



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA



---

---

DIVISION DE INGENIERIAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

INSTITUTO DE GEOFISICA



“LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA SUBCUENCA  
DEL RÍO GUANAJUATO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A

DAVID CABALLERO ALVARADO

DIRECTORA DE TESIS:  
M. EN C. ALEJENDRA CORTÉS SILVA



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## DEDICATORIAS

*A mi Dios y Señor, por darme la fuerza necesaria para la terminación de este trabajo; porque su misericordia nunca se apartó de mí, y su luz nunca dejó de brillar en mi camino.*

*A mi madre Ma. De los Ángeles, por su apoyo incondicional constante; por sus sabios consejos y sus continuas oraciones. Por acercarme al camino de Dios, y por amarme desde que fui formado en su vientre.*

*A mi padre Gilberto, que siempre creyó en mí, dándome su apoyo y ejemplo de fortaleza y lucha constante en la vida. Por apoyarme desde que era un niño y por ser una motivación en mi vida para superarme cada día más.*

*A mis hermanos Hazael, Alfonso y Gersaín, por su invaluable apoyo y cariño que me mostraron al crecer y convivir juntos.*

*A mis sobrinos, Andrés, Abraham y Alejandro, por ser una alegría maravillosa en mi vida.*

*A mi novia Itzel, por darme su cariño, su amor y su apoyo en todo momento desde que la conocí. Por comprenderme en todo momento, motivándome siempre a ser mejor.*

## AGRADECIMIENTOS

*A la Facultad de Ingeniería de la UNAM, por formarme en sus aulas, y brindarme una educación profesional de excelencia.*

*A mi directora de Tesis, Alejandra Cortés, por la paciencia y dedicación que siempre me mostró desde que inicié este trabajo hasta su culminación*

*Al grupo de Hidrología Isotópica del Instituto de Geofísica de la UNAM, por brindarme todas las facilidades para la terminación de esta tesis.*

*A los proyectos del COREMI y Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León, SAPAL, a través de los cuales obtuve apoyo económico.*

*Al Consejo de Recursos Minerales, COREMI y a la Comisión Estatal de Aguas de Guanajuato, CEAG por permitirme usar para mi tesis los resultados del proyecto "Potencial geohidrológico del GRAVEN de León".*

*A mis profesores, por compartir sus conocimientos y experiencias profesionales, y hacer de mi educación una experiencia inolvidable.*

*A mis amigos Juan Carlos, Alberto, Miguel, Araceli, Paty, Fernando y Hugo por brindarme su amistad a lo largo de la vida.*

*Al Ing. Javier Gutiérrez e Ing. Javier Cadaval, por su amistad y por abrirme las puertas de las empresas donde comencé a adquirir experiencia profesional.*

*A mis amigos y compañeros de trabajo, Ing. Julián Gallegos, Arq. Salvador García, Ing. Pablo Miranda, Top. Agustín Cervantes, Ing. Pablo García, Ing. Héctor Badillo, TL Agustín Coronel, Ing. Jesús Domínguez, Ing. José Pérez Domínguez, por su amistad y por su invaluable ayuda en mi formación profesional como Ingeniero Civil.*

## INDICE GENERAL

<b>INTRODUCCION</b>		
<b>1 GENERALIDADES</b>		<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS		3
1.1.1 <i>Objetivo general</i>		3
1.1.2 <i>Objetivos particulares</i>		3
1.2 GENERALIDADES		3
1.3 ANTECEDENTES		5
1.3.1 <i>Estudios previos</i>		7
1.4 FISIOGRAFIA Y GEOMORFOLOGIA		9
1.4.1 <i>Fisiografía</i>		9
1.4.2 <i>Geomorfología</i>		12
1.5 GEOLOGÍA		15
1.5.1 <i>Estratigrafía</i>		15
1.5.2 <i>Geología estructural</i>		18
<b>2 LEGISLACION</b>		<b>22</b>
2.1 GENERALIDADES		22
2.2 LEY DE AGUAS NACIONALES		23
2.3 REGLAMENTO DE LA LEY DE AGUAS NACIONALES		30
2.4 NORMAS OFICIALES MEXICANAS		32
2.4.1 <i>Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994</i>		32
<b>3 CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA</b>		<b>37</b>
3.1 GENERALIDADES		37
3.2 CONTAMINACION EN FUENTES DE EXPLOTACION.		39
3.2.1 <i>Manantiales</i>		39
3.2.2 <i>Pozos</i>		39
3.2.3 <i>Galerías filtrantes</i>		39
3.3 CONCEPTO DE POTABILIDAD		39
3.4 CLASIFICACION Y DESCRIPCION DE LOS CONTAMINANTES		39
3.4.1 <i>Clasificación de las fuentes de contaminación del agua</i>		40
3.5 INDICE DE CALIDAD DEL AGUA		43
3.6 PARAMETROS DE CALIDAD DEL AGUA		46
3.6.1 <i>Parámetros físicos</i>		46
3.6.2 <i>Parámetros químicos</i>		50
3.6.2.1 <i>Características de los iones y sustancias disueltas más importantes.</i>		50
3.6.2.1.1 <i>Aniones y sustancias aniónicas</i>		50
3.6.2.1.2 <i>Cationes y sustancias catiónicas</i>		54
3.7 EVALUACION DE LA CONTAMINACION		59
<b>4 HIDROGEOQUÍMICA</b>		<b>60</b>
4.1 EL AGUA COMO SUSTANCIA QUIMICA PURA		60
4.1.1 <i>Ionización del Agua</i>		61

4.1.2	<i>El Sistema carbónico</i>	62
4.1.3	<i>Capacidad amortiguadora de las aguas naturales (soluciones buffer)</i>	63
4.2	<b>EL AGUA EN LA NATURALEZA COMO AGENTE FISICO-QUIMICO</b>	64
4.2.1	<i>El agua como disolvente</i>	64
4.2.2	<i>Forma en que se encuentran las sustancias disueltas</i>	65
4.2.3	<i>Expresión de concentraciones</i>	65
4.2.4	<i>Fuerza iónica</i>	66
4.2.5	<i>Actividad</i>	67
4.2.6	<i>Concentración de iones de Hidrógeno.</i>	68
4.2.7	<i>Reacciones de oxidación-reducción. Potencial Redox.</i>	68
4.2.8	<i>Intercambio iónico</i>	70
4.3	<b>COMPOSICION DEL AGUA SUBTERRÁNEA</b>	71
4.3.1	<i>Sustancias que se encuentran disueltas en agua natural subterránea. Iones fundamentales y menores</i>	71
4.4	<b>ORIGEN Y PROPIEDADES GEOQUÍMICAS DE LAS SUSTANCIAS DISUELTAS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS</b>	72
4.4.1	<i>Aniones</i>	73
4.4.2	<i>Cationes</i>	74
4.4.3	<i>Electroneutralidad</i>	76
4.4.4	<i>Los fenómenos modificadores</i>	76
	4.4.4.1 <i>Reducción de sulfato y hierro</i>	76
	4.4.4.2 <i>Intercambio iónico</i>	77
	4.4.4.3 <i>Fenómenos de oxidación-reducción.</i>	78
4.5	<b>MÉTODOS GRÁFICOS DE ESTUDIO</b>	79
4.5.1	<i>Representación gráfica de las características químicas y su utilidad</i>	79
4.5.2	<i>Diagramas hidroquímicos</i>	80
	4.5.2.1 <i>Diagramas triangulares. Diagramas de Piper</i>	80
	4.5.2.2 <i>Diagramas poligonales o radiantes. Diagramas de Stiff</i>	85
	4.5.2.3 <i>Diagramas de columnas verticales logarítmicas de Schoeller-Berkaloff</i>	86
4.6	<b>EMPLEO DE DIAGRAMAS Y GRÁFICOS</b>	87
4.7	<b>CLASIFICACION DE LAS AGUAS</b>	88
4.7.1	<i>Objeto</i>	88
4.7.2	<i>Clasificación geoquímica por iones dominantes.</i>	88
4.7.3	<i>Clasificación mediante diagramas y planos</i>	90
<b>5</b>	<b>MUESTREO Y ANALISIS</b>	91
5.1	<b>COMPORTAMIENTO HIDROGEOQUÍMICO DEL AGUA SUBTERRÁNEA</b>	91
5.1.1	<i>Base de datos</i>	91
5.1.2	<i>Composición de iones mayores</i>	97
	5.1.2.1 <i>Subfacie 1</i>	97
	5.1.2.2 <i>Subfacie 2</i>	103
5.2	<b>IMPACTO DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA.</b>	107
5.2.1	<i>Limitaciones por los datos de los metales</i>	110
5.2.2	<i>Nitratos y Cloruros como indicadores del impacto antropogénico</i>	113
5.2.3	<i>Altos valores de sodio y su implicación en el uso de riego</i>	117

5.2.4	<i>Calidad de agua para riego</i>	119
5.3	DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA (Cd)	121
5.3.1	<i>Interpretación del Índice de Contaminación del agua (Cd)</i>	123
5.4	DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (ICA)	124
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	129
6.1	Conclusiones	129
6.2	Recomendaciones	131
	<b>ANEXO 1 GLOSARIO DE TÉRMINOS</b>	132
	<b>ANEXO 2 MUESTREO Y ANALISIS EN CAMPO DE AGUAS</b>	141
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	168

## INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

### FIGURAS

1.1	Localización del Área de Estudio	4
1.2	Mapa fisiográfico de la Subcuenca del Río Guanajuato	14
1.3	Plano geológico. Tomado de COREMI (2004), con modificaciones	16
1.4	Columna estratigráfica del Graben de León	17
1.5	Plano estructural de la Subcuenca del Río Guanajuato	20
1.6	Imagen de satélite de la Subcuenca del Río Guanajuato	21
2.1	Sinopsis de la Legislación en Materia de Calidad del Agua	23
2.2	Ley de Aguas Nacionales	24
2.3	Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales	30
3.1	Campos de estabilidad de las soluciones acuosas de los sistemas férricos-ferrosos	58
3.2	Porción del campo de estabilidad del sistema férrico-ferroso	58
4.1	Curvas de titulación para ácido carbónico y ácido sulfúrico	63
4.2	Curvas acumulativas	73
4.3	Diagrama triangular para mezclas ternarias	80
4.4	Diferentes tipos de diagramas triangulares	81
4.5	Dos formas de tener en cuenta la salinidad total del agua	82
4.6	Representación de los efectos simples de fenómenos modificadores sobre un agua	84
4.7	Dos tipos de diagramas uno radiante y uno poligonal.	85
4.8	Diagramas de Stiff modificados	86
4.9	Tipos de aguas deducidas de un diagrama triangular de Piper	89
5.1	Composición de iones mayores en los 206 muestras	92
5.2	Diagrama de Piper para muestras con error de electroneutralidad < 5% meq/L.	93
5.3	Diagrama de Piper. Comportamiento de la facie Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> y de la subfacie 1.	98
5.4	Ubicación de las muestras bicarbonatadas	99
5.5	Comportamiento de la subfacie 1, 5.5b y 5.5c	102
5.6	Distribución del ión magnesio en el área de estudio en mg/L	104
5.7	Subfacie 2	105
5.8	Distribución de los tipos de agua bicarbonatada-sulfatada	107
5.9	Distribución de las concentraciones de Nitratos	115
5.10	Distribución de las concentraciones de Cl	117
5.11a	Relación entre Na y B	118
5.11b	Relación entre Na y temperatura	118
5.12	Rangos de Salinidad y relación de la adsorción de sodio	120
5.13	Distribución de las diferentes clases	121
5.14	Distribución del Índice de Contaminación del Agua	123
5.15	Índice de calidad del agua	126



**TABLAS**

2.1 Límites permisibles de características microbiológicas	32
2.2 Límites permisibles de características físicas y organolépticas	33
2.3 Límites permisibles de características químicas	33
2.4 Tabla de cumplimiento gradual	35
2.5 Límites permisibles de características radiactivas	36
3.1 Importancia relativa de los parámetros para definir el índice de calidad	44
3.2 Ecuaciones para índice de calidad individual	44
3.3 Escala de Clasificación de la Calidad del Agua (ICA)	45
4.1 Constante de producto iónico del agua	62
4.2 Valores de Eo para diferentes reacciones	69
4.3 Capacidad de intercambio para diferentes minerales	70
5.1 Número de muestras y duplicados colectado	91
5.2 Resultados de análisis de iones mayores	94
5.3 Características Físico-químicas y tipos de agua bicarbonatada	100
5.4 Características físico-químicas y tipos de agua sulfatada-bicarbonatada	106
5.5 Este límite es valido desde 2005, el límite actual es 0.05 mg/L	111
5.6 Correlaciones con el arsénico en los diferentes tipos de agua	112
5.7 Correlaciones estadísticas de nitratos con parámetros físico-químicos y iones mayores para la facie bicarbonatada-sulfatada.	114
5.8 Índices de contaminación y de calidad para los 80 pozos	127

## INTRODUCCIÓN.

El agua subterránea es la fuente de abastecimiento de agua potable más importante para diversos sectores de una población, como lo son: urbano, rural, industrial y comercial. Por ello es de gran importancia dotar a estos sectores de este importante recurso en cantidad y calidad adecuadas.

La problemática que presenta en particular el Estado de Guanajuato, requiere necesariamente de una participación multidisciplinaria. La aportación de la Ingeniería Civil es fundamental: su participación va desde la planeación hasta la construcción de infraestructura ya sea desde la extracción y/o captación de una fuente de abastecimiento, pasando por la conducción, almacenamiento y distribución del vital líquido; pasando por las etapas de proyección, diseño, construcción y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua residuales, que mediante procesos físico-químicos devuelve parte de la calidad del agua usada para ser nuevamente aprovechable, cumpliendo con la normatividad vigente, según su uso.

El objetivo de la presente Tesis es mostrar las condiciones de calidad del agua subterránea en la Subcuenca del Río Guanajuato. Para ello se trabajará con los diversos parámetros físico-químicos medidos en campo y laboratorio, y esto a su vez se compararan con los límites establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas.

Además de ello se clasificarán los diferentes tipos de agua subterránea a fin de establecer el posible origen de los contaminantes, de acuerdo a las características de los iones fundamentales que se analizaron en la zona de estudio.

Para ello se utilizaran diversos modelos químicos y gráficos para apreciar las condiciones de la subcuenca. Posteriormente, se propondrán recomendaciones para un mejor manejo integral a fin de aportar lineamientos para un sistema sustentable, para que a corto, mediano y largo plazo, las próximas generaciones cuenten con aceptables condiciones de calidad de agua, tanto para su consumo como para su uso en diferentes sectores.

En el primer capítulo se exponen los objetivos generales y particulares, así como el marco físico y los proyectos antecedentes de los cuales se derivó la presente tesis.

En el segundo capítulo se abordan los aspectos más importantes en cuanto a legislación y aspectos legales sobre uso y consumo del agua en México. Se pondrá

especial énfasis a las Normas Oficiales Mexicanas, que son las que establecen cuáles son los límites permisibles de diversos parámetros contaminantes.

En el tercero se definen los principales parámetros de calidad del agua, para que con esta base, se presenten las condiciones actuales de la Subcuenca del Río Guanajuato y sus límites permisibles establecidos las Normas Oficiales Mexicanas.

El en cuarto capítulo se tratan aspectos básicos de la Geohidrología, que nos ayudaran a comprender y entender la naturaleza del agua subterránea originada por sus características hidrogeoquímicas que están en función del medio por el que circula.

En el quinto capítulo se exponen los resultados de los análisis de los muestreos efectuados en la zona de estudio: la Subcuenca del Río Guanajuato. Es decir, se les aplicarán a estos resultados los conceptos teóricos expuestos en los capítulos anteriores.

Finalmente en el sexto capítulo se plantean las conclusiones y recomendaciones basadas en los resultados obtenidos del muestreo, análisis y discusión con base en lo establecido en las Normas Oficiales Mexicanas.

Finalmente se presentan dos anexos con la finalidad de que este material sirva como una guía rápida para introducir a los lectores (principalmente estudiantes) al área de estudio del agua, así como para comprender conceptualmente algunos aspectos tratados en la presente tesis. En el primero se estructuró un glosario de términos relacionados con la Hidrogeoquímica y la Geohidrología. En el segundo se explican los principales métodos de muestreo para agua, recolectada en las diferentes captaciones, la cual es una de las áreas fundamentales en estudios que conllevan trabajo de campo ya que de su buen desempeño dependerá un buen análisis, y por lo tanto una buena interpretación.

## **CAPITULO 1 GENERALIDADES**

### **1.1.- OBJETIVOS**

#### **1.1.1.- Objetivo General**

El objetivo general del presente trabajo es mostrar las condiciones de la calidad del agua subterránea en la Subcuenca del Río Guanajuato y su impacto en la zona de estudio, tanto en el aspecto de consumo humano como en el uso de tipo agrícola. Así mismo se identificarán las fuentes potenciales de contaminación en base a un estudio hidrogeoquímico. De esta manera se contará con resultados que puedan aportar en un futuro argumentos que influyan en la toma de decisiones importantes por parte de los organismos operadores con respecto al uso y manejo integral del agua, a fin de lograr un sistema sustentable.

#### **1.1.2.-Objetivos Particulares:**

- Identificar de Familias de Agua por Métodos hidrogeoquímicos.
- Determinar los principales parámetros de calidad del agua considerados en las Normas nacionales.
- Elaborar un diagnóstico de las condiciones de calidad del agua subterránea de la Subcuenca del Río Guanajuato.
- Establecer recomendaciones con base a las Normas Oficiales Mexicanas de Calidad de Agua.

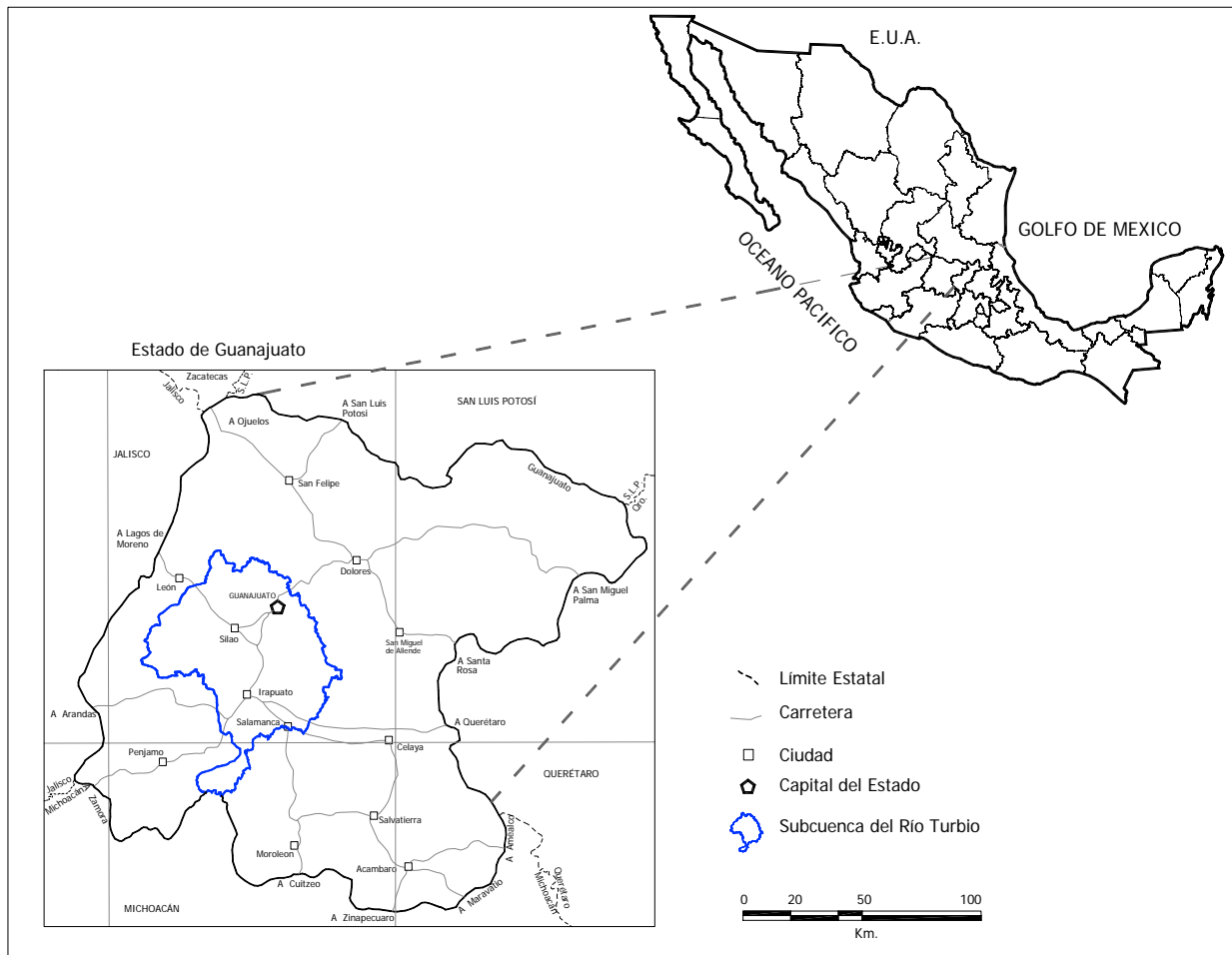
### **1.2.- GENERALIDADES**

La Subcuenca del Río Guanajuato se encuentra ubicada en la porción centro occidental del Estado de Guanajuato (Figura 1.1), entre los paralelos 20°20' y 21°15' de latitud Norte y los meridianos 101°00' y 101°45' de longitud Oeste, dentro de los municipios de León, Silao, Romita, Irapuato, Guanajuato y Salamanca, cubriendo una extensión aproximada de 4,061 km<sup>2</sup>. Los límites de la subcuenca son, al Norte y Noreste, la Sierra de Guanajuato, al Noroeste el Valle de León, al poniente con una serie de lomeríos de origen volcánico, al Sur y Sureste, el Río Lerma, y al Sureste el Valle de Salamanca.

Por superficie, la principal vía de comunicación de la zona es la Carretera Federal No. 45 que comunica a las ciudades de Salamanca y León, otra carretera de gran

importancia es la No. 110, la cual comunica a las ciudades de Abasolo con Irapuato, de la misma manera, Silao se une con la capital del estado por medio de una autopista estatal y una carretera federal.

Existen innumerables caminos secundarios en la zona que permiten la comunicación a lo largo y ancho de la zona de estudio, la mayoría de ellos en condiciones de uso a lo largo de todo el año, y sólo poco transitables en la época de lluvias tras de grandes precipitaciones.



**Figura 1.1.-** Localización del área de estudio (COREMI, 2004).

El escurrimiento más importante para el área de estudio es el Río Guanajuato, seguido del Río Silao. El primero nace aproximadamente a 10 Km de la ciudad de Guanajuato, desembocando en el Río Lerma, sus aguas son retenidas y reguladas por la Presa La Purísima. El Río Silao nace en la parte norte de la subcuenca, pasa por las inmediaciones de la ciudad que lleva el mismo nombre y antes de interceptarse con el

Río Guanajuato, al noroeste de Irapuato, sus aguas son reguladas por la Presa El Conejo.

El clima predominante de la región, según la clasificación de Köppen, modificada por García (1981), es de tipo Templado - Sub-húmedo "C (wO) (w)". La temperatura media anual es de 18 °C (Figura 1.2), con mínimas de 11 °C y máximas de 22 °C. A partir del balance de aguas superficiales elaborado para este estudio, se calculó una precipitación media anual es de 622 mm, a la vez que se determinó la evapotranspiración media anual, resultando del orden de 516 mm y un escurrimiento medio anual de unos 63 Hm<sup>3</sup>.

