulares transportados por ríos y arroyos provenientes de las partes topográficamente más altas que circularon hacia los valles. Cubriendo a dichos materiales y en espesores variables, se encuentran arcillas y arenas finas que son el producto del sedimento de los antiguos lagos.

Al sur del valle se encuentra la Sierra Chichinautzin de edad cuaternaria, que divide geográficamente al estado de Morelos con la Ciudad de México, constituida por derrames lávicos vesiculares muy extensos, masivos o lajeados de composición andesítica y basáltica de textura fina a media, que pertenece a la Formación Chichinautzin, (Fries, 1960).

La Sierra de las Cruces ubicada al poniente del valle de México divide al Estado de México con la Ciudad de México, siendo constituida principalmente por extensos derrames de lava y domos de composición andesítica-dacítica y afinidad calcialcalina, alternándose con flujos piroclásticos de bloques y cenizas, flujos de piedra pómez, oleadas piroclásticas, depósitos de caída, flujos de detritos y lodo, así como colapsos que originaron depósitos de avalanchas de escombros.

En la parte este de la Cuenca de Chalco se localiza la Sierra de Río Frío, con orientación N-S y conformada en su mayor parte por derrames riolíticos, hacia el sur esta prominencia se conoce como Sierra Nevada, con estructuras importantes como el volcán Iztaccíhuatl y Popocatepetl, (Schlaepfer, 1968).

Hacia el límite oeste se ubica el área chinampera de Tláhuac sobre depósitos lacustres y aluviales, constituidos por cenizas volcánicas, material piroclástico, tobas, brechas y arcillas.

En la parte central del valle se encuentra el área del ex lago de Chalco que corresponde a una planicie lacustre. A la altura del antiguo nivel de agua del lago, se encuentra un anillo de roca

piroclástica de 100 m de altura y 1,500 m de diámetro, resultado de la interacción de magma basáltico con agua, llamado Cerro el Xico que se fusiona con otro semejante conocido como el Xico Viejo (De Cerna et al., 1988).

1.6 MODELO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

La Cuenca de México es una cuenca endorréica de carácter lacustre, donde la corteza ha sufrido grandes esfuerzos, produciéndose un intenso fracturamiento. Está circundada por montañas y cubierta en diferentes puntos por áreas lacustres producto de lagos que existieron al final de la época glacial. Al cerrarse la cuenca en el Cuaternario Superior, las aguas pluviales quedaron encajonadas, formando un conjunto de lagos someros. Podrían mencionarse hacia el centro el Lago de México, al este el de Texcoco, al sur los de Xochimilco y Chalco, que formaban uno solo y al norte el de Zumpango (Figura 1-1).

El fondo de la Cuenca es una planicie lacustre de 1,431 km², a una altitud que varía entre 2,230 y 2,240 msnm. El parteaguas de la cuenca se extiende por la zona montañosa circundante, la que frecuentemente se eleva por encima de los 3,000 msnm.

El acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México se encuentra ubicado en el sur poniente de la Cuenca del Valle de México, ocupa el 17% de la superficie de la cuenca endorreica. La Ciudad de México y su área conurbada depende fundamentalmente para abastecimiento de agua potable del suministro del acuífero.

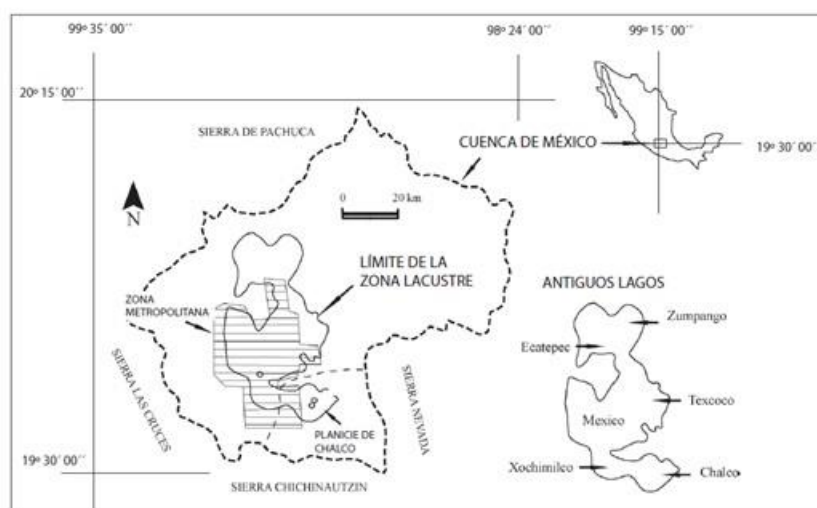


Figura 1-1. Cuenca de México y planicie lacustre (Ortiz-Zamora y Ortega-Guerrero, 2007)

El modelo conceptual del acuífero de la cuenca del Valle de México (Rudolph et al., 1991; Mooser y Molina, 1993; Vázquez, 1989, Ortega et al., 1997, Huizar et al., 2003, Herrera-Zamarón et al., 2006) considera que, en vista de la relación existente entre la secuencia litológica y su permeabilidad, se tiene una continuidad hidráulica entre las diversas unidades



hidrogeológicas existentes en la cuenca de México. De este modo, las unidades estratigráficas, hidrogeológicamente estarían dispuestas de la siguiente manera: acuitardo superior, acuífero superior, acuitardo medio, acuífero medio, acuitardo inferior y un acuífero inferior (Tabla 1-1, Figura 1-2 y Figura 1-3). Particularidades de estas unidades se describen a continuación:

Tabla 1-1 Unidades hidroestratigráficas en la Cuenca de México

Unidad	Clasificación Hidrogeológica		Litología
1	Baja permeabilidad granular	Acuitardo superior	Arcilla lacustre
2	Permeabilidad media alta de tipo granular primaria y secundaria debida a fracturamiento	Acuífero superior	Aluviones, lavas basálticas y tobas del Cuaternario; así como depósitos de la Formación Tarango. Además de basaltos del Terciario Superior
3	Baja permeabilidad granular	Acuitardo medio	Arcilla lacustre del Terciario Superior
4	Permeabilidad baja a media, debida a fracturamiento	Acuífero medio	Rocas ígneas ácidas del Mioceno e intermedias del Oligoceno
5	Baja permeabilidad granular y de fracturamiento	Acuitardo inferior	Conglomerados del Eoceno; así como margas, areniscas, lutitas y carbonatos compactos del Cretácico Superior
6	Permeabilidad media a alta, originada por fracturamiento y canales de disolución	Acuífero inferior	Carbonatos de las formaciones Morelos y El Doctor.

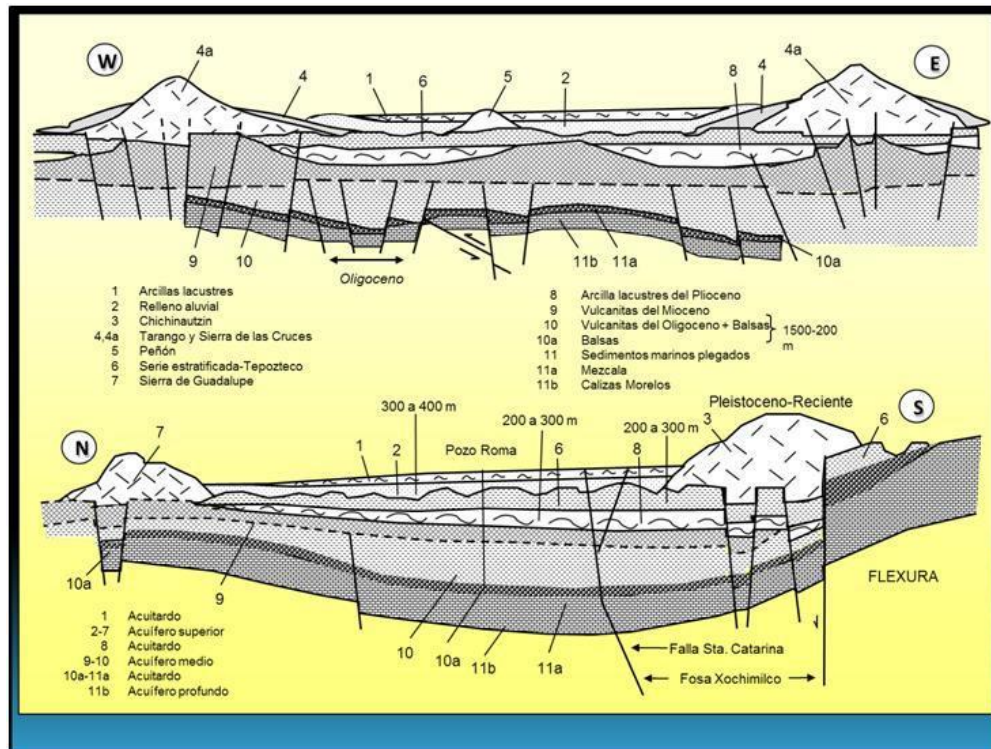


Figura 1-2. Modelo conceptual de funcionamiento de los multiacuíferos del Valle de México (Mooser, 1993)

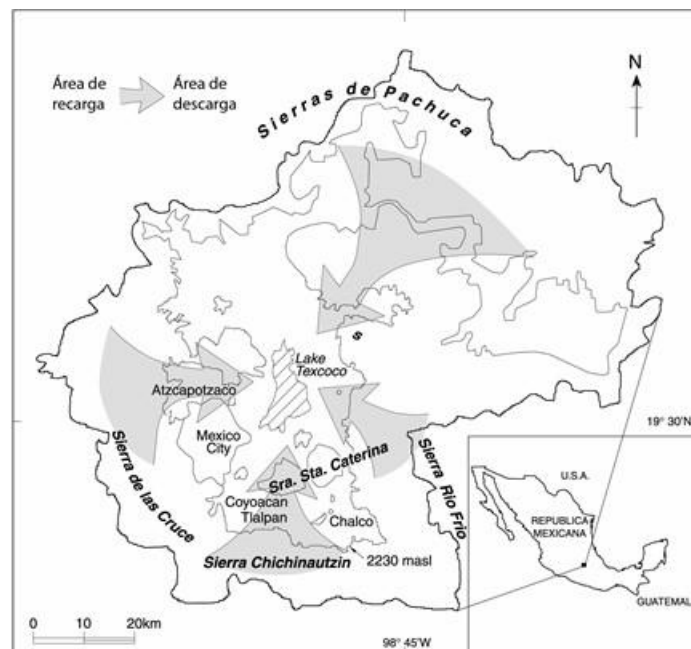


Figura 1-3 Áreas de recarga y descarga del agua subterránea de la Cuenca del Valle de México (Edmunds, et.al., 2002).

Unidad uno de baja permeabilidad (acuitardo superior)

Depósitos lacustres del cuaternario

La componen depósitos de arcillas lacustres del cuaternario que afloran, principalmente, en la porción meridional de la Cuenca de México y llegan a tener un espesor que va de los 5 a los 300 m. Por el efecto del bombeo de las unidades permeables subyacentes, la arcilla lacustre transmite agua a través de un “proceso de goteo” en forma vertical descendente al acuífero superior (Sánchez-Díaz, 1989; Cardona y Hernández, 1995). Suelen presentar una conductividad hidráulica de 2.3×10^{-9} a 5.6×10^{-8} m/s (Rudolph et al., 1991) y un valor de transmisividad de 2×10^{-7} m²/s (Lesser, 1993).

Como se mencionó anteriormente, la Cuenca de México se cerró en el Cuaternario Superior, formándose en su interior una serie de lagos que no tenían salida. La salinidad era variable de lago a lago: Los lagos Zumpango, Ecatepec y Texcoco, en la parte baja de la cuenca eran salinos (Peñafiel, 1884). Las sales, concentradas por evaporación (Ortega-Guerrero, 1997), ahora se manifiestan como agua de poro altamente salina en los sedimentos del acuitardo de la parte baja de la cuenca. Rudolph et al. (1991) reportó valores de cloruros hasta de 60,000 mg/l en los sedimentos lacustres de Texcoco. Ortega-Guerrero et al. (1997) midió valores de cloruros hasta de 4000 mg/l en el acuitardo lacustre del vaso de Chalco (Figura 1-4).

El ademe liso de los pozos emplazados en la zona del vaso de Chalco (entre ellos los pozos Santa Catarina 5 y Tulyehualco 6) debe ser lo suficientemente largo para evitar extraer el agua de poro salina del acuitardo.

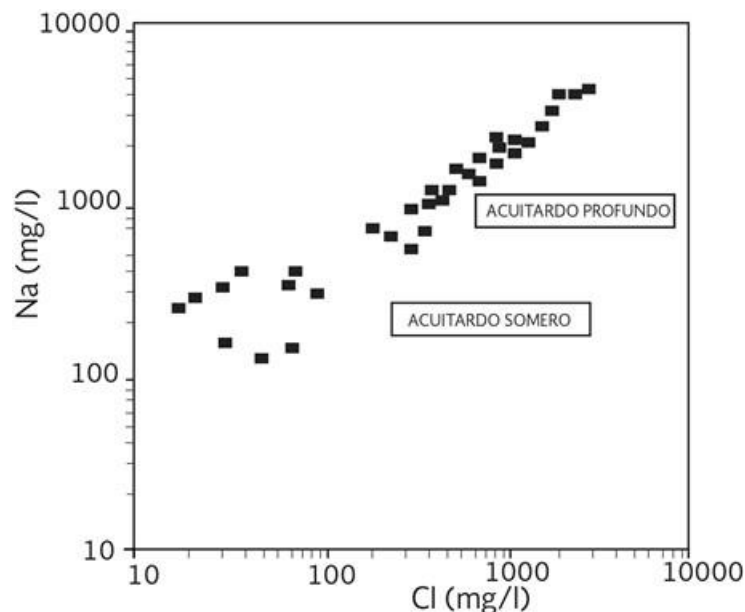


Figura 1-4. Concentración de cloruro versus sodio en el acuitardo del vaso de Chalco (Ortega-Guerrero et al. 1997)

Unidad dos de permeabilidad media a alta (acuífero superior)

En la mayor parte de la planicie de la Cuenca de México, este acuífero -granular, mixto y fracturado- se encuentra subyaciendo a las arcillas lacustres. Es el acuífero del que se extrae la mayor parte del agua subterránea en la cuenca. El acuífero superior mixto granular fracturado se halla conformado por la siguiente secuencia litológica:

Depósitos aluviales del Cuaternario

Estos son depósitos de arenas y gravas, principalmente, que hacia las zonas montañosas se interdigitan con las lavas y piroclásticos. Su espesor se incrementa hacia el centro de las planicies. La producción por pozo, en la zona de la Ciudad de México, suele oscilar entre los 30 y los 60 lps; el caudal específico entre 1.4 y 5.5 l/s/m (Sánchez-Díaz 1989 y 1994) y la transmisividad va de 2.4×10^{-3} a $7.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (Huizar-Álvarez, 1993; Vázquez, 1995).

Vulcanitas del Cuaternario

Están representadas por una secuencia litológica de piroclastos y lavas de tipo básico principalmente. Afloran en las sierras del Chichinautzin y Santa Catarina, así como en diversos cerros. Tienen una permeabilidad ocasionada por la presencia de fracturas y diaclasas. La producción promedio por pozo ubicado en la sierra del Chichinautzín (sur del DF) oscila entre los 50 y 140 lps, con un caudal específico de 0.5 a 2.2 l/s/m (Sánchez y Gutiérrez, 1997). Los valores de transmisividad fluctúan entre 0.011 y $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ (Lesser, 1993).

Tobas del Cuaternario

Consideradas como materiales de baja a mediana permeabilidad, de acuerdo con lo establecido por la CNA (2002d), se consideran como parte del acuífero superior. De acuerdo con valores consignado en Davis y De Wiest (1971), en depósitos similares en E.U.A., se tiene una transmisividad de $2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Formación Tarango

Está conformada por abanicos aluviales y lahares intercalados con capas de pómez, cenizas, suelos, gravas y arenas de origen fluvial. Suprayace a las rocas porfidoandesíticas de la sierra de las Cruces, entre otras. Estos depósitos, en conjunto, muestran una transmisividad de 6×10^{-4} a $2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (Sánchez-Díaz, 1994).

Rocas ígneas porfido andesíticas del Cuaternario

Representadas por andesitas y dacitas porfídicas que afloran en las sierras Nevada, Río Frío y Las Cruces. Por su porosidad secundaria a base de fracturas, se considera que transmite el



agua hacia la planicie. Muestran una transmisividad promedio de $9 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (Sánchez-Díaz, 1994).

Vulcanitas del Plioceno

Conformadas por numerosos estrato-volcanes de composición andesítica y dacítica que sostienen a una serie de domos ácidos, como los de la sierra de Xochitepec (suroeste de Xochimilco) y la base de la sierra de Guadalupe, experimentan una porosidad secundaria debida a fracturamiento; sin embargo, su conductividad hidráulica es de alrededor de $2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$.

Unidad tres de baja permeabilidad (acuitardo medio)

Depósitos lacustres del Plioceno

El estudio sísmico realizado por Pemex en 1986 (en: Mooser *et al.*, 1996) indica que arcillas lacustres se hallan en la secuencia litológica del subsuelo de la Ciudad de México; acusan un espesor máximo de 300 m y contienen, probablemente, lavas basálticas intercaladas con arcillas lacustres. Dada su antigüedad y posible consolidación, por carga litostática, se juzga que los valores de transmisividad y conductividad hidráulica son menores a los establecidos en las arcillas lacustres del Cuaternario.

Unidad cuatro de permeabilidad baja a media (acuífero intermedio)

Este acuífero fracturado consiste de andesitas, riolitas y escasos basaltos, que muestran una permeabilidad secundaria a base de fracturas; implicando esto, conductividades hidráulicas que varían entre 10^{-8} y 10^{-4} m/s (Huizar *et al.*, 2003). Dependiendo de su posición en la secuencia litoestructural en cada acuífero, puede funcionar como libre, semiconfinado o confinado.

Unidad cinco de permeabilidad baja (acuitardo inferior)

El acuitardo inferior está conformado por los depósitos continentales del Eoceno-Oligoceno y carbonatos del Cretácico Superior, cuyas características hidrogeológicas se comentan a continuación:

Depósitos continentales del Eoceno–Oligoceno

Representados por el Grupo El Morro o Balsas, según Mooser *et al.* (1996), se hallan en la secuencia litológica del subsuelo de la zona en estudio. En algunas partes del Estado de Morelos, éstos afloran y manifiestan muy baja porosidad y permeabilidad porque los clastos están contenidos en una matriz arcillo–limosa.



Rocas del Cretácico superior

Conformadas por margas, areniscas y lutitas, así como también de calizas delgadas intercaladas con lutitas como en el caso de las formaciones Agua Nueva, San Felipe y Soyatal. Por su litología, no se consideran unidades acuíferas.

Unidad seis de permeabilidad media a alta (acuífero inferior)

Rocas del Cretácico inferior

Están representadas principalmente por las calizas de la Formación Morelos. En algunas zonas de la entidad del mismo nombre, éstas afloran y muestran una permeabilidad alta, debido al intenso fracturamiento y a los canales de disolución de que son objeto.

2 DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN DE LOS POZOS SANTA CATARINA Y TULYEHUALCO

La localización de los pozos Santa Catarina 5 y Tulyehualco 6 se muestra en el recuadro rojo de la **Figura 2-1**.



Figura 2-1 Localización de los pozos Santa Catarina 5 y Tulyehualco 6

Las coordenadas de los pozos se muestran en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1 Coordenadas de los pozos

POZO	ESTE	NORTE	ZONA
DEPORTIVO REYNOSA	480801	2156553	14 Q
XOCHINAUC	478708	2156330	14 Q
AZCAPOTZALCO 1	478491	2157097	14 Q
POPOTLA	479113	2157393	14 Q
JARDINES DEL PEDREGAL	489992	2153232	14 Q
TULYEHUALCO 6	499232	2133571	14 Q
SANTA CATARINA 5	499015	2132979	14 Q
ATORON 6	491725	2151267	14 Q

2.1 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE CAMPO

Los parámetros medidos en campo, fueron: temperatura del agua, temperatura ambiente (T), potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD) y potencial redox (Eh). Los significados de estos parámetros y las metodologías utilizadas se describen a continuación.

Temperatura (T)

Las temperaturas del ambiente y del agua se midieron con electrodos previamente calibrados en laboratorio y verificados en campo. La precisión de los equipos utilizados es de una décima de grado centígrado. Estos parámetros son importantes para conocer la temperatura en la que se encuentra el agua subterránea al momento de ser muestreada, así como para corregir varios de los parámetros medidos en campo que varían en función de la temperatura, como es el caso de la C.E. y del Eh.

Potencial de hidrógeno (pH)

La medición de la actividad de los iones hidrógeno en el agua subterránea se efectuó por medio de un potenciómetro. La calibración del equipo se realizó utilizando la técnica de calibración en tres puntos, a partir de soluciones *buffer* de pH conocido. En esta técnica, el pH a registrar debe ubicarse entre tales valores extremos. En la calibración del equipo se utilizaron soluciones de 4.0, 7.0 y 10.0 unidades de pH.

Conductividad Eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica del agua es la propiedad que mide la facilidad de conducción de una corriente eléctrica, proceso que en el caso de una solución acuosa es función de la concentración de electrolitos presentes. Por tanto, el registro de este parámetro permite identificar de manera indirecta su salinidad o la concentración de constituyentes disueltos.



La calibración del equipo se realizó utilizando una solución estándar de cloruro de potasio (KCl) de $1,412 \mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C .

La conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales calculados se registraron por medio de un conductivímetro portátil con compensación por temperatura. Los sólidos disueltos totales se estimaron con el mismo aparato con el cual se registró la conductividad eléctrica, multiplicándola por un factor de 0.72.

Oxígeno disuelto (OD)

El oxígeno se disuelve en el agua hasta que su presión parcial iguale a la existente en la atmósfera, es decir hasta que las presiones en la fases gaseosa y líquida alcanzan el equilibrio. El agua disuelve aproximadamente 9 mg/L de oxígeno a una temperatura de 20°C y una presión atmosférica de $1,013 \text{ mbar}$ en estado saturado. La concentración de oxígeno depende de varios factores; tales como: temperatura, altitud (presión atmosférica), consumo de oxígeno por la biodegradación por microorganismos, reacciones químicas en el medio subterráneo, etc.

La medición de la cantidad de oxígeno disuelto en el agua subterránea se llevó a cabo utilizando un electrodo con sensor de membrana galvánica recubierta, con compensación de temperatura. En este caso específico, el electrodo de oxígeno disuelto se calibró de acuerdo con las condiciones atmosféricas del lugar, es decir en equilibrio con el aire a la elevación sobre el nivel medio del mar del sitio.

Potencial redox (Eh)

El potencial redox del agua subterránea se midió con un electrodo de tipo combinado, que consiste de un filamento de platino y un electrodo de referencia de plata-cloruro de plata con electrolito de referencia de cloruro de potasio 3 mol/L . El elemento sensible donde se realiza la transferencia de electrones es el filamento de platino, por lo que este se mantuvo limpio y pulido para evitar mediciones erróneas.

Se reconoce en la literatura especializada que la obtención en campo de lecturas válidas y reales de potencial redox es relativamente complicada, sobre todo en medios oxidantes donde las concentraciones de hierro disuelto son bajas. La complicación se debe, entre otros factores a: i) fallas del electrodo utilizado, ii) cinética lenta en algunas de las especies que se presentan en estado de oxidación y reducción, lo que provoca desequilibrio entre los diferentes pares redox presentes en la solución y iii) presencia de potenciales naturales mezclados.

Para la verificación del funcionamiento del equipo y para referenciar la lectura de campo al electrodo de hidrógeno se utilizó una solución Zobell's estándar (mezcla de reactivos de ferrocianuro y ferricianuro de potasio) de 428 mV , colocando el electrodo en un tubo de ensaye con la solución Zobell's.



Figura 2-2 Equipo utilizado para medir parámetros en campo



Figura 2-3 Medición de parámetros físico-químicos de campo en el pozo Santa Catarina 5

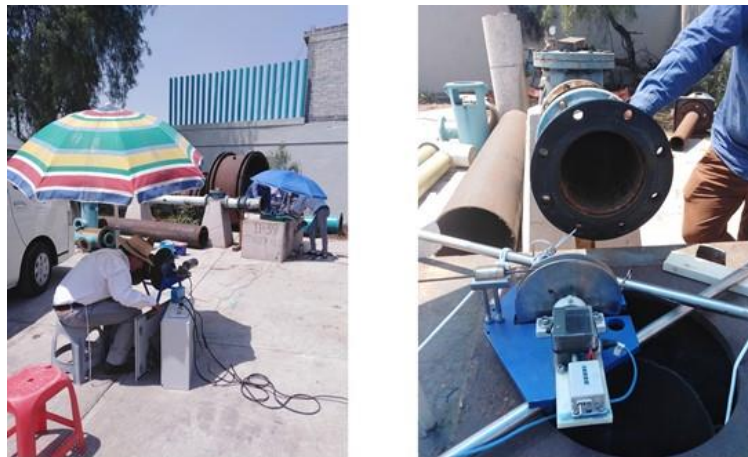


Figura 2-4 Medición de parámetros físico-químicos de campo en el pozo Tulyehualco 6

En la

Tabla 2-2 se muestran los datos de campo de los pozos Santa Catarina 5 y Tulyehualco 6. Se observan valores de conductividad muy altos, lo cual indicaría que el agua de los pozos tiene altos contenidos de sales. Así mismo, también se puede ver que los valores de potencial redox son bajos, lo cual indicaría condiciones reductoras en el acuífero. Los valores de oxígeno disuelto indican condiciones anaerobias en el agua subterránea.

Tabla 2-2 Datos de campo de los pozos Santa Catarina 5 y Tulyehualco 6



FECHA: 11 de abril de 2019							
POZO	ESTE	NORTE	Temp	pH	Eh	DO	COND
	m	m	oC		mV	mg/l	microS/cm
SANTA CATARINA 5 (65 m)	499015	2132979	19.47	7.68	-352	0.30	3,570
SANTA CATARINA 5 (80 m)	499015	2132979	19.48	7.72	-365	0.18	3,620
SANTA CATARINA 5 (95 m)	499015	2132979	19.5	7.74	-364	0.15	3,650
SANTA CATARINA 5 (130 m)	499015	2132979	19.51	7.77	-363	0.13	3,730
SANTA CATARINA 5 (250 m)	499015	2132979	19.52	7.8	-366	0.12	3,760
SANTA CATARINA 5 (260 m)	499015	2132979	19.48	7.81	-356	0.11	3,740
SANTA CATARINA 5 (270 m)	499015	2132979	19.55	7.84	-384	0.11	3,690
SANTA CATARINA 5 (290 m)	499015	2132979	19.55	7.85	-393	0.10	3,640
TULYEHUALCO 6 (90 m)	499232	2133571	22.4	8.51	-49	0.8	7010
TULYEHUALCO 6 (100 m)	499232	2133571	22.2	8.54	-200	1	6920
TULYEHUALCO 6 (110 m)	499232	2133571	22.3	8.55	-162	1	6890
TULYEHUALCO 6 (120 m)	499232	2133571	22.5	8.39	-144	0.8	6850
TULYEHUALCO 6 (140 m)	499232	2133571	22.6	8.37	-200	0.9	6580
TULYEHUALCO 6 (150 m)	499232	2133571	22.7	8.35	-111	0.7	6530
TULYEHUALCO 6 (160 m)	499232	2133571	22.1	8.36		0.8	6580
TULYEHUALCO 6 (170 m)	499232	2133571	21.2	8.47		1	6600
TULYEHUALCO 6 (180 m)	499232	2133571	21.3	8.62		0.9	7340
TULYEHUALCO 6 (190 m)	499232	2133571	21.3	8.62		0.9	8070

2.2 TOMA DE MUESTRAS EN LA VERTICAL

El equipo utilizado para la obtención de muestras de agua de pozos profundos en la vertical, está integrado por los componentes siguientes:

- 1.- Botella muestreadora de acero inoxidable grado alimenticio.
- 2.- Polea de acero inoxidable.
- 3.- Malacate impulsado por un motor eléctrico con piola de alta resistencia.
- 4.- Monitor electrónico de visualización e identificación de profundidad.