En el Estado de Guanajuato el 60% de la superficie del estado (30, 847 km<sup>2</sup>) corresponden a zonas montañosas que son portadoras de importantes volúmenes potenciales de recarga a los acuíferos. La superficie restante (11, 000 km<sup>2</sup>) es topográficamente plana, en donde se da la explotación de este recurso, y asociado a ello un gran desarrollo económico.

La explotación del agua subterránea comenzó a ser de gran importancia en la década de los 50's para sustentar el desarrollo agrícola del Estado. Hoy en día el sector industrial y urbano requiere de importantes volúmenes de agua, para lo cual ha sido necesario buscar nuevas fuentes de abastecimiento.

La Comisión Estatal de Agua de Guanajuato (CEAG) y el Sistema de Agua potable y Alcantarillado de León (SAPAL) se ha dado a la tarea de buscar y suministrar este recurso en cantidad y calidad, invirtiendo en estudios de investigación para conocer la situación actual del agua subterránea y entender su funcionamiento. Estas investigaciones tienen, entre otros objetivos, la búsqueda de áreas con potenciales para la explotación del vital líquido, debido a que las reservas subterráneas representan la principal fuente de abastecimiento en la región.

### 1.3.- ANTECEDENTES

El estudio *Potencial Geohidrológico del Graben de León* del cual se derivó esta tesis fue inicialmente una propuesta de investigación de la Gerencia de Geofísica de COREMI, por el interés de investigar detalladamente el denominado Graben de León, que es una estructura definida a partir de un lineamiento magnético mínimo, ubicada al pie de la Sierra de Guanajuato, inmediatamente al sur de la Falla del Bajío. Esta área de exploración propuso el levantamiento gravimétrico con líneas paralelas y transversales al Graben de León y, a partir de sus resultados, la interpretación de la geología del subsuelo. Para hacer más atractivo el estudio y darle el carácter de investigación aplicada, se propuso darle enfoque hidrogeológico y ampliar sus metas y objetivos. De esta manera se gesta el estudio Potencial Geohidrológico del Graben de León, con la participación interdisciplinaria de varias áreas de COREMI (Geofísica,

Centros Experimentales y, la de nueva creación, Geohidrología y Geotecnia) con la participación del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro (CONCyTEQ) y del laboratorio del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Aplicada (CENICA).

Sí bien el Graben de León ocupa la porción norte de dos subcuencas, de los ríos Guanajuato, al oriente, y Turbio, al poniente, para fines hidrogeológicos se convino que la extensión del estudio se limitara a la Subcuenca del Río Guanajuato, a la que se le incluyó la pequeña Subcuenca del Arroyo Temascatío, y se dejara para un siguiente período de exploración la continuidad de la investigación con la Subcuenca del Río Turbio.

Con el objeto de dar mayor apoyo técnico al proyecto, COREMI firmó un convenio de colaboración con la Comisión Estatal del Agua del Estado de Guanajuato (CEAG), la cual aportó información previa, guías de campo, base de datos georreferenciadas, ideas y comentarios sobre los resultados y su interpretación, etc.

En la zona de estudio los trabajos de carácter hidrológico tradicionalmente se han elaborado por acuíferos, mismos que están limitados por medio de poligonales simplificadas cuyos nombres y extensiones fueron publicados en el Diario Oficial de la Federación (DOF), de fecha 5 de diciembre del año 2001, en el denominado Catálogo Nacional de Acuíferos que comprende a todo el territorio nacional y que consta de 653 acuíferos, y ratificadas las poligonales para 188 de estos acuíferos, conforme al Acuerdo publicado el 31 de enero de 2003 en el mismo DOF.

A diferencia de lo anterior, como ya se dijo, la zona a la cual se enfoca este trabajo está enmarcada por una subcuenca completa (Río Guanajuato), la cual se delimita a partir de una división básica del país en 37 regiones hidrológicas, cuyos nombres y extensiones están estipulados en un catálogo nacional de cuencas, elaborado por Comisión Nacional del Agua -CNA- (2001).

Desde un punto de vista administrativo, en la región de estudio se encuentra el Distrito de Riego No. 011 "Alto Lerma", enmarcado en la Región Hidrológico-Administrativa VIII "Lerma-Santiago-Pacífico". Esta región ha sido motivo de veda para la explotación de aguas subterráneas en numerosas ocasiones. Para 1978, según la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), existían tres tipos de veda en el área de estudio; Veda Rígida: que comprende a los municipios de Salamanca y León, Veda Intermedia: que abarca el municipio de Irapuato, y Veda Elástica: que cubre los municipios de Silao, Romita y Salamanca. Actualmente toda la zona de estudio está sujeta a una Veda del tipo Rígida.

Dentro de la Subcuenca del Río Guanajuato se localizan tres acuíferos; Silao-Romita, Irapuato-Valle, Valle de León y Pénjamo - Abasolo.

Desde el punto de vista agrícola, la zona en estudio es de gran importancia económica, por lo que son necesarios grandes volúmenes de agua, siendo el agua subterránea la principal fuente de abastecimiento para el riego de los cultivos, lo que genera la necesidad de llevar a cabo estudios de carácter hidrogeológico para actualizar el conocimiento de las condiciones en las que se encuentra el agua en el subsuelo.

### **1.3.1.- Estudios previos**

Dada la importancia agrícola e industrial de la región, en la zona de estudio se han llevado a cabo numerosos estudios de carácter geohidrológico, la mayoría por encomienda de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y organismos que le antecedieron y de la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG). También existen compendios y cartografía de tipos regionales desarrollados y publicados por el Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI). A continuación se hace una breve reseña de algunos informes consultados.

En 1969 la empresa Ariel Construcciones, S. A., realiza uno de los primeros trabajos en la zona de estudio, particularmente en la zona del Valle de León, el propósito del mismo era dar continuidad a los trabajos piezométricos llevados a cabo en años anteriores. Fueron observados ligeros descensos en los niveles estáticos (7 metros para un periodo de 21 años, 1948-1969) mismos que son atribuidos a la incipiente sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos.

A partir de 1997, CEAG encomendó a diversas empresas el hacer estudios de carácter geohidrológico con el objeto de programar el manejo de los acuíferos. En ese mismo año la empresa Lesser y Asociados, elaboró el Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero Silao-Romita. De este estudio se destaca la presencia de 3 horizontes acuíferos denominados: somero, intermedio y profundo, asimismo, que existía un cambio de almacenamiento negativo de 33 Hm<sup>3</sup>, mismo que estaba relacionado con un abatimiento promedio anual de entre 2 y 5 m.

En el mismo año y por el mismo motivo, CEAG encomendó a la empresa GUYSA S.A. de C.V. la elaboración del "Estudio Hidrogeológico y Modelo Matemático del Acuífero del Valle de Irapuato y Valle de Santiago".

Del mismo modo, CEAG, a través de Lesser y Asociados, en el año 2000, llevó a cabo el seguimiento y actualización del estudio anterior, del cual se resalta que en la zona persistía un abatimiento promedio anual de 2 m/año, así como un cambio de almacenamiento negativo de 255 Hm<sup>3</sup>, además de la definición de cuatro familias geoquímicas de agua. El modelo conceptual fue representado por un acuífero superior con un grosor variable (entre 40 y 80 m) que funciona como tipo libre, y una capa



inferior compuesta por material aluvial y volcánico cuyo espesor asignado fue de 450 m, con un tipo de funcionamiento confinado.

Para 1998, Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. de C.V., llevó a cabo el “Estudio Hidrogeológico y Modelo Matemático del Acuífero del Valle de León, Gto.”. Del anterior se desprende que el tipo de acuífero es libre heterogéneo y anisotrópico, con un abatimiento anual de 1.6 m y con un cambio de almacenamiento negativo de 68 Hm<sup>3</sup>, también se obtuvo una nueva visión de la geometría espacial del subsuelo y se definieron 8 unidades hidroestratigráficas.

En 1999 el estudio denominado “Desarrollo de un Modelo Integral para el Análisis Coordinado de las Aguas Subterráneas y Superficiales en las Subcuencas de los Ríos Turbio y Guanajuato”, fue llevado a cabo por Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. de C.V. De entre las actividades más importantes destacan la elaboración de un balance de aguas subterráneas, dando como resultado un déficit de 207 Hm<sup>3</sup> y un balance de aguas superficiales que arrojó una infiltración de 303 Hm<sup>3</sup>. Se propuso la existencia de un acuífero de tipo libre, sin marcados contrastes de conductividad hidráulica entre unidades hidroestratigráficas. Se definieron de manera cualitativa los parámetros hidráulicos del sistema por medio de la información arrojada por 53 pruebas de bombeo.

En el año 1999 CEAG encomendó al Instituto de Geofísica de la UNAM elaborar el “Estudio para la determinación del grado de alteración de la calidad del agua subterránea por compuestos orgánicos en Salamanca, Gto.”. En este estudio se estableció que el modelo conceptual del sistema acuífero que abastece a la ciudad de Salamanca se caracteriza por un acuífero somero y uno profundo, ubicado en los 70-75 m de profundidad; no se descarta la posibilidad de que ambos estén comunicados hidráulicamente y tiendan a formar un solo acuífero del tipo libre. Se establecen las condiciones de calidad del agua y sus posibles fuentes de contaminación.

En 1999 el Instituto de Geofísica de la UNAM llevó a cabo el “Estudio isotópico para la caracterización del agua subterránea en la zona de La Muralla, Gto.”. En dicho trabajo se hace una caracterización isotópica del agua subterránea y se determina el origen de la misma. Se determinaron las conductividades hidráulicas promedio de las distintas unidades geológicas de la zona.

Para el 2001 CEAG a través del Ing. Ham Chi J., elaboró el “Estudio de planeación del aprovechamiento sustentable del Acuífero del Valle de Silao Romita, Gto.”. Su principal aportación se basa en un balance de aguas subterráneas, donde se define un déficit de 33.3 Hm<sup>3</sup> anuales. En base a una modelación del comportamiento del acuífero, se analizaron y propusieron diferentes políticas de extracción con el objeto de lograr la administración más adecuada para el mismo.

En el 2001 CEAG inicia la conformación de la red estatal para el monitoreo de la calidad del agua subterránea, la cual se realiza por etapas, incorporando pozos existentes, representativos para la calidad del agua subterránea y su evolución con el tiempo. Por tal motivo, en ese mismo año, el Instituto de Geofísica de la UNAM, elaboró el estudio “Definición de red para la caracterización e la calidad fisico-química del agua subterránea para el Acuífero de Pénjamo - Abasolo”. En este estudio, como su nombre lo indica, se propone una red de monitoreo para la calidad de agua y a la vez se sugiere el monitoreo constante de la misma.

En el 2002, el Instituto Mexicano de Tecnología de Agua, llevó a cabo el estudio denominado “Plan de Manejo para la Conservación, Rehabilitación y Manejo Sustentable de los Recursos Naturales en el Área de Atención del COTAS Silao-Romita”. En el presente se manifiesta que el abatimiento ha sido del orden de 100 metros en un lapso de 50 a 60 años, se propone un plan de manejo enfocado a combatir las problemáticas detectadas en el área de influencia del COTAS referido, dicho plan consta de dos objetivos; evitar la pérdida de suelo por efecto de la erosión hídrica y conservar el agua proporcionando mayor infiltración y recarga al acuífero.

En el año 2003, la empresa Gondwana Exploraciones S.C., llevó a cabo el estudio denominado; “Cuantificación del volumen de extracción a partir del Análisis de Imágenes de Satélite y verificación de campo en el Acuífero Silao-Romita, Gto.”. Entre sus resultados se destaca la presencia de las fallas El Bajío, El Veinte y Aldama, así como el Graben Campuzano. Refiere que el abatimiento de la zona es de dos metros por año, se describen y delimitan 6 unidades hidrogeológicas, el modelo conceptual queda establecido como un sistema acuífero del tipo libre, constituido por un medio granular y fracturado (COREMI 2004).

## **1.4.- FISIOGRAFIA Y GEOMORFOLOGIA**

### **1.4.1.- Fisiografía**

El área de estudio queda comprendida dentro de dos grandes provincias fisiográficas: la Mesa Central y el Eje Neovolcánico. Esta última provincia representa la mayor parte de la superficie (más de 80%), mientras que el dominio de la Mesa Central está restringido a la Sierra de Guanajuato.

La Figura 1.2 presenta un mapa fisiográfico de la Subcuenca del Río Guanajuato y zonas circundantes. En el mapa se señalan las divisiones correspondientes a las provincias y subprovincias fisiográficas que se encuentran en el área (según las claves y divisiones utilizadas por INEGI, 1982), así como los diferentes sistemas de topofomas que se hallan en ellas.

El área correspondiente a la Mesa del Centro incluye solamente a la subprovincia de Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato o Altos de Guanajuato, en tanto que la porciones centro, sur y poniente del área pertenecientes al Eje Neovolcánico, quedan incluidas casi enteramente en la subprovincia del Bajío Guanajuatense, con zonas menores clasificadas dentro de la subprovincia de Sierras y Bajíos Michoacanos.

También aparecen en el mapa zonas pertenecientes a la subprovincia Altos de Jalisco, que también es parte de la provincia del Eje Volcánico, aunque esta subprovincia ya no está dentro de los límites del área de estudio, sino que forma parte de la Subcuenca del Río Turbio, es decir, hacia el poniente.

El área de estudio incluye las subcuencas hidrográficas del Río Guanajuato, del Arroyo Temascatío y de las corrientes Los Razos y Miranda. Del Río Guanajuato son afluentes el Río Silao y el arroyo El Zarco. Todas estas corrientes se unen al Río Lerma hacia el sur, para fluir hacia la Laguna de Chapala y, finalmente, desembocar al Océano Pacífico por el Río Santiago.

La red hidrográfica es de densidad moderada con patrones dendríticos, subparalelos y radiales. El paisaje está dominado por sierras altas y bajas, mesas y lomeríos, así como por cerros aislados separados por valles y zonas llanas o con muy suave relieve, donde preferentemente se practican los cultivos.

La orientación de los elementos orográficos del área está estrechamente relacionada con las principales estructuras regionales. De esta manera, son de notar las orientaciones NW-SE, como la Sierra de Guanajuato, así como de una serie de aparatos volcánicos plio-cuaternarios que se extienden desde la parte NW de Valle de Santiago, hasta una zona comprendida entre las comunidades de Carmen de Sánchez, Ojos de Rana y Cruz de Aguilar, en la zona poniente del área. Otros focos de este tipo se encuentran formando lomeríos dispersos en la zona NW del Valle Silao-Romita.

Estos aparatos se aprecian formando pequeños grupos separados entre sí, distribuidos según una dirección NW-SE. A su vez cada uno de estos grupos de aparatos muestra una alineación ENE-WSW, que es la misma que siguen las sierras que enmarcan el valle donde se ubican los poblados de La Saucedá, Campuzano, El Tejabán y El Chorro, en el extremo oriente del área.

No son raros los rasgos topográficos alineados según una dirección muy próxima a NE-SW, presente tanto dentro de la Sierra de Guanajuato como en la parte media y sur del área, en grupos de aparatos volcánicos recientes. Esta orientación se puede apreciar de manera muy clara en grandes valles tectónicos, fuera del área de estudio, como ocurre al norte de la Sierra de Guanajuato, en el Valle de Villa de Reyes.

En el área, el principal rasgo orográfico está constituido por la Sierra de Guanajuato. Esta sierra tiene aproximadamente 85 Km de longitud y anchura entre 15 y poco más de 20 Km. Se alza a unos 12 Km al oriente de Lagos de Moreno y se extiende en dirección sureste por la zona norte de León, hasta unos 15 Km hacia el sureste de la Ciudad de Guanajuato.

Las mayores elevaciones de la Sierra de Guanajuato, dentro del área de trabajo, alcanzan alturas de entre 2,500 y poco más de 2,800 metros sobre el nivel del mar (msnm). Dentro de esta misma zona se incluyen partes de otras sierras secundarias, como Cuatralba y El Ocote, con elevaciones de casi 2,900 y poco más de 2,500 msnm, respectivamente. Hacia el extremo norte del área las principales elevaciones son: Cerro El Timbal (2,775 msnm), Mesa El Zacate (2,780 msnm), Mesa Cuatralba (2,840 msnm), Cerro Verde (2,730 msnm) y Mesa del Obispo (2,450 msnm). Todas estas elevaciones constituyen el parteaguas norte de la Subcuenca del Río Guanajuato.

En la vertiente sur de la Sierra de Guanajuato, entre Silao y la capital estatal, destaca el Cerro del Cubilete, de casi 2,600 msnm. Hacia el norte de la capital resaltan el Cerro El Cuervo (2,850 msnm), Cerro San Miguel (2,850 msnm), La Tapona (2,610 msnm), el Puerto de Barrientos (2,640 msnm) y la Mesa El Paseo (2,815 msnm).

El paisaje, en la zona oriente de la Subcuenca del Río Guanajuato está dominado por una serie de sierras, lomeríos y mesas con elevaciones de entre 1,900 y 2,200 msnm, aunque sobresalen el Cerro Misterio del Chorro (2,600 msnm) y cerros circundantes, con alturas cercanas a los 2,500 msnm. En esta zona se aprecia un estrecho valle de orientación general E-W, relacionado a un bloque tectónico hundido (Graben de la Saucedá). A lo largo de este valle se extiende la carretera que comunica a la Ciudad de Guanajuato con San Miguel de Allende y Celaya. El valle separa la parte sureste de la Sierra de Guanajuato y las sierras volcánicas terciarias predominantes.

El límite poniente de la subcuenca está representado por una serie de lomeríos y mesas con alturas de entre 1,800 y 2,100 msnm. En esta zona son de notar los siguientes rasgos orográficos: Cerro La Silleta (1,935 msnm), al norte de Jesús de Monte; el Cerro Peña El Gavilán (2,140 msnm); las mesas La Colmena (2,160 msnm) y Los Cevallos (2,050 msnm), así como el cerro El Picacho hacia el poniente de la localidad de La Muralla. Las estrechas zonas llanas aledañas a estas sierras bajas tienen elevaciones del orden de 1,770 msnm.

Al norte y noroeste de la Ciudad de Irapuato sobresalen los cerros Arandas (2,030 msnm) y el cerro El Veinte, volcán de 2,330 msnm de altura. Este último aparato es el rasgo topográfico más notable en la zona suroeste del área de estudio; su cima es parte de la línea de parteaguas entre las subcuencas de los ríos Turbio y Guanajuato.

En contraposición a las elevaciones serranas, las zonas llanas, que son utilizadas primordialmente para campos de cultivo, se encuentran a niveles entre 1,740 y 1,780 msnm para el Valle de Silao - Romita; entre 1,700 y 1,730 msnm para la zona de Irapuato y, aproximadamente, de 1,730 msnm para el valle que se extiende al norte y noroeste de Salamanca (COREMI 2004)

#### **1.4.2.- Geomorfología**

Las distintas formas de relieve en el área son, por supuesto, reflejo y consecuencia de la historia geológica de la región. Las unidades geológicas, al igual que las topoformas derivadas de ellas, pueden agruparse, de manera general, en dos dominios. Por una parte se tienen sierras altas y bajas, bastante disectadas, así como lomeríos de formas suaves, que acusan una larga historia de intemperismo y erosión. Por otro lado, se tienen formas juveniles, consistentes en mesas, abanicos aluviales, planicies de rellenos sedimentarios, así como algunas sierras altas, bajas y lomeríos de origen volcánico reciente, que muestran redes de drenaje poco desarrolladas.

El primer grupo de topoformas se presenta principalmente en la Sierra de Guanajuato, en la parte norte y noreste del área; éste corresponden a las unidades geológicas más antiguas, de la era Mesozoica y de la base del Terciario, que incluyen rocas metasedimentarias volcanoclásticas e intrusivas, principalmente, así como volúmenes menores de conglomerados consolidados. La sierra se extiende a lo largo de una franja de orientación general NW-SE, coincidente con trazas de fallamientos de tipo normal e inverso. Dentro de la misma sierra pueden observarse cañadas subparalelas de orientación NE-SW, perpendiculares al tren general de la sierra.

En las unidades más antiguas de la Sierra de Guanajuato el patrón de avenamiento es dendrítico y bastante denso, aunque se nota claramente la influencia de las grandes fracturas y fallas mencionadas anteriormente. La red de avenamiento es claramente más densa en las unidades geológicas mencionadas que en las rocas más recientes; sin embargo, dentro de la misma sierra se encuentran algunos cuerpos de basaltos y rocas ácidas del Terciario Superior y Cuaternario, cuya morfología contrasta con la de las unidades subyacentes.

En las rocas del Terciario Inferior es frecuente observar cañones, escarpes y grandes peñas de bordes redondeados. Estas formas son en parte reflejo de los fallamientos ocurridos a lo largo del período Terciario, así como de la erosión, enfriamiento y relajamiento de coladas lávicas en frentes volcánicos. Este tipo de relieve se puede apreciar en los alrededores de la Ciudad de Guanajuato, así como en las sierras que se extienden hacia el sureste de la misma ciudad.

En el resto del área son conspicuas las formas juveniles asociadas a materiales volcánicos del Terciario Medio al Cuaternario, así como a depósitos y rellenos aluviales. En la parte oriente del área de estudio pueden observarse formas de relieve más recientes constituidas por rocas volcánicas ácidas.

Estas sierras alcanzan alturas de casi 2,600 msnm y muestran drenaje poco desarrollado así como formas abruptas de cumbres angulosas. Los cerros llegan a tener alturas considerables, de hasta cerca de 500 m por encima del nivel base circundante; presentan a menudo formas abruptas o laderas tendidas disectadas por pequeños cañones. También se encuentran mesas de materiales piroclásticos disectadas por drenes subparalelos, controlados por grandes fracturas (NE-SW), así como por la suave pendiente de las mesas.

En la zona Norte y parte del centro del área se presenta, en general, un desarrollo geomorfológico de madurez, con zonas rejuvenecidas hacia la parte sur; éstas últimas manifiestas por la presencia de aparatos volcánicos cuaternarios, así como por el retrabajo de algunos depósitos aluviales terciarios y cuaternarios.

Dentro de las predominantes formas juveniles se presentan mesetas volcánicas, sierras y lomeríos de rocas ácidas intermedias y básicas terciarias y cuaternarias, con aparatos volcánicos que cubren a rocas sedimentarias y metamórficas. La denudación de estas formas ha originado rellenos sedimentarios, en ocasiones de tipo lacustre y fajas de abanicos aluviales.

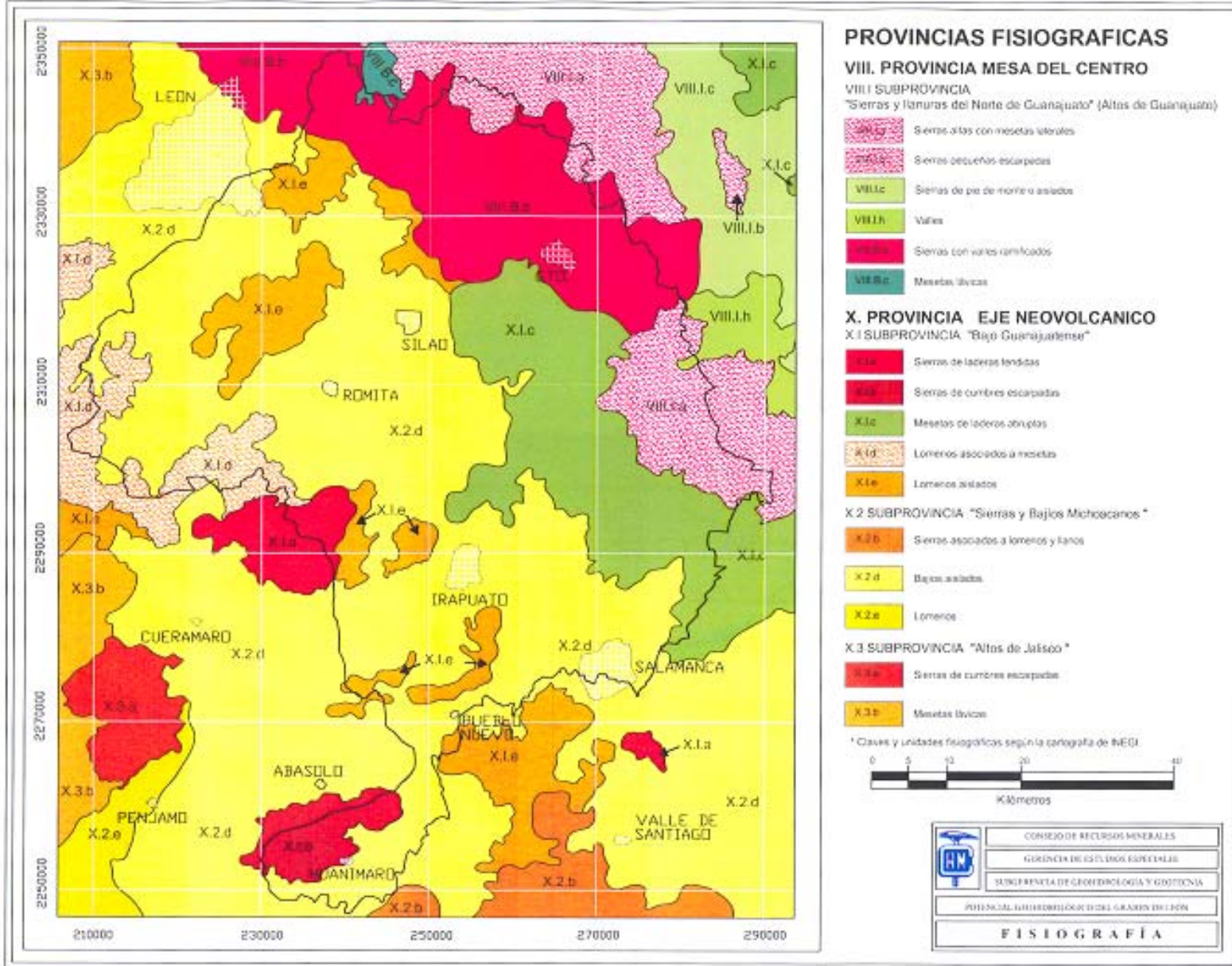


Figura 1.2.- Mapa fisiográfico de la Subcuenca del Río Guanajuato (COREMI, 2004).

## 1.5 GEOLOGÍA.

Las rocas y materiales geológicos que se encuentran en el área de la Subcuenca del Río Guanajuato pueden agruparse de forma general en dos grandes conjuntos litológicos principales y contrastantes. El primero y más antiguo de ellos conforma en su mayor parte la Sierra de Guanajuato. Está constituido por un complejo plutónico y volcanosedimentario de edad mesozoica, afectado por metamorfismo de bajo grado e intrusionado, a su vez, por plutones terciarios.

El segundo conjunto litológico se extiende a la mayor parte del área. Lo constituyen rocas volcánicas y sedimentarias continentales, así como cenizas y depósitos granulares aluviales y lacustres de edad terciaria y cuaternaria, corresponde con eventos que se asocian a la formación de la Sierra Madre Occidental y a la Faja Volcánica Transmexicana (o Eje Neovolcánico, según el autor). En toda la Subcuenca del Río Guanajuato predominan afloramientos de rocas volcánicas riolíticas, con algunos basaltos y andesitas, en su mayoría pertenecientes al Terciario Medio y Superior. Del Cuaternario predominan sedimentos aluviales y lacustres, con algunas emisiones de lavas y cenizas basálticas.

La Sierra de Guanajuato, constituye un alto topográfico y estructural (Horst de León) relacionado con grandes fallas de tipo normal que siguen una orientación NW- SE. Paralelamente, hacia el sur de la sierra se extienden zonas llanas y de suaves lomeríos formados por rocas volcánicas, cenizas volcánicas y sedimentos aluviales que rellenan las zonas bajas de la paleotopografía y depresiones estructurales.

### 1.5.1.- Estratigrafía

En el Plano Geológico de la Figura 3.1 se muestra la distribución en planta de las diferentes unidades que se exponen en la zona. La Figura 3.2 ilustra la columna estratigráfica del área de estudio y en el anexo se presentan fotografías ilustrativas. Las figuras 3.6 a 3.16 son secciones del apartado Geología Estructural, muestran la disposición de materiales geológicos en el subsuelo hasta una profundidad somera, según la información proporcionada por cortes de pozos. En estos casos los perfiles esquematizan el tipo y disposición de materiales, sin señalar nombres de unidades. La geología plasmada en la planta se obtuvo de la cartografía de escala 1:250,000 de COREMI, respetando su nomenclatura, geología parcialmente modificada durante la verificación de campo.



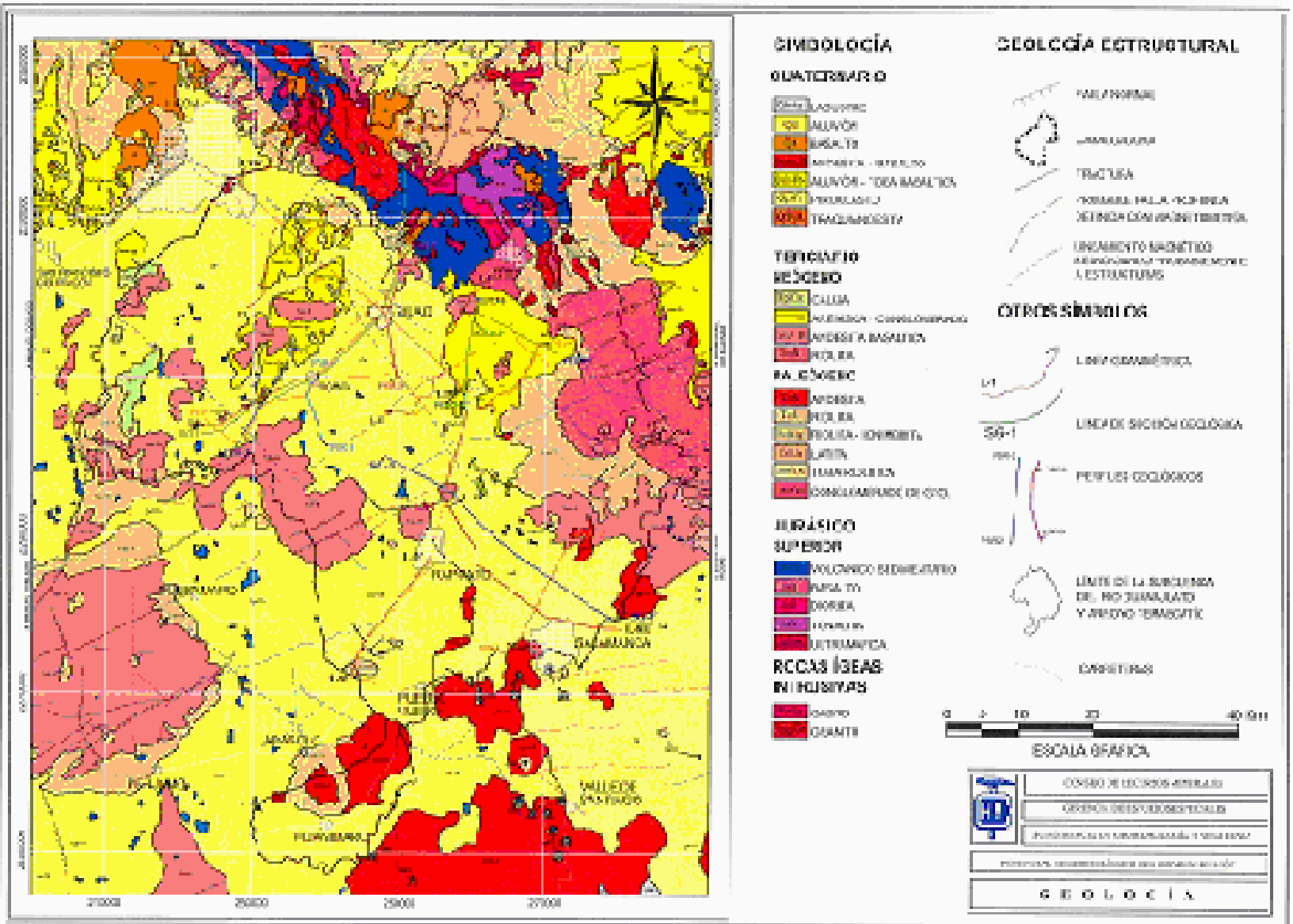


Figura 1.3.- Plano geológico. Tomado de COREMII (2004), con modificaciones.

## COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

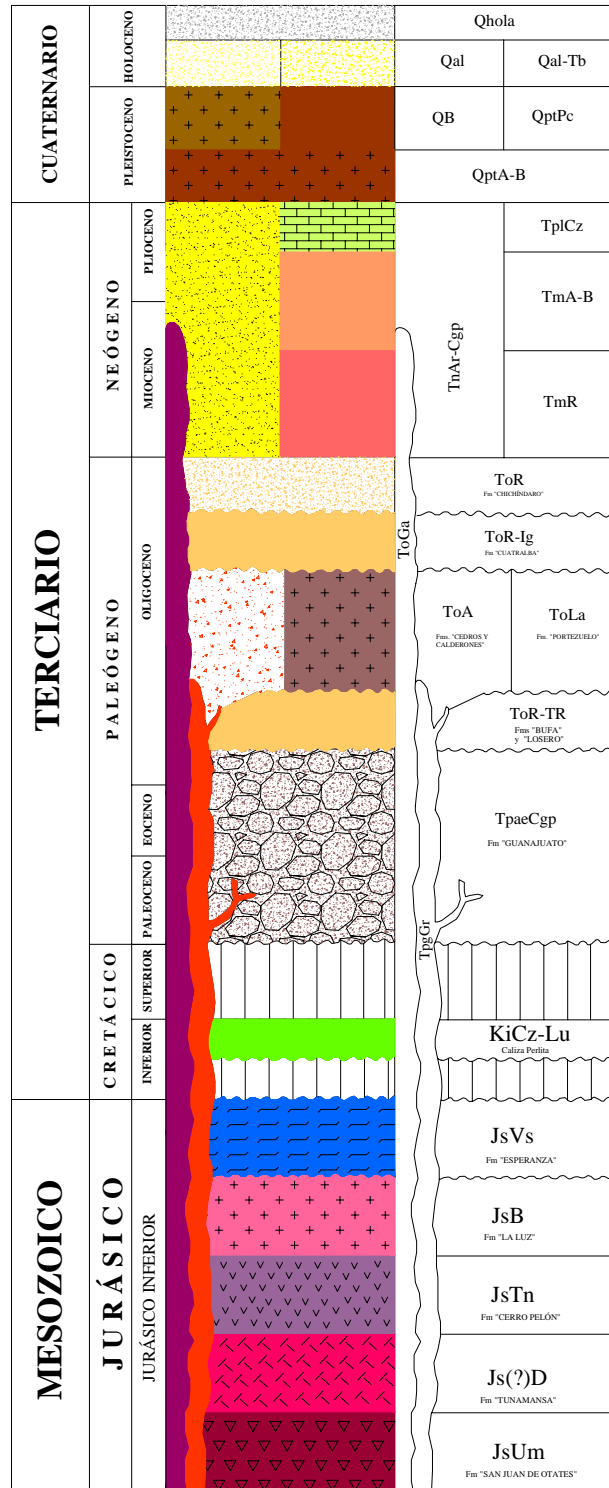


Figura 1.4.- Columna estratigráfica del Graben de León. (COREMI 2004)

### 1.5.2.- Geología estructural

Las rocas mesozoicas de la Sierra de Guanajuato están afectadas por deformación dúctil, con foliación, pliegues isoclinales y cabalgaduras que revelan esfuerzos compresivos de dirección SW-NE. En la región, sólo las rocas del Arco de Guanajuato están afectadas por este tipo de deformación. Es posible que el efecto deformacional pertenezca al que generó la acreción de los arcos magmáticos del sur de México durante el Cretácico Superior.

Durante el Cenozoico se presenta una fase distensiva que produjo una serie de fallas normales, dando origen a pilares y fosas tectónicas, entre las que destacan el Graben de Villa de Reyes, de orientación NE-SW, el Graben de la Saucedá, de orientación ENE-WSW, y el Horst de la Sierra de Guanajuato, limitado al pie de su vertiente SW por un gran fallamiento normal, de orientación NW-SE, conocido como Falla del Bajío. En el área de la ciudad de Guanajuato existen yacimientos auroargentíferos y de plomo-zinc de tipo epitermal vetiforme y en *stockworks*, los cuales tienen relación con el batolito granítico del Terciario Inferior y con diques.

Las estructuras más antiguas afectan a las rocas del complejo plutónico volcanosedimentario del arco de Guanajuato. Estas estructuras consisten en foliación, micropliegues, pliegues y cabalgaduras a escala de afloramiento, que se observan en todas las rocas volcanosedimentarias de este complejo. La foliación tiene rumbo general NE 50° – 80° con 20° a 40° de inclinación en dirección al NW.

Las estructuras asociadas a las rocas mesozoicas se relacionan con la fase de deformación orogénica que afecta a las unidades de arco y su cubierta sedimentaria en la etapa de emplazamiento de las cobijaduras regionales. La interpretación clásica relaciona este fenómeno con la fase de deformación laramídica en el límite Mesozoico-Cenozoico.

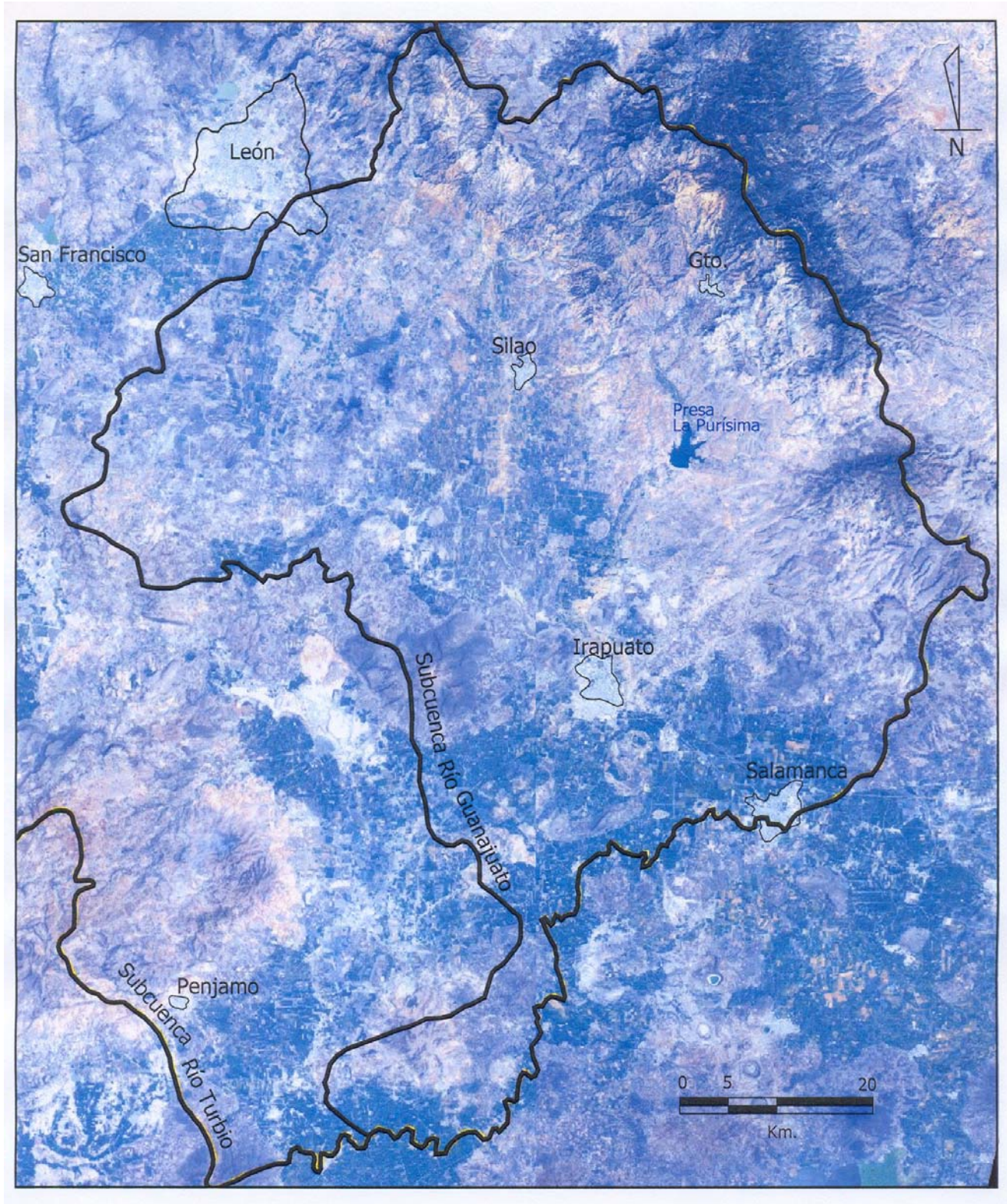
Las fallas y fracturas de las rocas miocénicas se asocian al emplazamiento y evolución de las fajas volcánicas del occidente y centro del territorio de México (Sierra Madre Occidental) y la Faja Volcánica Transmexicana (o Eje Neovolcánico, dependiendo del autor). Los lineamientos y enjambres de conos cineríticos están orientados según estructuras ENE – WSW y N – S, relacionadas a la actividad de la Faja Volcánica Transmexicana.

Los yacimientos minerales conocidos están distribuidos aisladamente; destacan las vetas de Au-Ag de rumbo NW y echados al SW que se localizan en el extremo opuesto del Distrito Minero Guanajuato (Veta Madre Sur, El Nayal, Cabrestantes, Purísima, vetas de origen hidrotermal. Los rasgos estructurales mayores se muestran en el plano Geológico y estructural de las figuras 1.3 y 1.5 y en la imagen de satélite de la

Figura 1.6 (composición de imágenes Landsat path 28, row 45 y 46, bandas 5, 3 y 2, tomadas en 1990 y 1992, respectivamente).

Los rasgos estructurales fueron extraídos de la cartografía del COREMI, de los informes y archivos electrónicos facilitados por CEAG, previa revisión de ambos, de la interpretación de imágenes de satélite e interpretación cualitativa de las cartas de magnetometría aérea de COREMI y de las líneas gravimétricas, recientemente levantadas también por COREMI.





**Figura 1.6.-** Imagen de satélite de la Subcuenca del Río Guanajuato. (COREMI 2004)

## **CAPITULO 2 LEGISLACIÓN**

La aparición y evolución de reglamentaciones que limitan la utilización de agua para consumo humano, han seguido los pasos que la investigación ha ido desarrollando y que se extiende no sólo a los efectos que los distintos elementos pueden tener en el organismo humano, sino también a los sistemas de análisis que permiten su determinación precisa e inequívoca.

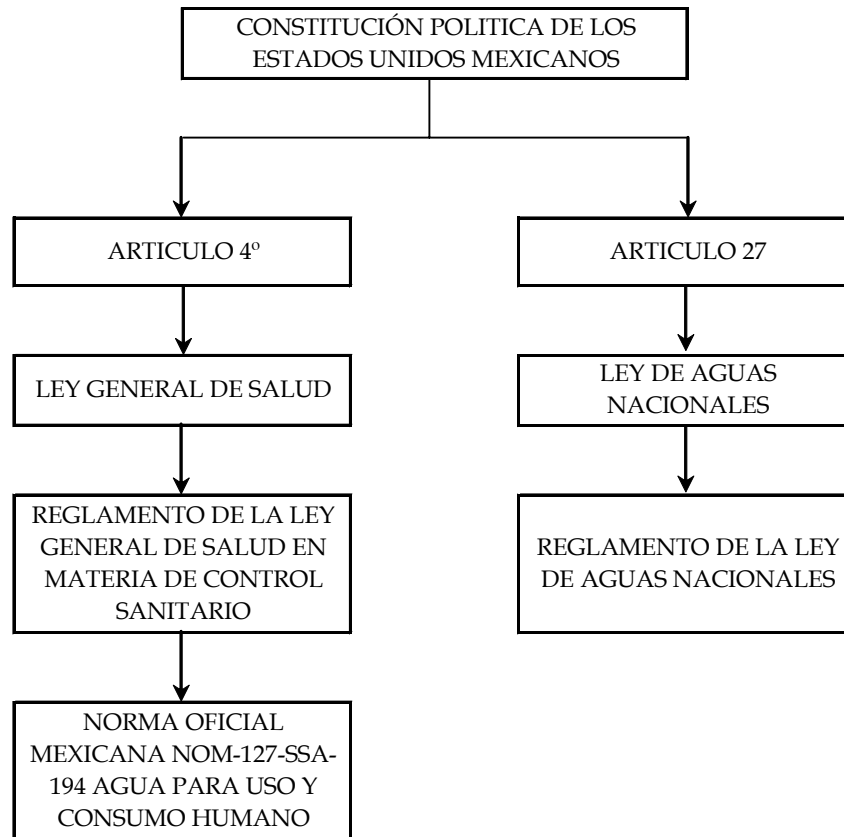
La tendencia mundial es a la normalización de las reglamentaciones existentes, no solo en lo que atañe a la fijación de los límites admisibles de las características del agua, sino también en lo referente a los sistemas de toma de muestras, frecuencia de las mismas y métodos de análisis a utilizar.

### **2.1 GENERALIDADES**

El 5 de Febrero de 1917 se promulgó la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos; este ordenamiento contiene la esencia y espíritu de todas las leyes que del mismo emanan. Los Artículos 4 y 27 Constitucionales son los que, se considera importante mencionar, pues de ellos emanan la Ley General de Salud y la Ley de Aguas Nacionales, respectivamente.

En artículo 4º establece que toda persona tiene derecho a la protección de la salud, además de tener derecho a un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar.

El artículo 27 establece que la propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originalmente a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada. Además establece que la Nación tendrá el derecho de imponer a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público, así como el de regular, en beneficio social, el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de ser aprovechados, con objeto de hacer una distribución equitativa de la riqueza pública, cuidar de su conservación, lograr el desarrollo equilibrado del país y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y urbana.



*Figura 2.1 Sinopsis de la Legislación en Materia de Calidad del Agua*

A continuación se harán extractos de la Ley de Aguas Nacionales, la cual nos servirá como referencia al establecer el marco normativo. Aquí se presenta la última modificación a esta Ley, la cual se publicó el día viernes 30 de abril de 2004 en el Diario Oficial de la Federación.

Si se lee cuidadosamente esta ley se puede percibir que no se requieren nuevas leyes y/o reglamentos, además de concienciar a la sociedad de que hace falta una real y comprometida participación social y política para respetar y conservar el medio ambiente; y si esta ley se respetara y se aplicara, los problemas de contaminación que existen actualmente se reducirían de manera impresionante. El daño ambiental es una bomba de tiempo que actualmente ha empezado a manifestarse pero que sigue sin ser tomado en cuenta.