La botella muestreadora está fabricada con acero inoxidable grado alimenticio (Figura 2-5 y Figura 2-6). Su diámetro exterior es de 70 mm, capacidad de almacenamiento de 1,000 ml de muestra de agua y rango de operación de 0 m hasta 500 m de profundidad. Está provista de un sistema de cierre hermético activado por un mensajero que se lanza desde la superficie, dirigido por medio de una cuerda de nylon; se acopla a un dispositivo electrónico de registro de profundidad.



Figura 2-5 Botella para toma de muestras de agua en pozos profundos (cerrada)



Figura 2-6 Botella para toma de muestras de agua en pozos profundos (abierta)

Durante el muestreo se colectaron muestras de agua para análisis de metales y aniones, isótopos estables de hidrógeno y oxígeno, y muestras para la determinar el contenido de nitrógeno amoniacal.

Para eliminar las partículas de materiales en suspensión presentes en el agua subterránea, se realizó el filtrado de las muestras mediante membranas de celulosa con tamaño de poro de 0.45 micrones, utilizando presión positiva, tal como se muestra en la Figura 2-7. El filtrado de la muestra se realiza para eliminar el material particulado existente en el agua y evitar alteraciones de las muestras, ocasionadas por intercambio químico con las partículas suspendidas, con lo cual se garantiza que el análisis de laboratorio se realice exclusivamente de los iones disueltos y de los componentes en solución.



Figura 2-7 Equipo utilizado para el filtrado de las muestras de agua

Las muestras de agua recolectadas para la determinación de los diferentes parámetros, se envasaron en botellas de polietileno de alta densidad. Las muestras se preservaron de acuerdo con las especificaciones dadas por los laboratorios de análisis contratados. Las muestras para metales se acidificaron a $\text{pH} < 2$ con ácido nítrico de ultra alta pureza, las muestras para aniones e isótopos estables se preservarán únicamente a 4°C , las muestras para nitrógeno amoniacal se preservaron con ácido sulfúrico a $\text{pH} < 2$.



La preservación de las muestras de agua subterránea y tipo de envases utilizados para los diferentes parámetros medidos, se detallan en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3 Descripción de volúmenes requeridos para la medición de parámetros fisicoquímicos, tipo de envases y preservación

Parámetro	Envase	Preservación
Oxígeno-18 y Deuterio	120 mL envase de polietileno de alta densidad	4 ° C
Cloruros	60 mL envase de polietileno de alta densidad (Nalgene)	4 ° C
Fluoruros		
Fosfatos		
Nitratos		
Nitritos		
Sulfatos		
Nitrógeno Amoniacal	1000 mL envase de polietileno de alta densidad (Nalgene)	pH < 2 con ácido sulfúrico
Ag, Al, As, Au, Br, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Ga, Gd, Ge, Hf, Hg, Ho, I, In, K, La, Lu, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Nd, Ni, Os, P, Pb, Pd, Pr, Pt, Re, Ru, S, Sb, Se, Si, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Te, Th, Ti, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr	60 mL envase de polietileno de alta densidad (Nalgene)	pH < 2 con HNO ₃



Figura 2-8 Toma de muestras en la vertical



Figura 2-9 Muestras de agua de los pozos Santa Catarina 5 (izquierda) y Tulyehualco 6 (derecha). Presentan color amarillo y fuerte olor a Nitrógeno Amoniacal.

2.3 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS QUÍMICOS EN LABORATORIO

Los análisis químicos de las muestras de agua subterránea, se realizaron por medio de inducción de plasma acoplado a espectroscopia óptica (cationes) y cromatografía de líquidos (aniones). El método fue EPA-200.1/EPA 300.1.

El Laboratorio de Geoquímica Ambiental cuenta con el siguiente equipo e instalaciones para la preparación y análisis de muestras (Figura 2-10).

- Espectrómetro de emisión óptica con plasma acoplado por inducción Thermo iCAP 6500 Duo View.
- Espectrofotómetro de Absorción Atómica Perkin Elmer Analyst 300 con flama y sistema de inyección de flujo FIAS 100.
- Cromatógrafo de líquidos de alta resolución Dionex IC1100 con bomba isocrática y detector de conductividad.
- Potenciómetro ORION950.
- Sistema de digestión con microondas CEM MarxXpress con controlador de temperatura.
- Campana de flujo laminar y campana de extracción de polipropileno.



Figura 2-10 Equipo e instalaciones para la preparación y análisis de muestras de agua subterránea.

2.3.1 POZO SANTA CATARINA 5

En la Tabla 2-4 se muestran en color rojo los parámetros que exceden el Límite Máximo Permitido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 modificada en 2000 (Anexo A). En cuanto al Boro, la NOM-127-SSA1-1994 modificada en 2000, no incluye valores de referencia, pero los criterios ecológicos de calidad del agua (Sedue, 1989) indican un máximo permisible de 1 mg/l para uso público urbano, valor que coincide con el indicado por la Directiva Europea (Weinthal, Parag, Vengosh, Muti, & Kloppmann, 2005). La Organización Mundial de la Salud provisionalmente marca el límite en 2.4 mg/l (WHO, 2009).

Tabla 2-4. Parámetros químicos de laboratorio del pozo Santa Catarina 5

Elemento analizado	Nitrogeno Amoniacal
Unidad	mg/l
Santa Catarina 60m	11.5
Santa Catarina 70m	13.0
Santa Catarina 80m	11.5
Santa Catarina 100m	14.8
Santa Catarina 120m	14.1
Santa Catarina 140m	14.9
Santa Catarina 150m	14.8
Santa Catarina 250m	14.4
Santa Catarina 260m	14.4
Santa Catarina 290m	25.0

Elemento analizado	Li	Be	Na	Mg	K	Ca	Al	As	B	Ba
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Santa Catarina 65m	0.33	<l.c.	509.33	146.88	62.77	59.36	0.01	<l.c.	3.65	0.02
Santa Catarina 80m	0.33	<l.c.	507.93	143.34	64.78	56.34	0.01	<l.c.	3.76	0.02
Santa Catarina 95m	0.32	<l.c.	523.43	143.53	67.55	54.42	0.01	<l.c.	3.95	0.02
Santa Catarina 130m	0.33	<l.c.	534.58	145.48	69.13	55.32	0.01	<l.c.	4.09	0.02
Santa Catarina 250m	0.33	<l.c.	541.49	147.08	69.73	55.79	0.01	<l.c.	4.02	0.02
Santa Catarina 260m	0.32	<l.c.	523.23	144.48	67.19	54.12	0.00	<l.c.	3.87	0.01
Santa Catarina 270m	0.33	<l.c.	536.78	145.94	68.70	55.42	0.01	<l.c.	4.04	0.02
Santa Catarina 290m	0.32	<l.c.	532.47	146.08	68.87	55.40	0.01	<l.c.	3.96	0.02

Elemento analizado	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	P	Pb
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Santa Catarina 65m	0.08	<l.c.	<l.c.	0.00	0.39	0.06	<l.c.	0.02	1.99	0.02
Santa Catarina 80m	0.04	<l.c.	0.00	0.01	1.26	0.06	<l.c.	0.02	2.06	0.02
Santa Catarina 95m	0.05	<l.c.	<l.c.	0.01	0.95	0.06	<l.c.	0.02	2.24	0.02
Santa Catarina 130m	0.03	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.85	0.06	<l.c.	0.02	2.37	0.02
Santa Catarina 250m	0.02	<l.c.	<l.c.	0.00	0.81	0.07	<l.c.	0.02	2.29	0.02
Santa Catarina 260m	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	0.20	0.03	<l.c.	0.02	2.19	0.02
Santa Catarina 270m	0.03	<l.c.	0.00	0.01	2.92	0.09	<l.c.	0.02	2.32	0.02
Santa Catarina 290m	0.04	<l.c.	<l.c.	0.01	4.32	0.08	<l.c.	0.01	2.23	0.02

Elemento analizado	Sb	Se	Si	Sn	Sr	Tl	V	Zn	S	Bi
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Santa Catarina 65m	<l.c.	<l.c.	31.03	<l.c.	0.49	<l.c.	0.01	0.02	141.76	<l.c.
Santa Catarina 80m	<l.c.	<l.c.	30.34	<l.c.	0.47	<l.c.	0.01	0.04	139.84	<l.c.
Santa Catarina 95m	<l.c.	<l.c.	30.30	<l.c.	0.47	<l.c.	0.01	0.03	126.47	<l.c.
Santa Catarina 130m	<l.c.	<l.c.	31.31	<l.c.	0.49	<l.c.	0.01	0.02	129.21	<l.c.
Santa Catarina 250m	<l.c.	<l.c.	30.33	<l.c.	0.47	<l.c.	0.01	0.02	125.21	<l.c.
Santa Catarina 260m	<l.c.	<l.c.	28.73	0.02	0.48	<l.c.	0.01	0.00	109.86	<l.c.
Santa Catarina 270m	<l.c.	<l.c.	31.03	<l.c.	0.47	<l.c.	0.02	0.02	127.63	<l.c.
Santa Catarina 290m	<l.c.	<l.c.	29.88	<l.c.	0.46	<l.c.	0.01	0.02	123.30	<l.c.

Elemento analizado	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Santa Catarina 65m	1.20	169	17.20	0.70	27.4	4.61	459	1596.00
Santa Catarina 80m	1.25	169	40.99	0.78	2.19	5.09	427	1600.00
Santa Catarina 95m	1.23	181	42.86	0.79	10.5	5.55	396	1727.00
Santa Catarina 130m	1.14	273	49.28	0.75	6.77	4.99	417	1500.00
Santa Catarina 250m	1.13	174	37.41	0.76	0.95	5.27	360	1431.00
Santa Catarina 260m	1.12	194	39.69	0.75	5.38	4.89	385	1477.00
Santa Catarina 270m	1.12	174	48.23	0.71	0.50	3.52	366	1493.00
Santa Catarina 290m	1.15	172	44.98	0.73	0.68	4.67	363	1512.00

El pozo Santa Catarina 5 fue perforado hasta una profundidad de 350m. La toma de las muestras de agua se distribuyó hasta esa profundidad, desafortunadamente el pozo está colapsado a una profundidad de 295m, por lo cual no fue posible tomar las dos muestras más profundas. Ya con el conocimiento del colapso, la toma de las muestras para el análisis del nitrógeno amoniacal, se distribuyó hasta la profundidad de 290m. Debido a ello, en este único caso, no coincidió la distribución del nitrógeno amoniacal con los demás parámetros.

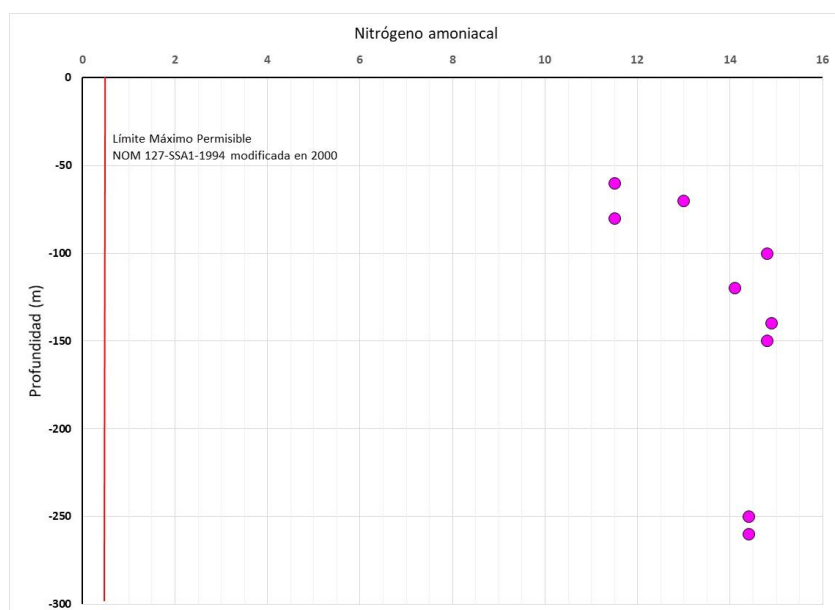


Figura 2-11 Nitrógeno amoniacal en la vertical

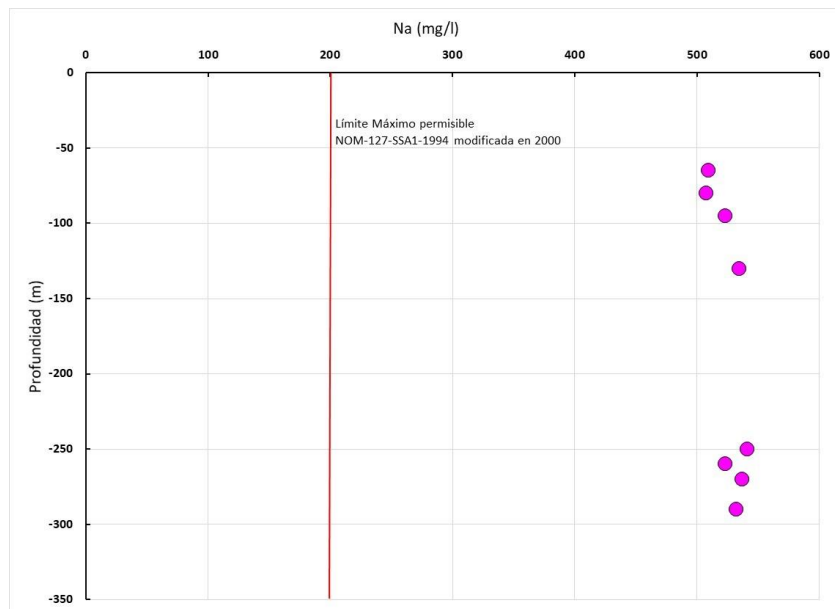


Figura 2-12 Sodio en la vertical

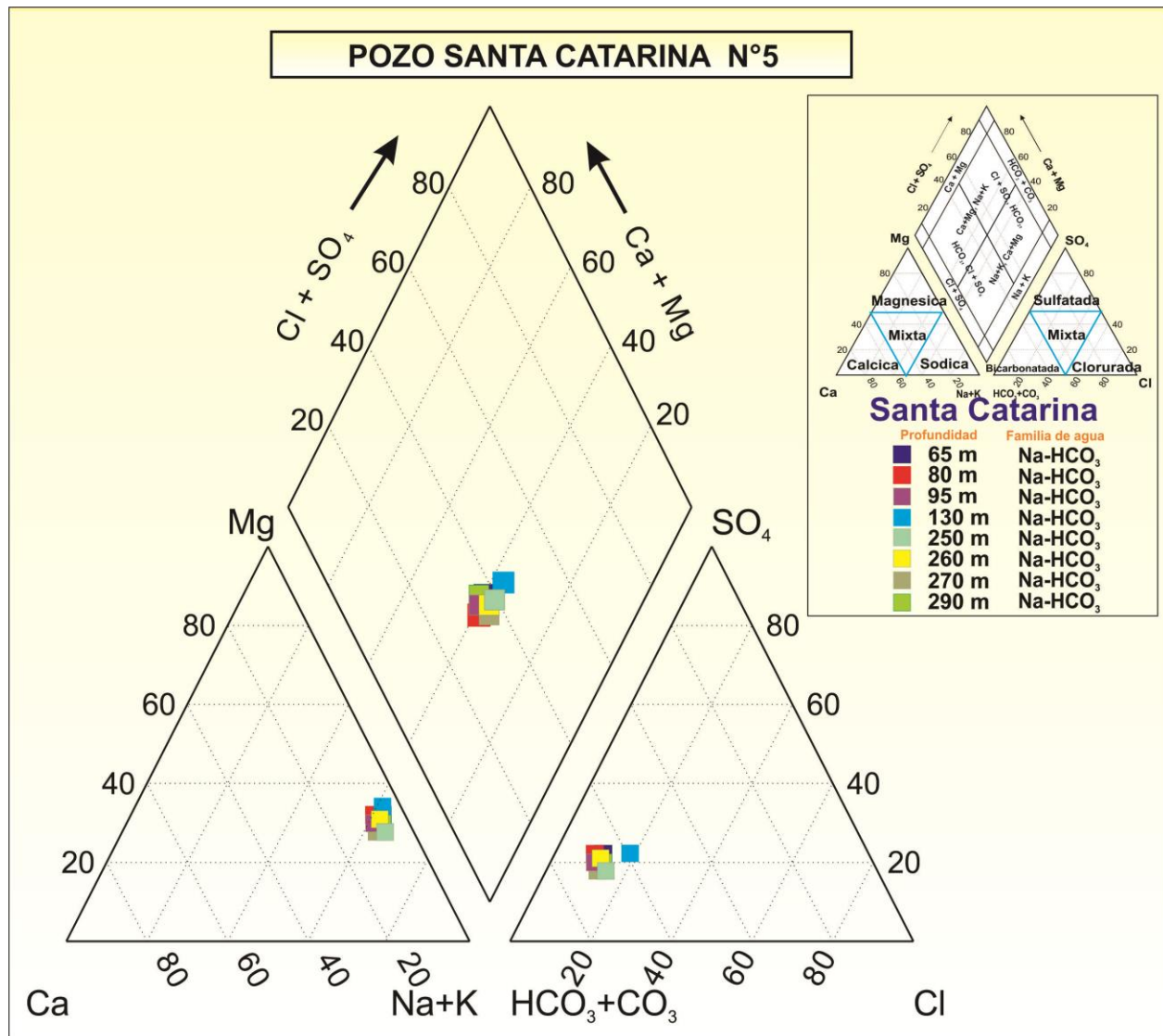


Figura 2-13 Diagrama de Piper del pozo Santa Catarina 5

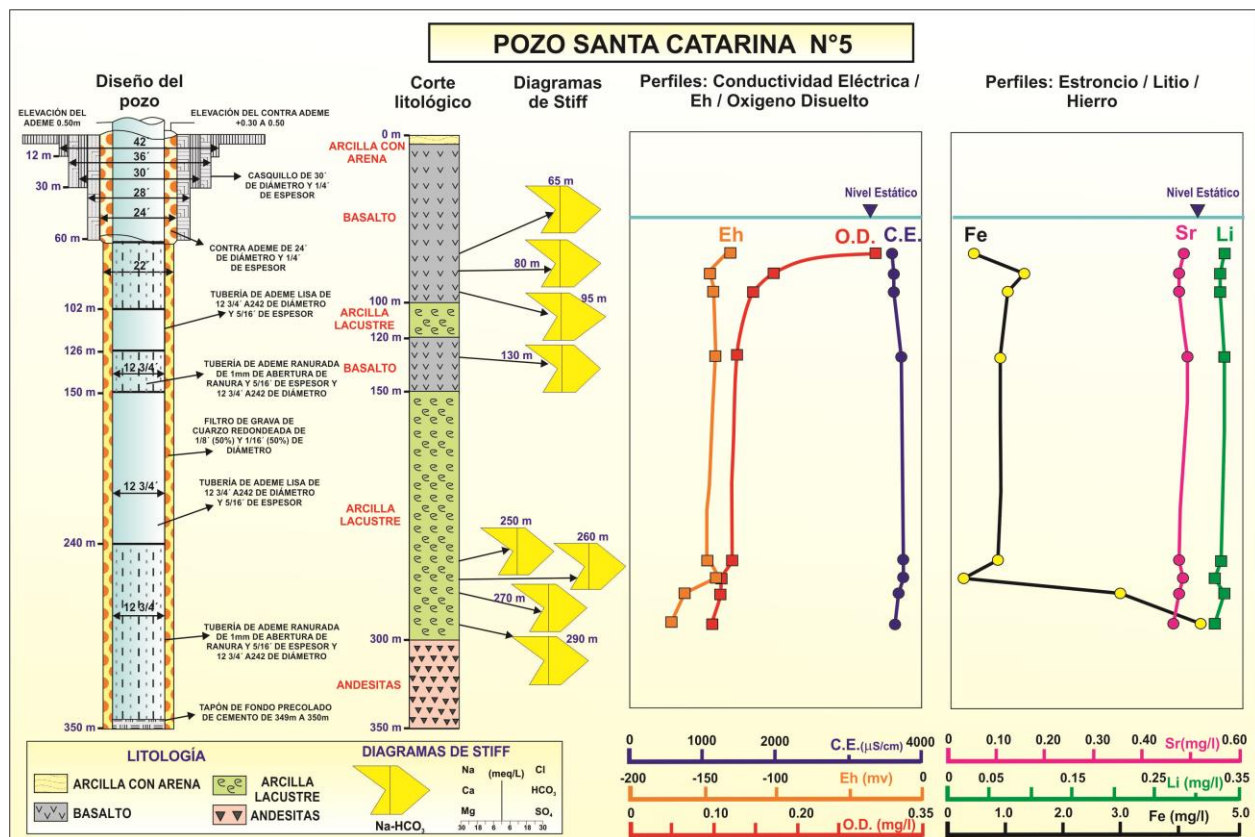


Figura 2-14 Representación de los parámetros físico-químicos del agua del pozo Santa Catarina 5



2.3.2 POZO TULYEHUALCO 6

En la Tabla 2-5 se muestran en color rojo los parámetros que exceden el Límite Máximo Permitido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 modificada en 2000 (Anexo A).

Tabla 2-5 Parámetros físico-químicos de laboratorio del pozo Tulyehualco 6

Elemento analizado	Nitrogeno Amoniacal
Unidad	mg/l
90 m	43.8
100 m	44.4
110 m	42.9
120 m	41.2
140 m	39.0
150 m	38.3
160 m	38.4
170 m	39.1
180 m	38.4
190 m	38.6

Elemento analizado	Li	Be	Na	Mg	K	Ca	Al	As	B	Ba
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
90 m	0.21	<l.c.	1435.40	24.73	92.92	4.80	0.02	<l.c.	9.76	0.12
100 m	0.21	<l.c.	1436.49	23.55	91.81	4.57	0.02	<l.c.	9.77	0.12
110 m	0.21	<l.c.	1418.54	22.28	90.38	4.32	0.01	<l.c.	9.82	0.12
140 m	0.22	<l.c.	1356.15	17.94	87.02	3.97	0.04	<l.c.	9.31	0.10
150 m	0.23	<l.c.	1339.14	17.63	86.61	3.81	0.02	<l.c.	9.23	0.10
160 m	0.22	<l.c.	1359.83	18.11	86.64	3.89	0.02	<l.c.	9.20	0.10
170 m	0.22	<l.c.	1327.44	18.51	84.94	4.03	0.04	<l.c.	9.16	0.10
190 m	0.21	<l.c.	1598.24	33.43	102.97	5.97	0.03	<l.c.	11.09	0.20

Elemento analizado	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	P	Pb
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
90 m	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	1.47	0.05	<l.c.	0.01	4.61	0.02
100 m	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	1.91	0.06	<l.c.	0.01	4.37	0.01
110 m	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	1.53	0.05	<l.c.	0.01	4.45	0.01
140 m	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.01	1.40	0.04	<l.c.	0.01	3.89	0.01
150 m	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	1.07	0.04	<l.c.	0.01	3.93	0.01
160 m	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.98	0.03	<l.c.	0.01	3.89	0.01
170 m	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.00	1.37	0.04	<l.c.	0.01	3.74	<l.c.
190 m	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.00	1.23	0.03	<l.c.	0.01	4.82	0.01

Elemento analizado	Sb	Se	Si	Sn	Sr	Tl	V	Zn	S	Bi
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
90 m	<l.c.	<l.c.	18.01	0.01	0.12	<l.c.	0.00	0.11	2.87	<l.c.
100 m	<l.c.	<l.c.	18.06	<l.c.	0.12	<l.c.	<l.c.	0.09	2.93	<l.c.
110 m	<l.c.	<l.c.	18.35	0.01	0.12	<l.c.	<l.c.	0.07	2.84	<l.c.
140 m	<l.c.	<l.c.	18.28	0.01	0.10	<l.c.	<l.c.	0.09	2.71	<l.c.
150 m	<l.c.	<l.c.	18.12	0.01	0.10	<l.c.	<l.c.	0.02	2.64	<l.c.
160 m	<l.c.	<l.c.	18.14	0.01	0.10	<l.c.	<l.c.	0.04	2.69	<l.c.
170 m	<l.c.	<l.c.	18.31	<l.c.	0.10	<l.c.	<l.c.	0.05	2.73	<l.c.
190 m	<l.c.	<l.c.	20.21	<l.c.	0.17	<l.c.	<l.c.	0.10	3.27	<l.c.