## 2.2. LEY DE AGUAS NACIONALES

La Ley de Aguas Nacionales es reglamentaria del Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de aguas nacionales; es de observancia general en todo el territorio nacional, sus disposiciones son de orden público e interés social y tiene por objeto regular la explotación, uso,



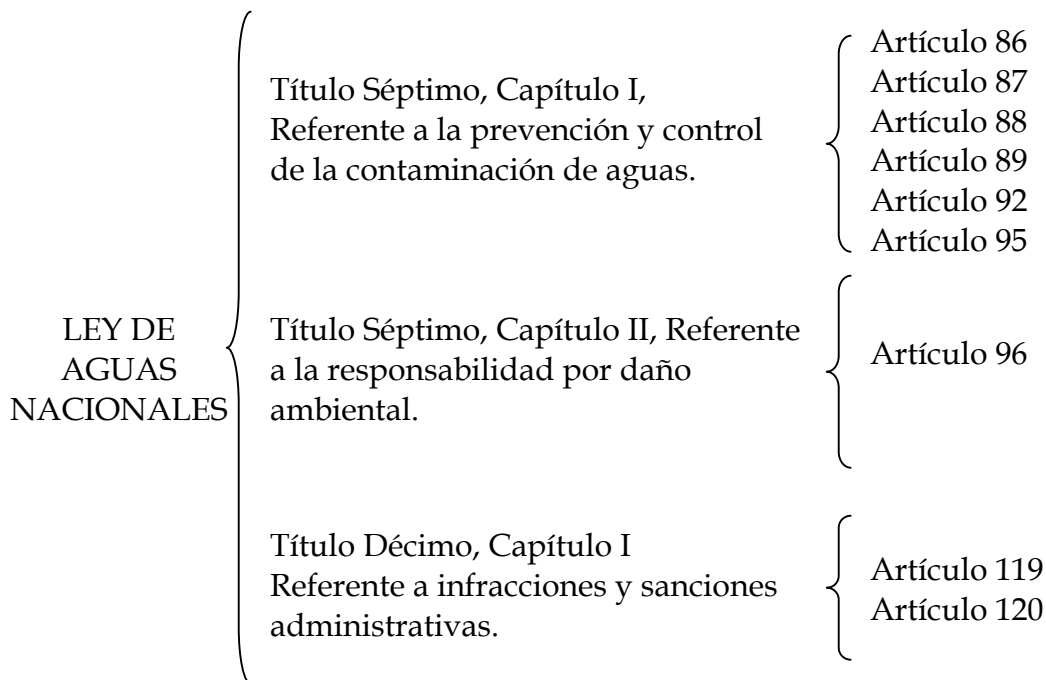
aprovechamiento, distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr un desarrollo integral sustentable.

Las disposiciones de la Ley de Aguas Nacionales son aplicables a todas las aguas nacionales, sean superficiales o del subsuelo. Estas disposiciones también son aplicables a los bienes nacionales que se señalan en esta Ley.

Para el manejo de los recursos hidráulicos, la Comisión Nacional del Agua (CNA), es el organismo federal normativo que cuenta con las atribuciones necesarias para proteger, conservar, mejorar y explotar racionalmente los diferentes cuerpos de agua nacionales.

Para controlar y prevenir la contaminación del Agua, la CNA, de acuerdo con el artículo 87 de la Ley de Aguas Nacionales, debe determinar la capacidad de asimilación y dilución de los contaminantes de los cuerpos de agua nacionales, que son utilizados para las diferentes actividades humanas como fuente de abastecimiento o cuerpo receptor.

La capacidad de asimilación y dilución de contaminantes de las corrientes se determinará a través de estudios de clasificación, lo cual permitirá a la CNA regular las fuentes de contaminación y/o el volumen de aprovechamiento. Además, dichos estudios servirán para elaborar las Declaratorias de Clasificación de corrientes, las cuales serán la base técnico-jurídica en las que se apoyará la CNA, conforme al artículo 89 de la Ley de Aguas Nacionales, para otorgar permisos a los responsables de las descargas de aguas residuales.



**Figura 2.2** Ley de Aguas Nacionales

***La Ley de Aguas Nacionales en su Título Séptimo, Capítulo I, referente a la prevención y control de la contaminación de las aguas, establece que:***

**ARTÍCULO 86 (Extracto).** La "Comisión" tendrá a su cargo:

- Promover y, en su caso, ejecutar y operar la infraestructura federal, los sistemas de monitoreo y los servicios necesarios para la preservación, conservación y mejoramiento de la calidad del agua en las cuencas hidrológicas y acuíferos, de acuerdo con las Normas Oficiales Mexicanas respectivas y las condiciones particulares de descarga;
- Formular y realizar estudios para evaluar la calidad de los cuerpos de agua nacionales;
- Formular programas integrales de protección de los recursos hídricos en cuencas hidrológicas y acuíferos, considerando las relaciones existentes entre los usos del suelo y la cantidad y calidad del agua;
- Establecer y vigilar el cumplimiento de las condiciones particulares de descarga que deben satisfacer las aguas residuales, de los distintos usos y usuarios, que se generen en:
  - a) Bienes y zonas de jurisdicción federal;
  - b) Aguas y bienes nacionales;
  - c) Cualquier terreno cuando puedan contaminar el subsuelo o los acuíferos
- Realizar la inspección y verificación del cumplimiento de las disposiciones de las Normas Oficiales Mexicanas aplicables, para la prevención y conservación de la calidad de las aguas nacionales y bienes señalados en la presente Ley;
- Atender las alteraciones al ambiente por el uso del agua, y establecer a nivel de cuenca hidrológica o región hidrológica las acciones necesarias para preservar los recursos hídricos y, en su caso, contribuir a prevenir y remediar los efectos adversos a la salud y al ambiente, en coordinación con la Secretaría de Salud y "la Secretaría" en el ámbito de sus respectivas competencias.

**ARTÍCULO 86 BIS 2 (Extracto).** Se prohíbe depositar en los cuerpos receptores y zonas federales, en contravención a las disposiciones legales y reglamentarias en materia ambiental, basura, materiales, lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales y demás desechos o residuos que por efecto de disolución o arrastre, contaminen las aguas de los cuerpos receptores, así como aquellos desechos o residuos considerados peligrosos en las Normas Oficiales Mexicanas.

**ARTÍCULO 87 (Extracto).** "La Autoridad del Agua" determinará los parámetros que deberán cumplir las descargas, la capacidad de asimilación y dilución de los cuerpos de aguas nacionales y las cargas de contaminantes que éstos pueden recibir, así como las metas de calidad y los plazos para alcanzarlas, mediante la expedición de Declaratorias de Clasificación de los Cuerpos de Aguas Nacionales, las cuales se publicarán en el Diario Oficial de la Federación, lo mismo que sus modificaciones, para su observancia.

**ARTÍCULO 88 (Extracto).** Las personas físicas o morales requieren permiso de descarga expedido por "la Autoridad del Agua" para verter en forma permanente o intermitente aguas residuales en cuerpos receptores que sean aguas nacionales o demás bienes nacionales, incluyendo aguas marinas, así como cuando se infiltren en terrenos que sean bienes nacionales o en otros terrenos cuando puedan contaminar el subsuelo o los acuíferos.

**ARTÍCULO 89 (Extracto).** "La Autoridad del Agua" para otorgar los permisos de descarga deberá tomar en cuenta la clasificación de los cuerpos de aguas nacionales a que se refiere el Artículo 87 de esta misma Ley, las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes y las condiciones particulares que requiera cumplir la descarga.

Cuando la descarga de las aguas residuales afecte o pueda afectar fuentes de abastecimiento de agua potable o a la salud pública, "la Autoridad del Agua" lo comunicará a la autoridad competente y dictará la negativa del permiso correspondiente o su inmediata revocación, y, en su caso, la suspensión del suministro del agua, en tanto se eliminan estas anomalías

**ARTÍCULO 92 (Extracto).** "La Autoridad del Agua" ordenará la suspensión de las actividades que den origen a las descargas de aguas residuales, cuando:

I. No se cuente con el Permiso de Descarga de aguas residuales en los términos de esta Ley.

II. La calidad de las descargas no se sujete a las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes, a las condiciones particulares de descarga o a lo dispuesto en esta Ley y sus reglamentos.

**ARTÍCULO 95 (Extracto).** "La Autoridad del Agua" en el ámbito de la competencia federal, realizará la inspección o fiscalización de las descargas de aguas residuales con el objeto de verificar el cumplimiento de la Ley.

*La Ley de Aguas Nacionales en su Título Séptimo, Capítulo II, referente a la responsabilidad por el daño ambiental, establece que:*

**ARTÍCULO 96 (Extracto).** En las zonas de riego y en aquellas zonas de contaminación extendida o dispersa, el manejo y aplicación de sustancias que puedan contaminar las aguas nacionales superficiales o del subsuelo, deberán cumplir con las normas, condiciones y disposiciones que se desprendan de la presente Ley y sus reglamentos.

"La Comisión" promoverá en el ámbito de su competencia, las normas o disposiciones que se requieran para hacer compatible el uso de los suelos con el de las aguas, con el objeto de preservar la calidad de las mismas dentro de un ecosistema, cuenca hidrológica o acuífero.

**ARTÍCULO 96 BIS (Extracto)** "La Autoridad del Agua" intervendrá para que se cumpla con la reparación del daño ambiental, incluyendo aquellos daños que comprometan a ecosistemas vitales, debiendo sujetarse en sus actuaciones en términos de Ley.

**ARTÍCULO 96 BIS 1 (Extracto).** Las personas físicas o morales que descarguen aguas residuales, en violación a las disposiciones legales aplicables, y que causen contaminación en un cuerpo receptor, asumirán la responsabilidad de reparar el daño ambiental causado, sin perjuicio de la aplicación de las sanciones administrativas, penales o civiles que procedan, mediante la remoción de los contaminantes del cuerpo receptor afectado y restituirlo al estado que guardaba antes de producirse el daño, o cuando no fuere posible, mediante el pago de una indemnización fijada en términos de Ley por Autoridad competente.

"La Comisión", con apoyo en el Organismo de Cuenca competente, intervendrá para que se instrumente la reparación del daño ambiental a cuerpos de agua de propiedad nacional causado por extracciones o descargas de agua, en los términos de esta Ley y sus reglamentos.

***La Ley de Aguas Nacionales en su Título Décimo, Capítulo I referente a Infracciones y Sanciones Administrativas, establece que:***

**ARTÍCULO 119 (Extracto).** "La Autoridad del Agua" sancionará conforme a lo previsto por esta Ley, las siguientes faltas:

I. Descargar en forma permanente, intermitente o fortuita aguas residuales en contravención a lo dispuesto en la presente Ley en cuerpos receptores que sean bienes nacionales, incluyendo aguas marinas, así como cuando se infiltren en terrenos que sean bienes nacionales o en otros terrenos cuando puedan contaminar el subsuelo o el acuífero;

II. Explotar, usar o aprovechar aguas nacionales residuales sin cumplir con las Normas Oficiales Mexicanas en la materia y en las condiciones particulares establecidas para tal efecto;

III. Explotar, usar o aprovechar aguas nacionales en volúmenes mayores a los autorizados en los títulos respectivos o en las inscripciones realizadas en el Registro Público de Derechos de Agua;

IV. Ocupar o aprovechar vasos, cauces, canales, zonas federales, zonas de protección y demás bienes, sin el título de concesión;

V. Alterar la infraestructura hidráulica autorizada para la explotación, uso o aprovechamiento del agua, o su operación, sin el permiso correspondiente;

VI. No acondicionar las obras o instalaciones en los términos establecidos en los reglamentos o en las demás normas o disposiciones que dicte la autoridad competente para prevenir efectos negativos a terceros o al desarrollo hidráulico de las fuentes de abastecimientos o de la cuenca;

VII. No instalar, no conservar, no reparar o no sustituir, los dispositivos necesarios para el registro o medición de la cantidad y calidad de las aguas, en los términos que establece esta Ley, sus reglamentos y demás disposiciones aplicables, o modificar o alterar las instalaciones y equipos para medir los volúmenes de agua explotados, usados o aprovechados, sin permiso correspondiente, incluyendo aquellos que en ejercicio de sus facultades hubiere instalado "la Autoridad del Agua";

VIII. Explotar, usar o aprovechar aguas nacionales sin el título respectivo, cuando así se requiere en los términos de la presente Ley, así como modificar o desviar los

cauces, vasos o corrientes, cuando sean propiedad nacional, sin permiso respectivo o cuando se dañe o destruya una obra hidráulica de propiedad nacional;

IX. Ejecutar para sí o para un tercero obras para alumbrar, extraer o disponer de aguas del subsuelo en zonas reglamentadas, de veda o reservadas, sin el permiso respectivo así como a quien hubiere ordenado la ejecución de dichas obras;

X. Impedir u obstaculizar las visitas, inspecciones, reconocimientos, verificaciones y fiscalizaciones que realice "la Autoridad del Agua" en los términos de esta Ley y sus reglamentos;

XI. No entregar los datos requeridos por "la Autoridad del Agua" o "la Procuraduría", según el caso, para verificar el cumplimiento de las disposiciones contenidas en esta Ley y en los títulos de concesión, asignación o permiso de descarga, así como en otros ordenamientos jurídicos;

XII. Usar volúmenes de agua mayores que los que generan las descargas de aguas residuales para diluir y así tratar de cumplir con las Normas Oficiales Mexicanas en materia ecológica o las condiciones particulares de descarga;

XIII. Suministrar aguas nacionales para consumo humano que no cumplan con las normas de calidad correspondientes;

XIV. Arrojar o depositar cualquier contaminante, en contravención a las disposiciones legales, en ríos, cauces, vasos, lagos, lagunas, esteros, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua, o infiltrar materiales y sustancias que contaminen las aguas del subsuelo;

XV. No cumplir con las obligaciones consignadas en los títulos de concesión, asignación o permiso de descarga;

XVI. No solicitar el concesionario o asignatario la inscripción en el Registro Público de Derechos de Agua en los términos previstos en la presente Ley y sus reglamentos;

XVII. Ocasionar daños ambientales considerables o que generen desequilibrios, en materia de recursos hídricos de conformidad con las disposiciones en la materia;

XVIII. Desperdiciar el agua en contravención a lo dispuesto en la Ley y sus reglamentos;

XX. Modificar o desviar los cauces, vasos o corrientes cuando sean propiedad nacional, sin el permiso correspondiente; cuando se dañe o destruya una obra hidráulica de propiedad nacional;

XXI. No informar a "La Autoridad del Agua", de cualquier cambio en sus procesos cuando con ello se ocasionen modificaciones en las características o en los volúmenes de las aguas residuales que hubieren servido para expedir el permiso de descarga correspondiente;

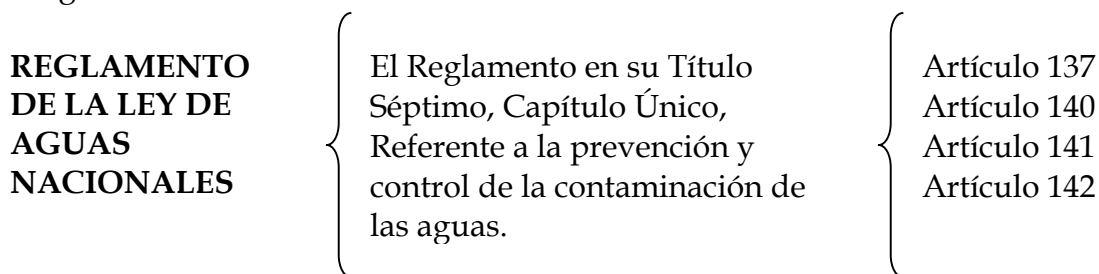
**ARTÍCULO 120 (Extracto).** Las faltas a que se refiere el Artículo anterior serán sancionadas administrativamente por "La Autoridad del Agua" con multas que serán equivalentes a los siguientes días del salario mínimo general vigente en el Distrito Federal en el momento en que se cometa la infracción, independientemente de las sanciones estipuladas en la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, Ley de Bienes Nacionales y Ley Federal de Metrología y Normalización y sus reglamentos, las Normas Oficiales Mexicanas, el Código Penal Federal y demás disposiciones aplicables en la materia:

- I. 1,000 a 1,500, en el caso de violación a las fracciones XVI y XXIV;
- II. 1,501 a 5,000, en el caso de violaciones a las fracciones VI, X, XVIII y XXI, y
- III. 5,001 a 20,000, en el caso de violación a las fracciones I, II, III, IV, V, VII, VIII, IX, XI, XII, XIII, XIV, XV, XVII, XIX, XX, XXII y XXIII.

En los casos previstos en la fracción IX del Artículo anterior, los infractores perderán en favor de la Nación las obras de alumbramiento y aprovechamiento de aguas y se retendrá o conservará en depósito o custodia la maquinaria y equipo de perforación, hasta que se reparen los daños ocasionados en los términos de Ley, sin menoscabo de otras sanciones administrativas y penales aplicables.

### 2.3 REGLAMENTO DE LA LEY DE AGUAS NACIONALES

El Reglamento De La Ley De Aguas Nacionales tiene por objeto reglamentar la Ley de Aguas Nacionales.



*Figura 2.3 Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales*

---

***El Reglamento, en su Título Séptimo, Capítulo Único, referente a la prevención y control de la contaminación de las aguas, establece que:***

**ARTÍCULO 137 (Extracto).** Es responsabilidad de los usuarios del agua y de todos los concesionarios a que se refiere el Capítulo II del Título VI de la “Ley”, incluidas las unidades y los distritos de riego, cumplir con las Normas Oficiales Mexicanas y en su caso con las demás condiciones particulares de descarga, para la prevención y control de la contaminación extendida o dispersa que resulte del manejo y aplicación de sustancias que puedan contaminar la calidad de las aguas nacionales y los cuerpos receptores.

**ARTICULO 140 (Extracto).** Para determinar las condiciones particulares de descarga, la “Comisión” tomará en cuenta los parámetros y límites máximos permisibles contenidos en las Normas Oficiales Mexicanas que emitan las autoridades competentes en materia de descargas de aguas residuales y para el tratamiento de agua para consumo humano, así como parámetros y límites máximos que deriven de las Declaraciones de Clasificación de los Cuerpos de Aguas Nacionales que se publiquen en los términos del artículo 87 de la “Ley”.

Asimismo para determinar las condiciones particulares de descarga, “La Comisión” tomará en cuenta los desechos de terceros para explotar, usar o aprovechar las Aguas Nacionales del cuerpo receptor de que se trate, las restricciones que imponga la programación hidráulica aprobada en los términos de la “Ley” y el “Reglamento” y las demás consideraciones de interés público o de salubridad general que, debidamente fundadas y motivadas, emitan las autoridades competentes y que establezcan restricciones adicionales para la descarga de aguas residuales en los cuerpos receptores a que se refiere la “Ley”.

**ARTÍCULO 141.** La “Comisión” conforme a las Normas Oficiales Mexicanas que emitan las autoridades competentes, las metas y plazos establecidos en la programación hidráulica y las Declaratorias de Clasificación de los Cuerpos de Aguas Nacionales, podrá modificar las condiciones particulares de descarga, señalando a los permisionarios el plazo para que sus descargas se ajusten a las mismas.

Las condiciones particulares de descarga no podrán ser modificadas sino después de transcurridos cinco años, contados a partir de su expedición o modificación, salvo situaciones comprobadas de emergencia para evitar graves daños a la salud o a un ecosistema o a terceros.



**ARTICULO 142.** Para efectos de la fracción III, del artículo 86 de la “Ley”, “La Comisión” podrá publicar en el Diario Oficial de la Federación los parámetros y concentraciones máximos que por lo menos deberán observar las condiciones particulares de descargas de aguas residuales.

## 2.4 NORMAS OFICIALES MEXICANAS

Las Normas Oficiales Mexicanas son el conjunto de reglas científicas o tecnológicas emitidas por la Federación que establecen los requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, parámetros y límites permisibles que deberán observarse en el desarrollo de actividades o uso y destino de bienes; su aplicación y vigilancia corresponderá a las autoridades federales, estatales o municipales, en el ámbito de sus respectivas jurisdicciones territoriales, así como en los términos que establezcan en su propia legislación.

### 2.4.1 Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad del agua que sea destinada para uso y consumo humano. Esta Norma Oficial Mexicana es aplicable a todos los sistemas de abastecimiento públicos y privados y a cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional.

*La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 en su Capítulo 4 referente a Límites Permisibles de Calidad, establece que:*

- El contenido de organismos resultante del examen de una muestra simple de agua, debe ajustarse a lo establecido en la Tabla 4.1

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Organismos coliformes totales	Ausencia o no detectables
<i>E. coli</i> o coliformes fecales u organismos termotolerantes	Ausencia o no detectables

**Tabla 2.1** Límites permisibles de características microbiológicas

Bajo situaciones de emergencia, las autoridades competentes podrán establecer los agentes biológicos nocivos a la salud que se deban investigar.

Las unidades de medida deberán reportarse de acuerdo a la metodología empleada.

El agua abastecida por el sistema de distribución no debe contener *E. coli* o coliformes fecales u organismos termotolerantes en ninguna muestra de 100 ml. Los organismos coliformes totales no deben ser detectables en ninguna muestra de 100 ml; en sistemas de abastecimiento de localidades con una población mayor de 50 000 habitantes; estos organismos deberán estar ausentes en el 95% de las muestras tomadas en un mismo sitio de la red de distribución, durante un periodo de doce meses de un mismo año.

- Las características físicas y organolépticas deberán ajustarse a lo establecido en la Tabla 4.2

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

**Tabla 2.2** Límites permisibles de características físicas y organolépticas.

- El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 4.3. Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad.

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

**TABLA 2.3** Límites permisibles de características químicas.

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Cromo total	0,05
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500,00
Fenoles o compuestos fenólicos	0,3
Fierro	0,30
Fluoruros (como F <sup>-</sup> )	1,50
Hydrocarburos 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

**TABLA 2. 3** Límites permisibles de características químicas (Continuación).

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Plomo	0,01
Sodio	200,00
Sólidos disueltos totales	1000,00
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> =)	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

**TABLA 2. 3** Límites permisibles de características químicas (Continuación).

**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 4.4 de cumplimiento gradual:

Límite permisible mg/l	Año
0,045	2001
0,040	2002
0,035	2003
0,030	2004
0,025	2005

**Tabla 2.4** Tabla de cumplimiento gradual

En caso de que en el sistema de abastecimiento se utilicen para la desinfección del agua, métodos que no incluyan cloro o sus derivados, la autoridad sanitaria determinará los casos en que adicionalmente deberá dosificarse cloro al agua distribuida, para mantener la concentración de cloro residual libre dentro del límite permisible establecido en la Tabla 4.3

- El contenido de constituyentes radiactivos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 4.5. Los límites se expresan en Bq/l (Becquerel por litro).

<b>CARACTERISTICA</b>	<b>LIMITE PERMISIBLE Bq/l</b>
Radiactividad alfa global	0,56
Radiactividad beta global	1,85

*Tabla 2.5 Límites permisibles de características radiactivas.*

La vigilancia del cumplimiento de esta Norma Oficial Mexicana corresponde a la Secretaría de Salud en coordinación con los gobiernos estatales, municipales, el Gobierno del Distrito Federal, las Comisiones Estatales de Agua y Saneamiento y la Comisión Nacional del Agua, en sus respectivos ámbitos de competencia.

## CAPITULO 3

### CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

#### 3.1.- GENERALIDADES

La salud humana depende de muchos factores entre los que se halla en forma primordial tanto la cantidad como la calidad del agua utilizada. El problema de la contaminación del agua empieza con los grandes conglomerados humanos y el advenimiento de la industrialización, debido a que la cantidad de desechos aumenta considerablemente por estos conceptos.

En todo estudio de recursos hidráulicos se deben analizar características del agua con vistas a su utilización; surge así el concepto de calidad. El estudio de calidad de agua debe extenderse a todo tipo de agua que el hombre puede usar, entre estos tipos se encuentran las aguas subterráneas y marinas. La importancia del agua subterránea resulta de su volumen ya que el consumo se acrecienta en forma vertiginosa. Su importancia resalta al considerar el volumen disponible, ya que fuera de las aguas de los océanos y de los glaciares, supera por mucho a la capacidad de las demás fuentes.

Las aguas del subsuelo ofrecen un suministro natural más puro, económico y satisfactorio, que el obtenido a través de aguas superficiales, siempre y cuando se conserven las aguas disponibles y se suplementen mediante una recarga adecuada procedente de los recursos superficiales.

Si no se administran cuidadosamente, fallarán en cantidad y en calidad pudiéndose dar el caso de que tengan que ser abandonadas. No obstante su volumen y su resguardo, el agua subterránea no es absolutamente segura en su calidad e inagotable en su volumen; en arenas y otros suelos de grano fino o de rocas, pueden suministrar contaminantes de tipo químico al disolverlos de los estratos geológicos que atraviesa. No es de sorprender tampoco, que se hayan detectado brotes de enfermedades hídricas ocasionadas por aguas subterráneas, igual que en las aguas superficiales.

Las aguas subterráneas pueden por tanto, contener metano, ácido sulfhídrico y grandes cantidades de bióxido de carbono, provenientes de la descomposición de las plantas en el suelo; el rastrojo de las cosechas, las hojas que caen y las sustancias orgánicas de desecho, son destruidas por bacterias, hongos y otros

microorganismos del suelo; esta materia en conjunto puede pasar a las capas superficiales de agua subterránea provocando al mismo tiempo, que cedan su oxígeno disuelto a los saprófitos (plantas que se alimentan de las materias orgánicas en descomposición).

Las aguas subterráneas con transportadas a grandes distancias, sin embargo, los volúmenes de flujo están limitados al área de recarga, es decir, a la extensión de su captación y a la cantidad de precipitación pluvial, o de flujo de corrientes que alcance a las formaciones permeables.

La autopurificación de las aguas subterráneas contaminadas difiere de apreciablemente de la de las aguas superficiales. La variedad de organismos vivientes que se alimentan de las sustancias contaminantes, se encuentra sumamente restringida y depende del confinamiento y de la oscuridad, así como del espacio entre los poros del suelo, pero esta reducción en la purificación biológica se compensa mediante la purificación física a través de la filtración. En general se incrementa grandemente la velocidad de purificación y decrecen el tiempo y la distancia del trayecto de la contaminación.

El agua es el solvente más abundante, y es capaz de incorporar gran cantidad de sustancias al estar en contacto con los terrenos por los cuales circula.

Las aguas subterráneas tienen una mayor oportunidad de disolver materiales por las mayores superficies de contacto, lentas velocidades de circulación, además de mayor temperatura y presión a las que están sometidas y facilidad de disolver CO<sub>2</sub> del suelo no saturado. Por ello sus concentraciones salinas son superiores en comparación con las aguas superficiales.

La calidad del agua queda definida por su composición, y el conocimientos de los efectos que puede causar cada uno de los elementos que contiene o el conjunto de todos ellos, permite establecer las posibilidades de su utilización, clasificando así su destino para bebida, usos agrícolas, industriales, etc.

Cabe considerar la calidad natural de un cuerpo de agua y la calidad afectada por las actividades humanas (factores antropogénicos), que en general llevan una degradación. Agua natural y buena calidad no son sinónimos, y en muchos casos las aguas naturales pueden ser de muy baja calidad, e incluso tóxicas. La calidad del agua también puede alterarse localmente por causas geológicas como la presencia de yacimientos minerales, emanaciones volcánicas, cuerpos intrusivos, etc.

---

### **3.2.- CONTAMINACIÓN EN FUENTES DE EXPLOTACIÓN**

Las fuentes comunes de explotación de aguas subterráneas son los manantiales, pozos y galerías filtrantes.

#### **3.2.1.- Manantiales**

En los manantiales la contaminación se origina cerca del punto de captación, y se puede prevenir resguardando el material mediante una cámara hermética que penetra hasta una distancia segura dentro del acuífero y desviando el escurrimiento superficial hacia fuera de la vecindad inmediata.

#### **3.2.2.- Pozos**

Excepto en roca dura, particularmente en piedra caliza, sin cubierta de arena o grava, los pozos generalmente no sufren contaminación por filtración lateral, sino por entrada vertical de los contaminantes en la superficie del suelo o cerca de ella. La contaminación se evita mediante revestimiento impermeable o sellos que penetran en el acuífero por lo menos tres metros bajo la superficie del suelo y alrededor del pozo.

#### **3.2.3.- Galerías filtrantes**

La calidad del agua proveniente de una galería filtrante, depende en gran parte del diseño y su construcción, ya que el agua que se capta es prácticamente o en su mayoría de origen superficial reciente; y como agua superficial, está sujeta a innumerables causas de contaminación. (Murguía Vaca 1999)

### **3.3.- CONCEPTO DE POTABILIDAD**

El estudio de la calidad del agua destinada a ser consumida por el hombre ha sido, y es, de primordial importancia, interviniendo muchos factores que pueden afectarla, ya sea de manera inmediata o diferida.

De manera general, se denomina potable a aquella agua que puede ser consumida por el ser humano sin peligro alguno para su salud. Esto supone tener en cuenta las distintas características del agua, ya sean físicas, químicas, bacteriológicas, etc., definiendo criterios de calidad para cada una de ellas.

### **3.4.- CLASIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS CONTAMINANTES**

Los tipos de contaminantes del agua se dividen en conservativos y no conservativos. Los contaminantes conservativos (que incluyen metales pesados



como el arsénico, cadmio, mercurio, plomo, zinc, etc.) se caracterizan por concentraciones que permanecen constantes al transcurrir el tiempo.

Los contaminantes no conservativos (que incluyen a la mayoría de las sustancias orgánicas, algunas sustancias inorgánicas y muchos microorganismos) se degradan por los procesos naturales de autopurificación), al transcurrir el tiempo. La degradación es función del tiempo, del tipo y concentración del contaminante y del tipo de microorganismos.

Además de tener presente la clasificación de acuerdo a las características conservativas o no conservativas, es importante conocer las siguientes propiedades de los contaminantes:

- a) Compuestos tóxicos que causan la inhibición o destrucción de la actividad biológica en el agua. La mayoría de estos materiales provienen de las descargas industriales. Algunas especies de algas pueden liberar toxinas potentes.
- b) Materiales que afectan el balance de oxígeno de agua:
  - Sustancias que consumen oxígeno; éstas pueden ser materiales orgánicos que se oxidan bioquímicamente o agentes reductores inorgánicos.
  - Sustancias que entorpecen la transferencia de oxígeno a través de la interfase aire-agua. Los aceites y detergentes pueden formar películas protectoras en la interfase, las que reducen la cantidad de transferencia de oxígeno y amplifican los efectos de sustancias que consumen oxígeno.
  - La contaminación térmica puede alterar el balance de oxígeno debido a que la concentración de saturación de OD se reduce con el aumento de la temperatura.
- c) Los sólidos inertes en suspensión o disueltos causan problemas en altas concentraciones, por ejemplo, los lavados de kaolín china pueden recubrir el lecho de una corriente, lo que impide el crecimiento del alimento para los peces. La descarga de agua salobre por el drenaje de las minas puede hacer que un río sea inadecuado para propósitos de abastecimiento de agua.

### 3.4.1 Clasificación de las Fuentes de Contaminación del Agua

La contaminación del agua puede tener su origen en muchas fuentes. Si bien no todas las fuentes indicadas a continuación están presentes en todas las situaciones,

ellas son comunes a la mayoría de áreas o regiones. Las fuentes de contaminación de agua se clasifican de acuerdo al origen de las descargas, de la siguiente manera:

#### **a) De Origen Industrial**

La actividad industrial, especialmente la producción de pulpa y de papel, azucarera, eléctrica, la elaboración de alimentos y la manufacturera química, engendran una gran variedad de productos de desecho que pueden ser descargados en las corrientes de agua. Muchos desechos industriales son compuestos orgánicos que pueden ser degradados por las bacterias, pero sólo muy lentamente, de modo que podrán llevar acaso olores y gustos desagradables hasta distancias considerables a lo largo de un cuerpo de agua.

Los compuestos de diversos metales, tales como el cobre, el cadmio, el cromo y la plata, también son contaminantes industriales del agua. Las descargas que incluyen metales pesados como residuo, son las derivadas de las operaciones de acabados y cromado de metales, repelentes de polilla utilizados en la manufactura de textiles, herbicidas y plaguicidas, etc. La solución salina salmuera contiene mercurio y cuando es desechada sigue cualquier curso que se le presente. También el producto hidróxido de sodio está contaminado con mercurio y lo lleva a muchos productos para los cuales este es una materia prima.

El agua también puede resultar contaminada por la descarga de materiales radioactivos. Las principales fuentes son los laboratorios de investigación, hospitales que usan isótopos radioactivos, lavanderías que presentan servicios a dichos laboratorios y hospitales, reactores nucleares refrigerados con agua, plantas que procesan combustibles para reactores y actividades de extracción y preparación de uranio.

Finalmente cabe agregar que la descarga de cualquiera de estos residuos constituye un grave riesgo a corto plazo.

#### **b) De Origen Municipal**

Este tipo de residuo es común a todas las comunidades y centros poblacionales, ya sean urbanos, marginales y rurales. Generalmente consiste en una combinación de residuos domésticos mezclados con cantidades variables de efluentes industriales provenientes de pequeñas industrias y comercios. En áreas altamente industrializadas, las descargas de residuos industriales pueden constituir el principal componente.

Los desechos transportados por el agua de fuentes tales como los hogares, hospitales, escuelas y edificios comerciales contienen desechos de alimentos, excrementos humanos, papel, jabón, detergentes, polvo, ropa y otros residuos diversos y, por supuesto, microorganismos.

En los centros urbanos, generalmente se recolectan los residuos y se descargan en un punto central para su tratamiento o disposición final. Muchas ciudades tienen un sistema que conduce tanto el agua de lluvia como las aguas residuales domésticas (a este se le conoce como sistema combinado). En épocas de lluvia, diferentes cantidades de residuos líquidos, compuestos por una mezcla de aguas residuales sin tratar y agua de lluvia, no ingresan a la planta de tratamiento, sino que descargan directamente en las corrientes de agua, causando un incremento efectivo en los niveles de contaminación de dicha corriente durante el periodo de avenidas.

#### **c) De Origen Agropecuario**

Los fertilizantes agrícolas son elementos nutritivos vegetales y, cuando se aplican a la tierra, pueden ser arrastrados mediante escorrentías hacia el agua superficial; infiltrados y penetrados en aguas subterráneas, y también trasladados por el viento hasta las aguas superficiales. Los contaminantes provenientes de las actividades agrícolas incluyen sedimentos, nutrientes, plaguicidas, cargas orgánicas y organismos patógenos.

En cuanto a la actividad pecuaria, el estiércol producido por cabeza de ganado, en las instalaciones dedicadas a la crianza y engorda de ganado mayor y menor, cada día es una fuente importante de agua residual.

#### **d) De Origen de Desechos, Sustancias o Residuos Generados en las Actividades de Extracción de Recursos No Renovables**

Las descargas originadas por las actividades correspondientes a la extracción y transformación de recursos naturales en bienes de consumo y satisfactores para la población, como por ejemplo la industria del petróleo, la siderúrgica y las actividades mineras, son también una importante fuente de contaminación de agua superficial y subterránea.

El contaminante más grave que producen las actividades mineras, es el líquido que drena de ellas cuando existe oxidación de los compuestos de pirita, con el aire en presencia del agua. Este drenaje consiste en una mezcla ácida de sales de hierro y de otro tipo de sales de ácido sulfúrico. El líquido que drena de las minas proviene tanto de actividades subterráneas como

superficiales. Los residuos de la extracción, los materiales residuales dejados cerca del lugar de la extracción luego de haberse extraído los minerales (también llamados relaves), constituyen otra fuente de contaminación. La lluvia que llega a estos cúmulos de residuos lixiviará parte de los contaminantes presentes y los drenará, ya sea hacia el subsuelo, (pudiendo contaminar las aguas subterráneas) o hacia las aguas superficiales adyacentes.

### 3.5.- ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (ICA)

El Índice de Calidad del Agua Subterránea, proporciona un método que permite relacionar los parámetros reportados, con el fin de determinar el grado de contaminación que presenta el agua. Mediante el ICA se logra un patrón de comparación entre distintos cuerpos de agua, comprendido con mayor claridad para el público en general. No obstante que se logra un valor conjunto, debe considerarse el resultado de cada uno de los parámetros que intervienen, con objeto de analizar efectos específicos.

El grado de contaminación queda representado por el Índice de Calidad del Agua, el cual está expresado como un porcentaje del agua pura; así, el agua altamente contaminada tendrá un ICA global cercano o igual a 0%, en cambio, el agua en excelente condición tendrá un valor cercano al 100%.

El Índice de Calidad General se puede conocer aplicando la ecuación 3.1:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n (I_i W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (3.1)$$

Donde:

I = Índice de calidad general

I<sub>i</sub> = Índice de calidad del parámetro considerado

W<sub>i</sub> = Valor de importancia relativa del parámetro considerado

El cuadro 3.1 contiene los valores de importancia relativa para 18 parámetros que se proponen como básicos en un estudio

Las ecuaciones definidas para el índice de calidad individual, de cada uno de los 18 parámetros seleccionados para conformar el índice general, se muestran en cuadro 3.2

Con ayuda del ICA se pueden determinar los usos a los que se pueden destinar el agua según el grado de contaminación; dichos usos quedan establecidos en la Escala de Clasificación General de la Calidad del Agua, y corresponden a: abastecimiento público, recreación, pesca y vida acuática, uso industrial o agrícola, navegación y transporte de desechos tratados. En el cuadro 3.3 se presenta la Escala de Clasificación de la Calidad del Agua.

Parámetro	Importancia Relativa (W)	Parámetro	Importancia Relativa (W)
pH	1.0	N de Nitratos	2.0
Color	1.0	N Amoniacal	2.0
Turbiedad	0.5	Fosfatos Totales	2.0
Grasas y Aceites	2.0	Cloruros	0.5
Sólidos Suspendidos	1.0	Oxígeno Disuelto	5.0
Sólidos Disueltos	0.5	DBO	5.0
Conductividad Eléctrica	2.0	Coniformes Totales	3.0
Alcalinidad	1.0	Coniformes Fecales	4.0
Dureza Total	1.0	Detergentes (SAAM)	3.0

**Tabla 3.1** Importancia relativa de los parámetros para definir el índice de calidad

Parámetro	Ecuaciones	Observaciones
pH	$I_{pH} = 10^{0.2335pH + 0.440}$	Si el pH es menor que 6.7
	$I_{pH} = 100$	Si el pH está entre 6.7 y 7.3
	$I_{pH} = 10^{4.22 - 0.293pH}$	Si el pH es mayor que 7.3
Color	$I_c = 123C^{-0.295}$	C en unidades de color escala platino-cobalto
Turbiedad	$I_t = 108t^{-0.178}$	t en UTJ
Grasas y Aceites	$I_{GyA} = 87.25(GyA)^{-0.298}$	G y A expresado en mg/l
Sólidos Suspendidos	$I_{ss} = 266.5(SS)^{-0.37}$	SS expresado en mg/l
Sólidos Disueltos	$I = 109.1 - 0.0175(sd)$	sd expresado en mg/l
Conductividad Eléctrica	$I_{CE} = 540(ce)^{-0.379}$	CE expresado en $\mu$ mhos/cm
Alcalinidad	$I_a = 105a^{-0.186}$	a expresado en mg/l como CaCO <sub>3</sub>
Dureza Total	$I_D = 10^{1.974 - 0.00174}$	D expresado en mg/l como CaCO <sub>3</sub>
N de Nitratos	$I_{NO_4} = 162.2(NO_3)^{-0.343}$	NO <sub>3</sub> expresado en mg/l
N amoniacal	$I_{NH_3} = 45.8(NH_3)^{-0.343}$	NH <sub>3</sub> expresado en mg/l
Fosfatos Totales	$I_{PO_4} = 34.215(PO_4)^{-0.460}$	PO <sub>4</sub> expresado en mg/l

**Tabla 3.2** Ecuaciones para índice de calidad individual (Metcalf 1981)

Parámetro	Ecuaciones	Observaciones
Cloruros	$I_{CL}=121(CI)^{-0.223}$	Cl expresado en mg/l
Oxígeno Disuelto	$I_{OD}=(OD/OD_{SAT})100$	OD expresado en mg/l, a temp. De campo; $OD_{SAT}$ expresado en mg/l de saturación a la misma temperatura de campo.
Demanda Bioquímica de Oxígeno	$I_{DBO}=120(DBO)^{-0.673}$	DBO expresado en mg/l
Coniformes Totales	$I_{CT}=97.5(CT)^{-0.270}$	CT expresado en NMP coli/ml
Coniformes Fecales	$I_{EC}=97.5[5(EC)^{-0.270}]$	EC expresado en Escherichia coli/ml
Detergentes	$I_{SAAM}=100-16.78(SAAM)+0.1587(SAAM)^2$	SAAM expresado en mg/l

Tabla 3.2 Ecuaciones para índice de calidad individual (Continuación)

Rango	Abastecimiento Público	Recreación	Pesca y Vida Acuática	Industrial y Agrícola	Navegación	Transporte de Desechos Tratados	
90-100	No requiere purificación	Aceptable para cualquier deporte acuático.	Aceptable para todos los organismos	No requiere purificación	Aceptable	Aceptable	
80-90	Ligera Purificación			Ligera purificación para algunos procesos			
70-80	Mayor Necesidad de tratamiento			Sin tratamiento para industria normal			
60-70	Dudoso	Aceptable pero no recomendable	Excepto especies muy sensibles				
50-60		Dudoso para especies sensibles					
40-50	Inaceptable	Dudoso para contacto directo	Solo organismos muy resistentes	Con tratamiento en la mayor parte de la industria			
30-40		Sin contacto con el agua	Inaceptable	Uso muy restringido			Restringido
20-30		Uso muy restringido		Inaceptable			Inaceptable
10-20		Inaceptable					
0-10							Inaceptable

Tabla 3.3 Escala de Clasificación de la Calidad del Agua (ICA) (Metcalf 1981)

---

### 3.6.- PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA

#### 3.6.1.- Parámetros físicos

a) Temperatura

Básicamente importante por efecto en otras propiedades, por ejemplo, aceleración de reacciones químicas, reducción en la solubilidad de los gases, intensificación de sabores y olores, etc.

Se mide con un termómetro de laboratorio que tiene una precisión apreciativa de 1/10 de grado, aunque es suficiente con indicarla con aproximación de medio grado. Hay diversos tipos de termómetros que se emplean según la investigación o las condiciones del medio. Basta y se recomienda usar un termómetro de laboratorio que se sumerge en el agua hasta la marca que tiene para ese objeto. Dado que algunas veces no se puede hacer de esta manera, la muestra se saca en un frasco, y de allí es de donde se toma; el error que se pudiera cometer al hacerlo es casi despreciable.

b) Color

Es necesario diferenciar entre el color verdadero debido al material en solución, y el color aparente debido a la materia suspendida.

Se usan cristales montados en discos que permiten comparar éstos sobre agua destilada con la muestra directa. Es un procedimiento aceptado como prueba estándar de campo, porque dan buenos resultados si se comparan con el método de Platino - Cobalto usado en laboratorio. Estos discos se colocan en bases metálicas que contienen tubos para la muestra y para el agua destilada.

c) Olor

En general el olor se debe a la presencia de materia orgánica en descomposición, o a compuestos químicos como son los fenoles; si además el agua contiene cloro, la intensidad del olor aumenta. Hay olores específicos en lagos, ríos, mares, canales, etc., que pueden distinguirse de olor producto por contaminación, siendo factible no solamente diferenciarlo, sino medirlo.

d) Turbiedad

La presencia de sólidos coloidales le da al líquido una apariencia nebulosa que es poco atractiva y puede ser dañina. La turbiedad en el agua pueden causarla partículas de arcilla y limo, descargas de agua residual, desechos industriales o la presencia de numerosos microorganismos.

Dependiendo de la corriente o del tipo de agua, se usa un disco de 20 cm de diámetro, dividido en cuadrantes pintados de blanco y negro, sujeto al extremo de una barra o cable. Este disco denominado Secchi, se sumerge en el agua hasta que desaparezca la imagen; la barra que lo sostiene, tiene una graduación que da la turbiedad en función de la longitud del tramo sumergido. La función del disco de Secchi es medir la penetración de la luz en el agua: sin embargo se puede usar con buenos resultados considerando la penetración de la luz como función del grado de turbiedad o de color

e) pH

La intensidad de acidez o alcalinidad de una muestra se mide en la escala de pH, que en realidad mide la concentración de iones de hidrógeno presentes. La escala va de 0 a 14 con 7 como neutralidad, siendo ácido por debajo de 7 y siendo alcalino por arriba de 7. El pH controla muchas reacciones químicas y la actividad biológica normalmente se restringe a una escala bastante estrecha de pH entre 6 y 8. Las aguas muy ácidas o muy alcalinas son indeseables debido a que son corrosivas o presentan dificultades en su tratamiento.

Se deben utilizar potenciómetros ya que dan una muy buena aproximación del pH que se obtiene en laboratorio. En su defecto se usará el método colorimétrico que no es muy recomendable porque solamente da una idea de los valores del pH; no es exacto debido a las interferencias producidas por color, turbiedad, materia coloidal y cloro libre entre otras. En este método se emplean tiras de papel tornasol, las cuales al contacto con el agua toman colores variables dependiendo de la acidez o basicidad y su intensidad. Por comparación directa o intermedia entre los colores, se determina el valor del pH.

Para determinar en campo el pH, en el Anexo no. 2 se hace una descripción de cómo se lleva a cabo el proceso de medición en campo.

f) Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica se relaciona con la concentración de sólidos disueltos y es proporcional a otros parámetros como pH, turbiedad y color.



La conductividad de una solución depende de la cantidad de sales disueltas presentes y para soluciones diluidas es aproximadamente proporcional al contenido de sólidos disueltos totales (SOT):  $K = \text{conductividad (S/m)}/\text{SOT (mg/l)}$ ; si se conoce el valor apropiado de  $K$  para un agua en particular, la medición de la conductividad da una indicación rápida del contenido de sólidos disueltos totales.

Se usa un Puente de Wheatstone que mide el paso de la corriente entre dos electrodos separados un centímetro y con un área de un centímetro cuadrado manteniendo el agua a 25°C. La conductividad eléctrica o conductancia específica como también se le conoce, es la recíproca de la resistencia entre los electrodos; por tanto y debido a los valores normales tan bajos, se da en micra mhos/cm.

La conductividad eléctrica se relaciona con la concentración de sólidos disueltos y es proporcional a otros parámetros como pH, turbiedad y color.

#### g) Sólidos Totales

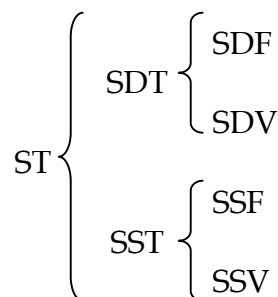
Un metro cúbico de agua residual pesa aproximadamente 1,000,000 de gramos. Contiene alrededor de 50 gramos de sólidos totales; éstos pueden estar en forma suspendida o en dilución. Los sólidos totales se determinan evaporando un volumen determinado de muestra y pesando el residuo remanente. Los resultados se expresan en mg/L.