Elemento analizado	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
90 m	0.39	1045	<Ll.c.	4.03	0.64	11.09	2.93	
100 m	0.42	1010	<Ll.c.	4.16	0.59	11.71	0.72	2322.8
110 m	0.39	1307	<Ll.c.	3.93	0.47	10.77	0.62	2320
140 m	0.45	1262	<Ll.c.	3.89	0.69	10.46	0.60	2216
150 m	0.38	860	<Ll.c.	3.47	0.31	8.75	0.32	2264
160 m	0.40	1323	<Ll.c.	3.42	<Ll.c.	8.48	0.32	2168
170 m	0.37	1162	<Ll.c.	3.44	0.73	8.78	0.55	2232
190 m	0.31	1226	<Ll.c.	4.76	1.43	11.46	0.25	2552

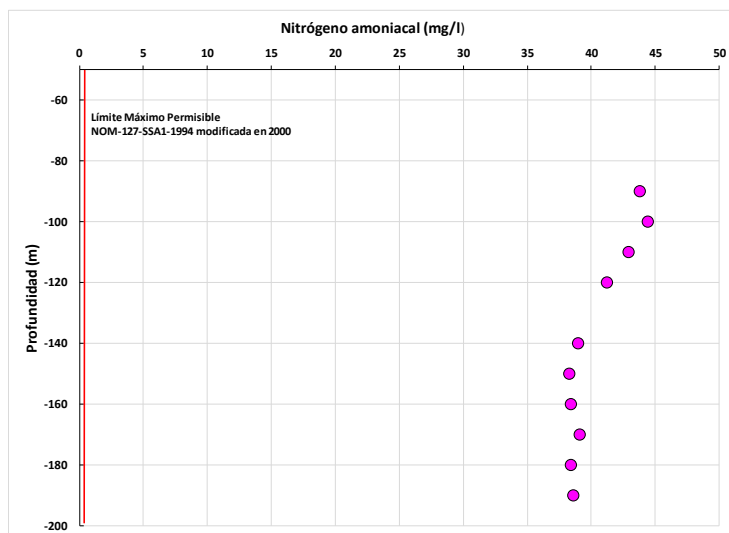


Figura 2-15 Nitrógeno amoniacal en la vertical

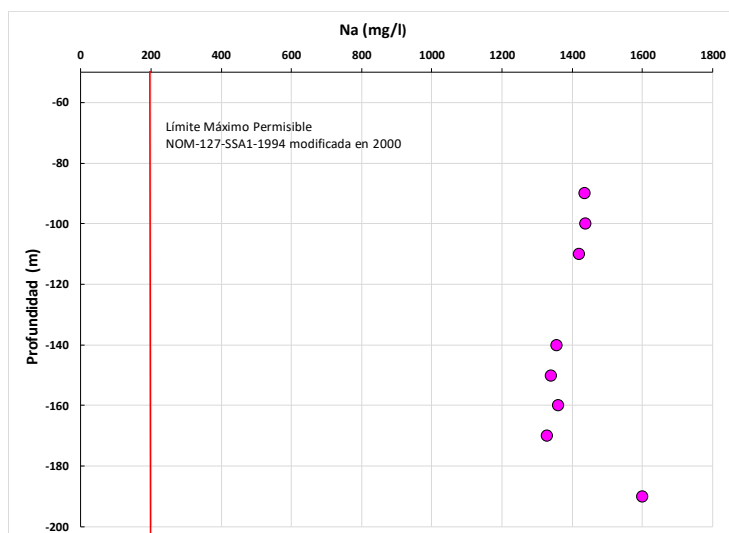


Figura 2-16 Sodio en la vertical

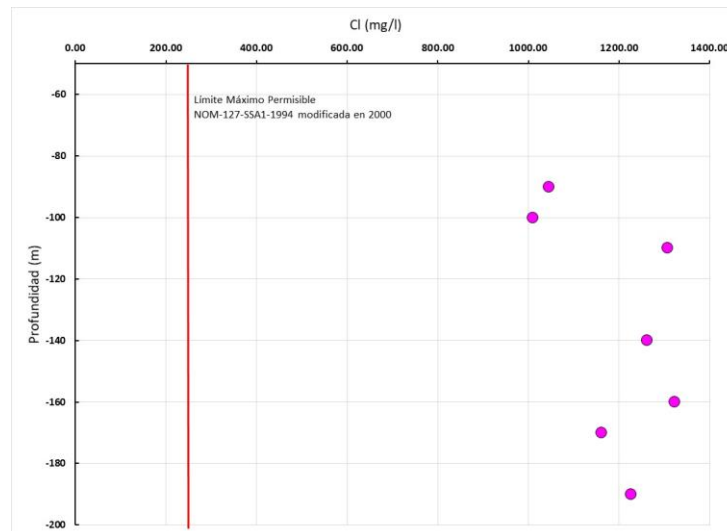


Figura 2-17 Cloruro en la vertical

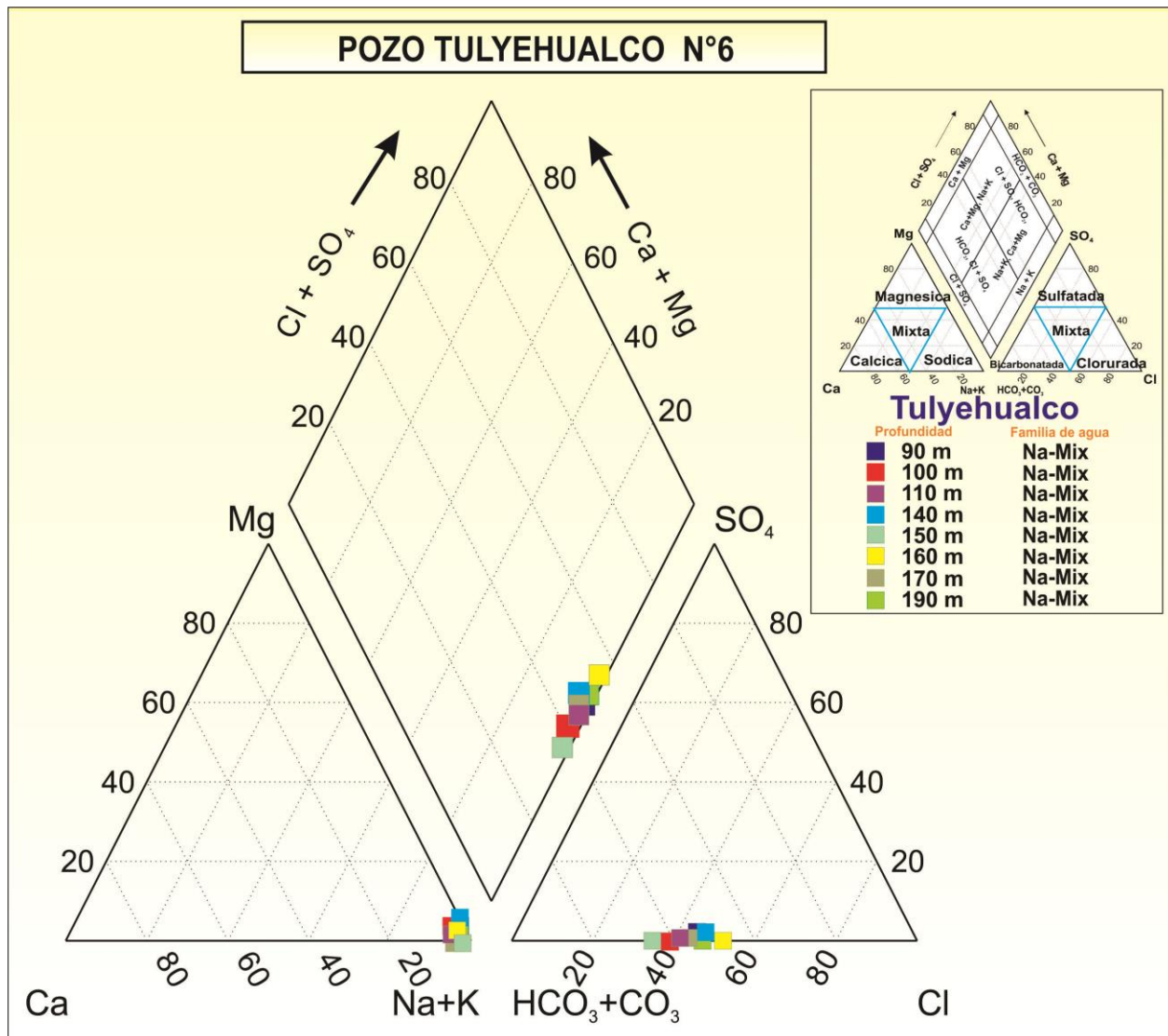


Figura 2-18 Diagrama de Piper del pozo Tulyehualco 6

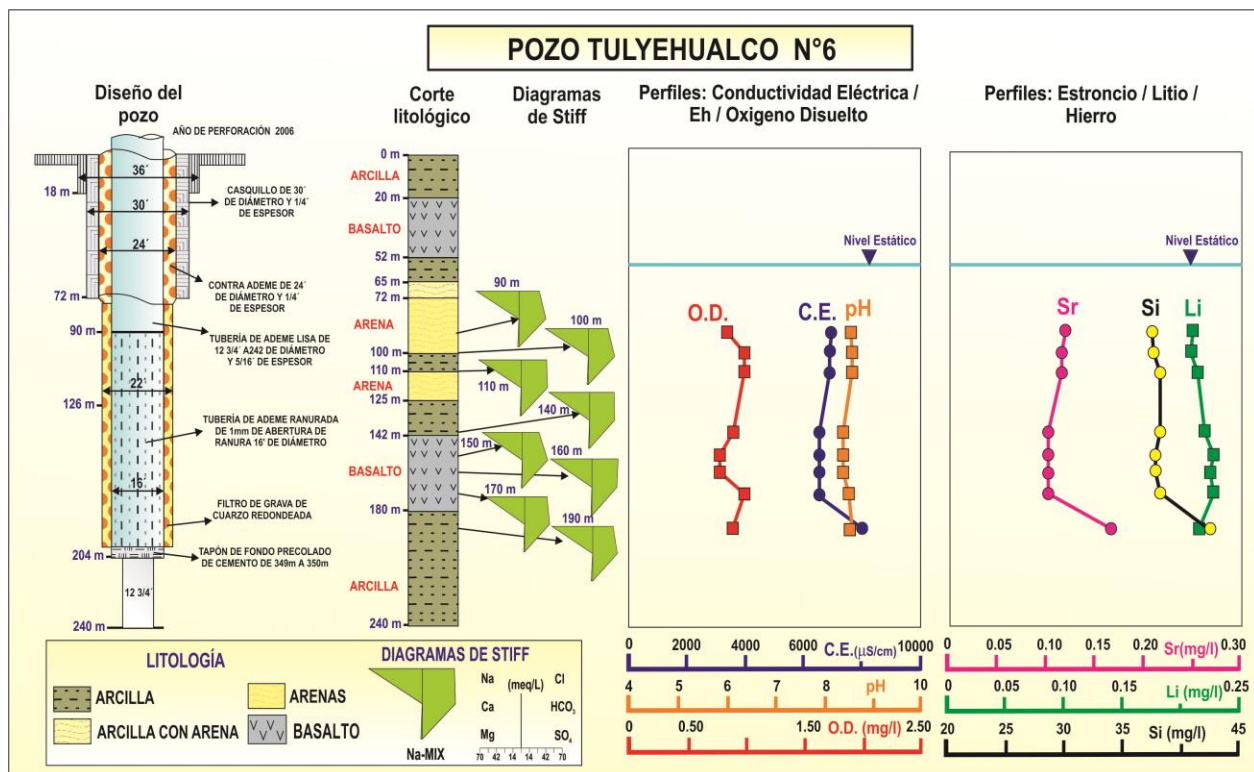


Figura 2-19 Representación de los parámetros físico-químicos del agua del pozo Tulyehualco 6

2.4 DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN DE LOS POZOS SANTA CATARINA 5 Y TULYEHUALCO 6.

2.4.1 PARÁMETROS QUÍMICOS

En los diagramas de Piper del pozo Santa Catarina 5 y Tulyehualco 6 (Figura 2-13 y Figura 2-18), se observa una evolución de agua cálcica hacia agua sódica. Este proceso se conoce como intercambio catiónico, donde el calcio y el magnesio del agua subterránea se intercambian con el sodio de las arcillas del acuitardo.

La superficie de las arcillas presenta cargas negativas, la cual atraen cationes en una capa exterior, difusa, en equilibrio dinámico con la solución. Los cationes adsorbidos están débilmente unidos y pueden llegar a intercambiarse con otros cationes del agua subterránea. El cambio se producirá cuando un catión en el agua subterránea tenga más fuerza de adsorción y desplace a otros que estaban adheridos a las arcillas. Los divalentes son adsorbidos más fuerte que los monovalentes, y dentro de cada grupo, tienen mayor fuerza los de menor radio iónico hidratado. La secuencia de mayor a menor fuerza es: $\text{Ba}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ = \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}^+$.

Debido a este intercambio catiónico, la concentración del calcio y el magnesio en el agua subterránea disminuye, mientras que la concentración del sodio aumenta.

Lo anterior indicaría que los pozos Santa Catarina 5 y Tulyehualco 6, contienen agua que fluyó a través de las arcillas del acuitardo.

2.4.2 PARÁMETROS ISOTÓPICOS

Cuando el contenido de oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$) y deuterio ($\delta^2\text{H}$) de muestras de lluvia de alrededor del mundo se grafican, se distribuyen a lo largo de una línea recta conocida como Línea Meteórica Mundial (LMM), cuya ecuación es: $\delta^2\text{H} = 8.13 \delta^{18}\text{O} + 10.8$ (Rozanski et al., 1993) y se muestra en la Figura 2-20.

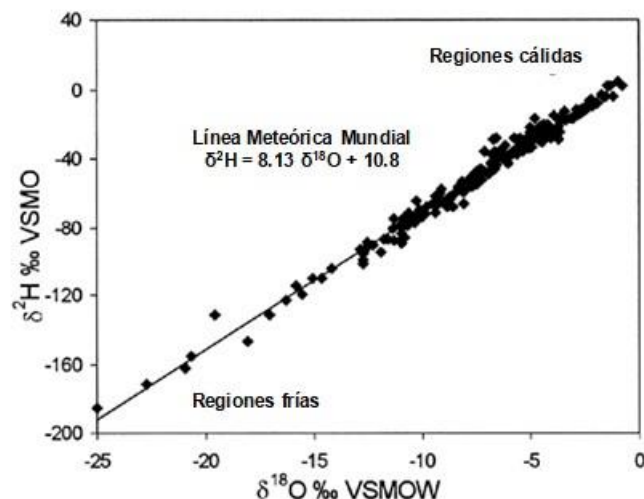


Figura 2-20 Línea Meteorica Mundial (Rozanski et al., 1993)

La LMM provee una clave importante para la interpretación de los datos de Deuterio y Oxígeno-18. Muestras de agua cuya composición isotópica cae a lo largo de la LMM se asumen originarse de la lluvia. Las desviaciones de esta línea resultan de diversos procesos isotópicos. En la mayoría de los casos, los procesos que afectan la relación entre $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{D}$ son tan únicos que la posición de los datos puede ayudar a identificar el proceso. La Figura 2-21 ilustra desviaciones de la LMM y los procesos que causan dichas desviaciones. Uno de los procesos más comunes es la evaporación de agua superficial. Cuando el agua en un reservorio se evapora hay un enriquecimiento de los isótopos pesados, y la composición isotópica sigue "una línea de evaporación" con una pendiente entre 3 y 5 dependiendo de la tasa de evaporación. El punto de intersección de la línea de evaporación con la LMM se toma como la composición isotópica de la precipitación sin alterar. En general, entre más se extienda la línea de evaporación, mayor la evaporación que sufrió el agua.

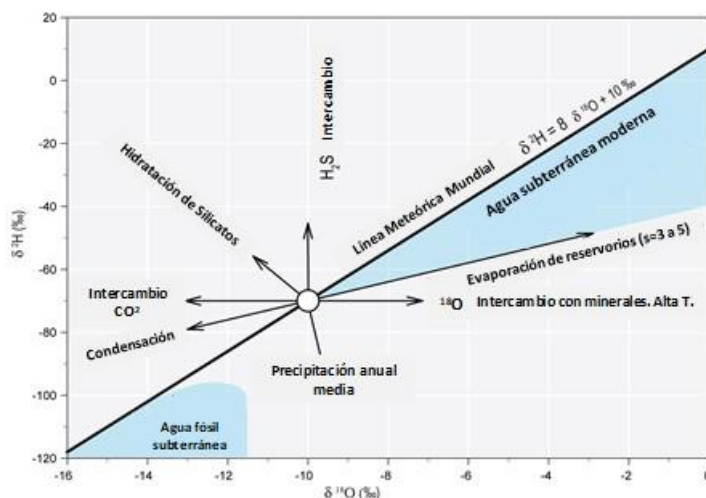


Figura 2-21 Desviaciones de la Línea Meteorica Mundial producto de diversos procesos (IAEA, 2005)

Los valores de isótopos estables del agua de los pozos Santa Catarina 5 y Tulyehualco 6 se presentan en la Tabla 2-6 y Figura 2-23.

Los análisis de isótopos estables se realizaron en el laboratorio de hidrología isotópica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), utilizando un analizador de isótopos de agua de espectroscopia de anillo de cavidad (cavity ring-down) Picarro L2110-i (Figura 2-22). La precisión analítica es de $\pm 0.5 \text{ ‰}$ para $\delta^2\text{H}$ y $\pm 0.13 \text{ ‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$.



Figura 2-22 Analizador de isótopos de agua Picarro L2110-i



Tabla 2-6 Valores de isótopos estables del agua de los pozos Santa Catarina 5 y Tulyehualco 6



LABORATORIO DE HIDROLOGÍA ISOTÓPICA

RESULTADOS DEL CONTENIDO ISOTÓPICO DE DEUTERIO (δ ² H) Y OXÍGENO-18 (δ ¹⁸ O)							
FECHA DE INGRESO: 15/04/2019				ENVÍO DE RESULTADOS: 25/04/2019			
PROYECTO:							
JEFE DE PROYECTO: Miguel Ángel Mejía González							
MUESTRAS PROCEDENTES: Ciudad de México, D.F.							
NÚM.	# LAB. IMTA	IDENTIFICACIÓN	CE μS/cm	δ ¹⁸ O (‰)	1σ (‰)	δD (‰)	1σ (‰)
1	W-1879	SANTA CATARINA 5-65m	3,570	-7.85	±0.07	-58.4	±0.50
2	W-1139	SANTA CATARINA 5-80m	3,620	-7.93	±0.07	-57.2	±0.38
3	W-1144	SANTA CATARINA 5-95m	3,700	-8.26	±0.06	-55.0	±0.25
4	W-1121	SANTA CATARINA 5-120m	3,650	-7.59	±0.08	-56.3	±0.30
5	W-1880	SANTA CATARINA 5-130m	3,730	-7.40	±0.03	-56.4	±0.49
6	W-1122	SANTA CATARINA 5-140m	3,630	-7.63	±0.09	-55.9	±0.34
7	W-1140	SANTA CATARINA 5-250m	3,760	-7.68	±0.07	-55.8	±0.29
8	W-1119	SANTA CATARINA 5-260m	3,740	-7.59	±0.04	-56.6	±0.90
9	W-1146	SANTA CATARINA 5-270m	3,690	-7.91	±0.05	-55.6	±0.41
10	W-1881	SANTA CATARINA 5-290m	3,640	-7.44	±0.03	-56.2	±0.46
11	W-1123	TULYEHUALCO 90m	7,010	-4.47	±0.03	-36.0	±0.22
12	W-1124	TULYEHUALCO 100m	6,920	-4.76	±0.08	-35.6	±0.23
13	W-1125	TULYEHUALCO 110m	6,890	-4.85	±0.10	-35.9	±0.29
14	W-1126	TULYEHUALCO 120m	6,850	-4.76	±0.08	-36.2	±0.14
15	W-1127	TULYEHUALCO 140m	6,580	-5.25	±0.08	-35.7	±0.32
16	W-1128	TULYEHUALCO 150m	6,530	-5.11	±0.07	-36.1	±0.21
17	W-1129	TULYEHUALCO 160m	6,580	-5.10	±0.07	-35.6	±0.29
18	W-1130	TULYEHUALCO 170m	6,600	-4.93	±0.05	-35.7	±0.21
19	W-1131	TULYEHUALCO 180m	7,340	-5.13	±0.08	-34.8	±0.26
20	W-1143	TULYEHUALCO 190m	8,070	-5.00	±0.10	-34.7	±0.29

Revisó

Fís. Luis González Hita
Jefe del laboratorio de Hidrología Isotópica.

Página 1 de 1

FO.C3.1.0

Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, 62550.México.
Tel:(777)329 36 00 www.imta.gob.mx

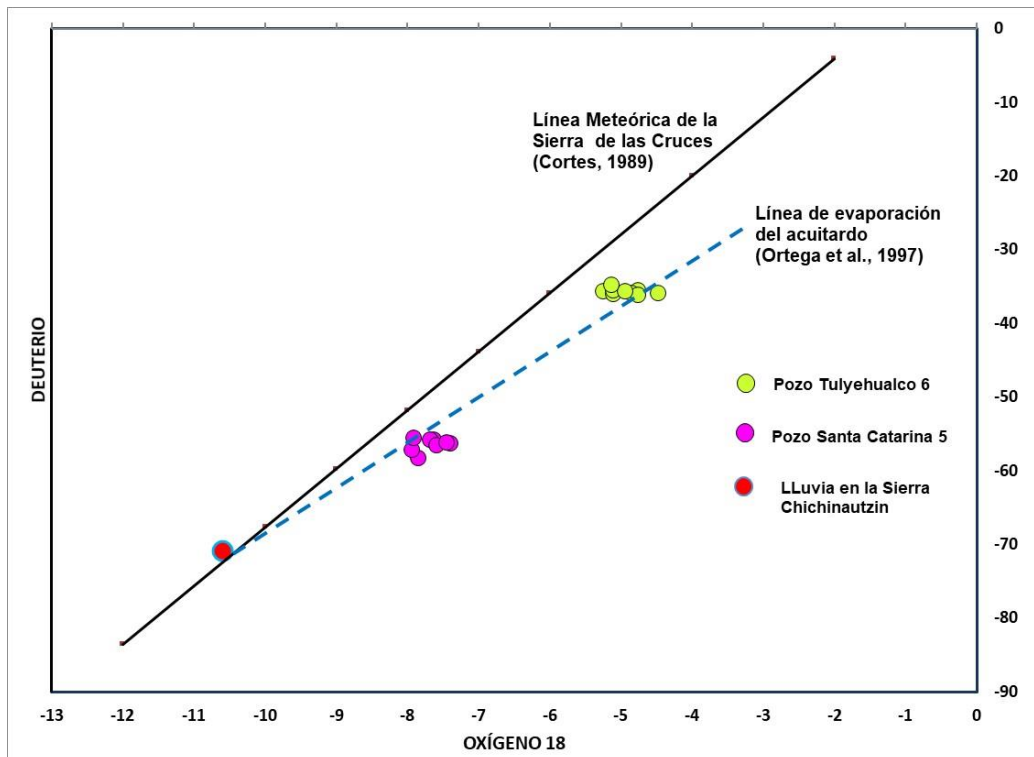


Figura 2-23 Valores isotópicos del agua de los pozos Santa Catarina 5 y Tulyehualco 6

Los valores isotópicos de las muestras de agua de los pozos Santa Catarina 5 y Tulyehualco 6, se sitúan en la línea de evaporación del acuitardo (Ortega et al., 1997), por lo cual se infiere que reciben recarga de agua evaporada del acuitardo. Se observa también, que los valores isotópicos de estos pozos son mucho más enriquecidos que la lluvia en la sierra Chichinautzin.

2.4.3 CONCLUSIONES

- 1.- Con base en los valores químicos e isotópicos de las muestras de agua, así como la geología y estratigrafía de la zona, se concluye que los pozos Santa Catarina 5 y Tulyehualco 6, reciben recarga del acuitardo.
- 2.- Se concluye que la contaminación de los pozos Santa Catarina 5 y Tulyehualco 6, se debe a que están extrayendo agua de poro altamente salina del acuitardo.

2.5 ELABORACIÓN DE ESTRATOS DE PERFILES GEOLÓGICOS CON BASE EN SONDEOS TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS.

En la Figura 2-24 se muestra la localización de los 4 sondeos geofísicos.

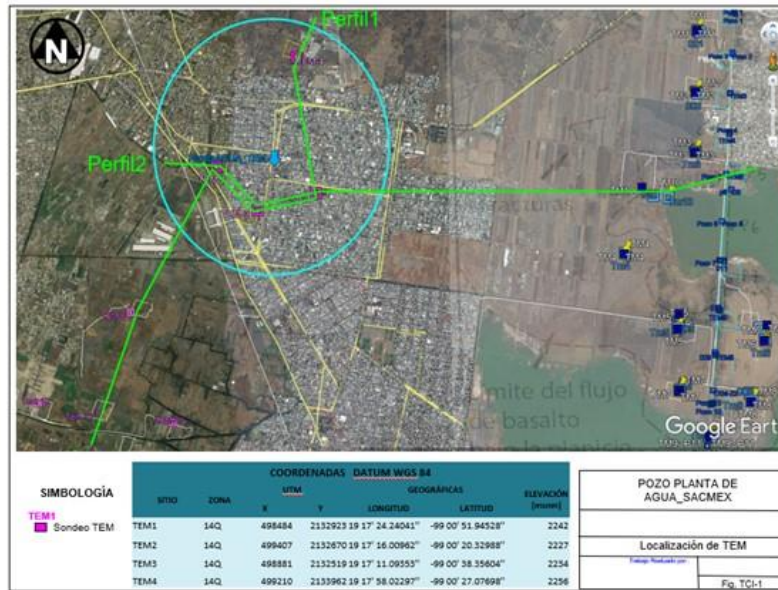


Figura 2-24 Ubicación de los sondeos geofísicos

2.5.1 METODOLOGÍA

Para el levantamiento geofísico se utilizó la técnica del Transitorio Electromagnético (TEM), que consistió en utilizar una espira o bobina que está formada de un cuadro mediante cable del # 10 con dimensiones de 150*150 m (área de la bobina 22,500 m²), con el arreglo denominado "Loop coincidente", con una resistencia de 4 Ohm en el circuito, para lo cual se utilizó un cable especial. Con estas características del arreglo se logró una intensidad de corriente del orden de los 5 amperes, esto para cumplir con los 400 m de investigación propuestos (Figura 2-25).

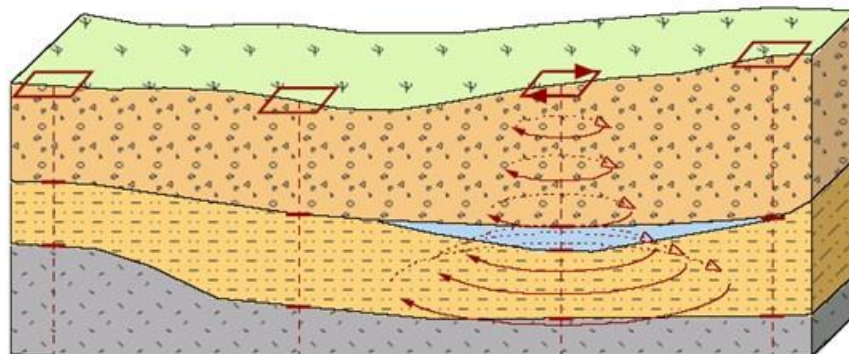


Figura 2-25 Arreglo de Loop coincidente



Con este arreglo se realizaron una serie de pruebas que consistieron en variar parámetros tales como:

Pruebas de la resistencia del circuito de transmisión y recepción.

Análisis de la intensidad de corriente circulante.

Análisis de ruido y respuesta del equipo con diferentes ganancias.

Análisis de la penetración de la señal en el subsuelo (profundidad de investigación).

Análisis de la repetibilidad de la respuesta medida por el equipo.

Apilamiento de la señal con promedios de 256, 512, 1024 y 2048 muestras.

El tiempo de medición se fijó con una duración entre 35 y 40 ventanas, con la serie de tiempo denominada "Early Times" del equipo "Sirotem". Las mediciones se realizaron con ganancias de 1, 2, 4, 8, 16, 32 y 64, aumentando el número de lecturas en sitios donde el ruido geológico era mayor, esto con el fin de aumentar la calidad en la estadística de los datos.

El proceso de los datos de campo se inicia mediante el análisis estadístico del compendio de registros obtenidos para cada sitio de TEM, con estos a su vez se define una curva de decaimiento de voltaje la cual es transformada a las tradicionales curvas de resistividad aparente, las cuales son comúnmente reconocidas en el medio geohidrológico. Posteriormente esta curva de resistividad aparente es procesada, obteniendo para cada sitio un modelo unidimensional; en una primera etapa mediante el modelado por capas planas, siguiendo el método clásico de prueba y error, en el que se propone un cierto número de capas, dependiendo de las inflexiones de las curvas y los tiempos en los que ocurren las inflexiones. Una segunda etapa en el proceso de la curva de resistividad aparente es aplicar un algoritmo mediante una regresión tipo Occam con lo cual se logra obtener un modelo multicapas (19 capas) para integrar secciones y simular un comportamiento bidimensional de la sección.

A continuación, se resumen los pasos seguidos en el procesado de los registros de campo:

Transferencia de los registros del equipo TERRATEM a la computadora.

Edición de las curvas registradas con cada ganancia para obtener una curva final de nV/AMP contra tiempo (curva de decaimiento).

Conversión de la curva de decaimiento a Resistividad Aparente contra tiempo

Cálculo del modelo estratificado

Cálculo del modelo suavizado (inversión Occam)

Impresión gráfica del modelo unidimensional

Transferencia de las curvas y los modelos generados al paquete WINGLINK

En Winglink, formación de la base de datos

Elaboración de plantas y secciones de isorresistividad e impresión de resultados gráficos.

En el proceso de los datos se siguieron los estándares que se aplican para este fin, utilizando software y equipos de patente, las cuales se citan a continuación

Equipo TERRATEM con número de serie 1503 (Figura 2-26).

Programa TEMIXS para el proceso primario de los datos.

Programa WINGLINK para utilizarlo como base de datos y formar secciones y mapas de resistividad.



Figura 2-26 Sistema de adquisición TerraTEM de MONEX Geoscope ®

2.5.2 RESULTADOS

En la Figura 2-27 y Figura 2-28 se muestran los perfiles geológicos 1 y 2.