De los aproximadamente 500 gramos de sólidos totales, la mitad son sólidos disueltos tales como calcio, sodio y compuestos orgánicos solubles. Los 250 gramos restantes son insolubles. La fracción insoluble consiste en aproximadamente 125 gramos de material que puede sedimentarse en 30 minutos si se deja al agua en condiciones de quietud. Los 125 gramos restantes permanecerán en suspensión por mucho tiempo.

Para la determinación de los sólidos suspendidos y de los sólidos disueltos se requiere filtrar la muestra. La filtración se lleva a cabo por medio de un filtro de membrana. Para determinar los sólidos suspendidos, el filtro es secado y pesado; en seguida se filtra un volumen determinado de muestra, se le seca y pesa otra vez. La diferencia de peso dividida por el volumen de muestra utilizada, proporciona la concentración de sólidos suspendidos. Para la determinación de los sólidos disueltos, del líquido filtrado se toma un cierto volumen, se evapora hasta su secado y se pesa el residuo remanente. Basta realizar dos de las determinaciones de las concentraciones de sólidos y la

tercera viene dada por la suma o diferencia de las otras dos. Los sólidos volátiles son aquella cuya fracción que se volatiliza a 50 °C. La concentración de sólidos volátiles se suele considerar como una medida aproximada del contenido de materia orgánica. Los sólidos volátiles pueden determinarse sobre la muestra original (sólidos volátiles totales), sobre la fracción suspendida (sólidos suspendidos volátiles) o sobre la fracción filtrada (sólidos disueltos volátiles). La determinación se hace por incineración en una mufla del residuo obtenido en el análisis de los sólidos totales. Cuando se trata de determinar los sólidos suspendidos volátiles, debe añadirse, bien un filtro de vidrio (el cual dará lugar a una pequeña pérdida de peso, que habrá que corregir) o un filtro de acetato de celulosa (no da lugar a cenizas). La fracción volátil se obtiene por diferencia entre el residuo remanente después del secado y el posterior a la incineración. Este último se denomina sólidos fijos o cenizas y constituye una medida aproximada del contenido mineral del agua residual. (Henry Glynn 1999)

Los sólidos suspendidos son principalmente de naturaleza orgánica; están formados por algunos de los materiales más objetables contenidos en el agua residual. La mayor parte de los sólidos suspendidos son desechos humanos, desperdicios de alimentos, papel, trapos y células biológicas que forman una masa de sólidos suspendidos en el agua. Incluso las partículas de materiales inertes adsorben sustancias orgánicas en su superficie. La mayor parte de los contaminantes de aguas son sólidos, disueltos o suspendidos. En un concepto general, los sólidos se definen como la materia que permanece como residuo después de someter a evaporación una muestra de agua a una temperatura de 105°C. El término "sólido" involucra 10 determinaciones que representan un análisis completo del contenido de residuos de una muestra de agua:



En donde:

- ST: Sólidos Totales
- SDT: Sólidos Disueltos Totales
- SST: Sólidos Suspendidos Totales

SDF: Sólidos Disueltos Fijos  
SDV: Sólidos Disueltos Volátiles  
SSF: Sólidos Suspendidos Fijos  
SSV: Sólidos Suspendidos Volátiles

### 3.6.2 Parámetros químicos

El análisis químico proporciona datos útiles y específicos respecto al estado de descomposición de aguas o corrientes contaminadas. Para los fines que se tienen en la presente tesis, se tomaron en cuenta los siguientes parámetros químicos (Custodio 1976):

#### 3.6.2.1 Características químicas de los iones y sustancias disueltas más importantes. (Esto estaba originalmente en el capítulo no. 4)

##### 3.6.2.1.1 Aniones y sustancias aniónicas.

###### 1. Ión Cloruro, Cl -

- a) Características químicas. Sales en general muy solubles. Muy estable en disolución y muy difícilmente precipitable. No se oxida ni se reduce en aguas naturales. En general va asociado al ión Na<sup>+</sup>; en especial en aguas muy salinas, pero el número de Miliequivalentes de ambos iones no es necesariamente igual.
- b) Concentraciones. Entre 10 y 250 ppm en aguas dulces, no siendo raro encontrar contenidos mucho mayores, hasta varios miles de ppm. El agua de mar tiene entre 18,000 y 21,000 ppm. Las salmueras naturales pueden llegar a tener 220,000 ppm (saturación).
- c) Nocividad y Toxicidad. Más de 300 ppm comunican sabor salado al agua de bebida, pero no es perjudicial por lo menos hasta algunos miles de ppm. Es esencial para la vida. Contenidos elevados son perjudiciales para muchas plantas y comunican corrosividad al agua.
- d) Análisis de Laboratorio. Valoración con NO<sub>3</sub> Ag usando como indicador cromato potásico (cambio de amarillo a naranja). Error de análisis menor de 1 a 3% para 10 a 100 ppm y del 1 a 2% para más de 100 ppm. En la valoración pueden interferir los iones Br<sup>-</sup>, I<sup>-</sup>, CN<sup>-</sup>, pero en general están en muy pequeñas cantidades.

- e) Análisis de campo. Igual que en el laboratorio, con bureta portátil o cuentagotas. Es un análisis sencillo.
- f) Toma de muestras. No se precisan precauciones especiales.

## 2. Ión Sulfato, $\text{SO}_4 =$

- a) Características químicas. Sales moderadamente solubles a muy solubles excepto las de Sr (60 ppm) y de Ba (2 ppm). En agua pura el  $\text{SO}_4$  Ca satura a 1500 ppm, y puede llegar a 7200 ppm en aguas salinas. En medios reductores con abundante materia orgánica puede sufrir una reducción bacteriana a S ó  $\text{S} =$ , pero en general es estable. Es difícilmente precipitable ya que las sales solubles del Sr y Ba son muy escasas en la naturaleza, pero puede separarse de la solución por concentración si existe una evaporación importante.
- b) Concentraciones. Entre 2 y 150 ppm en aguas dulces pudiendo llegar a 5000 ppm en aguas salinas si existe Ca y hasta 200 000 si está asociado a Mg y Na en ciertas salmueras. El agua de mar contiene alrededor de 3000 ppm.
- c) Nocividad y Toxicidad. Las aguas selenitosas (elevado contenido de sulfato) no quitan la sed y tiene sabor poco agradable y amargo. Por sí mismo, o si va asociado a Mg o Na en cantidad importante, puede comunicar propiedades laxantes. En cantidades elevadas puede ser perjudicial a las plantas. Más de algunos centenares de ppm perjudican la resistencia del hormigón y cemento.
- d) Análisis de Laboratorio. Su determinación cuantitativa no es fácil y es sometida a errores importantes si no se trabaja con cuidado. Puede realizarse por valoración complexométrica, pero se precisa cierta práctica en determinar el punto de cambio. Los métodos turbidimétricos sirven sólo para tener valores aproximados. El método mejor es el gravimétrico pero es engorroso y largo, y por eso es de uso restringido. Se pueden tener errores del 5% en agua con más de 100 ppm y hasta 10% si hay menos de esa cantidad. Con métodos gravimétricos los errores son notablemente inferiores.
- e) Análisis de campo. No realizado habitualmente, excepto por turbidimetría.
- f) Toma de muestras. No se precisan precauciones especiales.

## 3. Iones Bicarbonato y Carbonato, $\text{CO}_3 \text{H} -$ y $\text{CO}_3 =$

- 
- a) Características Químicas. Existe una profunda relación entre el  $\text{CO}_2$  gas,  $\text{CO}_2$  disuelto,  $\text{CO}_3\text{H}^-$ ,  $\text{CO}_3^{=}$  y pH. Estos iones comunican alcalinidad al agua. Sentido que dan capacidad de consumo de ácido al crear una solución tampón. No son oxidables ni reducibles en aguas naturales. Se pueden precipitar con mucha facilidad como  $\text{CO}_3\text{Ca}$ .
  - b) Concentraciones. El ion bicarbonato  $\text{CO}_3\text{H}^-$  varía entre 50 y 350 ppm en aguas dulces pudiendo llegar a veces hasta 800 ppm. El agua de mar contiene alrededor de 100 ppm. El ion carbonato  $\text{CO}_3^{=}$  está en concentraciones mucho menores que el  $\text{CO}_3\text{H}^-$  y si el  $\text{pH} < 8.3$  se le considera cero. En aguas alcalinas con  $\text{pH} > 8.3$  puede haber cantidades importantes, hasta 50 ppm en algunas aguas naturales. El agua de mar tiene menos de 1 ppm.
  - c) Nocividad y Toxicidad. No presenta problemas de toxicidad. Las aguas bicarbonatadas sódicas son malas para riego, debido a la fijación de Na en el terreno y creación de un medio alcalino. El equilibrio entre  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_3\text{H}^-$ ,  $\text{CO}_3^{=}$  y pH es determinante de la corrosividad o incrustabilidad.
  - d) Análisis de Laboratorio. Se determina en función de la alcalinidad del agua, con error menor de 1 ó 2 %.
  - e) Análisis de Campo. Se realiza a veces determinando la alcalinidad del agua.
  - f) Toma de Muestras. Debe realizarse con cuidado para evitar pérdida de  $\text{CO}_2$ . Debe protegerse de cambios de temperatura y analizar lo antes posible. Las botellas deben ir bien cerradas y llenas a tope. En general los valores de  $\text{CO}_3\text{H}^-$  medidos en laboratorio son algo menores que los reales.

#### 4. Ion Nitrato, $\text{NO}_3^-$ .

- a) Características Químicas. Sales muy solubles y por lo tanto es muy difícilmente precipitable. Aunque tiene tendencia a ser estable, aún en medios reductores, puede pasar a  $\text{N}_2$  o  $\text{NH}_4^+$ , y excepcionalmente a  $\text{NO}_2^-$ . La mayoría de compuestos nitrogenados pasan a  $\text{NO}_3^-$  en medio oxidante, aunque el  $\text{NH}_4^+$  puede perderse en parte como  $\text{N}_2$ . El terreno puede fijar el  $\text{NO}_3^-$ , en especial en suelo vegetal.
- b) Concentraciones. Normalmente entre 0.1 y 10 ppm pero en aguas solucionadas puede llegar a 200 ppm y en algún caso hasta 1000 ppm. El agua del mar tiene alrededor de 1 ppm o menos.

- c) Nocividad y Toxicidad. Concentraciones elevadas en agua de bebida puede producir cianosis en los niños y comunican corrosividad (oxidaciones) al agua y producen interferencias en fermentaciones.
- d) Análisis de Laboratorio. No siempre se determina, pues en general es escaso y su análisis es complicado y lento. Se determina colorimétricamente a través del ácido fenildisulfónico. En aguas salinas puede determinarse convirtiendo el nitrato en amonio con polvo de Al o Zn. Se pueden admitir errores de 2%.
- e) Análisis de Campo. No suele realizarse
- f) Toma de Muestras. No se precisan precauciones especiales excepto quizás en aguas que contienen  $\text{NH}_4^+$  para evitar su oxidación y que aparezca como  $\text{NO}_3^-$ . El  $\text{NO}_3^-$  y el  $\text{NH}_4^+$  son incompatibles en concentraciones elevadas.

## 5. Sílice, $\text{SiO}_2$

- a) Características Químicas. La mayoría de la sílice está como  $\text{SiO}_4\text{H}_4$ , en parte disuelta y en parte coloidal, y solo una pequeña parte está ionizada ( $\text{SiO}_3\text{H}_3^-$ ) a pH normales, las aguas fuertemente básicas pueden tener cantidades importantes de sílice iónica, pero son muy raras en la naturaleza. La sílice iónica contribuye algo a la alcalinidad del agua. El  $\text{CO}_2$  juega un importante papel al evitar que el pH suba, limitando así la solubilidad de la sílice. El cuarzo y sus formas alotrópicas son muy poco solubles pero la sílice amorfa lo es mucho más (50 ppm a  $0^\circ\text{C}$ , 160 ppm a  $25^\circ\text{C}$  y 400 ppm a  $100^\circ\text{C}$  en agua pura).
- b) Concentraciones. La mayoría de las aguas naturales tienen entre 1 y 40 ppm de  $\text{SiO}_2$  pudiendo llegar hasta 100, en especial en aguas bicarbonatadas sódicas. En aguas muy básicas se puede llegar hasta 1000 ppm.
- c) Nocividad y Toxicidad. El mayor inconveniente está relacionado con su incrustabilidad en calderas y calentadores.
- d) Análisis de Laboratorio. Se suele realizar por colorimetría por el método llamado del azul de molibdeno (silicomolibdato) con un error menor del 2%. El método gravimétrico se emplea poco. El análisis de un agua con más de 100 ppm puede presentar inconvenientes.

- e) Análisis de Campo. No realizado habitualmente.
- f) Toma de Muestras. Conviene evitar cambios de pH importantes y utilizar botellas de plástico o vidrio Pirex. Los vidrios normales pueden aportar algo de sílice soluble si no se los mantiene antes uno o dos días con agua destilada.

### 3.6.2.1.2 Cationes y sustancias catiónicas.

#### 1. Ión Sodio, Na<sup>+</sup>

- a) Características Químicas. Solubilidad muy elevada y muy difícil de precipitar. Es afectado fácilmente por el cambio de bases. Suele ir asociado al ion Cl<sup>-</sup>, aunque no siempre sucede así. Las aguas naturales con elevados contenidos de Na<sup>+</sup> suelen tener contenidos elevados en F<sup>-</sup>.
- b) Concentraciones. Entre 1 y 150 ppm en aguas dulces, no siendo raro encontrar contenidos mucho mayores, hasta varios miles de ppm. El agua de mar tiene alrededor de 10 000 ppm, siendo un límite que rara vez se sobrepasa el de 500 meq/l (≈110 000 ppm).
- c) Nocividad y Toxicidad. Las aguas con concentraciones elevadas en Sodio son perjudiciales a las plantas al reducir la permeabilidad del suelo; son especialmente nocivas si las concentraciones de Ca y Mg son bajas. Aguas con contenidos elevados en CO<sub>3</sub>HNa originan problemas de espumas en calderas.
- d) Análisis de Laboratorio. Actualmente se determina mediante un fotómetro de llama, con un error menor de 1 a 3 %, pero se precisa disponer de este instrumento, el cual es caro.
- e) Análisis de Campo. No se realiza
- f) Toma de Muestras. No se precisan precauciones especiales

#### 2. Ion Potasio, K<sup>+</sup>

- a) Características Químicas. Solubilidad muy elevada y difícil de precipitar. Es afectado fácilmente por el cambio de bases y es absorbido de forma muy poco reversible por las arcillas en formación (paso de montmorillonita a illita), para formar parte de su estructura, circunstancia que lo diferencia

notablemente del  $\text{Na}^+$ . Por ello las aguas naturales, a pesar de la mayor abundancia de K en muchas rocas, tiene mucho menos  $\text{K}^+$  que  $\text{Na}^+$  excepto en las muy diluidas.

- b) Concentraciones. Entre 0.1 y 10 ppm en aguas dulces. Extraordinariamente se pueden tener algunos cientos de ppm y sólo muy raramente se pueden tener salmueras de hasta 100 000 ppm. El agua de mar tiene alrededor de 400 ppm
- c) Nocividad y Toxicidad. No presenta problemas especiales a las concentraciones habituales y es un elemento vital para las plantas.
- d) Análisis de Laboratorio. Actualmente se le determina con cierta frecuencia por fotometría de llama con un error del 3 ó 10%.
- e) Análisis de Campo. No se realiza
- f) Toma de Muestras. No se precisan precauciones especiales.

### 3. Ion Calcio $\text{Ca}^{++}$

- a) Características Químicas. Sales desde moderadamente solubles a muy solubles. Es muy fácil de precipitar como  $\text{CO}_3\text{Ca}$ . Su química va muy asociada a la de los iones  $\text{CO}_3\text{H}^-$  y  $\text{CO}_3^{=}$  en muchas aguas naturales, pudiéndose precipitar y disolver con facilidad al cambiar el pH o la presión parcial de  $\text{CO}_2$ . Puede ser afectado por cambio de bases.
- b) Concentraciones. Entre 10 y 250 ppm en aguas dulces pudiendo llegar a 600 ppm en aguas selenitosas. El agua del mar contiene alrededor de 400 ppm. Excepcionalmente se puede tener 50 000 ppm en salmueras de  $\text{Cl}_2\text{Ca}$ .
- c) Nocividad y Toxicidad. El mayor inconveniente va asociado al aporte de dureza y producción de incrustaciones.
- d) Análisis de Laboratorio. Valoración complexométrica con ácido etilendiaminotetracético (EDTA) o valorando oxalato residual con  $\text{MnO}_4\text{K}$ . También puede realizarse por fotometría de llama pero es poco usual. La precisión del análisis es de 2 a 5 % si hay más de 10 ppm, y entre 5 y 10% si hay menos.



- e) Análisis de Campo. Se realiza a veces por valoración complexométrica utilizando bureta o cuentagotas. También a veces se emplean métodos turbidimétricos.
- f) Toma de Muestras. Se debe evitar el escape de gases, llenando bien la botella y cerrándola. Evitar cambios de temperatura. Puede precipitarse como  $\text{CO}_3\text{Ca}$ . Puede estabilizarse acidulando por separado una porción de la muestra.

#### 4. Ion Magnesio, $\text{Mg}^{++}$

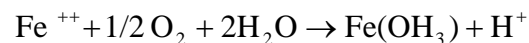
- a) Características Químicas. Propiedades similares a las del ion calcio pero más soluble y algo más soluble y algo más difícil de precipitar.
- b) Concentraciones. Entre 1 y 100 ppm en aguas dulces, pudiendo llegar a veces a algunos miles de ppm en aguas salinas o salmueras. El agua de mar contiene 1200 ppm.
- c) Nocividad y Toxicidad. Propiedades laxantes y de sabor amargo al agua de bebida si hay algunos centenares de ppm. Contribuye a la dureza y además de pH elevado puede dar  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  incrustante.
- d) Análisis de Laboratorio. Valoración complexométrica con EDTA indirecta ( $\text{Mg} = \text{dureza} - \text{Ca}$ ), rara vez realizada directamente. No es fácil tener métodos substitutivos. El error de análisis puede ser del 5 al 10%.
- e) Análisis de Campo. Se determina como dureza menos calcio
- f) Toma de Muestras. En principio las mismas precauciones indicadas para el  $\text{Ca}^{++}$ , pues aunque no suele precipitar, si se precipita  $\text{Ca}^{++}$  entre el análisis del mismo y la determinación de la dureza, se tiene un error que puede ser importante y la relación  $\text{Mg}^{++}/\text{Ca}^{++}$  puede quedar notablemente aumentada, desvirtuando las consideraciones geoquímicas que se realicen.

#### 5. Iones relacionados con el Hierro

- a) Características Químicas. Su química es relativamente compleja pues puede existir en los estados de valencia +2 y +3. La estabilidad de los iones  $\text{Fe}^{++}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})^{++}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})^+$ , en relación con el  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  y  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  precipitados o coloidales, depende del pH, Eh y composición de la solución. Ciertas sustancias orgánicas y algunas inorgánicas pueden actuar formando

complejos, que aún complican más el comportamiento. Los trabajos de Hem (1962) han llevado a establecer un conjunto de diagramas de estabilidad tales como los que se muestran en las figuras 4.1 y 4.2.

En la figura 4.1 se dan los límites de los campos de estabilidad donde puede verse en general que las aguas subterráneas normalmente tienen disuelto  $\text{Fe}^{++}$ , y a veces  $\text{FeOH}^+$  y a un pH algo elevado prácticamente no existe hierro disuelto. La figura 4.2 muestra las curvas de solubilidad del  $\text{Fe}^{++}$  dentro de ese campo para una cierta composición del agua. La oxidación del  $\text{Fe}^{++}$  se produce según:

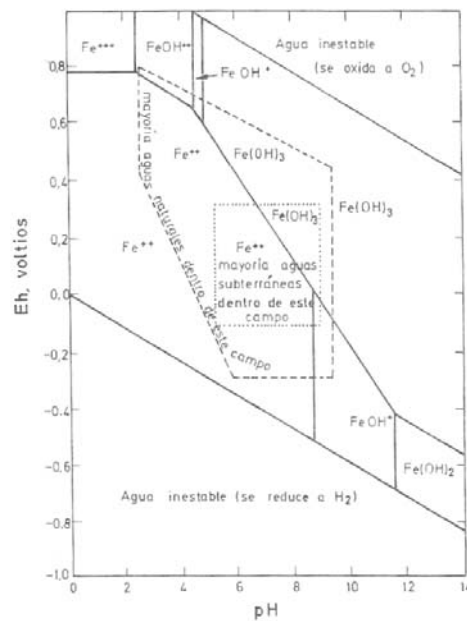


sea disminuyendo el pH. El  $\text{CO}_3\text{H}^-$  juega el importante papel de tampón, permitiendo que prosiga la reacción y liberándose  $\text{CO}_2$ .

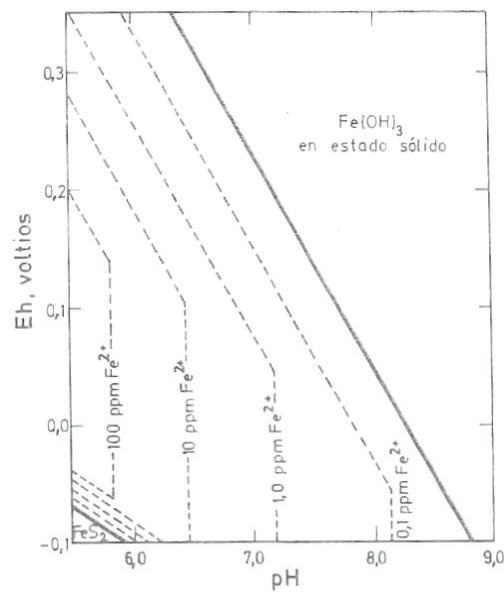
Ciertos microorganismos promueven medios reductores que favorecen la formación de  $\text{Fe}^{++}$ , mientras otros utilizan la energía de paso  $\text{Fe}^{++}$  a  $\text{Fe}^{+++}$  en sus procesos vitales y dan lugar a precipitaciones gelatinosas; estos crecimientos bacterianos se favorecen en la oscuridad y aguas con exceso de  $\text{O}_2$  y abundante  $\text{CO}_2$

El Fe puede estabilizarse con compuestos orgánicos tales como los ácidos oxálicos, tartárico, cítrico y también con polifosfatos.

- b) Concentraciones.  $\text{Fe}^{++}$  entre 0 y 10 ppm, siendo de menos de 0.5 ppm en aguas aireadas. Con H entre 5 y 8 rara vez se llega a 50 ppm. En aguas muy ácidas se puede llegar a 100 ppm en  $\text{Fe}^{++} + \text{Fe}^{+++}$ . Las aguas alcalinas sólo tienen muy pequeñas cantidades de  $\text{Fe}^{++}$  o  $\text{Fe}(\text{OH})^+$
- c) Nocividad y Toxicidad. Produce manchas de herrumbre y depósitos orgánicos fangosos con  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , y es en general molesto en aguas industriales. Puede originar incrustaciones duras. Más de 5 ppm pueden ser tóxicas para las plantas. Más de 5 ppm son nocivas o molestas en general



**Figura 3.1** Campos de estabilidad de las soluciones acuosas de los sistemas férrico-ferrosos. Se indican los campos en que se sitúan la mayoría de las aguas naturales y las aguas subterráneas.