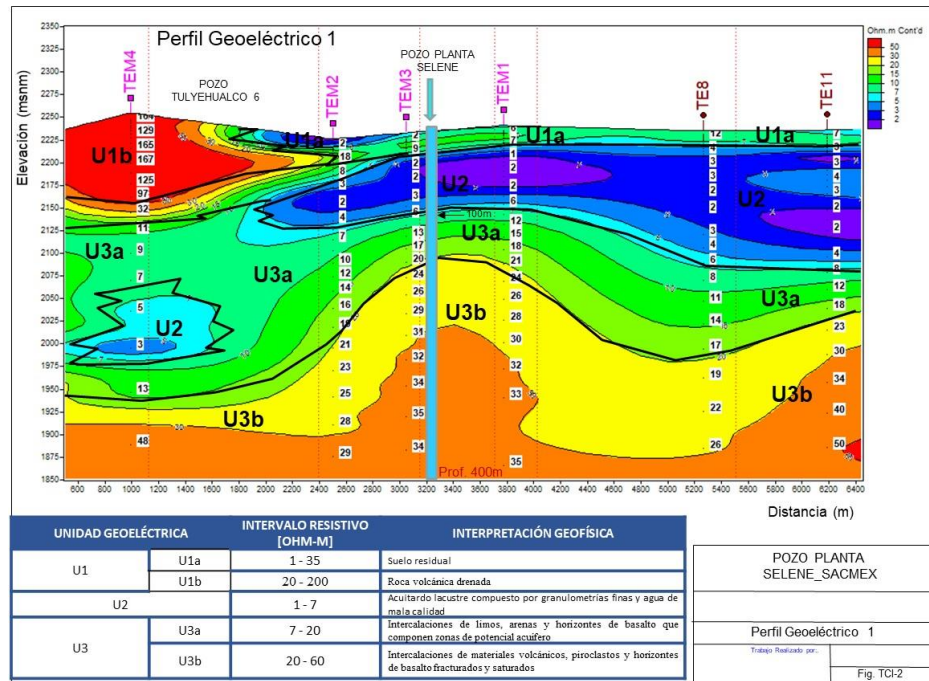


Figura 2-27 Perfil geoléctrico 1

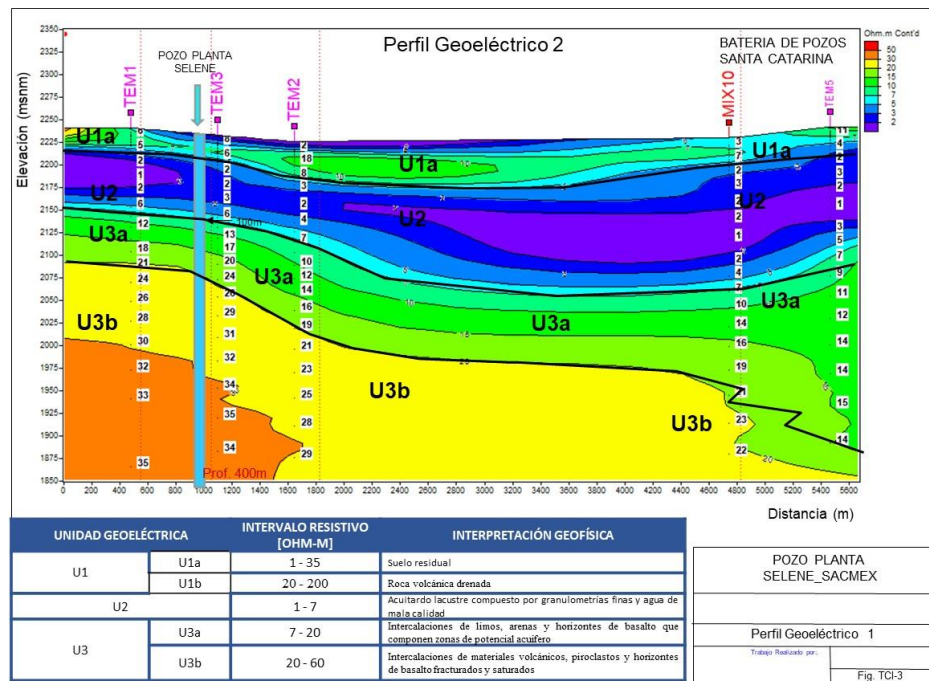


Figura 2-28 Perfil geoléctrico 2

2.6 PROPUESTA DE DISEÑO DEL POZO DE REPOSICIÓN SANTA CATARINA 5, DE TAL MANERA QUE EL AGUA ENTREGADA SEA DE BUENA CALIDAD.

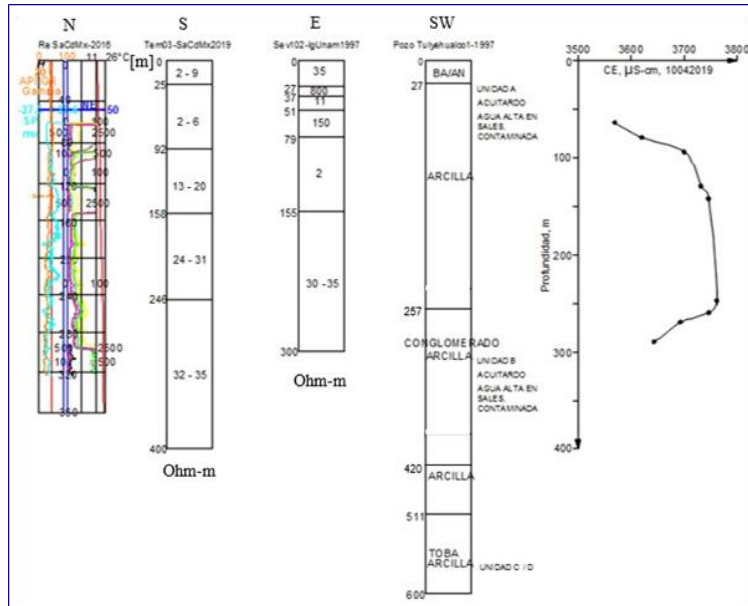


Figura 2-29 Estructura lito-estratigráfica y calidad del agua en el subsuelo



Figura 2-30 Interpretación hidrogeológica del registro geofísico del pozo

Los sondeos geofísicos y el registro geofísico del pozo (Figura 2-29 y Figura 2-30), muestran entre 0 m y 280 m alternancia de estratos de agua salobre y agua dulce. A partir de los 280 m y hasta 500 m, se observa un estrato uniforme de agua dulce, alojado en material volcánico, piroclastos y basalto fracturado.



Derivado de ello, se recomienda para el diseño del pozo:

Profundidad del proyecto: 450 m.

Ademe liso y cementación: 0 – 306 m (51 tramos de contra-ademe de 6 m c/u).

Ademe ranurado: 306 m – 450 m (24 tramos de 6 m c/u). Cedazo tipo canastilla, 2 mm, a/c.

Filtro: 0 m – 450 m

Tapón de fondo: 0.5 m

Recomendaciones de construcción

Es fundamental seguir procesos constructivos adecuados, en particular durante la actividad de cementación para garantizar la total impermeabilidad entre el acuífero lacustre suprayacente contaminado y el volcánico inferior con agua dulce. Además, hay que tener el debido cuidado durante la cementación a profundidades como las del proyecto, ya que se generan presiones diferenciales muy intensas, entre la superficie exterior e interior, que podrían acercarse o rebasar las de resistencia al colapso de las tuberías.

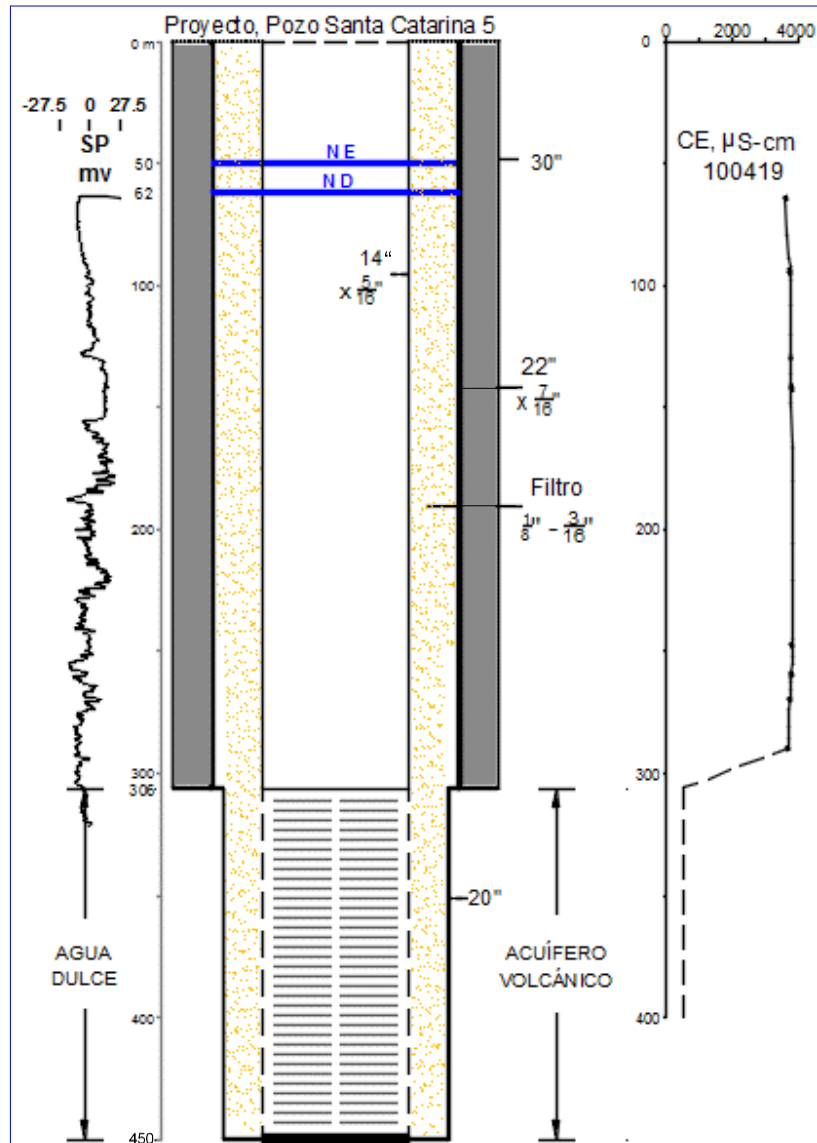


Figura 2-31 Diseño de pozo de reposición Santa Catarina 5

El diseño y la construcción del brocal del pozo es otra de las actividades críticas a tomar en cuenta de manera que se evite en lo posible su irregular asentamiento junto con la subsidencia del terreno circundante, mecanismo progresivo inevitable, provocado por la extracción de agua del acuífero lacustre muy compresible y por el peso de las construcciones aledañas, induciendo fuertes concentraciones de esfuerzo cortante y tangencial principalmente, pandeamiento y deformaciones en el contra-ademe y ademe, con el consiguiente daño potencial al pozo y a la bomba, acortando su vida útil y ocasionando elevados costos de mantenimiento, o incluso la pérdida total de la obra en su conjunto, en un lapso de tiempo pequeño.



Fuentes de información consultadas

- 1.- Estudio geofísico TEM'S, IMTA, 2019
- 2.- Bombeo de pozo Santa Catarina 5. IMTA, 2019
- 3.- Determinación de la conductividad eléctrica en la vertical del pozo Santa Catarina 5. IMTA, 2019
- 4.- Registro eléctrico multi-electrodo de pozo Santa Catarina 5. SACMEX, 2016
- 5.- Diseño constructivo para la rehabilitación de pozo Santa Catarina 5. SACMEX, 2016
- 6.- J. O. Campos-Enríquez, O. Delgado-Rodríguez, R. Chávez-Segura, P. Gómez-Contreras, E. L. Flores-Márquez and F. S. Birch, 1997. The subsurface structure of the Chlaco sub-basin inferred from geophysical data. Geophysics, Vol. 62, No. 1 (January-February), p. 23-35.
- 7.- Especificaciones técnicas generales, Tubería Laguna, 2015
- 8.- Aforo de pozo Santa Catarina 5, SACMEX, 1999
- 9.- Michel Chouteau, Stefka Krivochieta, Ramiro Rodriguez Castillo, Tomas Gonzalez Moran and Virginie Jouanne. Study of the Santa Catarina Aquifer System (México Basin) using magnetotellurics soundings, Journal of Applied Geophysics, 31 (1994) 85-106.
- 10.-Perforación profunda en el lago de Chalco: Reporte técnico. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Instituto de Geofísica, UNAM, 2017
- 11.- Diseño de pozos de reposición. Batería Mixquic. Memoria descriptiva y de cálculo. IMTA, 2016.

2.7 PROPUESTA DE REHABILITACIÓN DEL POZO SANTA CATARINA 5 PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA.

De acuerdo a los perfiles geoelectricos que se derivaron de los Sondeos Transitorios Electromagnéticos, en el pozo Santa Catarina 5 la contaminación procede principalmente de los estratos someros del acuífero, por lo que se recomienda sellar el ademe ranurado que va de los 60m a los 102m, para evitar la entrada de agua de mala calidad de este estrato, Figura 2-32.

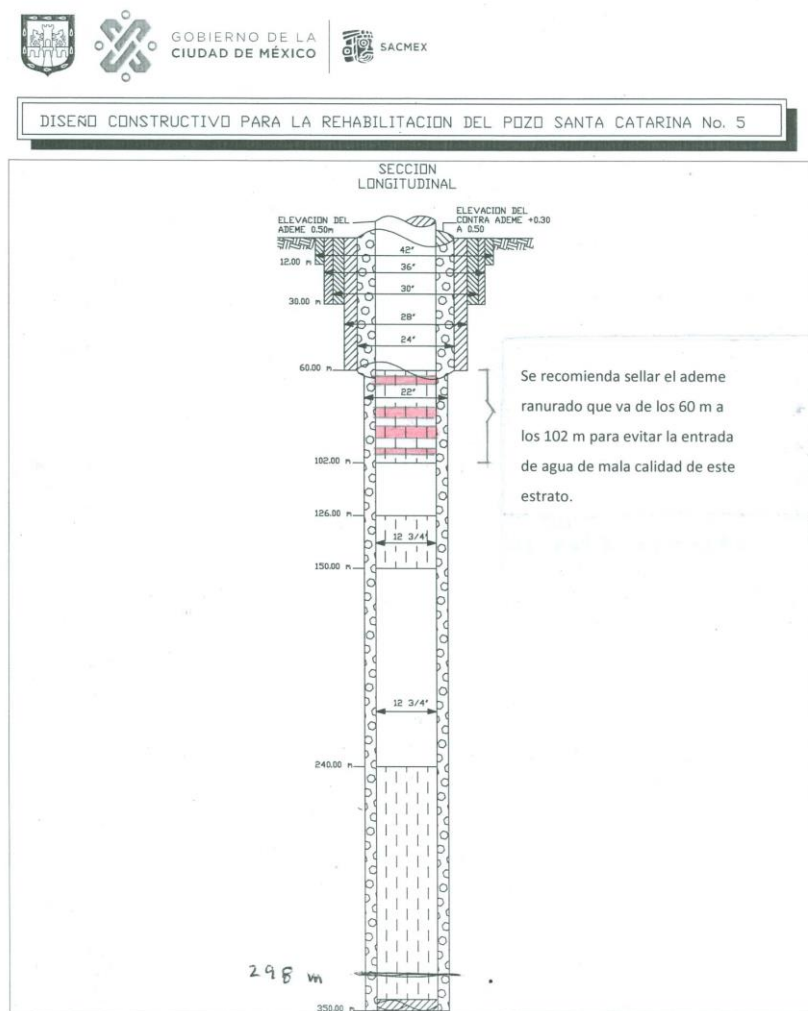


Figura 2-32 Propuesta de rehabilitación del pozo Santa Catarina 5

3 DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN DEL POZO POPOTLA

La localización de los pozos Popotla, Azcapotzalco 1, Xochinahuac y Deportivo Reynosa se muestra en el recuadro rojo de la Figura 3-1.

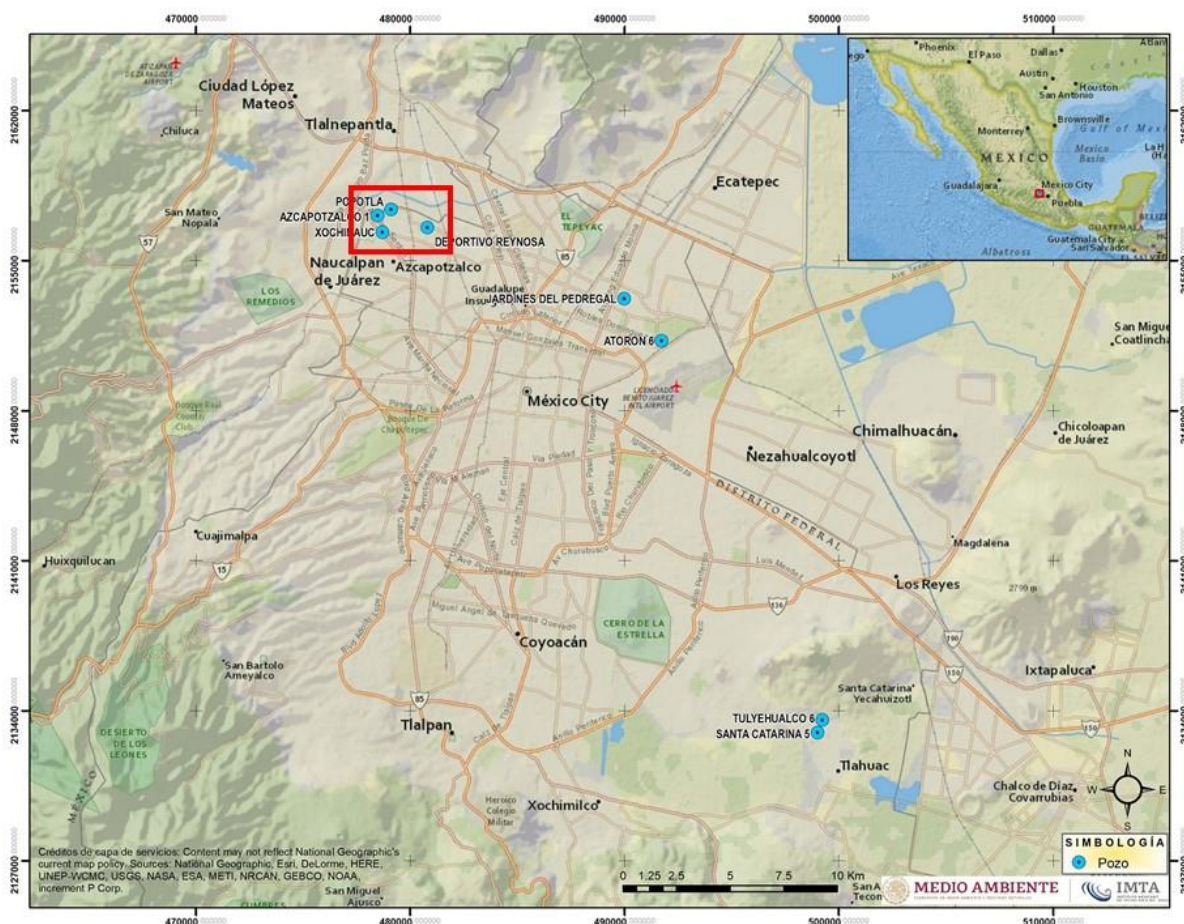


Figura 3-1 Localización del pozo Popotla

3.1 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE CAMPO

En la **Figura 3-2**, **Figura 3-3**, **Figura 3-4** y **Figura 3-5**, se muestra la medición de los parámetros físico-químicos en campo de los pozos Deportivo Reynosa, Xochinahuac, Azcapotzalco 1 y Popotla. En la tabla **Tabla 3-1** los parámetros medidos.

La colecta de las muestras de agua para análisis de laboratorio se realizó en el tren de descarga de los pozos. Antes de medir los parámetros de campo y recolectar las muestras, se bombeo tres veces el volumen del pozo y se aseguró que los parámetros se estabilizaran. Con la finalidad de limitar al máximo la modificación de las propiedades fisicoquímicas prevalecientes del agua subterránea, el procedimiento utilizado para la medición de los

parámetros de campo incluyó la utilización de celdas de aislamiento. Estos dispositivos se conectan por medio de mangueras de diámetro pequeño a alguna válvula ubicada en el tren de descarga del pozo o en la descarga directa del mismo, como es el caso de pozos que tienen descarga libre. De este modo, el agua extraída fluye en forma continua e inalterada en el interior de la celda, lo que permite la introducción de los electrodos de medición respectivos y llevar a cabo las mediciones. Este dispositivo permite además mayor facilidad para la estabilización de las lecturas.



Figura 3-2 Medición de parámetros físico-químicos de campo en el pozo Deportivo Reynosa



Figura 3-3 Medición de parámetros físico-químicos de campo en el pozo Azcapotzalco 1



Figura 3-4 Medición de parámetros físico-químicos de campo en el pozo Xochinahuac



Figura 3-5 Medición de parámetros físico-químicos de campo en el pozo Popotla

Tabla 3-1. Parámetros físico-químicos de campo

Pozo	Profundidad (m)	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Oxígeno Disuelto (mg/l)	Gasto (l/s)	Eh mV	pH
Deportivo Reynosa	200	705	21.8	4.2	43	71	6.85
Xochinahuac	190	942	21.8	2.2	45	130	6.6
Azcapotzalco 1	200	1285	23.7	1.1	54.7	40	6.25
Popotla	400	3210	28.5	0.5	30	25	5.97

3.2 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS EN LABORATORIO

En la **Tabla 3-2** se muestran en color rojo los parámetros que exceden el Límite Máximo Permitido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 modificada en 2000 (Anexo A).

Tabla 3-2 Parámetros físico-químicos de laboratorio

Elemento Analizado	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Nitrogeno Amoniacal
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/l
Popotla	0.28	502	<Ll.c.	1.24	<Ll.c.	1.16	36.0	810.08	1.53
Azcapotzalco 1	0.16	248	<Ll.c.	0.53	2.37	<Ll.c.	52.1	384	0.433
Xochinahuac	0.09	60.2	<Ll.c.	0.41	2.02	0.80	45.2	423.34	0.346
Deportivo Reynosa	0.11	64.2	<Ll.c.	0.32	0.47	0.76	74.7	256.2	1.2

Elemento Analizado	Li	Be	Na	Mg	K	Ca	Al	As	B	Ba
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Popotla	2.6730	<l.c.	450.9506	39.8076	71.6229	41.8035	0.0127	<l.c.	22.9291	0.0963
Azcapotzalco 1	1.5267	<l.c.	144.7260	48.4802	24.8240	40.5066	0.0102	<l.c.	4.5759	0.0469
Xochinahuac	0.4069	<l.c.	67.3400	55.6842	14.0812	52.8272	0.0050	<l.c.	1.9626	0.0925
Deportivo Reynosa	0.1180	<l.c.	57.4993	37.6640	11.2202	35.5585	0.0224	<l.c.	0.5830	0.1705

Elemento Analizado	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	P	Pb
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Popotla	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0142	0.5274	1.3761	<l.c.	0.0318	0.4293	0.0354
Azcapotzalco 1	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.8347	0.1663	<l.c.	0.0235	0.2035	0.0329
Xochinahuac	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0140	0.0016	<l.c.	0.0204	0.1088	0.0259
Deportivo Reynosa	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.2097	0.0222	<l.c.	0.0170	0.1260	0.0210

Elemento Analizado	Sb	Se	Si	Sn	Sr	Tl	V	Zn	S	Bi
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Popotla	<l.c.	<l.c.	55.4970	0.0192	0.7884	<l.c.	0.0060	0.0133	13.2946	<l.c.
Azcapotzalco 1	<l.c.	<l.c.	44.2317	<l.c.	0.3865	<l.c.	0.0152	0.0121	16.3212	<l.c.
Xochinahuac	<l.c.	<l.c.	39.8269	<l.c.	0.4522	<l.c.	0.0159	0.0073	14.1440	<l.c.
Deportivo Reynosa	<l.c.	<l.c.	36.2182	0.0010	0.3164	<l.c.	0.0180	0.0065	23.4889	<l.c.

3.2.1 DIAGRAMAS DE PIPER Y STIFF

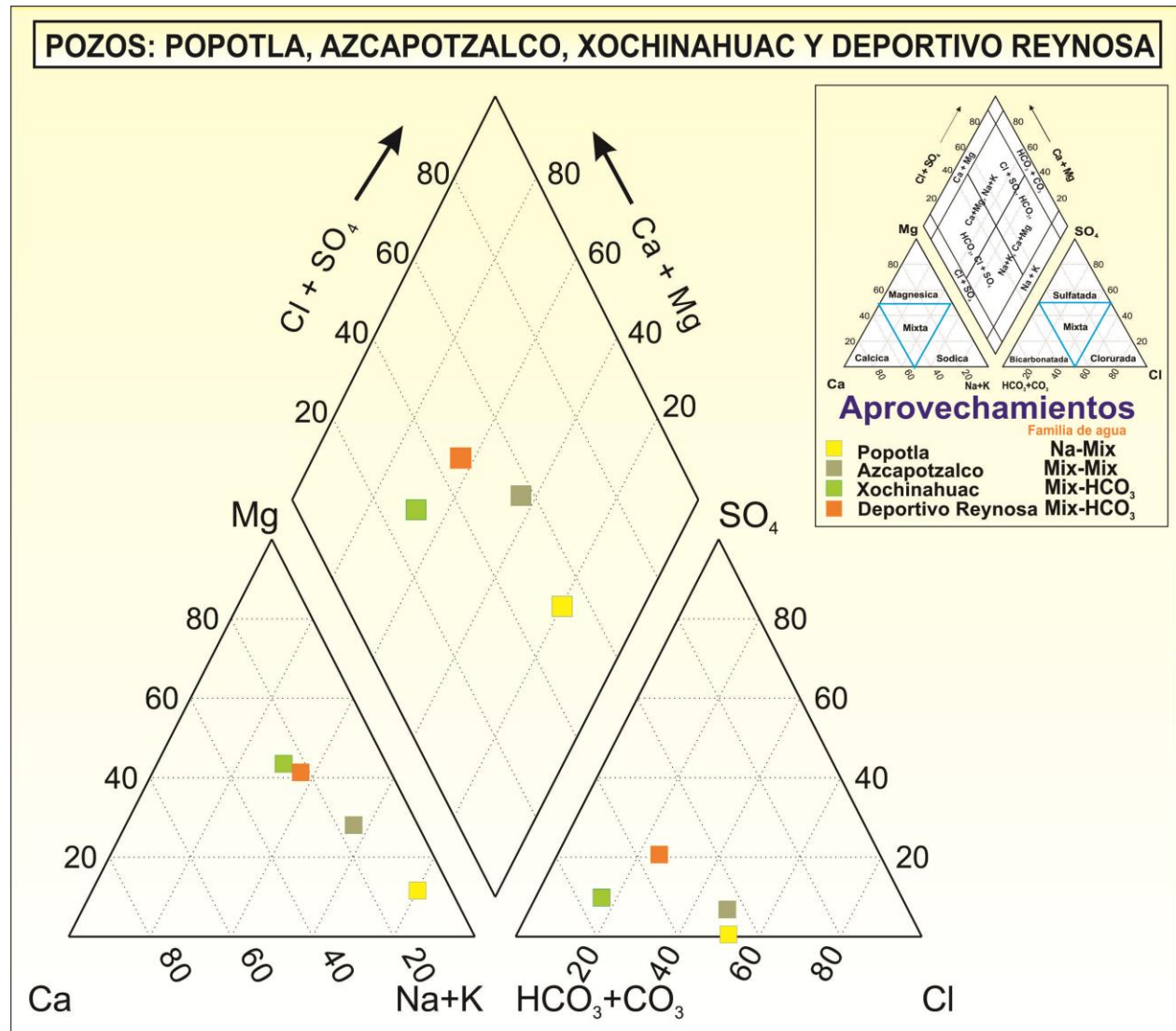


Figura 3-6 Diagrama de Piper de los pozos Popotla, Azcapotzalco 1, Xochinahuac y Deportivo Reynosa