**Figura 3.2** Porción del campo de estabilidad del sistema férrico-ferroso en agua que contiene 100 ppm de  $\text{CO}_3\text{H}^-$  y 10 ppm de  $\text{SO}_4^{2-}$ . En estas condiciones existen iones  $\text{Fe}^{2+}$ .

- d) **Análisis de Laboratorio.** Se le determina cuando se sospecha de su existencia. El método más usual es el de colorimetría con biperidina y se puede diferenciar,  $Fe^{++}$  y  $Fe^{+++}$ . Se le determina tanto la forma iónica como la coloidal o en suspensión fina, y por eso se llama a veces hierro total. Es muy complicado diferenciar la parte iónica y la parte coloidal y en suspensión fina. Unas veces conviene una buena filtración previa y otras una reducción del precipitado.
- e) **Análisis de Campo.** No se realiza habitualmente.
- f) **Toma de Muestras.** Es preciso tomar precauciones para evitar oxidación y cambios de pH. En ocasiones puede convenir separar una pequeña fracción de la muestra, filtrarla y acidificarla a fin de estabilizar el Fe disuelto (Custodio 1976).

### **3.7.- EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN.**

Según sea el uso del agua, se han adoptado normas de calidad que fijan límites a ciertos contenidos considerados ofensivos. La calidad a través de los contenidos de elementos y sustancias en el agua, se puede conocer si se lleva a cabo un examen minucioso que den resultados cualitativa y cuantitativamente de cada uno de ellos.

De aquí que la evaluación de la contaminación sólo se concibe si se especifica el uso o destino del agua, y se llevan a cabo los análisis necesarios para conocer sus contenidos.

Entre los diferentes análisis existentes para determinar los parámetros que definen el grado de contaminación se encuentran los físicos, químicos y biológicos.

Es importante que al analizar las aguas contaminadas se determinen los constituyentes que puedan dificultar su tratamiento así como los que faciliten la elección del proceso más conveniente. (Henry Glynn 1999)

## CAPITULO 4 HIDROGEOQUÍMICA

### 4.1 EL AGUA COMO SUSTANCIA QUÍMICA PURA

La molécula del agua está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, siendo por lo tanto su fórmula  $H_2O$ . Se trata de una molécula de enlaces covalentes y debido a que es algo asimétrica y a su fuerte polaridad, el agua posee propiedades singulares, tanto en el aspecto físico como el químico.

Físicamente se caracteriza porque es un líquido entre 0 y 100 °C a presión atmosférica, con un calor específico muy elevado y calores de vaporización y congelación también muy elevados. Su tensión superficial es la más elevada conocida y moja con facilidad la mayoría de las sustancias sólidas naturales.

El agua líquida es un cuerpo muy débilmente iónico, efectuándose una disociación molecular de acuerdo con la reacción simplificada:



Su conductividad eléctrica es muy baja, del orden de 0.45  $\mu S/cm$  a 18 °C, pero crece enormemente al contener pequeñas cantidades de impurezas, pudiendo llegar a ser un buen conductor eléctrico cuando contiene sustancias iónicas disueltas. El agua destilada puede tener entre 0.5 y 5  $\mu S/cm$  debido a pequeñas impurezas y gases disueltos.

A cualquier temperatura se cumple que:

$$[H^+] \cdot [OH^-] = K$$

en la que [ ] indica la concentración de molal y K es una constante, cuyo valor es de 10<sup>-14</sup> a 25 °C. Si el agua es pura, el equilibrio iónico exige que:  $[H^+] = [OH^-]$ . La concentración en iones de hidrógeno  $[H^+]$  es una cifra muy importante, pero para evitar manejar cifras muy pequeñas, se emplea el pH que se define como:

$$pH = - \log [H^+]$$

Aunque más exactamente debe tomarse como:

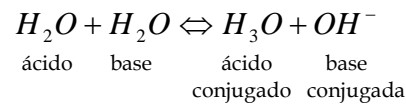
$$pH = - \log \langle H^+ \rangle$$

Indicando < > la actividad. Para el agua pura 25°C es pH = 7.

El agua es una sustancia químicamente muy activa que tiene gran facilidad de disolver y reaccionar con otras sustancias, tanto inorgánicas como orgánicas. Su poder ionizante y su constante dieléctrica son muy elevados, y es el disolvente más empleado y difundido.

#### 4.1.1 Ionización del Agua

Como ya sabemos, de acuerdo con la naturaleza de la otra sustancia reaccionante, el agua puede actuar ya sea como ácido o como base. El agua misma se ioniza débilmente y de manera reversible, como se muestra en la siguiente ecuación:



La constante de disociación K está determinada por:

$$K = \frac{[H_3O^+] \cdot [OH^-]}{[H_2O]} = 1.8 \times 10^{-16} \text{ mol/L (a } 25^\circ\text{C)}$$

la cual se simplifica usualmente a:

$$[H_3O^+] \cdot [OH^-] = K[H_2O]$$

en donde:

$$[H_2O] = \frac{1000\text{g/L}}{18\text{g/mol}} = 55.5\text{mol/L}$$

de modo que:

$$K_w = 1.8 \times 10^{-16} \times 55.5 = 1.0 \times 10^{-14}$$

A la constante Kw se le conoce como la **constante del producto iónico** del agua.

Al igual que con las constantes de disociación de ácido  $K_a$ , la temperatura afecta a  $K_w$ , la constante del producto iónico del agua, como se muestra en la siguiente tabla:

T (°C)	$K_w$
0	$1.1 \times 10^{-15}$
10	$2.9 \times 10^{-15}$
20	$6.8 \times 10^{-15}$
25	$1.0 \times 10^{-14}$
30	$1.5 \times 10^{-14}$
100	$7.0 \times 10^{-13}$

**Tabla 4.1** Constante de producto iónico del agua

La disociación a 100 °C es más de dos órdenes de magnitud mayor que a 0 °C

#### 4.1.2 El sistema carbónico

El sistema ácido-base conjugada más importante en interacciones aire / agua es el carbónico, el cual controla el pH de la mayor parte del agua natural y se compone de las siguientes especies:

Dióxido de carbono,  $CO_2$ , en forma gaseosa,  $CO_2(g)$ , o disuelto en agua  $CO_2(ac)$

Ácido carbónico,  $H_2CO_3$

Ión bicarbonato,  $HCO_3^-$

Ión carbonato,  $CO_3^{2-}$

Sólidos a base de carbonatos, principalmente de calcio y de magnesio

Entre los ejemplos que tienen importancia en el sistema carbónico en el campo ambiental se cuentan los siguientes:

La producción de  $CO_2$ , en la respiración biológica

El consumo de  $CO_2$  en la fotosíntesis

El intercambio de  $CO_2$  entre aire y agua

La disolución de carbonatos minerales, principalmente  $CaCO_3$  y  $MgCO_3$ , por las aguas subterráneas

La capacidad amortiguadora de las aguas naturales, que principalmente provienen del sistema carbónico (acidez y alcalinidad)

Ablandamiento de aguas

Diversos procesos de tratamiento de agua y de aguas residuales

El intercambio entre las formas sólida y disuelta del  $CaCO_3$  ( $MgCO_3$ ) en el fondo de los lagos.

Es difícil establecer la naturaleza del sistema carbónico, el cual puede participar en equilibrios homogéneos en solución, así como en equilibrios homogéneos aire / agua y agua / sólido.

Snoeynic y Jenkins (1980) han identificado cuatro sistemas:

- 1.- Un sistema abierto sin sólidos presentes
- 2.- Un sistema abierto con un sólido presente
- 3.- Un sistema cerrado sin sólidos presentes
- 4.- Un sistema cerrado con un sólido presente

#### 4.1.3 Capacidad amortiguadora de las aguas naturales (soluciones buffer)

El conocimiento del sistema carbónico nos ayuda a entender cómo es que la mayor parte de las aguas naturales son capaces de resistir los cambios de pH cuando se agrega o se forma material ácido o alcalino. En las aguas naturales esta capacidad amortiguadora es atribuible sobre todo a la presencia de especies del sistema carbónico. Las bases como  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{OH}^-$  confieren al agua la capacidad para resistir cambios de pH cuando se agrega un ácido fuerte. Los ácidos como  $\text{H}_2\text{CO}_3$  ( $\text{CO}_2$ ),  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{H}_3\text{O}^+$  proporcionan amortiguamiento contra la adición de bases fuertes.

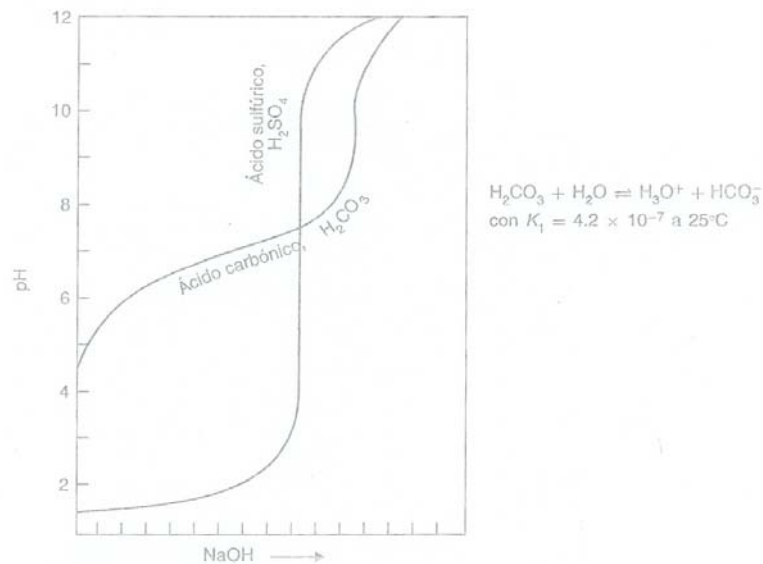


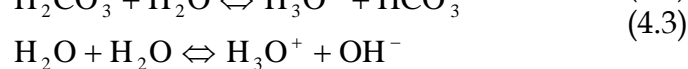
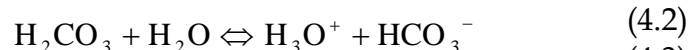
Figura 4.1 Curvas de titulación para ácido carbónico y ácido sulfúrico

Un amortiguador o (o buffer) es una sustancia en solución que ofrece resistencia a los cambios de pH cuando se agrega a la solución o se forma en ella un material ácido o alcalino. En el intervalo de pH de 6 a 9, que es característico de la mayor parte de las aguas naturales, sólo los ácidos y bases débiles tienen esta capacidad. La figura 4.1 muestra lo que sucede cuando se adiciona una base fuerte (NaOH) a un ácido débil ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) y a un ácido fuerte ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). La parte sesgada de la curva de



titulación de ácido carbónico nos muestra que se produce amortiguamiento entre los valores de pH de 6 a 8.5, en tanto que lo empinado de la curva de titulación de ácido sulfhídrico indica la ausencia de capacidad amortiguadora en este intervalo de pH.

En agua natural (con pH alrededor de 7) que contiene CO<sub>2</sub> libre y alcalinidad de bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), las reacciones del CO<sub>2</sub> y el HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (ecuaciones 4.1 y 4.2) y la disociación del agua misma (ecuación 4.3) ilustran cómo se produce el amortiguamiento. Estas ecuaciones se expresan como:



Si agregamos una pequeña cantidad de NaOH, material bastante alcalino (esto es, agregamos OH<sup>-</sup>), entonces, considerando que  $[\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-] = K_w = 10^{-14}$  advertiremos que un aumento de OH<sup>-</sup> causa una disminución de [H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>]. Sin embargo, una reducción de [H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>] desplaza la ecuación (4.2), y por consiguiente la ecuación (4.1) hacia la derecha, con lo cual se produce más [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>] y [H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>] y se reduce la concentración de CO<sub>2</sub>. El resultado neto es un ligero aumento de pH. Esta adición de iones hidroxilo puede continuar sin que se produzca un aumento notable de pH, situación que cambia cuando todo el CO<sub>2</sub> libre se ha convertido en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y se alcanza un pH cercano a 8.3. De forma similar, si agregamos una pequeña cantidad de ácido fuerte, por ejemplo HCl, la concentración de H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> aumenta. Esto hace que las ecuaciones se desplacen hacia la izquierda; el resultado final es un aumento en la cantidad de CO<sub>2</sub> libre y un pH ligeramente menor. Esta capacidad amortiguadora de las aguas naturales es una propiedad muy importante porque impide que ocurran grandes cambios de pH en el agua cuando se agregan a ella contaminantes ácidos o alcalinos. Muchas bacterias y otras formas de vida acuática tienen un intervalo de tolerancia al pH relativamente estrecho y se destruirían si no contaran con la protección del sistema carbónico.

## 4.2 EL AGUA EN LA NATURALEZA COMO AGENTE FÍSICO-QUÍMICO

### 4.2.1. El agua como disolvente

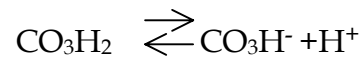
La gran capacidad de disolución del agua y su elevada reactividad hace que el agua natural contenga gran cantidad de sustancias disueltas, que entra a formar parte de la composición de muchas sustancias (hidratos, agua de formación, etc.). El agua puede disolver tanto gases como, líquidos y sólidos. El mecanismo de disolución puede ser unas veces un mecanismo como la disolución de nitrógeno o de azúcar, otras veces un mecanismo de simple ionización como la disolución de sal común, pero en otras ocasiones a veces se trata de mecanismos mucho más complejos en los que intervienen reacciones químicas con la propia agua (disolución de NH<sub>3</sub>) o con el agua y otras sustancias disueltas en la misma (disolución de caliza en presencia

de CO<sub>2</sub>, formación de complejos como la disolución de metales pesados con ayuda de ácidos húmicos o ciertas sustancias orgánicas, etc.) o a través de alteraciones previas producidas por el agua en materiales en sí solubles (ataque de silicatos).

#### 4.2.2. Forma en que se encuentran las sustancias disueltas

Las sustancias disueltas pueden estar en forma molecular o en forma iónica, pero en las aguas subterráneas la forma iónica es la más importante. Normalmente se trata de iones simples tales como los cationes Na<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, Fe<sup>++</sup> o aniones simples como Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>=</sup>. Menos frecuentemente existen iones complejos, por ejemplo de Fe u otros metales pesados, formados a expensas de sustancias orgánicas o incluso de ácido carbónico; estos complejos pueden ser tanto aniónicos como catiónicos.

Parte de las sustancias disueltas están en forma molecular no iónica, con frecuencia en equilibrio con especies iónicas. Así el ácido carbónico mantiene el equilibrio.



Otras sustancias están parcialmente disociadas dando origen a iones tales como CO<sub>3</sub>H<sup>-</sup>, SH<sup>-</sup>, SiO<sub>4</sub>H<sub>3</sub><sup>-</sup>, etc., en equilibrio con la forma molecular y la forma totalmente disociada, o con mayor grado de disociación.

Cuánto más concentrada está un agua en una sal, mayor es la proporción de la sal no ionizada. Para los iones de carácter débiles grado de disociación es función del pH de la disolución, el cual a su vez depende del resto de sustancias disueltas; tal sucede con el CO<sub>3</sub><sup>=</sup>, CO<sub>3</sub>H<sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, etc.

En aguas subterráneas naturales clasificadas como dulces (con menos de 1000 mg/l de sustancias disueltas), la mayoría de las sustancias disueltas están totalmente ionizadas (la principal excepción es la sílice en forma de SiO<sub>4</sub>H<sub>4</sub>), y por ello se considera en estado iónico.

#### 4.2.3. Expresión de concentraciones

La concentración de los diferentes iones y sustancias disueltas puede expresarse de diferentes maneras.

a) Expresiones en peso

Parte por millón (ppm). Es el gramo en un millón de gramos o sea el mg/kg. Es la forma más usual. Variantes de la misma son la parte por cien mil (ppc) y la llamada parte por billón (ppb) (1 billón = 10<sup>12</sup>).

Miligramo por litro (mg/l). Se entiende por litro de disolución. Si la concentración total de sales no supera 5000 ppm la densidad del agua es muy aproximadamente 1 y por lo tanto 1 ppm = 1 mg/l. Para concentraciones totales mayores, la densidad es algo superior a 1 y la medida

en ppm es algo menor que en mg/l. Sin embargo los errores son pequeños, aún para el agua de mar.

También se emplea con frecuencia el g/l = 1000 mg por litro y el microgramo por litro ( $\mu\text{g/l}$ ) =  $10^{-3}$  miligramos por litro.

b) Expresiones químicas.

En las expresiones químicas los pesos de sustancias disueltas se sustituyen por el número de moles o el número de equivalentes.

Número de Moles = peso de la sustancia / peso molecular

Número de Equivalentes = Peso de la sustancia / Peso equivalente

Peso Equivalente = Peso Molecular / Número de Electrones o Valencias en Juego

Miliequivalentes por litro de disolución (meq/l), de disolución que coincide aproximadamente con los equivalentes por millón de gramos (epm). Es muy empleada en análisis químicos por permitir comparar directamente iones. El número de equivalentes por litro se llama normalidad.

Molalidad o Moles litro de disolución (moles/l), de gran interés en el estudio de reacciones químicas.

Molalidad o Moles por kg de agua pura, que tiene interés cuando en los procesos es estudio se producen cambios de densidad o variaciones importantes en el contenido de agua.

Vamos a ilustrar mejor estos conceptos con el siguiente ejemplo:

Determinar el número de meq/l y molaridad de una solución diluida que contiene 150 ppm del ión  $\text{SO}_4^{2-}$  con vistas a reacciones de disolución:

Peso molecular del ión  $\text{SO}_4^{2-}$  =  $32 + (4 \times 16) = 96$

Peso equivalente del ión (tiene valencia 2) =  $96/2 = 48$

$150 \text{ ppm} = 150 \text{ mg/l} = 150/96 = 1.56 \text{ milimoles / litro} = 150/48 = 3.12 \text{ meq/l}$

#### 4.2.4. Fuerza Iónica

La fuerza iónica designada por  $\mu$ , expresa el contenido iónico de una solución y se define por:

$$\mu = \frac{1}{2} \sum Z_i^2 \cdot C_i = \frac{1}{2000} \sum Z_i \cdot C_i$$

En la que el signo de suma se extiende a todos los iones presentes,  $Z_i$  es la carga del ión a concentración molal  $C_i'$  o sea  $C_i$  meq / l para soluciones no excesivamente concentradas.

Es un valor de gran importancia en el estudio de soluciones, en especial de soluciones concentradas. Se muestra un ejemplo a continuación:

Hallar la fuerza iónica de una solución que contiene 200 mg de ClNa y 200 mg de SO<sub>4</sub> Mg por litro.

$$\text{Peso equivalente ClNa} = 35.5 + 23 = 58.5$$

$$\text{Peso equivalente SO}_4 \text{ Mg} = (32 + 4 \times 16 + 24) / 2 = 60$$

meq/l de Cl-	200/58.5 = 3.41
meq/l de Na+	200/58.5 = 3.41
meq/l de SO <sub>4</sub> =	200/60 = 3.33
meq/l de Mg <sup>++</sup>	200/60 = 3.33

$$\mu = \frac{1}{200} [(1 \times 3.41) + (1 \times 3.41) + (2 \times 3.33) + (2 \times 3.33)] = 0.010$$

#### 4.2.5. Actividad

Los iones contenidos en una disolución no son totalmente libres de moverse (Ley de Debye y Hückel) debido a diferentes razones tales como la incompleta ionización y los efectos de las moléculas de agua que tienen adheridas. En el estudio de reacciones químicas conviene sustituir la molalidad, simbolizada por [ ], por la actividad simbolizada por < > pasándose de una a otra mediante el coeficiente de actividad  $f$ .

$$\text{Actividad} = f \cdot \text{molalidad}$$

Teniéndose que para soluciones no demasiado concentradas se cumple para el ión  $i$ :

$$-\log f_i = A \cdot Z_i^2 \sqrt{\mu} \quad (\mu < 0.02)$$

y por lo tanto depende de la fuerza iónica. La constante  $A$ , varía con la temperatura y vale 0.51 a 25 °C. Para soluciones algo más concentradas debe corregirse la fórmula. Para valores de  $\mu < 0.1$  (6000 ppm ClNa), puede sustituirse  $\sqrt{\mu}$  por:

$$\frac{\sqrt{\mu}}{1 + \sqrt{\mu}}$$

Para soluciones muy diluidas es  $f_i \approx 1$  y la molalidad coincide aproximadamente con la molaridad y éstas con la actividad.

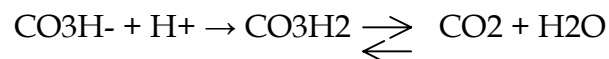
#### 4.2.6. Concentración de iones de Hidrógeno.

El pH ya ha sido explicado en el punto 4.1.

Las sustancias disueltas pueden alterar el equilibrio de disociación del agua, alterando por tanto el pH. La disolución de ClNa apenas modifica este equilibrio, pero la adición de ClH o NaOH lo modifica muy fuertemente por aporte de H<sup>+</sup> o OH<sup>-</sup> produciéndose un agua ácida o un agua básica respectivamente. Muchas sustancias neutras, al disolverse reaccionan con el agua destruyendo este equilibrio, tal como lo hace la calcita (CO<sub>3</sub>Ca), que da una solución algo básica o alcalina, pues se establece la reacción  $\text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+ \rightarrow \text{CO}_3\text{H}^-$ , quedando un exceso de OH<sup>-</sup>. Al producirse la reacción anterior aumenta el grado de disociación del agua, pero el resultado final es una menor concentración de H<sup>+</sup> y por tanto un pH mayor.

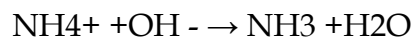
La existencia de ácidos o bases muy débilmente ionizados tienden a mantener casi constante el pH del agua cuando se intenta cambiarlo añadiendo pequeñas cantidades de ácidos o bases fuertes. A estas soluciones se les llama soluciones tampón y son relativamente frecuentes en la naturaleza debido a la presencia en el agua de CO<sub>2</sub> disuelto y CO<sub>3</sub>H<sup>-</sup>. Esto explica el porqué de la mayoría de las aguas subterráneas tiene el pH entre 6.5 y 8

Un agua que contiene en disolución ión bicarbonatado CO<sub>3</sub>H<sup>-</sup> reacciona de la siguiente forma al añadir unas gotas de ácido clorhídrico (aportación de H<sup>+</sup>):



Y tiende a mantener el pH al eliminar gran parte de los iones H<sup>+</sup> añadidos

Similarmente un agua que contiene en disolución ión amonio NH<sub>4</sub><sup>+</sup> reacciona de la siguiente forma al añadir más gotas de hidróxido sódico (aportación de OH<sup>-</sup>):



Tendiendo también a mantener el pH al eliminar la gran parte de los iones OH<sup>-</sup> añadidos.

#### 4.2.7. Reacciones de oxidación-reducción. Potencial redox

Entre los procesos de disolución de sales por el ataque del agua a los minerales son de gran interés aquellos procesos en los que intervienen sustancias que cambian o

pueden cambiar su estado de valencia, oxidándose unas veces y reduciéndose otras. Tales sistemas se llaman redox y están regidos por las condiciones de pH, presión, temperatura, etc. El potencial redox (Eh) del sistema mide la estabilidad de un ion en un nivel de oxidación determinado.