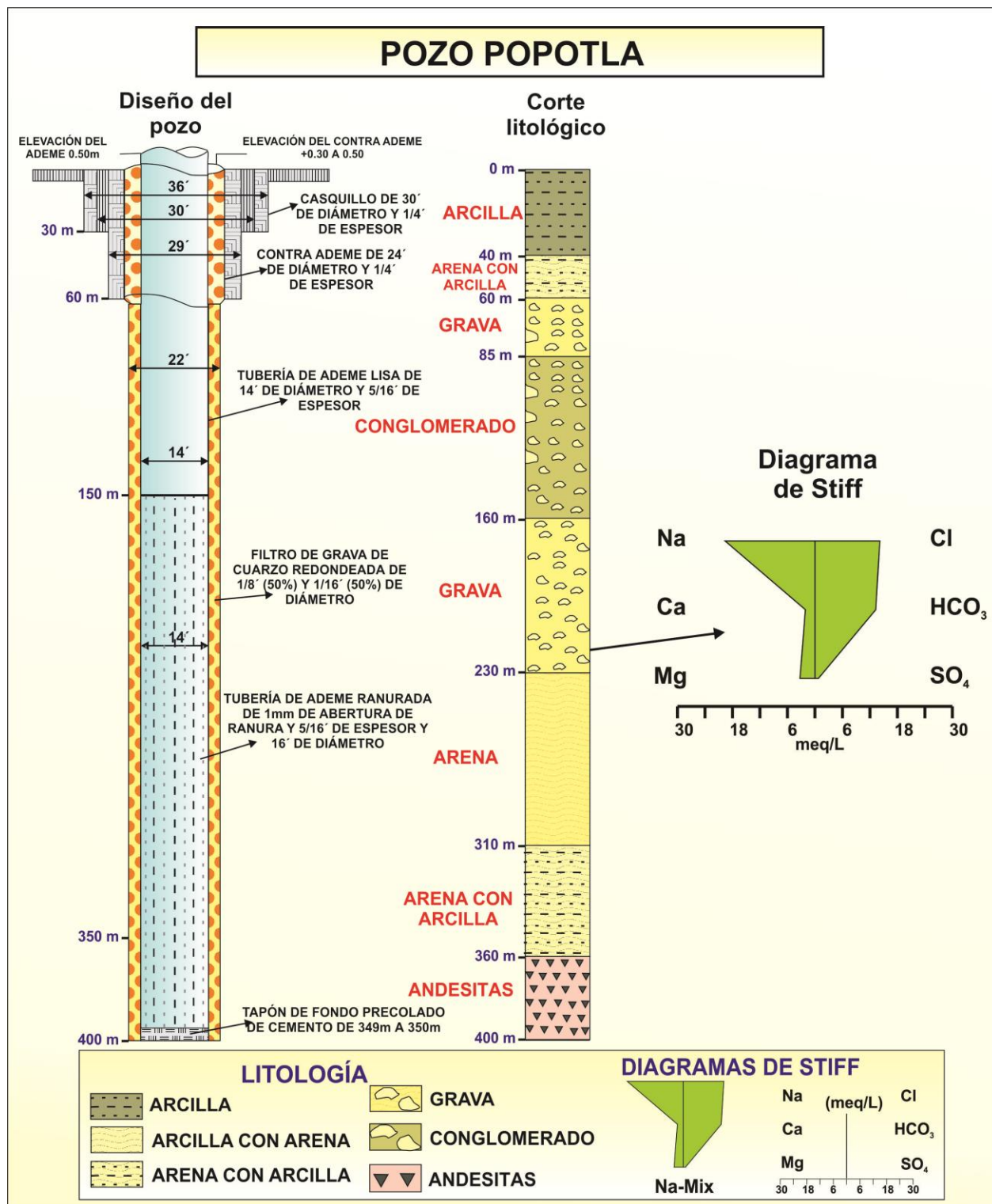


Figura 3-7 Diagrama de Stiff del pozo Popotla

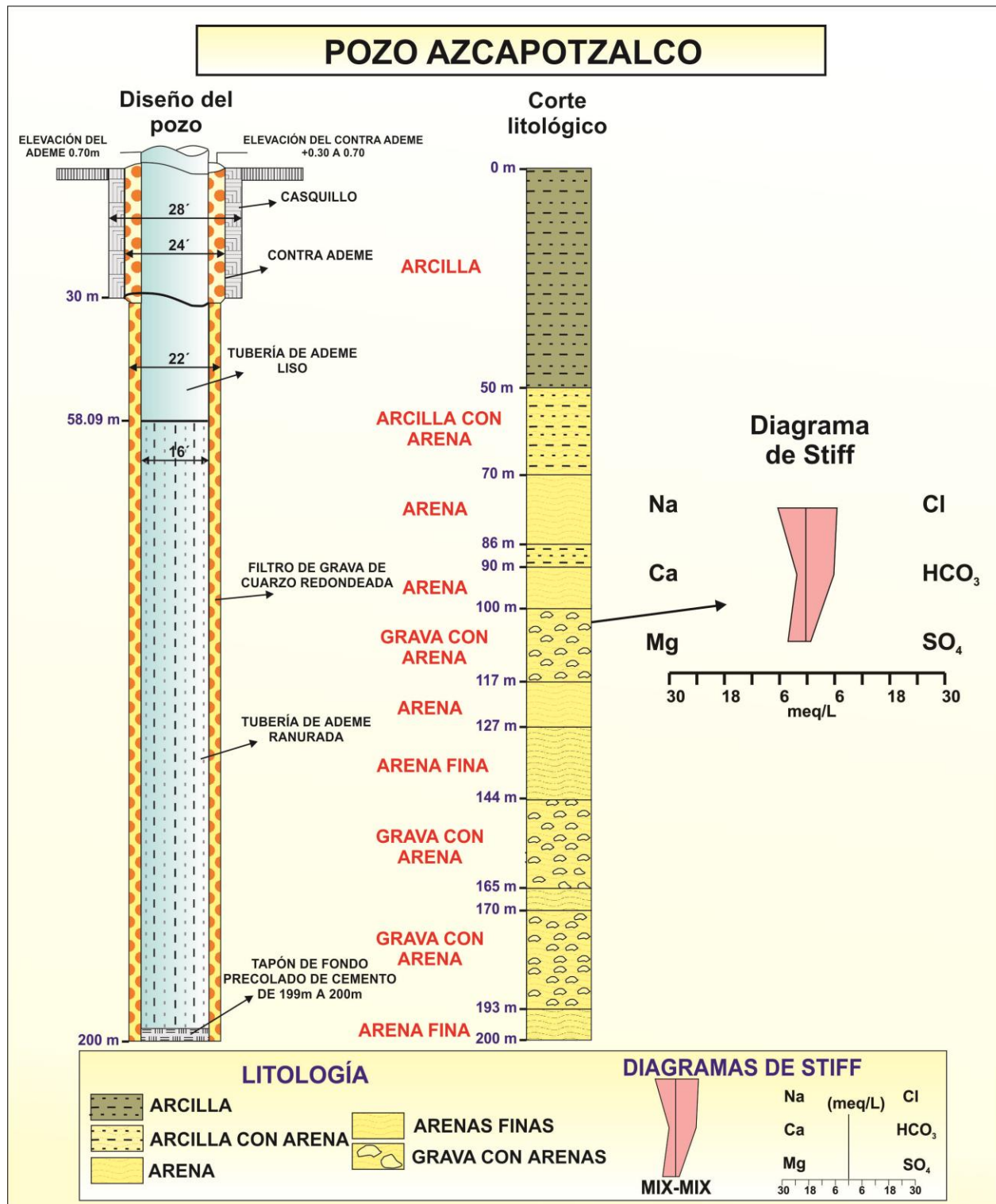


Figura 3-8 Diagrama de Stiff del pozo Azcapotzalco 1

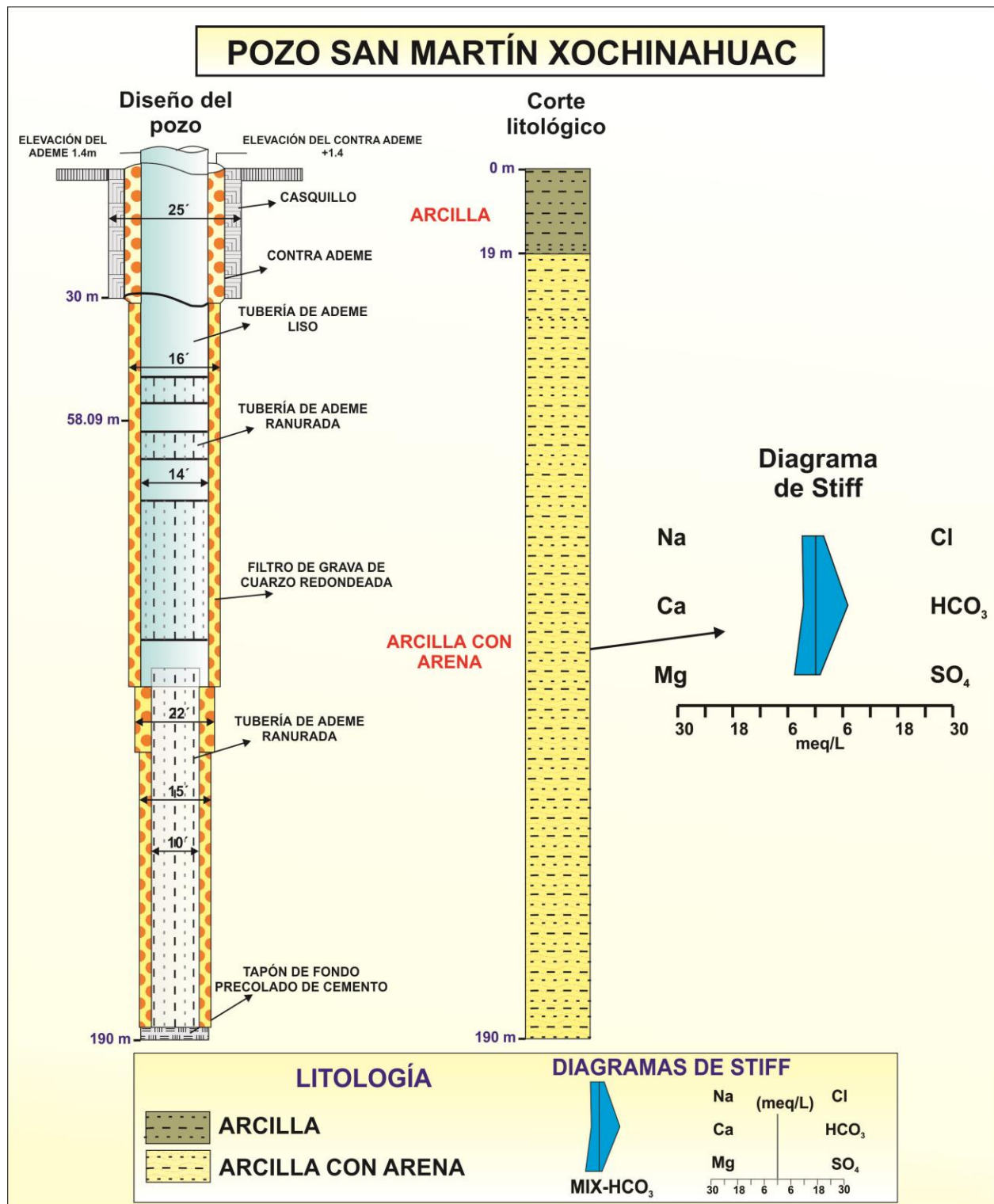


Figura 3-9 Diagrama de Stiff del pozo Xochinahuac

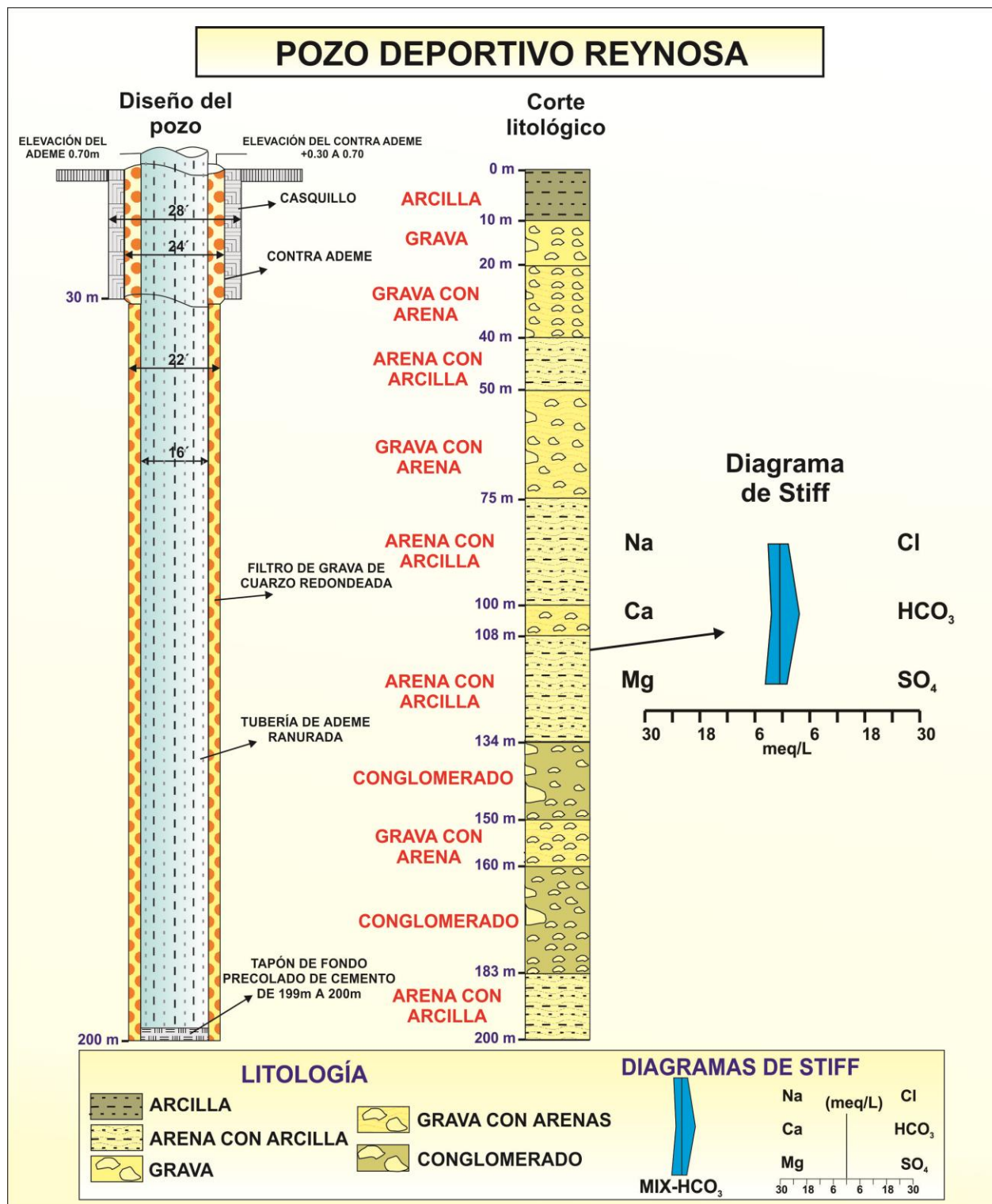


Figura 3-10 Diagrama de Stiff del pozo Deportivo Reynosa

3.2.2 DIAGRAMAS BINARIOS

Los valores de Litio, Boro, Cloruro, Temperatura y Nitratos, entre otros, indican que el agua del pozo Popotla tiene características de un flujo profundo que ha evolucionado de manera diferente al agua de recarga de los pozos Deportivo Reynosa, Xochinahuac y Azcapotzalco 1.

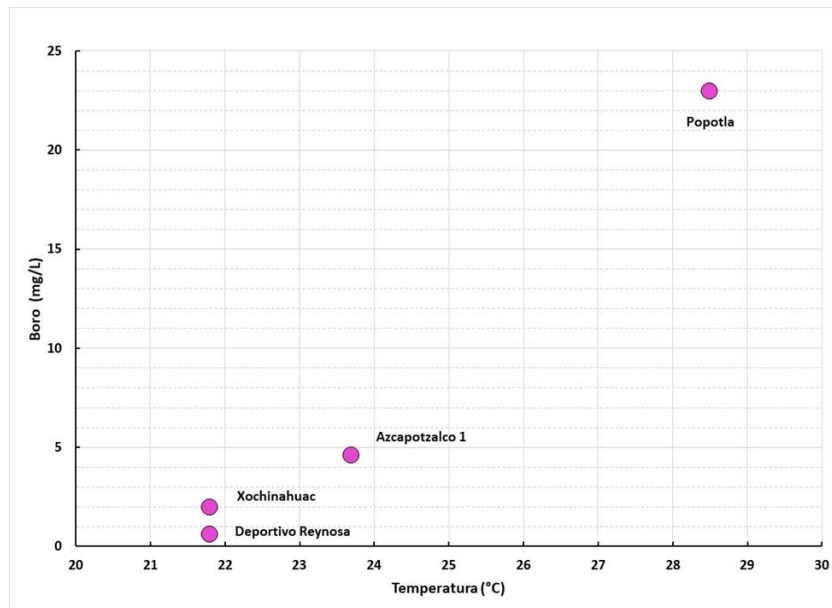


Figura 3-11 Boro versus temperatura

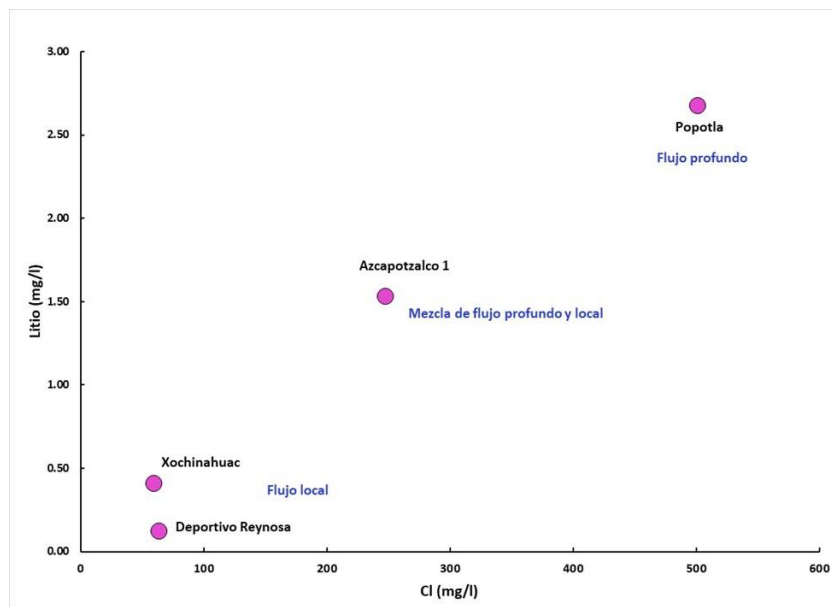


Figura 3-12 Cloruro versus litio

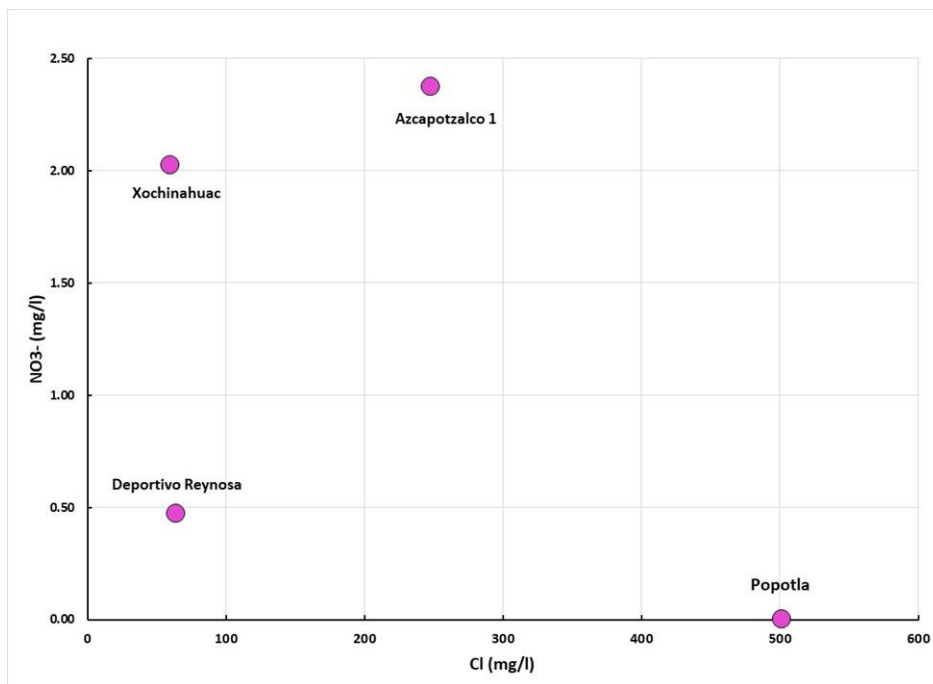


Figura 3-13 Cloruro versus Nitrato

3.3 DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN DEL POZO POPOTLA

3.3.1 TEMPERATURA DEL AGUA DE LOS POZOS

En la **Tabla 3-1** se muestran los valores de temperatura del agua de los pozos. Como se puede observar, los pozos Deportivo Reynosa y Xochinahuac tienen los valores más bajos de temperatura (21.8 °C). Representan un flujo somero. El pozo Azcapotzalco-1 tiene valor de temperatura (23.75 °C) y representa flujo intermedio. El pozo Popotla tiene el valor más alto de temperatura (28.5 °C). Este valor de temperatura tan alto indica que el pozo Popotla está extrayendo agua de un flujo profundo.

3.3.2 OXÍGENO DISUELTO DEL AGUA DE LOS POZOS

Con relación al contenido de oxígeno disuelto, el agua subterránea se clasifica en aerobia (óxica) y anaerobia (anóxica). Se considera que si el agua subterránea tiene un contenido de oxígeno disuelto mayor a 1 mg/l, es óxica. Agua subterránea con un contenido de oxígeno menor se considera anóxica. El agua subterránea somera por lo general tiene contenido de oxígeno disuelto alto, pero conforme se va infiltrando más y más profundo, el oxígeno se va agotando, de tal manera que las aguas subterráneas profundas son anóxicas. Cuando el agua subterránea es anóxica, se producen una serie de reacciones redox que solubilizan los metales del subsuelo, incorporándolos al agua subterránea.

En la **Tabla 3-1** se muestra el contenido de oxígeno disuelto del agua de los pozos. Los pozos Deportivo Reynosa y Xochinahuac tienen alto contenido de oxígeno, lo cual indicaría que es

agua somera. El pozo Popotla tiene un contenido de oxígeno muy bajo (agua anóxica), lo cual indicaría que es agua subterránea profunda.

3.3.3 CONDUCTIVIDAD

Los pozos más someros, Deportivo Reynosa (200 m), Xochinauc (190 m) y Azcapotzalco 1 (200 m) son los que presentan los valores de conductividad más bajos (705 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 942 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 1285 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente). El pozo más profundo, Popotla (400 m), registra el valor de conductividad más alto (3210 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

3.3.4 REGISTRO ELÉCTRICO DEL POZO POPOTLA

El registro eléctrico del pozo Popotla (Figura 3-14) muestra que, a partir de los 300m de profundidad, el agua es de mala calidad (contiene gran cantidad de solutos).

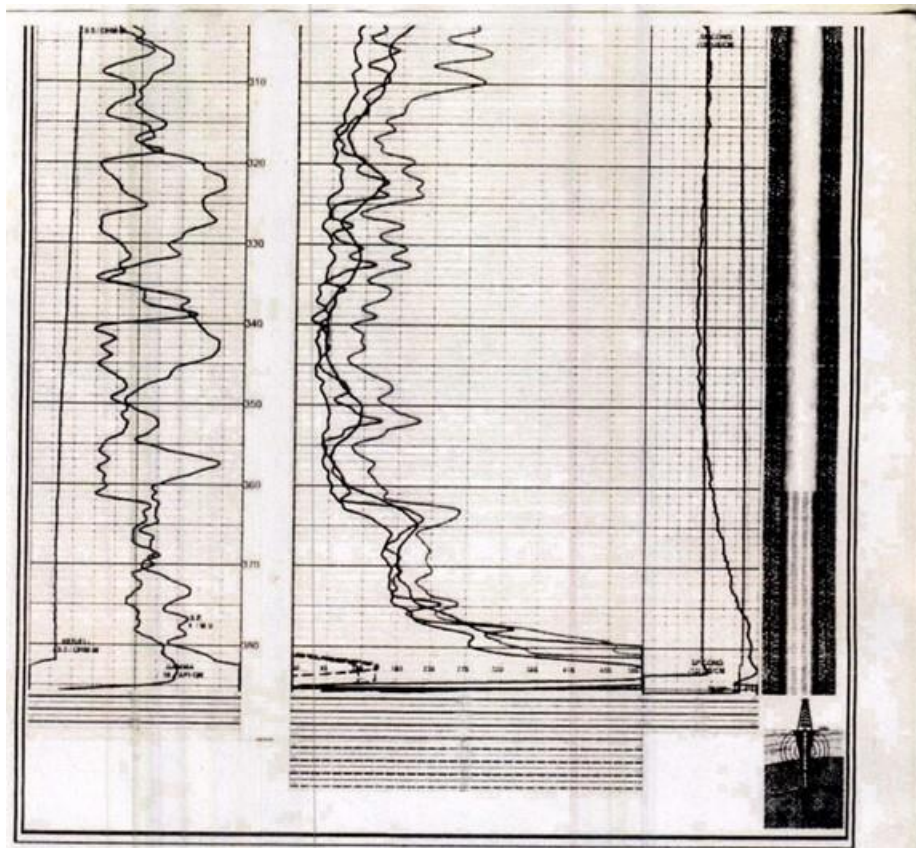


Figura 3-14 Registro eléctrico del pozo Popotla



3.4 CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

El pozo Popotla es muy profundo (400 m) y está captando agua de estratos profundos de mala calidad.

Se recomienda que en esta zona los pozos se perforen someros, a fin de evitar los flujos profundos que son de mala calidad. Se recomienda aproximadamente doscientos metros (200 m).

3.4.1 REPOSICIÓN DEL POZO POPOTLA

Si se decide reponer el pozo Popotla, el diseño sería:

Profundidad: 200 m

Ademe liso: 100 m

Ademe ranurado: 100 m

3.4.2 SELLAR A PROFUNDIDAD EL POZO POPOTLA

Sellar el pozo Popotla a partir de los 250 m.

Quedaría el pozo de la siguiente manera:

Ademe liso: 150 m (El cual tiene actualmente)

Ademe ranurado: 100 m

4 DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN DEL POZO JARDINES DEL PEDREGAL 5B

La localización del Pozo Jardines del Pedregal 5B se muestra en el recuadro rojo de la **Figura 4-1**



Figura 4-1 Localización del pozo Jardines del Pedregal 5 B

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE CAMPO Y TOMA DE MUESTRAS



Figura 4-2 Medición de parámetros físico-químicos de campo y toma de muestras en el pozo Jardines del Pedregal 5B

Tabla 4-1. Parámetros físico-químicos de campo del pozo Jardines del Pedregal 5B

Pozo Jardines del Pedregal 5B				
Profundidad (m)	Conductividad (µg/l)	Oxígeno disuelto (mg/l)	Temperatura (°C)	pH
140 m	1242	1.8	25.8	7.0
160 m	1484	1.5	25.6	6.7
180 m	1556	1.3	25.4	6.6
210 m	1694	1.3	25.1	6.9
250 m	1717	1.0	25.3	6.9
270 m	3570	0.7	24.8	6.4
290 m	3520	0.6	24.7	6.5
320 m	3500	0.6	24.7	6.3
340 m	2480	0.7	24.2	6.3

Las muestras más someras, 140m–250m, son las que presentan los valores de conductividad más bajos, 1242 µS/cm–1717 µS/cm. Las muestras más profundas, ≥ 270 m tienen valores de conductividad muy alto (≈3500 µS/cm).

Cabe mencionar que en las muestras profundas (≥ 270 m) se aprecian cantidades considerables de polímeros, Figura 4-3.



Figura 4-3 Muestras a 160 m y 270 m

4.1 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE LABORATORIO

En la **Tabla 4-2** se muestran en color rojo los parámetros que exceden el Límite Máximo Permitido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 modificada en 2000 (Anexo A).

Tabla 4-2 Parámetros físico-químicos de laboratorio del pozo Jardines del Pedregal 5

Elemento analizado	Li	Be	Na	Mg	K	Ca	Al	As	B	Ba
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
70 m	0.27	<l.c.	130.55	52.65	19.06	36.31	0.03	<l.c.	2.36	0.24
140	0.27	<l.c.	127.02	51.04	18.33	49.13	0.03	<l.c.	2.37	0.27
160	0.31	<l.c.	142.88	66.41	20.42	66.15	0.04	<l.c.	3.11	0.41
180 m	0.31	<l.c.	146.25	72.87	20.99	71.90	0.04	<l.c.	3.15	0.45
210 m	0.30	<l.c.	150.20	76.64	21.14	68.54	0.08	<l.c.	2.97	0.42
250 m	0.30	<l.c.	154.02	79.12	21.57	68.43	0.05	<l.c.	2.99	0.46
270	0.79	<l.c.	204.55	196.12	38.98	280.82	0.13	<l.c.	4.00	2.69
290 m	0.79	<l.c.	196.74	193.07	37.16	278.69	0.06	<l.c.	4.12	2.93
320 m	0.78	<l.c.	193.69	194.43	37.60	281.16	0.12	<l.c.	4.09	2.95
340 m	0.78	<l.c.	190.34	195.94	37.76	287.81	0.16	<l.c.	4.00	2.90

Elemento analizado	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	P	Pb
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
70 m	0.01	<l.c.	<l.c.	0.01	37.63	0.23	<l.c.	0.02	<l.c.	0.02
140	0.01	<l.c.	<l.c.	0.00	22.97	0.25	<l.c.	0.02	0.09	0.03
160	0.00	<l.c.	<l.c.	0.00	17.56	0.25	<l.c.	0.03	0.15	0.03
180 m	0.01	<l.c.	<l.c.	<l.c.	22.25	0.28	<l.c.	0.02	0.14	0.03
210 m	0.01	<l.c.	0.00	0.00	46.18	0.33	<l.c.	0.02	0.05	0.02
250 m	0.01	<l.c.	0.01	0.01	47.05	0.37	<l.c.	0.02	<l.c.	0.03
270 m	0.01	0.01	0.01	0.01	48.85	11.72	<l.c.	0.03	0.97	0.04
290 m	0.01	0.02	0.01	0.00	34.58	12.80	<l.c.	0.04	1.10	0.04
320 m	0.01	0.02	0.01	0.01	34.74	12.81	<l.c.	0.04	1.13	0.04
340 m	0.01	0.02	0.01	0.00	31.47	11.96	<l.c.	0.03	1.08	0.03



Elemento analizado	Sb	Se	Si	Sn	Sr	Tl	V	Zn	S	Bi
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
70 m	<l.c.	<l.c.	33.51	<l.c.	0.42	<l.c.	<l.c.	0.04	0.50	<l.c.
140	<l.c.	<l.c.	42.38	<l.c.	0.46	<l.c.	<l.c.	0.04	0.19	<l.c.
160	<l.c.	<l.c.	47.10	<l.c.	0.62	<l.c.	<l.c.	0.04	0.16	<l.c.
180 m	<l.c.	<l.c.	45.92	<l.c.	0.64	<l.c.	<l.c.	0.04	0.21	<l.c.
210 m	<l.c.	<l.c.	36.98	<l.c.	0.59	<l.c.	<l.c.	0.03	0.49	<l.c.
250 m	<l.c.	<l.c.	35.30	<l.c.	0.61	<l.c.	<l.c.	0.03	0.56	<l.c.
270 m	<l.c.	<l.c.	55.42	0.01	1.79	<l.c.	<l.c.	0.24	0.35	<l.c.
290 m	<l.c.	<l.c.	57.33	0.02	1.90	<l.c.	<l.c.	0.22	0.40	<l.c.
320 m	<l.c.	<l.c.	57.24	0.02	1.89	<l.c.	<l.c.	0.26	0.43	<l.c.
340 m	<l.c.	<l.c.	54.16	0.02	1.87	<l.c.	<l.c.	0.32	0.36	<l.c.

Elemento analizado	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Bicarbonato
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/l
70 m	0.11	125.42	1.01	0.40	0.26	<l.c.	11.93	534.36
140	0.10	125.21	0.28	0.38	<l.c.	<l.c.	3.67	553.88
160	0.11	145.15	<l.c.	0.54	0.27	<l.c.	0.46	657.58
180 m	0.10	225.07	<l.c.	0.53	<l.c.	<l.c.	0.52	692.96
210 m	0.09	228.30	<l.c.	0.56	<l.c.	<l.c.	0.00	724.68
250 m	0.09	192.27	<l.c.	0.57	<l.c.	<l.c.	0.00	663.68
270 m	<l.c.	330.44	<l.c.	0.72	<l.c.	<l.c.	0.31	1903.20
290 m	<l.c.	323.54	<l.c.	0.73	<l.c.	<l.c.	0.75	1786.08
320 m	<l.c.	308.17	<l.c.	0.74	<l.c.	<l.c.	1.26	1725.08
340 m	<l.c.	318.33	<l.c.	0.78	<l.c.	<l.c.	0.38	2069.12

Elemento analizado	Nitrógeno amoniacal
Unidad	mg/l
70 m	0.519
140	0.329
160	0.323
180 m	0.248
210 m	0.288
250 m	< 0.2
270 m	< 0.2
290 m	0.288
320 m	0.346
340 m	0.369

4.2 DIAGRAMAS DE PIPER Y STIFF

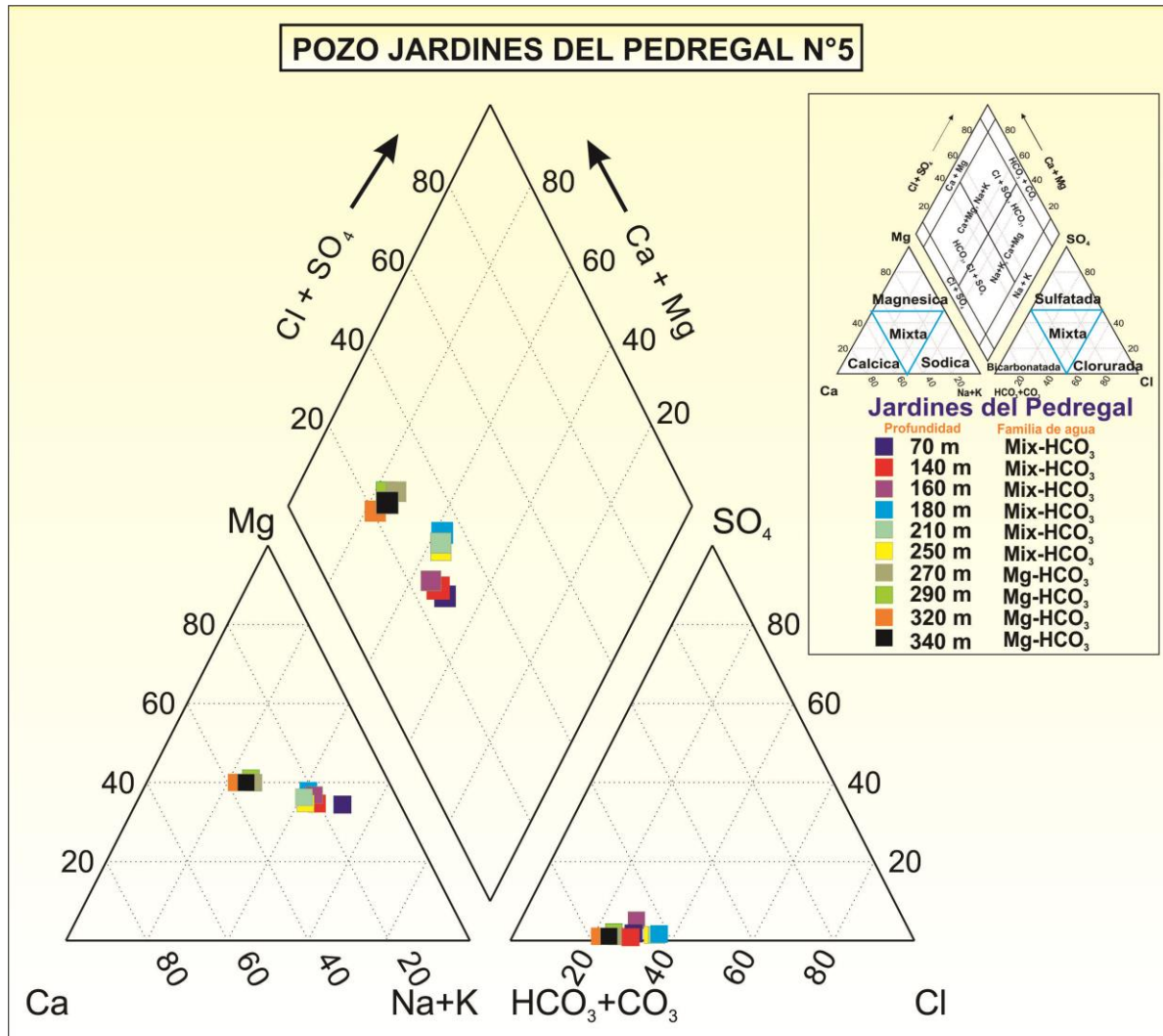


Figura 4-4 Diagrama de Piper del pozo Jardines del Pedregal 5

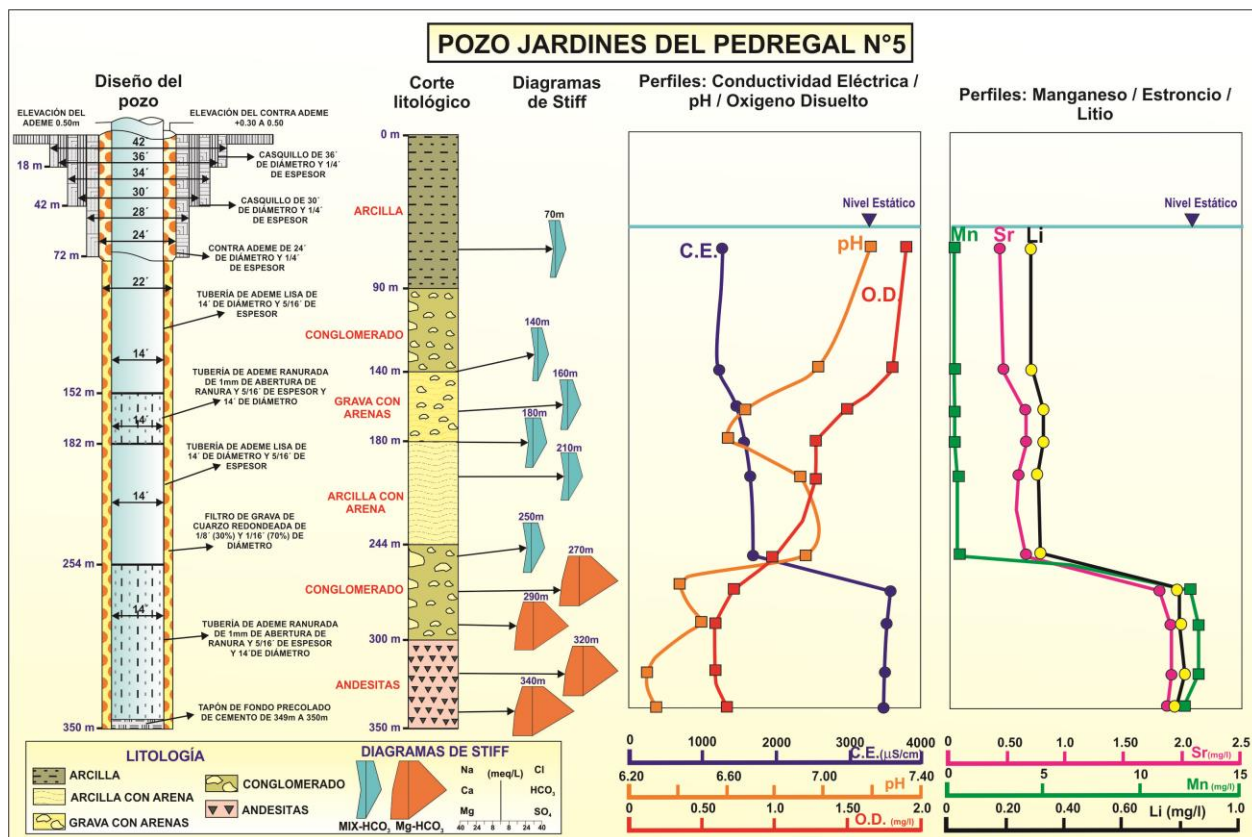


Figura 4-5 Diagrama de stiff del agua del pozo Jardines del Pedregal 5

4.3 PERFILES DE CALIDAD DEL AGUA

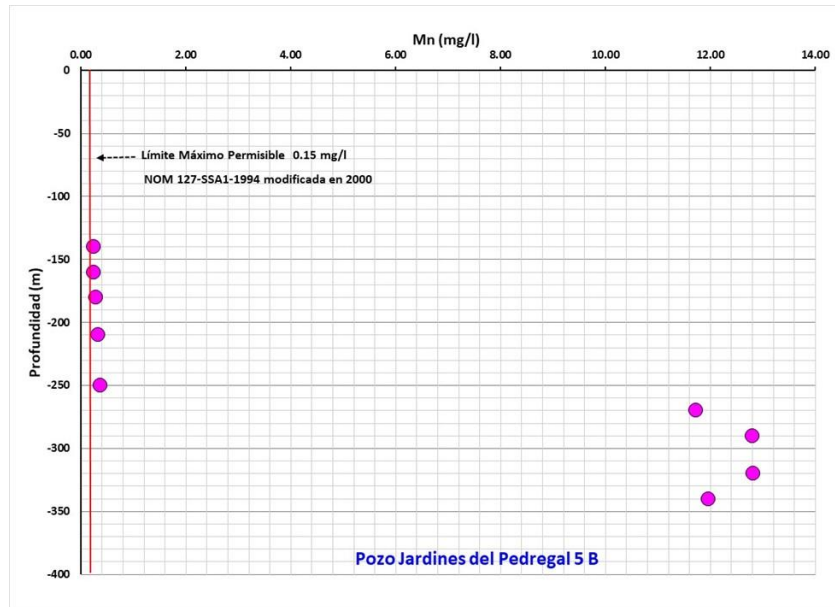


Figura 4-6 Manganeso en la vertical

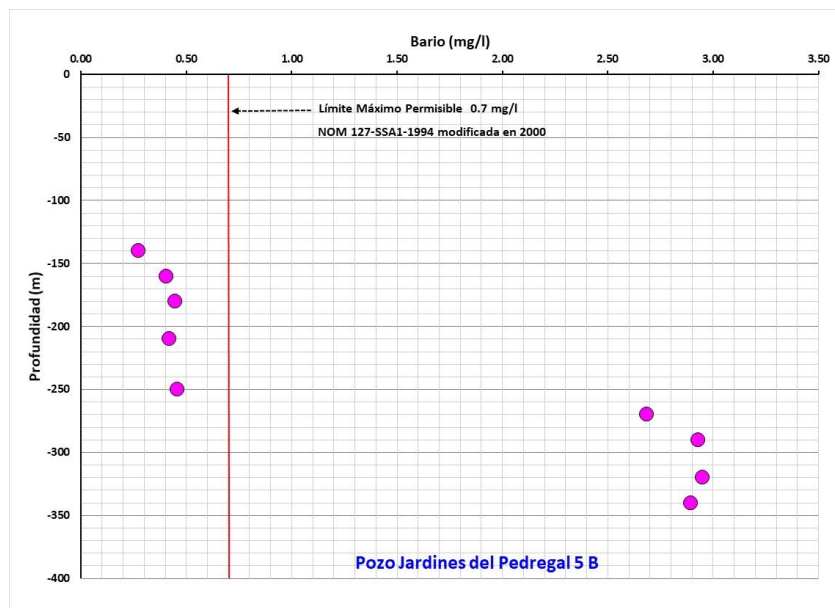


Figura 4-7 Bario en la vertical

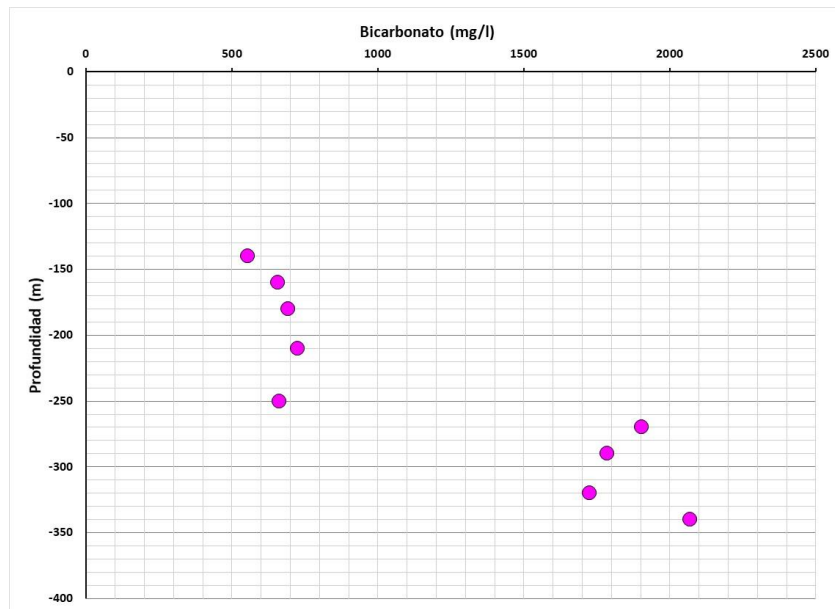


Figura 4-8 Bicarbonato en la vertical

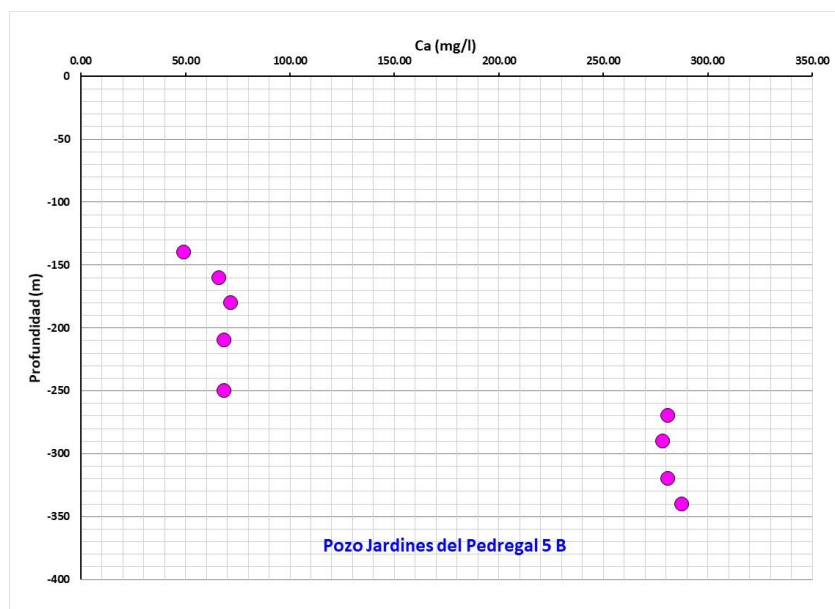


Figura 4-9 Calcio en la vertical

4.4 DIAGRAMAS BINARIOS

El diagrama de Litio versus Cloruro, indica que el agua del estrato somero es diferente del agua del estrato profundo, Figura 4-10. También se puede observar que el agua profunda es relativamente homogénea.

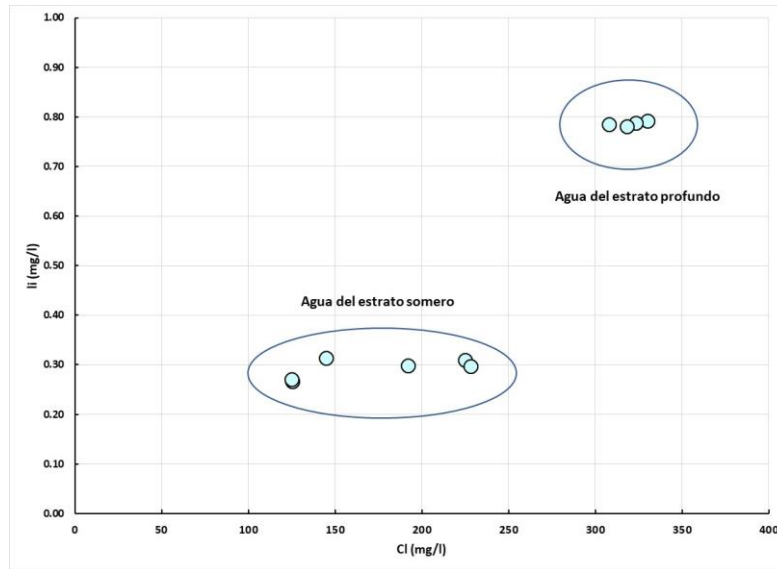


Figura 4-10 Litio versus cloruro

El diagrama de la Figura 4-11 indica que las muestras de agua se alinean a lo largo de recta $(Ca+Mg):HCO_3=1:1$, sugiriendo disolución de dolomita de acuerdo a

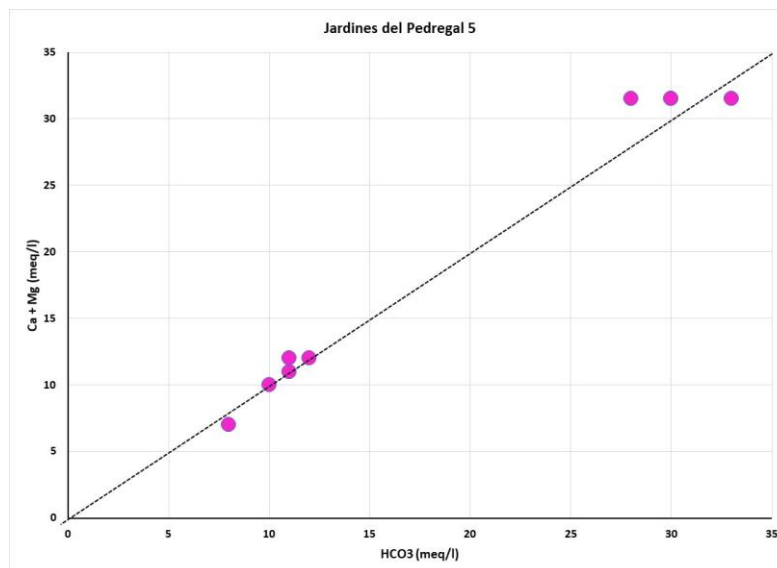
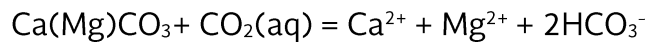


Figura 4-11 Bicarbonato versus (Ca+Mg)

4.5 ISOTOPOS ESTABLES

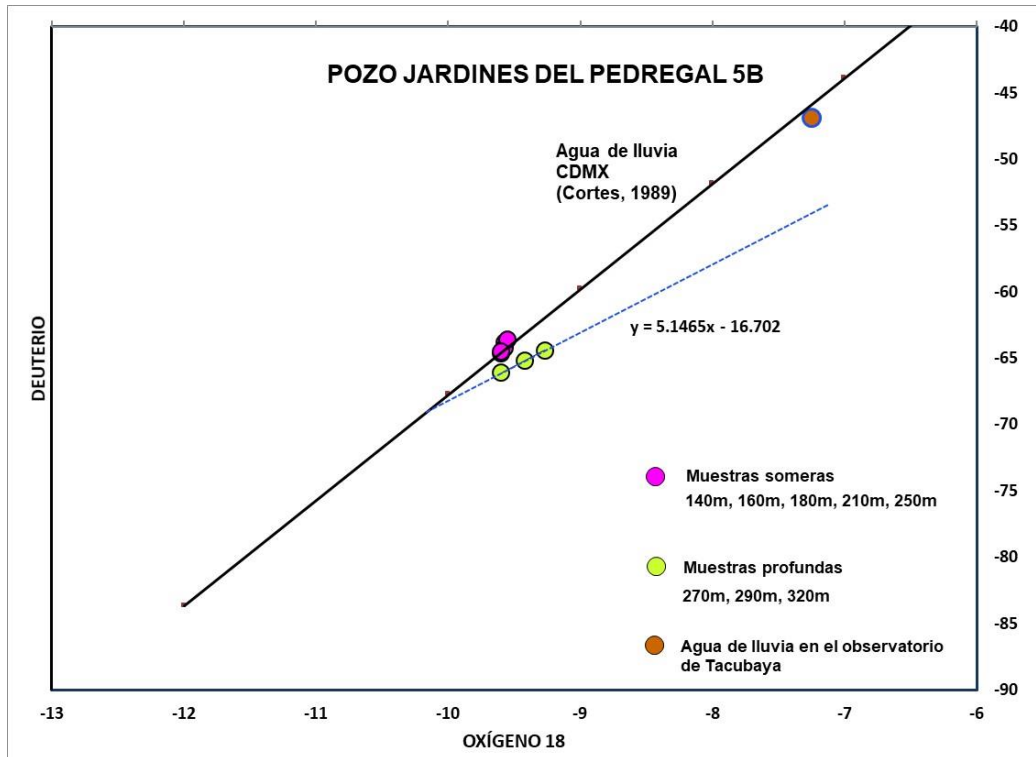


Figura 4-12 Contenido de isótopos estables del agua del pozo Jardines del Pedregal 5B

En la Figura 4-12 se puede observar que las muestras de agua del pozo someras (140m, 160m, 180m, 210m y 250m) se alinean a lo largo del agua de lluvia de la CDMX, por lo cual se asume que los estratos someros son recargados por agua de lluvia. Las muestras de agua del pozo profundas (270m, 290m y 320m) se alinean a lo largo de una recta con pendiente aproximada de 5, lo cual indica que es agua evaporada.

4.6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1.- Las muestras más someras, <250m, son las que presentan los valores de conductividad más bajos. Las muestras más profundas, ≥ 270 m, tienen valores de conductividad muy altos.
- 2.- El incremento de conductividad en las muestras profundas, se deriva de un aumento en los iones de calcio, magnesio y bicarbonato, en una relación $(Ca+Mg):HCO_3=1:1$.
- 3.- Se recomienda colocar la bomba a una profundidad de 150 m, con la finalidad de maximizar la extracción de los estratos someros y minimizar la extracción de los estratos profundos.

5 DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN DEL POZO ATORON 6

La localización del Pozo Atorón 6 se muestra en el recuadro rojo de la Figura 5-1.



Figura 5-1 Localización del pozo Atorón 6

5.1 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE CAMPO Y TOMA DE MUESTRAS

5.1.1 DESCARGA DEL POZO



Figura 5-2 Medición de parámetros físico-químicos de campo y toma de muestras en la descarga del pozo.

Tabla 5-1. Parámetros físico-químicos de campo en la descarga del pozo Atorón 6

Pozo Atorón 6				
Temperatura (°C)	Conductividad (µS/cm)	Oxígeno disuelto (mg/l)	pH	Redox (mV)
37.1	3900	0.5	6.39	-80.7

5.1.2 VERTICAL



Figura 5-3 Medición de parámetros físico-químicos de campo y toma de muestras en la vertical

Tabla 5-2 Parámetros físico-químicos de campo en la vertical del pozo Atorón 6

Pozo Atorón 6				
Profundidad (m)	Temperatura (°C)	Conductividad (µS/cm)	Oxígeno disuelto (mg/l)	pH
100	30.0	3620	1.0	6.6
120	30.9	3750	1.0	6.59
140	31.6	3760	0.9	6.56
160	32.3	3930	0.9	6.62
180	32.1	3950	1.0	6.62
200	32.1	3940	0.7	6.59
220	31.9	3940	0.8	6.61
240	31.6	3910	0.7	6.59
260	31.3	3940	0.7	6.56
280	31.2	3940	0.8	6.62

5.2 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE LABORATORIO

5.2.1 DESCARGA

En la **Tabla 5-3** se muestran en color rojo los parámetros que exceden el Límite Máximo Permitido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 modificada en 2000 (Anexo A).

Tabla 5-3 Parámetros físico-químicos de laboratorio en la descarga del pozo Atorón 6

Elemento analizado	Na	Li	Be	Mg	Al	Si	K	Ca	Sc	Ti
Unidad	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Atoron 6	417	0.77	< 0.0005	155	1.27	56.1	54.1	255	< .0005	0.05

Elemento analizado	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge
Unidad	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Atoron 6	0.0128	0.0054	0.401	10.20	0.0048	0.0149	0.0145	0.0843	0.00204	0.00047

Elemento analizado	As	Se	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd
Unidad	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Atoron 6	0.00272	< 0.001	0.0455	2.24	0.00492	0.00015	< 0.00003	0.0065	< 0.001	0.00012

Elemento analizado	In	Sn	Sb	Te	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd
Unidad	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Atoron 6	0.000006	< 0.0005	0.0001	< 0.0005	0.00102	1.37	0.00607	0.0151	0.00207	0.00912

Elemento analizado	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Unidad	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Atoron 6	0.00179	0.00027	0.00156	0.000208	0.000988	0.000177	0.000446	0.000054	0.000304	0.000047

Elemento analizado	Hf	Ta	W	Hg	Tl	Pb	Bi	Th	U
Unidad	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Atoron 6	< 0.000005	< 0.000005	< 0.0001	< 0.001	0.000131	0.00183	< 0.002	0.000209	0.000154

Elemento analizado	F	Cl	NO2 (as N)	Br	NO3 (as N)	PO4 (as P)	SO4	HCO3
Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Atoron 6	< 0.3	570	< 0.3	1.79	< 0.3	< 0.5	< 0.7	1727.52



5.2.2 VERTICAL

En la Tabla 5-4 se muestran en color rojo los parámetros que exceden el Límite Máximo Permitido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 modificada en 2000 (Anexo A).

Tabla 5-4 Parámetros físico-químicos de laboratorio en la vertical del pozo Atorón 6

Muestras	Li	Be	Na	Mg	K	Ca	Al	As	B	Ba
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Atorón 100 m	1.1000	<l.c.	337.9780	164.7625	52.4477	184.1121	0.0284	<l.c.	13.4079	1.5281
Atorón 120 m	0.9716	<l.c.	322.3738	167.6182	51.2399	187.9846	0.0090	<l.c.	13.3525	1.5987
Atorón 140 m	0.8826	<l.c.	321.3626	165.5408	48.8009	190.4732	0.0212	<l.c.	13.5600	1.6001
Atorón 160 m	1.0208	<l.c.	330.0858	171.4912	48.5926	210.5396	0.0176	<l.c.	13.1273	1.2999
Atorón 180 m	1.0384	<l.c.	328.7705	172.7533	48.8990	210.9963	0.0210	<l.c.	13.0911	1.2953
Atorón 200 m	1.0515	<l.c.	326.3363	170.1537	48.5926	208.3326	0.0285	<l.c.	13.1363	1.3148
Atorón 220 m	1.1659	<l.c.	331.4118	173.1891	49.5158	211.2993	0.0124	<l.c.	14.3711	1.3996
Atorón 240 m	1.0986	<l.c.	372.0508	195.3535	56.4439	241.7935	0.0341	<l.c.	13.8296	1.3706
Atorón 260 m	1.0951	<l.c.	345.0865	177.3155	51.9023	220.9989	0.0279	<l.c.	13.6199	1.3542
Atorón 280 m	1.0747	<l.c.	339.8418	174.9832	51.5080	217.1401	0.0213	<l.c.	13.2389	1.3126

Muestras	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	P	Pb
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Atorón 100 m	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0096	7.7626	0.1937	0.0103	0.0087	0.2210	0.0225
Atorón 120 m	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0038	5.5039	0.2351	0.0113	<l.c.	0.2071	0.0170
Atorón 140 m	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0039	5.5924	0.5639	0.0106	<l.c.	0.2209	0.0175
Atorón 160 m	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0046	6.8382	0.4073	0.0098	<l.c.	0.2568	0.0144
Atorón 180 m	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0050	7.7044	0.4352	0.0096	<l.c.	0.2594	0.0164
Atorón 200 m	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0049	7.8993	0.4445	0.0113	<l.c.	0.2666	0.0170
Atorón 220 m	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0040	8.1603	0.4677	0.0092	<l.c.	0.2657	0.0184
Atorón 240 m	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0044	8.1698	0.4625	0.0120	<l.c.	0.2893	0.0173
Atorón 260 m	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0047	7.9537	0.4487	0.0105	<l.c.	0.2748	0.0169
Atorón 280 m	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.0037	7.7063	0.4370	0.0076	<l.c.	0.2499	0.0165

Muestras	Sb	Se	Si	Sn	Sr	Tl	V	Zn	S	Bi
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Atorón 100 m	<l.c.	<l.c.	49.3215	0.0317	2.2391	<l.c.	<l.c.	0.0351	0.3795	<l.c.
Atorón 120 m	<l.c.	<l.c.	49.2756	0.0306	2.3215	<l.c.	<l.c.	0.0096	0.2844	<l.c.
Atorón 140 m	<l.c.	<l.c.	49.7661	0.0322	2.3566	<l.c.	<l.c.	0.0092	0.2843	<l.c.
Atorón 160 m	<l.c.	<l.c.	51.2329	0.0287	2.3371	<l.c.	<l.c.	0.0138	0.2959	<l.c.
Atorón 180 m	<l.c.	<l.c.	51.7217	0.0276	2.3505	<l.c.	<l.c.	0.0113	0.2936	<l.c.
Atorón 200 m	<l.c.	<l.c.	52.0845	0.0285	2.4375	<l.c.	<l.c.	0.0073	0.3389	<l.c.
Atorón 220 m	<l.c.	<l.c.	56.4848	0.0238	2.6583	<l.c.	<l.c.	0.0125	0.3342	<l.c.
Atorón 240 m	<l.c.	<l.c.	54.5707	0.0328	2.5864	<l.c.	<l.c.	0.0048	0.3416	<l.c.
Atorón 260 m	<l.c.	<l.c.	53.9567	0.0312	2.5539	<l.c.	<l.c.	0.0040	0.3070	<l.c.
Atorón 280 m	<l.c.	<l.c.	52.6708	0.0262	2.5148	<l.c.	<l.c.	0.0130	0.2658	<l.c.

Muestras	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃	Nitrógeno Amoniacal
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/l	mg/l
Atorón 100 m	<l.c.	605	<l.c.	1.1564	0.347	<l.c.	4.38	1486	2.37
Atorón 120 m	<l.c.	639	<l.c.	1.1693	<l.c.	<l.c.	1.90	1500	2.01
Atorón 140 m	<l.c.	555	<l.c.	1.1586	<l.c.	<l.c.	1.26	1627	2.69
Atorón 160 m	<l.c.	616	<l.c.	1.2689	<l.c.	<l.c.	0.81	1627	4.28
Atorón 180 m	0.05	774	<l.c.	1.2675	<l.c.	<l.c.	0.41	1338	4.28
Atorón 200 m	<l.c.	714	<l.c.	1.2398	<l.c.	<l.c.	0.29	1381	3.99
Atorón 220 m	<l.c.	780	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	0.50	1370	4.39
Atorón 240 m	<l.c.	671	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	1360	2.59
Atorón 260 m	<l.c.	781	<l.c.	1.2447	<l.c.	<l.c.	<l.c.	1488	4.51
Atorón 280 m	<l.c.	631	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	1432	0.93

5.3 DIAGRAMAS BINARIOS

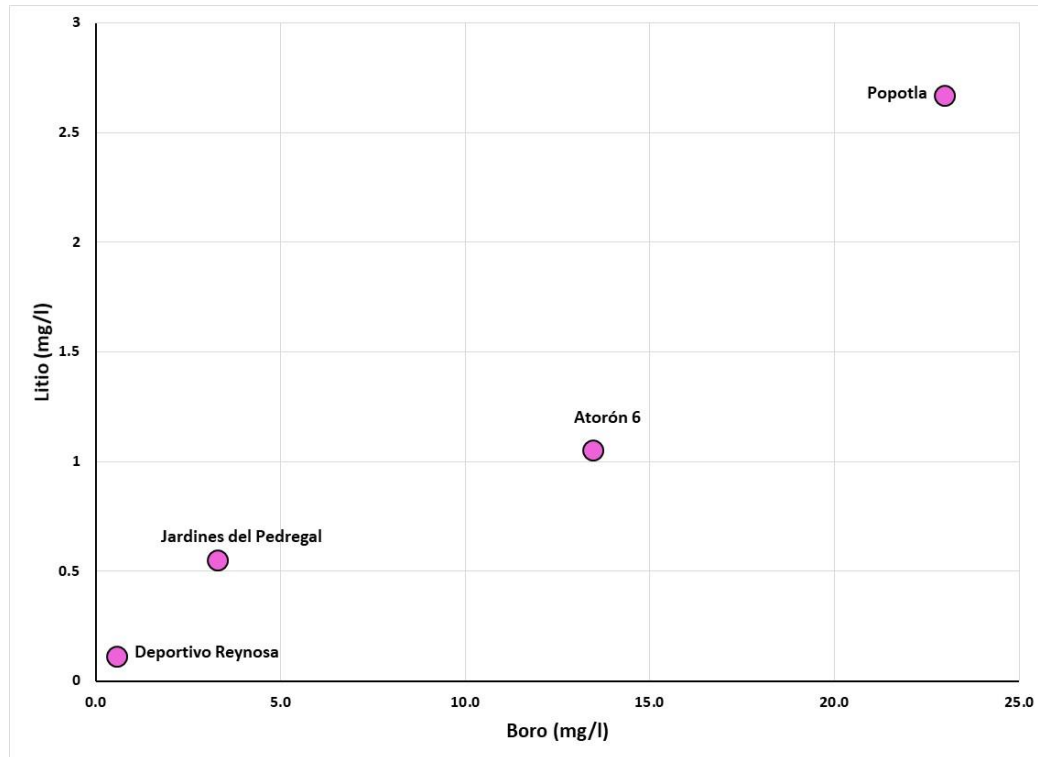


Figura 5-4. Boro versus litio

En la Figura 5-4 se observa una relación proporcional entre el boro y el litio, es decir a mayor contenido de litio mayor contenido de boro. El litio es un elemento conservativo, el cual se utiliza como un indicador del recorrido del agua subterránea. Entre mayor contenido de litio, mayor el recorrido del agua subterránea. Esto quiere decir, que el agua del pozo Popotla y el Atorón 6, son las que han transitado un mayor recorrido y por ende han pasado mayor tiempo en contacto con las rocas del subsuelo. Esto ha propiciado que algunos elementos de las rocas se disuelvan y se incorporen al agua subterránea, entre ellos el boro.

5.4 DIAGRAMAS DE PIPER Y STIFF

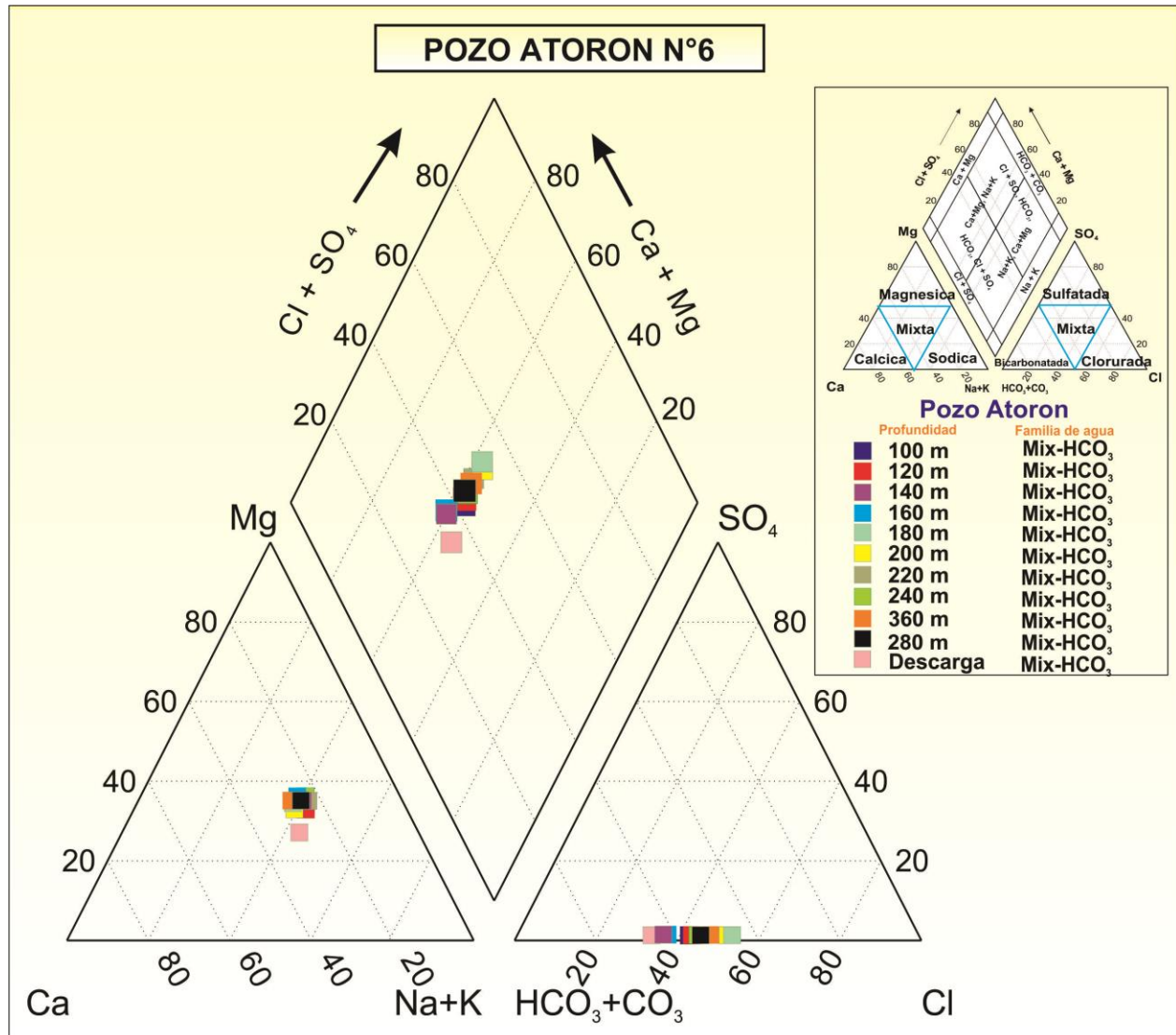


Figura 5-5 Diagrama de Piper del pozo Atorón 6

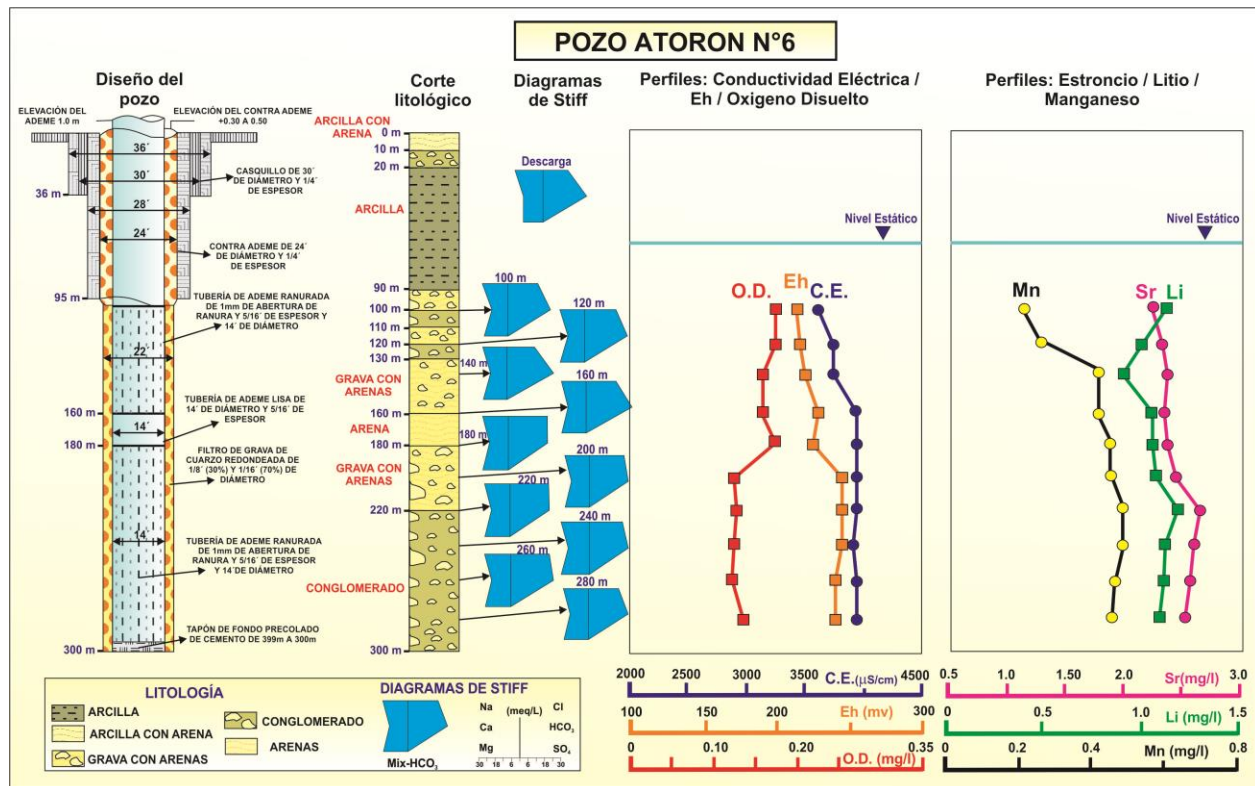


Figura 5-6 Diagrama de Stiff y parámetros físico-químicos del agua del pozo Atorón 6

5.5 ISÓTOPOS ESTABLES

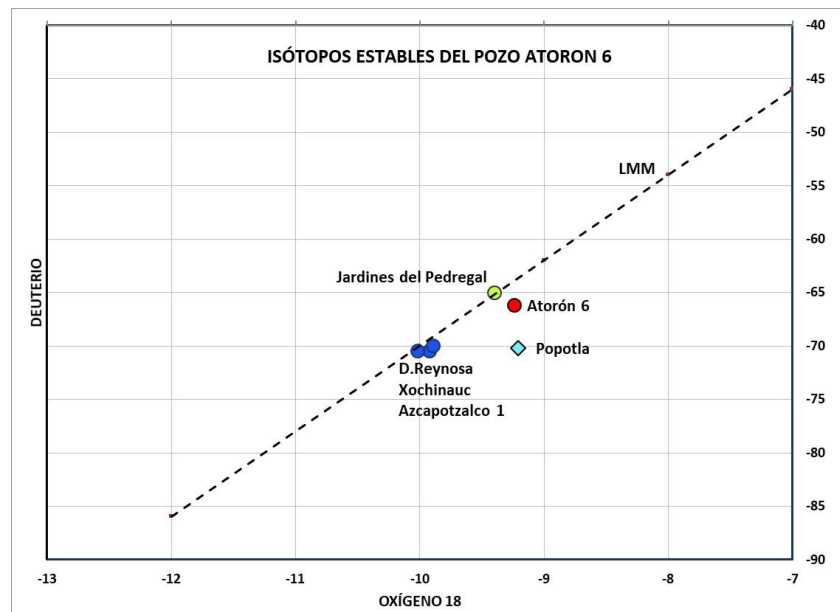


Figura 5-7 Composición isotópica del agua de los pozos

El agua del pozo Atorón 6 presenta enriquecimiento de oxígeno 18, característico de flujos profundos que han tenido contacto con rocas a altas temperaturas (Figura 5-7). Esto debido a que cuando el agua subterránea se calienta, los isótopos del oxígeno reaccionan con el oxígeno de las rocas mientras que los isótopos de hidrógeno permanecen sin cambio (Vuataz and Goff, 1986).

5.6 CONCLUSIONES

Las características geológicas de la zona de estudio y la composición isotópica e hidrogeoquímica del agua subterránea, indican que el termalismo del pozo Atorón 6 se origina por circulación profunda de agua subterránea debido al tectonismo (fallas profundas) propio de esta región.

6 INTERPRETACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LOS PARÁMETROS DE LAS MUESTRAS DE AGUA

Los pozos captan diferentes sistemas de flujo muy bien identificados a partir de la composición de los elementos traza; al parecer las familias de agua no son tan decisivas para diferenciarlos.

Los pozos Deportivo Reynosa, Xochinahuac y Jardines del Pedregal hasta 250 m son de un sistema de flujo intermedio con agua de mejor calidad. Este es un miembro extremo.

Otro miembro extremo es el agua del Deportivo Oceanía, por el valor que tiene de estroncio y litio, debe ser agua muy profunda que alcanza a circular por las calizas que constituyen el basamento.

Entre estos 2 miembros extremos, está el agua de otros pozos que consisten de mezclas de agua entre esos 2 miembros extremos, por ejemplo, las muestras del pozo Atorón 6, Nápoles, y los del Jardines del Pedregal en su parte inferior.

Al parecer existe otro sistema de flujo profundo, representado por el pozo Popotla y por el pozo Azcapotzalco 1, el cual es claramente diferente de los otros miembros extremos. Los valores muy elevados de litio indican que se trata de un sistema de flujo regional, y los bajos valores de estroncio indican que no ha sido lo suficientemente profundo para circular por las rocas carbonatadas.

Las concentraciones altas de Fe y Mn se justifican a partir del diagrama Eh-pH (). Como puedes observar, la mayoría de los pozos se ubican en el campo del hierro ferroso (Fe^{+2}), que es muy soluble, indicando que el Eh y pH son los responsables de que se movilice hierro del material geológico al agua subterránea. Los valores bajos de Eh pueden estar asociados a: i) sistema regional muy profundo, antiguo, ii) la presencia de horizontes arcillosos lacustres, con materia orgánica en algunos niveles de los pozos.

El Mn está controlado por la solubilidad con el mineral rodocrosita (MnCO_3), y el hierro con hidróxidos de Fe. Se incluyen también gráficas con índices de saturación con respecto a la calcita y dolomita.

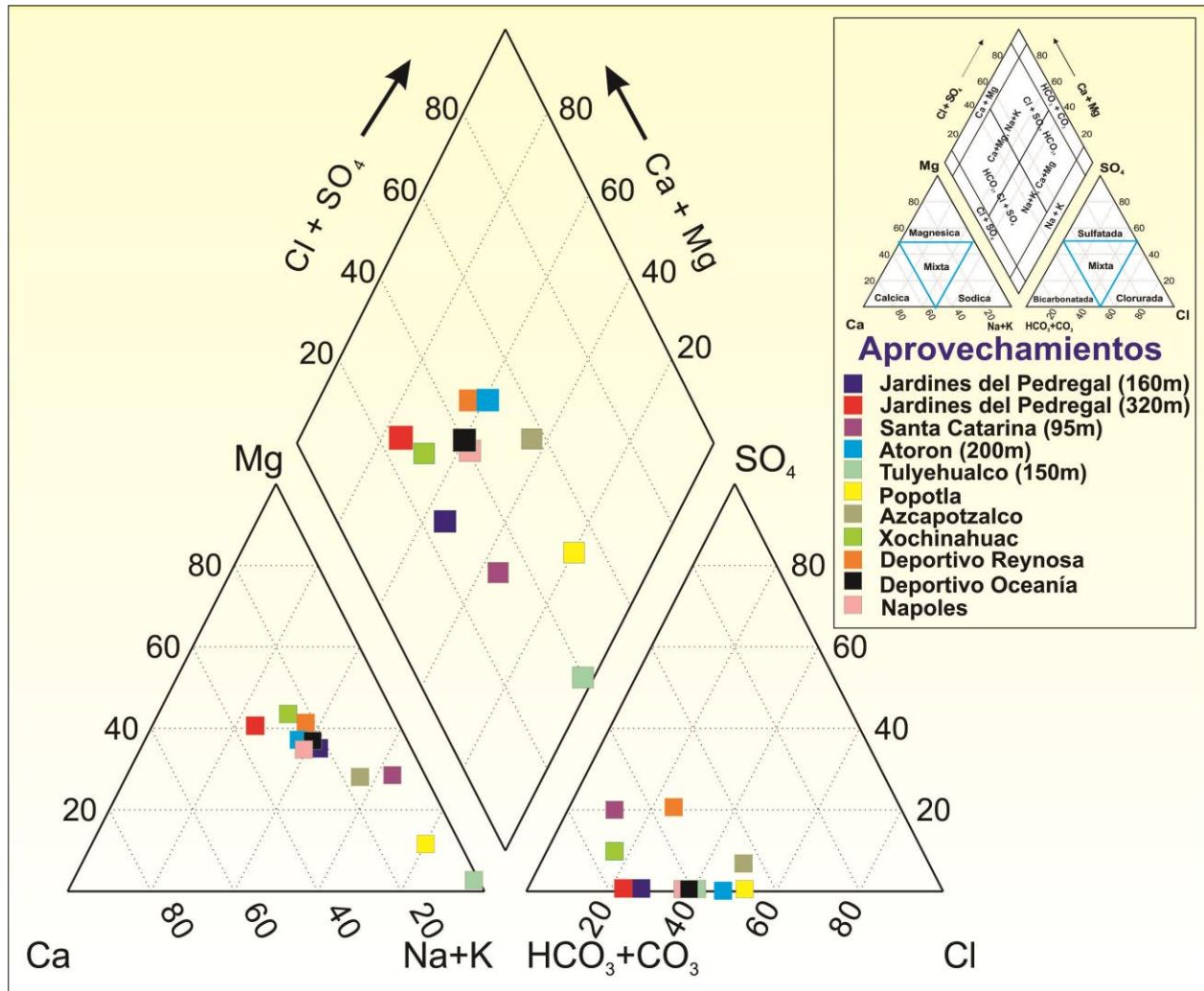


Figura 6-1 Diagrama de Piper de los diferentes aprovechamientos en la zona de estudio.



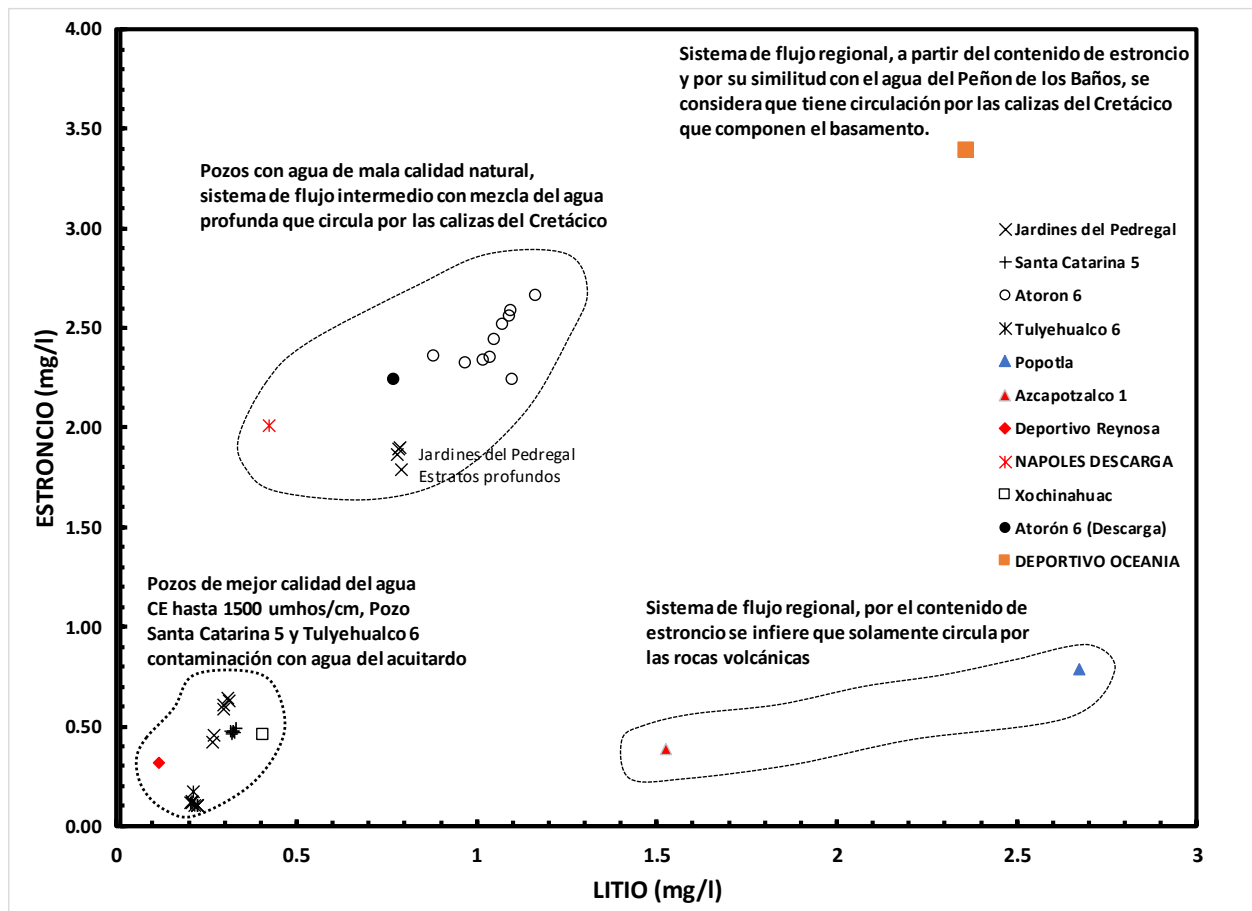


Figura 6-3 Sistemas de flujo

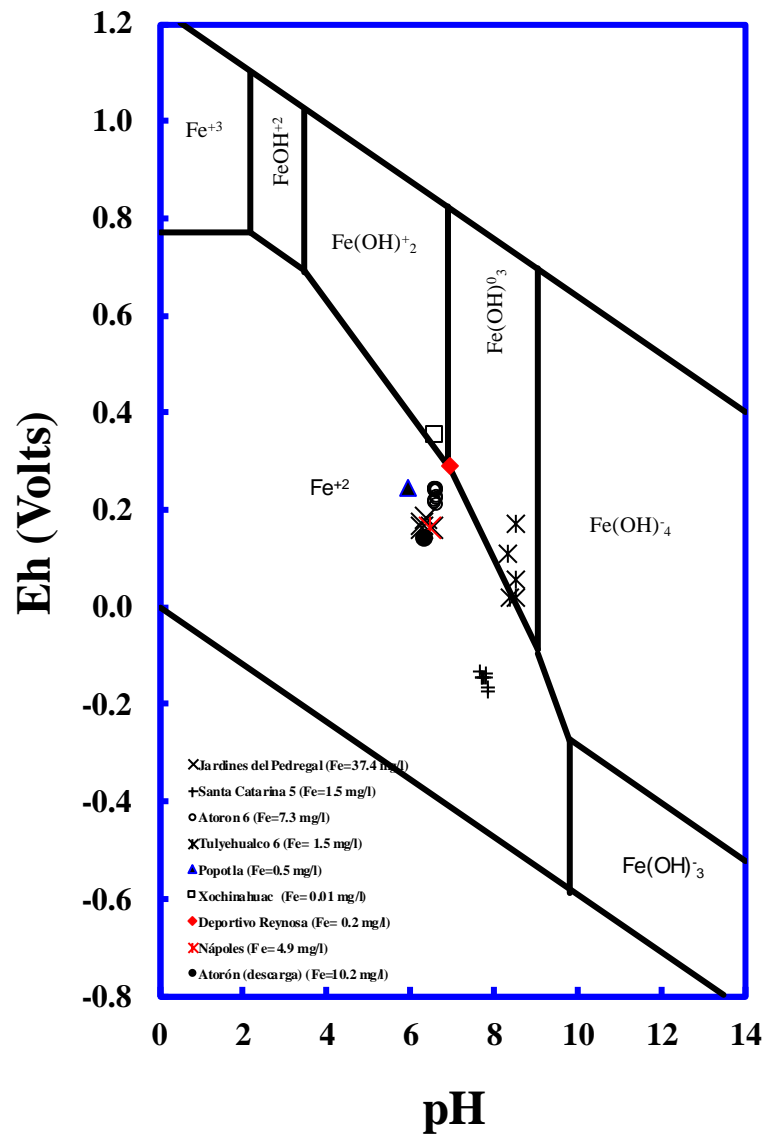


Figura 6-4 Diagrama Eh-pH

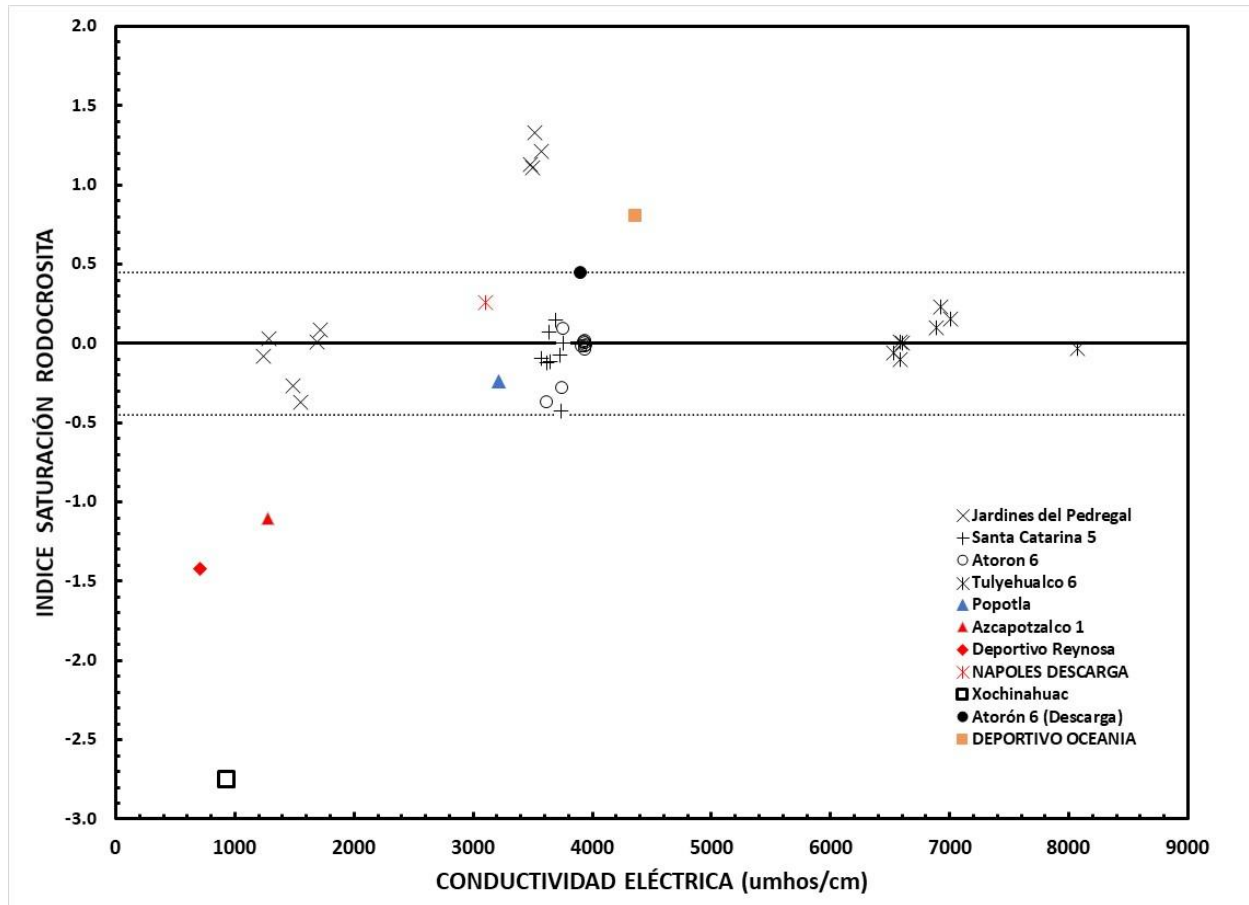


Figura 6-5 Índice de saturación de la Rodocrosita

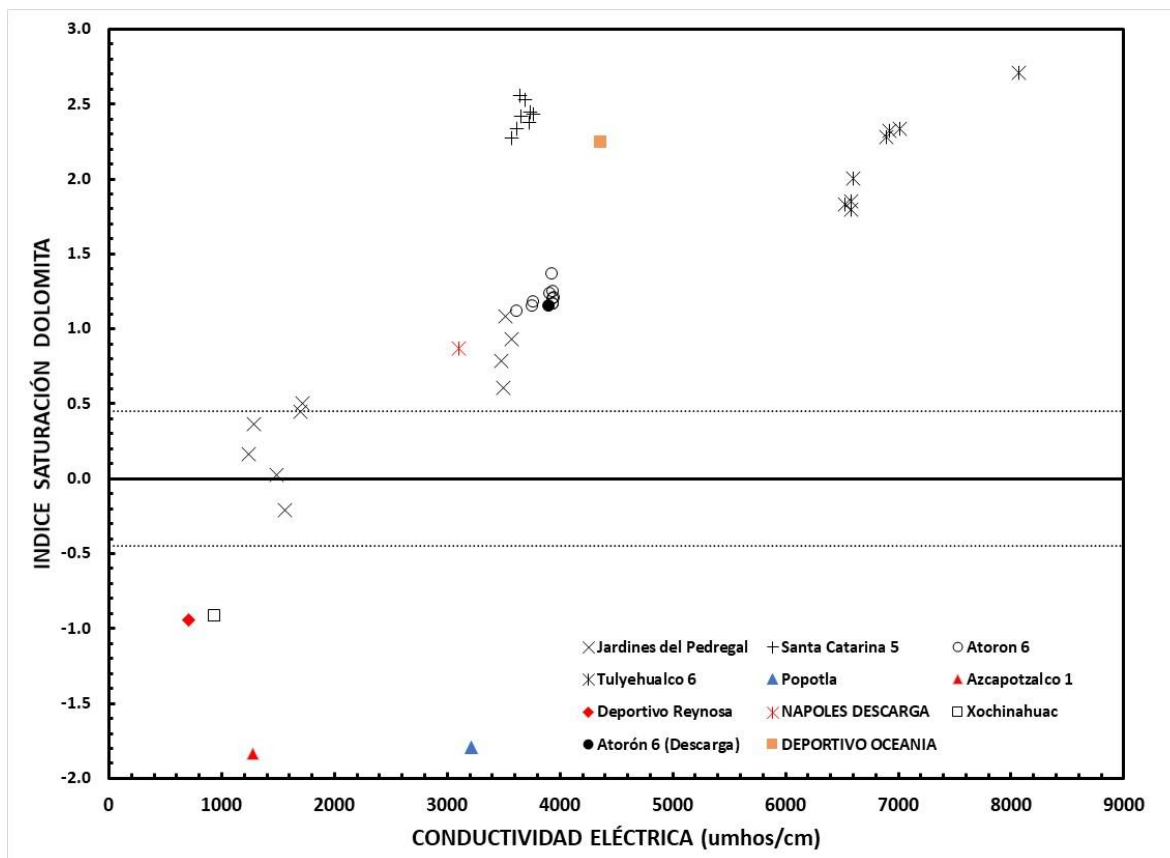


Figura 6-6 Índice de saturación de la dolomita

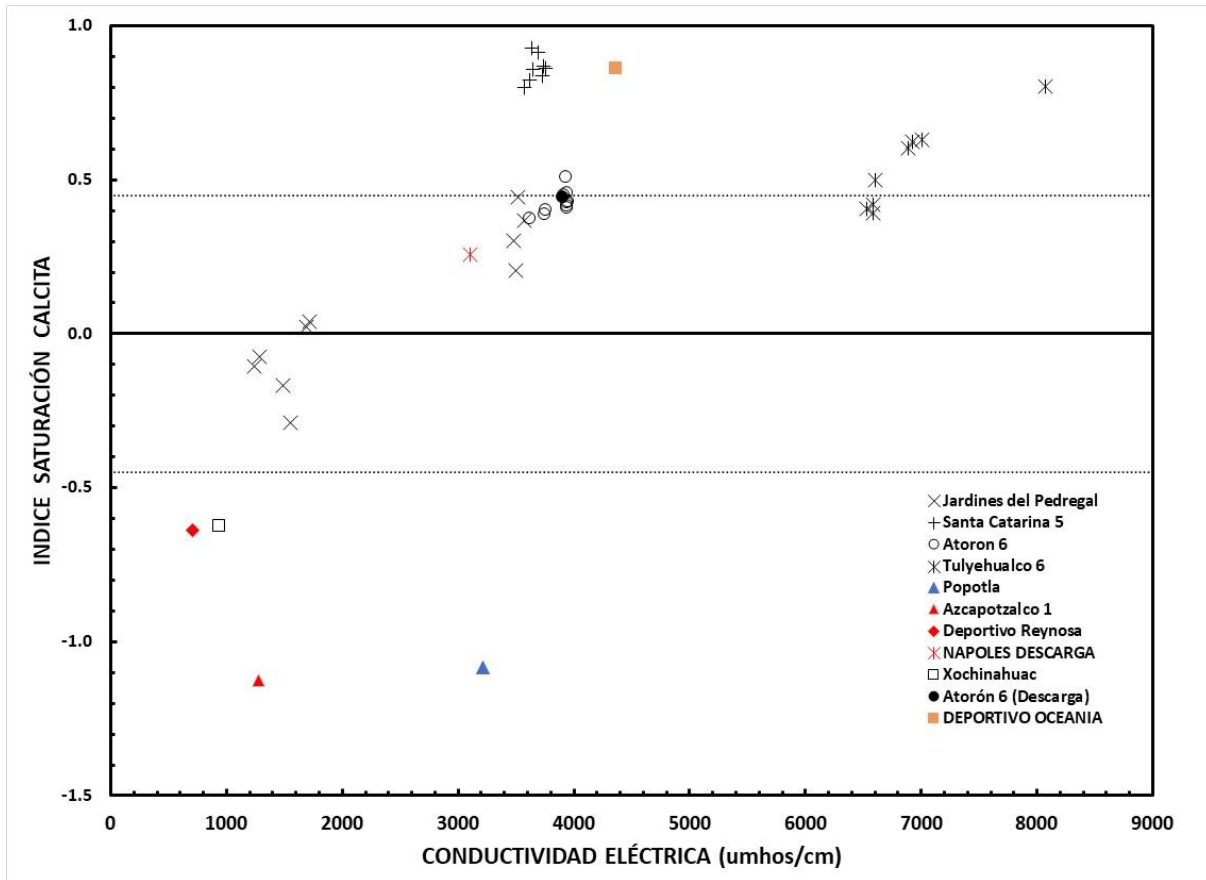


Figura 6-7 Índice de saturación de la calcita



Con el fin de determinar miembros extremos, se analizaron las muestras de dos pozos que se localizan en los alrededores del pozo Atorón 6, los cuales presentan altas temperaturas (Deportivo Oceanía y Nápoles).

Tabla 6-1 Parámetros físico-químicos de los pozos Deportivo Oceanía y Nápoles

Muestras	Temp	pH	Eh	DO	COND
	oC		mV	mg/l	microS/cm
DEPORTIVO OCEANIA	50	6.74			4360
NAPLES	34.9	6.49	-56.4	0.4	3100

Muestras	Li	Be	Na	Mg	K	Ca	Al	As	B	Ba
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
DEPORTIVO OCEANIA	2.3592	<l.c.	365.3937	203.5025	94.2868	211.0360	0.0053	<l.c.	13.6235	1.5082
NAPLES	0.4240	<l.c.	283.7317	130.5310	34.8468	165.7073	0.0248	<l.c.	10.9049	0.9863

Muestras	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	P	Pb
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
DEPORTIVO OCEANIA	<l.c.	0.0081	<l.c.	<l.c.	0.9980	1.4063	0.0201	<l.c.	0.1307	0.0195
NAPLES	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.	4.9164	0.5582	<l.c.	<l.c.	0.1884	0.0184

Muestras	Sb	Se	Si	Sn	Sr	Tl	V	Zn	S	Bi
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
DEPORTIVO OCEANIA	<l.c.	<l.c.	77.6664	0.0314	3.3949	<l.c.	<l.c.	0.0028	4.8617	<l.c.
NAPLES	<l.c.	<l.c.	48.8262	0.0128	2.0077	<l.c.	<l.c.	0.0241	0.2887	<l.c.

Muestras	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/l
DEPORTIVO OCEANIA	<l.c.	717	<l.c.	1.3959	<l.c.	<l.c.	16.24	1823
NAPLES	<l.c.	518	<l.c.	1.0338	<l.c.	<l.c.	1.04	1318

Tabla 6-2 Familias de agua

ID-Muestra	Nombre local del aprovechamiento	Profundidad de la muestra (m)	Familia de agua	Facies hidrogeoquímicas
1	Jardines del Pedregal	70	Na-HCO ₃	Na-Mg-HCO ₃ -Cl
2	Jardines del Pedregal	140	Na-HCO ₃	Na-Mg-HCO ₃ -Cl
3	Jardines del Pedregal	160	Na-HCO ₃	Na-Mg-Ca-HCO ₃ -Cl
4	Jardines del Pedregal	180	Na-HCO ₃	Na-Mg-Ca-HCO ₃ -Cl
5	Jardines del Pedregal	210	Na-HCO ₃	Na-Mg-HCO ₃ -Cl
6	Jardines del Pedregal	250	Na-HCO ₃	Na-Mg-Ca-HCO ₃ -Cl
7	Jardines del Pedregal	270	Mg-HCO ₃	Na-Mg-Ca-HCO ₃ -Cl
8	Jardines del Pedregal	290	Mg-HCO ₃	Na-Mg-Ca-HCO ₃ -Cl
9	Jardines del Pedregal	320	Mg-HCO ₃	Na-Mg-Ca-HCO ₃ -Cl
10	Jardines del Pedregal	340	Mg-HCO ₃	Na-Mg-HCO ₃ -Cl
11	Santa Catarina 5	65	Na-HCO ₃	Na-Mg-HCO ₃ -SO ₄
12	Santa Catarina 5	80	Na-HCO ₃	Na-Mg-HCO ₃ -SO ₄
13	Santa Catarina-5	95	Na-HCO ₃	Na-Mg-HCO ₃ -SO ₄
14	Santa Catarina 5	130	Na-HCO ₃	Na-Mg-HCO ₃ -SO ₄
15	Santa Catarina-5	250	Na-HCO ₃	Na-Mg-HCO ₃
16	Santa Catarina 5	260	Na-HCO ₃	Na-Mg-HCO ₃ -SO ₄
17	Santa Catarina-5	270	Na-HCO ₃	Na-Mg-HCO ₃
18	Santa Catarina 5	290	Na-HCO ₃	Na-Mg-HCO ₃



19	Atoron 6	100	Mix-HCO ₃	Na-Mg-Ca-HCO ₃ -Cl
20	Atoron 6	120	Mix-HCO ₃	Na-Mg-Ca-HCO ₃ -Cl
21	Atoron 6	140	Mix-HCO ₃	Na-Mg-Ca-HCO ₃ -Cl
22	Atoron 6	160	Mix-HCO ₃	Na-Mg-Ca-HCO ₃ -Cl
23	Atoron 6	180	Mix-HCO ₃	Na-Mg-Ca-HCO ₃ -Cl
24	Atoron 6	200	Mix-HCO ₃	Na-Mg-Ca-HCO ₃ -Cl
25	Atoron 6	220	Mix-HCO ₃	Na-Mg-Ca-HCO ₃ -Cl
26	Atoron 6	240	Mix-HCO ₃	Na-Mg-Ca-HCO ₃ -Cl
27	Atoron 6	260	Mix-HCO ₃	Na-Mg-Ca-HCO ₃ -Cl
28	Atoron 6	280	Mix-HCO ₃	Na-Mg-Ca-HCO ₃ -Cl
29	Atoron 6	Descarga	Mix-HCO ₃	Na-Mg-Ca-HCO ₃ -Cl
30	Tulyehualco 6	90	Na-Mix	Na-HCO ₃ -Cl
31	Tulyehualco 6	100	Na-Mix	Na-HCO ₃ -Cl
32	Tulyehualco 6	110	Na-Mix	Na-HCO ₃ -Cl
33	Tulyehualco 6	140	Na-Mix	Na-HCO ₃ -Cl
34	Tulyehualco 6	150	Na-Mix	Na-HCO ₃ -Cl
35	Tulyehualco 6	160	Na-Mix	Na-HCO ₃ -Cl
36	Tulyehualco 6	170	Na-Mix	Na-HCO ₃ -Cl
37	Tulyehualco 6	190	Na-Mix	Na-HCO ₃ -Cl
38	Popotla	Descarga	Na-Mix	Na-Cl-HCO ₃
39	Azcapotzalco	Descarga	Mix-Mix	Na-Mg-Cl-HCO ₃



40	Xochinahuac	Descarga	Mix-HCO₃	Mg-Na-Ca-HCO₃
41	Deportivo Reynosa	Descarga	Mix-HCO₃	Mg-Na-Ca-HCO₃-Cl-SO₄
42	Deportivo Oceania	Descarga	Mix-HCO₃	Mg-Na-Ca-HCO₃-Cl
43	Napoles	Descarga	Mix-HCO₃	Na-Mg-Ca-HCO₃-Cl

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cardona Antonio, Hernandez Noel, 1995. *Modelo químico conceptual de la evolución del agua subterránea en el Valle de México*. Ingeniería Hidráulica en México. Vol. X, Núm. 3, págs. 71-90, septiembre-diciembre.

Campos-Enríquez J.O., O. Delgado-Rodríguez, R. Chávez-Segura, P. Gómez-Contreras, E. L. Flores-Márquez and F. S. Birch, 1997. The subsurface structure of the Chalco sub-basin inferred from geophysical data. *Geophysics*, Vol. 62, No. 1 (January-February), p. 23-35.

Cortes A. and Farvolden R. N, 1989. Isotope studies of precipitation and groundwater in the sierra de las Cruces, México. *Journal of hydrology*, 107, 147-153.

Davis S.N. y De Wiest R., 1971. *Hidrogeología*, Editorial Ariel.

De Cserna, L., M. de la Fuente-Duch, M. Palacios-Nieto, L. Triay, L. M. Mitre-Salazar y R. Mota-Palomino, 1988. Estructura Geológica, Gravimetría, Sismicidad y Relaciones Neotectónicas Regionales de la Cuenca de México. *Bol. i04. Inst. Geol., UNAM*, México, D. F.

Edmunds, W. M., Carrillo-Rivera, J.J., & Cardona, A., 2002. *Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico City*. *Journal of Hydrology*. 258, 1-24.

Fries, C., Jr., 1960. Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México, UNAM. *Inst. Geol., Bol.* 60, 236.

Herrera-Zamarrón, G.; González H., L.; Gutiérrez O., C.; Hernández C., R.; Hernández G., G.; Hernández L., N.; López H., R.I.; Martínez M., M. Pita de la P., C.; Sánchez D., L.F.; Báez D., J.A. 2006. Modelo hidrodinámico del acuífero de la Zona Metropolitana de la ciudad de México. Informe Final. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Volumen I, contrato núm. 06-CD-03-1º-0272-1-06., 285 p.

Huizar-Álvarez, R., Carrillo-Rivera, J.J., Ángeles-Serrano, G., Hergt, T., y Cardona, A., 2003. *Chemical response to groundwater extraction southeast of Mexico City*. *Hydrogeology Journal* 12: 436-450.

Huizar-Alvarez R., 1993. Simulación matemática del sistema acuífero de Chalco-Amecameca, México. *Geofísica Internacional*, Vol. 32, Num. 1, pp. 57-79.

IAEA, (2005). Isotopes in the water cycle, past, present and future of a developing science.

Lesser y asociados, 1993. Aplicación del Modelo Matemático de Flujo "MODFLOW" al Acuífero de la Ciudad de México; elaborado para el Departamento del Distrito Federal.

Lesser y Asociados, 2000. Piezometría y balance de agua subterránea en la zona metropolitana de la Ciudad de México. Informe Técnico al GDF-DGCOH, México, D.F.

Mooser, F., Molina, C., 1993, Nuevo modelo hidrogeológico para la cuenca de México: Boletín del Centro de Investigación Sísmica Fundación Javier Barros Sierra, 3(1), 1-26.



Mooser Federico y Montiel Arturo y Zúñiga Ángel, 1996. *Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla, Estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos*, Comisión Federal de Electricidad 1937–1996, Grafica, Creatividad y Diseño S.A: de C.V. México, D.F.

Michel Chouteau, Stefka Krivochieta, Ramiro Rodriguez Castillo, Tomas Gonzalez Moran and Virginie Jouanne, 1994. Study of the Santa Catarina Aquifer System (México Basin) using magnetotellurics soundings, *Journal of Applied Geophysics*, 31, 85–106.

NOM-127-SSA1-1994, modificada en 2000. SALUD AMBIENTAL. AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO. LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION.

Ortega, G. A., Cherry, A. J. y Aravena R. 1997. *Origin of pore water and salinity in the lacustrine aquitard overlying the regional aquifer of Mexico City*, *Journal of Hydrology*, no.197, pp. 47–69.

Ortiz-Zamora D. y Ortega-Guerrero A. 2007. Origen y evolución de un nuevo lago en la planicie de Chalco: implicaciones de peligro por subsidencia e inundación de áreas urbanas en Valle de Chalco (Estado de México) y Tláhuac (Distrito Federal). *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* ISSN 0188-4611, Núm. 64, pp. 26–42.

Peñafiel, A., 1884. *Memorias Sobre las Aguas de la Capital de México*. Secr. Fome. Mex., D.F., 209 pp.

Rudolph, D.L., Cherry, J. A. y Farvolden R. N. 1991. *Groundwater flow and solute transport in fractured lacustrine clay near Mexico City*, *Water Resources Research*, vol. 27, no. 9, pp. 2187–2201.

Schlaepfer, J. C., 1968. Resumen de la Geología de la Hoja México, Distrito Federal y Estados de México y Morelos, Hoja México 14 Q-h (5), Ese, 1: 100 000. Inst. Geol., UNAM, México, D. F.

SEDUE (1989). Norma CE-CCA-001/89. Acuerdo en por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Diario Oficial de la Federación. México, 13 de diciembre de 1989.

Socorro lozano-garcía, Erik t. brown, Beatriz ortega, Margarita caballero, Josef werne, Peter j. fawcett, Antje schwalb, Blas l. valero-garcés, Douglas schnurrenberger, Ryan o'grady, Mona stockhecke, Byron steinman, Enrique cabral-cano, Cecilia caballero, Susana sosa-nájera, Ana maría soler, Liseth pérez, Anders noren, Smy myrbo, Matthias bücken, Nigel wattus, Alejandra arciniega, Thomas wonik, Sebastian watt, Dervla kumar, Carmen acosta, Ivan martínez, Rafael cossio, Troy ferland, Filiberto vergara-huerta. Perforación profunda en el lago de Chalco: reporte técnico. boletín de la sociedad geológica mexicana, junio, 2017.

Vázquez-Sánchez E., Jaimes-Palomera R. 1989. *Geología de la cuenca de México*. Geofísica Internacional. Vol. 28, No. 2, pp. 133–190.

Vuataz, F.D., Goff, F., 1986. Isotope geochemistry of thermal and non-thermal waters in the Valles Caldera, Jemez Mountains, Northern New Mexico. *J. Geophys. Res.* 91, 1835–1853.

Weinthal E., Parag Y., Vengosh A., Muti A., Kloppmann W., 2005. The EU Drinking Water Directive: The boron standard and scientific uncertainty. *European Environment*. Vol. 15(1); 1 – 12; 12 p.



World Health Organization (2009). Boron in drinking-water: background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality. World Health Organization.



8 ANEXOS



ANEXO A

MODIFICACION a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

TABLA 3

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Aluminio	0,20
Arsénico (Nota 2)	0,05
Bario	0,70
Cadmio	0,005
Cianuros (como CN-)	0,07
Cloro residual libre	0,2-1,50
Cloruros (como Cl-)	250,00
Cobre	2,00
Cromo total	0,05
Dureza total (como CaCO ₃)	500,00
Fenoles o compuestos fenólicos	0,3
Fierro	0,30
Fluoruros (como F-)	1,50
Hidrocarburos aromáticos en microgramos/l:	
Benceno	10,00
Etilbenceno	300,00
Tolueno	700,00
Xileno (tres isómeros)	500,00



Manganeso	0,15
Mercurio	0,001
Nitratos (como N)	10,00
Nitritos (como N)	1,00
Nitrógeno amoniacal (como N)	0,50
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6,5-8,5
Plaguicidas en microgramos/l:	
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0,03
Clordano (total de isómeros)	0,20
DDT (total de isómeros)	1,00
Gamma-HCH (lindano)	2,00
Hexaclorobenceno	1,00
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0,03
Metoxicloro	20,00
2,4 – D	30,00
Plomo	0,01
Sodio	200,00
Sólidos disueltos totales	1000,00
Sulfatos (como SO4=)	400,00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0,50
Trihalometanos totales	0,20
Yodo residual libre	0,2-0,5
Zinc	5,00

Nota 1. Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos.

Nota 2. El límite permisible para arsénico se ajustará anualmente, de conformidad con la siguiente tabla de cumplimiento gradual:

TABLA DE CUMPLIMIENTO GRADUAL

Límite permisible mg/l	Año
0,045	2001
0,040	2002
0,035	2003

0,030	2004
0,025	2005



ANEXO B

MEMORÍA FOTOGRÁFICA DE LA GEOFÍSICA