La existencia de oxígeno, materia orgánica, etc., son factores de gran importancia, en la evolución de y estabilidad de los sistemas redox. El potencial redox (Eh) mide esta tendencia a la oxidación-reducción y viene dado por la ecuación de Nernst:

$$E_h = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{\langle \text{Ox} \rangle}{\langle \text{Red} \rangle}$$

en la que:

- <Ox> Actividad Molar del ión oxidado
- <Red> Actividad Molar del ion reducido
- Eh Potencial redox en volts
- Eo Potencial en voltios del electrodo cuando <Ox> = <Red>
- R Constante de los gases = 8.32 joules/°K mol
- n Cambio de valencia en la reacción (eq - g/mol)
- F Número de Faraday = 96,500 coulombs/eq - g

A 25 °C es:

$$E_h = E_0 + \frac{0.059}{n} \log \frac{\langle \text{Ox} \rangle}{\langle \text{Red} \rangle}$$

Se conviene que para el electrodo de hidrógeno  $\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$  es  $E_0 = 0$ . Por comparación con este electrodo de hidrógeno se obtienen los valores de  $E_0$  para otras reacciones tales como:

Reacción	Eo en volts
$2\text{H}_2\text{O} = \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	1.23
$\text{NH}_4^+ + 3\text{H}_2\text{O} = \text{NO}_3^- + 10\text{H}^+ + 8\text{e}^-$	0.84
$\text{Fe}^{++} = \text{Fe}^{+++} + \text{e}^-$	0.77
$4 \text{OH}^- = \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	0.25
$\text{H}_2 = 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	0.00
$\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{OH}^- = \text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{e}^-$	-0.56

**Tabla 4.2** Valores de  $E_0$  para diferentes reacciones.

En estas reacciones de oxidación la concentración de  $\text{H}^+$  y por lo tanto de pH juega un papel muy importante y es preciso tenerlo en cuenta.

El hidrógeno puede estar en estado oxidado ( $\text{H}^+$ ) o reducido ( $\text{H}_2$ ) y el oxígeno también ( $\text{O} = \text{OH}^-$  reducido y  $\text{O}_2$  oxidado).

En el agua subterránea, los pH y Eh existentes son tales que no es posible ni la liberación de O<sub>2</sub> ni de H<sub>2</sub> procedentes de la descomposición del agua (Eh entre + 0.700 y -0.480 volts). Los posibles oxidantes presentes son el oxígeno tomado del aire, Fe<sup>+++</sup>, SO<sub>4</sub><sup>=</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Fe (OH)<sub>3</sub> entre otros y los posibles reductores son la materia orgánica, Fe<sup>++</sup>, S<sup>=</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Fe (OH)<sub>2</sub>, etc. Ciertas reacciones redox son favorecidas por la presencia de bacterias, sin las cuales no serían posibles, o transcurrirían muy lentamente.

#### 4.2.8. Intercambio iónico

Ciertas sustancias sólidas naturales se caracterizan por estar electrónicamente desequilibradas y logran la neutralidad rodeándose de cationes si las cargas libres son negativas (sustancias catiónicas) o de aniones si las cargas libres son positivas (sustancias aniónicas). Los iones retenidos lo están muy débilmente (iones hábiles) y al entrar en contacto con una disolución acuosa pueden ser reemplazados, valencia a valencia, por otros iones del mismo signo. Se trata de un fenómeno de adsorción, existiendo un equilibrio dinámico entre los iones adsorbidos y los del agua.

En la naturaleza abundan los minerales con capacidad de cambio iónico, pero sólo la presentan de forma acentuada algunas especies del grupo de las arcillas, tales como la caolinita, halloisita, montmorillonita, illita, vermiculita, etc., que son cambiadores catiónicos. La alúmina es cambiadora aniónica y los materiales orgánicos pueden ser aniónicos o catiónicos. Son catiónicos los ácidos húmicos, turba y lignito, madera, etc.

Cuanto mayor es el estado de división de esos materiales, mayor es la facilidad y rapidez con que se realiza el intercambio iónico, siendo máximo cuando se encuentran en estado coloidal.

Se denomina capacidad de intercambio iónico de un cierto material a los miliequivalentes que puede cambiar con el medio por cada 100g del mismo. La capacidad de intercambio para algunos minerales de la arcilla es:

Mineral	Capacidad de intercambio meq/100g
Vermiculita	100 a 150
Montmorillonita	80 a 150
Bentonita	Aprox. 100
Illita	10 a 40
Caolinita	3 a 15

**Tabla 4.3** Capacidad de intercambio para diferentes minerales.

Dado que en la naturaleza son mucho más abundantes las sustancias catiónicas, los cationes son los iones más afectados por el intercambio iónico y con frecuencia se considera sinónimo el cambio de fases (cationes) y el intercambio (o simplemente cambio) iónico.

Si, por ejemplo, se tiene una arcilla formada en ambiente de agua marina en la que domina el ión sodio, la arcilla tendrá la mayoría de sus valencias libres y cargas compensadas con  $\text{Na}^+$ . Si esta arcilla se traslada a un medio en el que dominan los iones calcio, cada par de  $\text{Na}^+$  que pasen a la solución en virtud de su labilidad y equilibrio dinámico con la misma serán reemplazados por un  $\text{Ca}^{++}$  que domina la solución (la posibilidad de que sean reemplazados por iones  $\text{Na}^+$  es muy pequeña, dada su baja concentración inicial) y así sucesivamente, de modo que la solución pierde  $\text{Ca}^{++}$  y gana  $\text{Na}^+$ , hasta que la elevación del contenido de iones de  $\text{Na}^+$  en la solución permite llegar a un equilibrio.

### 4.3 COMPOSICIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA.

En este apartado se darán de forma sinóptica, las características químicas, concentraciones usuales, comentarios sobre la nocividad y toxicidad, iones y sustancias disueltas en el agua. Se definirán, se darán unidades usuales, valores, el modo de determinación, y los efectos sobre la calidad del agua, según las características físicas, fisicoquímicas y químicas que se consideran más frecuentemente en las aguas subterráneas.

#### 4.3.1 Sustancias que se encuentran disueltas en agua natural subterránea. Iones fundamentales y menores.

En el agua subterránea natural, la mayoría de las sustancias disueltas se encuentran en estado iónico. Uno de estos cuantos iones se encuentran presentes casi siempre y su suma representa casi la totalidad de los iones disueltos; estos son los iones fundamentales y sobre ellos descansará la mayor parte de los aspectos químicos e hidrogeoquímicos, los cuales se verán más adelante.

Estos iones fundamentales son:

<b>Iones Fundamentales</b>	Aniones	Cloruro	$\text{Cl}^-$
		Sulfato	$\text{SO}_4 =$
		Bicarbonato	$\text{CO}_3\text{H}^-$
	Cationes	Sodio	$\text{Na}^+$
		Calcio	$\text{Ca}^{++}$
		Magnesio	$\text{Mg}^{++}$

Es frecuente que los aniones de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y carbonato ( $\text{CO}_3 =$ ), y el catión potasio ( $\text{K}^+$ ) se consideren dentro del grupo de iones fundamentales aún cuando en



general su proporción es pequeña. Otras veces se incluye además el ión ferroso ( $\text{Fe}^{++}$ ).

Entre las sustancias disueltas poco ionizadas o en estado coloidal son importantes los ácidos y aniones derivados de la sílice ( $\text{SiO}_2$ ).

El resto de los iones y de las sustancias disueltas se encuentran por lo general en cantidades notablemente más pequeñas que las anteriores, y se llaman *iones menores* a aquellos que se encuentran habitualmente formando menos del 1% del contenido iónico total, y *elementos traza* a aquellos que, aunque presentes, están por lo general en cantidades difícilmente medibles por medios químicos usuales.

Los iones menores más importantes son, además de los ya citados  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{=}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Fe}^{++}$ , el  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{Sr}^{++}$ . Suelen estar en concentraciones entre 0.01 y 10 ppm. En concentraciones entre 0.0001 y 0.1 ppm, suelen estar los iones menores:

Aniones:  $\text{Br}^-$ ,  $\text{S}^{=}$ ,  $\text{PO}_4^{-3}$ ,  $\text{BO}_3\text{H}_2^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{I}^-$ , etc.

Cationes:  $\text{Fe}^{+++}$ ,  $\text{Mn}^{++}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{+++}$ , etc.

Los iones metálicos derivados del As, Sb, Cr, Pb, Cu, Zn, Ba, V, Hg, U, etc., a veces están en cantidades medibles, pero en general son elementos traza. El resto de los posibles iones están casi siempre en cantidades menores que 0.0001 ppm

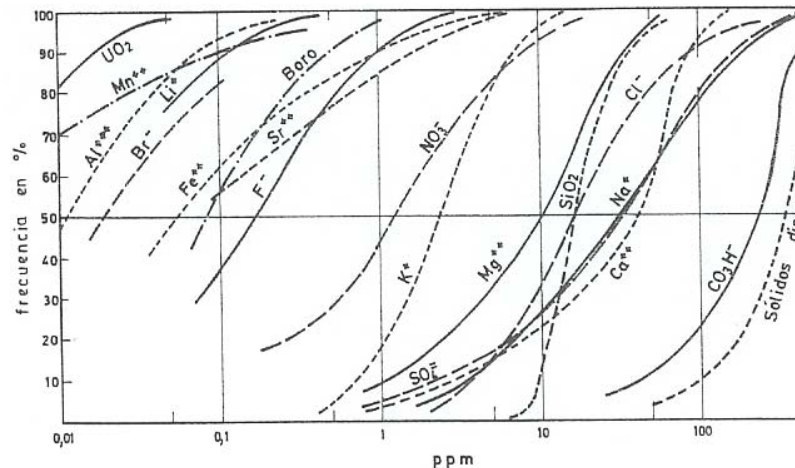
Aunque los iones menores y los elementos traza no suelen determinarse en análisis habituales, salvo circunstancias especiales, no por ello dejan de tener interés, en especial en estudios de origen y relaciones entre aguas y prospección minera.

Lo expuesto anteriormente se refiere a los casos más frecuentes de aguas naturales; en aguas contaminadas las circunstancias pueden cambiar notablemente.

Las aguas subterráneas llamadas dulces contienen como máximo 1000 o quizá 2000 ppm de sustancias disueltas; si el contenido es mayor, por ejemplo hasta 5000 ppm se llaman aguas salobres y hasta 40 000 se llaman aguas saladas. No es raro encontrar aguas que superen los 40 000 ppm de sustancias disueltas, llegando hasta los 300 000 ppm. A estas aguas se les llama salmueras, y están asociadas con frecuencia a depósitos salinos, aguas de yacimientos petrolíferos o bien a aguas situadas a gran profundidad.

#### **4.4 ORIGEN Y PROPIEDADES GEOQUÍMICAS DE LAS SUSTANCIAS DISUELTAS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS**

En la figura 4.3 se indica la frecuencia con que aparecen las concentraciones de los diferentes iones. A continuación se complementan estos datos junto con otros que son de interés hidrogeoquímico.



**Figura 4.2** Curvas acumulativas que indican la frecuencia con que aparecen concentraciones menores que las indicadas para cada ión en aguas potables.

#### 4.4.1 Aniones

a) Ion Cloruro. Procede de:

Lavado de los terrenos de origen marino.

De agua de lluvia y su concentración en el terreno.

Mezcla con agua marina en regiones costeras.

Ataque de rocas, aunque en general es pequeño por ser un elemento escaso en la corteza terrestre

Más raramente puede proceder de gases y líquidos asociados a emanaciones volcánicas.

Los vertidos urbanos e industriales pueden aportar cantidades importantes.

Es el anion más abundante en el agua de mar, pero puede ser el menos importante de los fundamentales en aguas continentales. No llega a saturar casi nunca y es muy difícilmente alterado por cambio iónico u otro tipo de acción.

b) Ion Sulfato. Procede de:

Lavado de terrenos formados en condiciones de gran aridez o en ambiente marino.

Disolución de yeso, anhidrita y terrenos yesíferos.

Concentraciones en el suelo de agua de lluvia.

Las actividades urbanas, industriales y en ocasiones agrícolas pueden aportar cantidades importantes.

Es afectado por la reducción de sulfatos. La solubilidad del yeso en agua pura es de 2.095 g/l, pudiendo llegar a 7.300 g/l si el contenido de ClNa es de 131 g/l

c) Ion Bicarbonato y carbonato. Procede de:

Disolución de CO<sub>2</sub> atmosférico o del suelo.

Disolución de calizas y dolomías ayudadas por el CO<sub>2</sub> y/o ácidos naturales (húmicos, oxidación de sulfuros, etc.)

Hidrólisis de silicatos ayudada por el CO<sub>2</sub>.

Si en el acuífero no existen aportes de CO<sub>2</sub> (oxidación de materia orgánica y aportes magmáticos) el contenido en carbono disuelto (CO<sub>2</sub>+CO<sub>3</sub>H<sup>-</sup> + CO<sub>3</sub><sup>=</sup>) permanece constante y muchas veces puede suponerse que el contenido en CO<sub>3</sub>H<sup>-</sup> es casi constante ya que es el ion dominante.

d) Ion Nitrato. Procede de:

Procesos de nitrificación naturales (bacterias nitrificantes), por ejemplo en las raíces de las leguminosas.

Descomposición de materia orgánica y contaminación urbana, industrial y ganadera.

Abonos agrícolas.

En pequeña proporción del agua de lluvia.

Muy localmente del desarrollo de pozos con explosivos.

Es relativamente estable pero puede ser fijado a veces por el terreno o puede ser reducido a N<sub>2</sub> o NH<sub>4</sub> en ambientes reductores.

Muchas veces es un indicador de contaminación, en cuyo caso suele estar estratificado, dominando las concentraciones mayores en la parte alta del acuífero libre. Si se tiene menos de 10 ppm se considera que el contenido es bajo, aunque en aguas subterráneas no contaminadas es raro superar unas pocas ppm.

e) Sílice. Procede de:

Ataque de silicatos y otras rocas que contienen sílice soluble.

En muy pequeñas cantidades de la disolución de cuarzo y sus formas alotrópicas.

El valor de pH es muy importante, precipitándose sílice si este desciende.

El CO<sub>2</sub> juega un papel muy importante en su solubilización. Una parte puede estar en forma coloidal.

Las rocas carbonatadas apenas tienen sílice soluble mientras que las rocas plutónicas y volcánicas pueden llegar a dar hasta 100 ppm, frente a 7 ppm las primeras.

La sílice puede ser un indicador del tipo de terreno atravesado por el agua subterránea y aún mejor de la temperatura del acuífero.

#### 4.4.2 Cationes

a) Sodio. Procede de:

Ataque de feldespatos, feldespatoideos y otros silicatos.

Lavado de sedimentos de origen marino y cambio de bases con arcillas del mismo origen.

Mezcla con agua del mar.

Localmente de la disolución de sal gema o sulfato sódico natural (sales evaporitas)

Raras veces de emanaciones y fenómenos relacionados con procesos magmáticos.

Contaminación urbana e industrial.

Concentración del agua de lluvia.

Es muy soluble, y es el catión más abundante en el agua del mar. Es muy afectado por el cambio de bases.

b) Potasio. Procede de:

Ataque de la ortosa y otros silicatos (micas, arcillas, etc.)

Localmente de la disolución de sales potásicas naturales (silvinita, carnalita, etc.)

En pequeña cantidad de aportes de agua de lluvia.

En ocasiones procede de contaminación industrial, minera y agrícola (abonos).

Tiende a ser fijado irreversiblemente por el terreno durante la formación de arcillas por lo que  $rK/rNa$  es mucho menor que 1 (uno), excepto en aguas muy diluidas, en las que ese valor puede llegar a ser 1 (uno).

c) Calcio. Procede de:

Disolución de calizas, dolomías, yeso y anhidrita.

Ataque de feldspatos y otros silicatos cálcicos.

Disolución de cemento calcáreo de muchas rocas.

Concentración de agua de lluvia.

Está frecuentemente en estado de saturación y su estabilidad en solución depende del equilibrio  $CO_2-CO_3H^- - CO_3^{2-}$ .

Puede precipitarse con facilidad y es muy afectado por el cambio iónico.

d) Magnesio. Procede de:

Disolución de calizas y calizas dolomíticas

Ataque de silicatos y ferromagnésicos.

Localmente del lavado de rocas evaporitas magnésicas (carnalita, kaiserita, etc.)

Mezcla con el agua del mar.

Contaminación industrial y minera.

Aunque se disuelve más lentamente es más soluble que el Ca y tiende a permanecer en solución cuando éste se precipita. Es afectado por el cambio iónico.

e) Hierro. Procede de:

Ataque de silicatos ferríferos.

Ataque de sulfuros y óxidos de hierro.

Ataque de la mayoría de las rocas sedimentarias.

Muy lentamente y con carácter local procede del entubado de los pozos.

Su estabilidad depende fundamentalmente del potencial redox; se solubiliza y precipita con facilidad. En medios oxidantes sólo se tienen cantidades mínimas de Fe disuelto.

#### 4.4.3 Electroneutralidad

Siempre es conveniente verificar si los resultados de los análisis químicos tienen la calidad analítica requerida para la interpretación hidrogeoquímica. Esto permitirá que las conclusiones de interpretación realizada presenten congruencia con las condiciones naturales. De este modo, el primer paso en la interpretación consistió en la revisión de los análisis químicos disponibles. La revisión incluyó reconocimiento de los análisis disponibles, para considerar únicamente aquellos que para cada muestra presentan información completa de aniones y cationes.

Al respecto, para comprobar la relativa exactitud de los resultados de los análisis químicos se utilizó la técnica del balance iónico o condición de electroneutralidad, fundamentada en la neutralidad eléctrica de las muestras de agua.

Este tipo de revisión es muy común y necesario en estudios de hidrogeoquímica de agua subterránea. La técnica utilizada para realizar el balance iónico consiste en calcular el total de cargas de aniones y cationes reportados por el laboratorio. Teóricamente, en un análisis correctamente realizado el valor calculado para los aniones deberá ser muy similar al de los cationes.

El total de cargas positivas (cationes) y negativas (aniones) se obtiene sumando los equivalentes correspondientes. El error de balance iónico se expresa por la diferencia como un porcentaje de la suma, de acuerdo a la siguiente expresión:

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

Al aplicar esta fórmula a todos los análisis, se determinaron los porcentajes de error para cada uno de ellos. De acuerdo con Freeze y Cherry (1979) los análisis que se consideran correctos son los que presentan un porcentaje de **error menor al 5- 10%**. Es importante considerar que un error menor al 5% no es garantía total de que los resultados son analíticamente correctos. Puede ser probable que dos errores analíticos en la determinación de un anión y catión se cancelen y por lo tanto el porcentaje de error no denote anomalías.

#### 4.4.4 Los Fenómenos Modificadores.

A continuación se describe con más detalle aquellos fenómenos que modifican el agua, y sus efectos, dado el gran interés que tienen en los estudios hidrogeoquímicos.

##### 4.4.4.1 Reducción de Sulfatos y de Hierro.

La reducción de sulfatos se realiza en ambientes reductores con abundante materia orgánica y consiste en el paso de ion sulfato  $\text{SO}_4^-$  a un estado inferior de oxidación,

en general  $S^=$  y a veces  $S$  ó  $S_2O_3^=$ . Se realiza a través de ciertas bacterias que viven en el terreno, incluso a grandes profundidades, y que actúan como catalizadores químicos de una serie de reacciones que en su ausencia no se producen naturalmente con suficiente rapidez.

#### 4.4.4.2 Intercambio Iónico.

El intercambio iónico afecta principalmente a los cationes, y por eso se le denomina por extensión, cambio de bases. Su interés está relacionado con acuíferos con fracción arcillosa, ya que las formaciones dominantes arcillosas son impermeables a efectos prácticos. Los materiales orgánicos naturales también poseen una capacidad de cambio de bases a tener en cuenta.

El cambio de bases afecta principalmente a los cationes:  $Na^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$  y también al  $H^+$ ,  $Li^+$  y  $Sr^{++}$  mientras que el  $K^+$  y el  $NH_4$  tienden a ser fijados irreversiblemente.

Un agua con una relación entre dos cationes X y Y que valga  $(rX/rY)_a$  alcanza el equilibrio con un terreno cuyas sales absorbidas tengan una relación  $(rX/rY)_t$ . Si en el agua crece esta relación, el terreno se opone a la modificación cediendo iones Y y tomando iones X. Así un terreno de formación marina en equilibrio con los cationes del agua del mar tiene una relación  $[r Na / r (Ca + Mg)]_t$  determinada.. Al ser sustituida el agua de imbibición inicial por un agua continental con una relación menor que 1 (uno), el terreno cede iones Na y toma del agua iones Ca y Mg; el agua se ablanda y tiende a convertirse en sódica; fenómeno que se observa con frecuencia.

El cambio de bases modifica en general las relaciones entre cationes tales como  $rK/rNa$ ,  $rNa/rCa$ ,  $rNa/Mg$ ,  $rMg/Ca$ ,  $rNa/r(Mg + Ca)$ ,  $\%rNa$ ,  $rCa/rCl$ ,  $rMg/rCl$ ,  $rNa/rCl$ , etc.

Es de gran interés la consideración del llamado índice de equilibrio entre cloruros y alcalinos, llamado también impropriadamente índice de cambio de bases (icb). Éste se define como:

$$icb = \frac{rCl - r(Na + K)}{rCl}$$

En un agua subterránea esta valor suele tomar un valor positivo o negativo, en general próximo a cero (0). Si existe ablandamiento (cambio de  $Ca^{++}$  y  $Mg^{++}$  por  $Na^+$ ) su valor tiende a disminuir mientras que si existe endurecimiento, tiende a crecer. Así pues, el cambio de bases no viene definido por un valor absoluto, sino por una variación. Si conviene se puede establecer un valor absoluto definido por icba tal que:

$$icba = \frac{rCl - r(Na + K)_f}{rCl} - \frac{rCl - r(Na + K)_o}{rCl} = \frac{r(Na + K)_o - r(Na + K)_f}{rCl}$$

en la que el subíndice (o) indica el valor inicial y el (f) el valor después de haberse producido el cambio de base.

En aguas en las que los iones Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup> son dominantes puede existir un notable ablandamiento sin que el valor *icb* se vea apenas afectado por estar el Ca y Mg en cantidad muy inferior al Na. En este caso es mejor emplear como índice:

$$icb = \frac{rCl - r(Na + K)}{r(SO_4 + CO_3H + NO_3)}$$

que se utiliza en general para valores negativos del mismo.

El intercambio iónico es en sí un proceso más rápido que el de puesta en solución si el material con el que se efectúa el intercambio presenta suficiente superficie de contacto.

Los procesos de cambio iónico no alteran primariamente el total de meq/l de iones disueltos, aunque sí alteran el residuo seco a consecuencia de variaciones en los pesos equivalentes. Sin embargo pueden producirse reacciones secundarias a consecuencia de variaciones de concentración de iones que están próximos a la saturación y a pequeños cambios en la fuerza iónica de la solución.

Así, el cambio de 1 meq/l de Mg<sup>++</sup> por 1 meq/l de Na<sup>+</sup> aporta 23 ppm y se retienen 12. La fuerza iónica se modifica en un valor:

$$\Delta\mu = \frac{1}{2000} (2 \cdot 1 - 1 \cdot 1) = 0.0005$$

La desaparición de Mg puede dar agresividad al agua al permitir una mayor disolución de caliza y viceversa, produciéndose los cambios consiguientes en el contenido de bicarbonatos y en anhídrido carbónico libre y una variación del pH, acompañado a veces por un cambio de bases entre Mg y Ca.

Las aguas ablandadas tienden a aumentar su pH.

El índice de cambio de bases también puede ser afectado por otros fenómenos cuando se expresa con el denominador  $r(SO_4 + CO_3H + NO_3)$ , ya que el SO<sub>4</sub> o CO<sub>3</sub>H pueden sufrir fenómenos de reducción o de precipitación, respectivamente.

#### 4.4.4.3 Fenómenos de Oxidación - Reducción.

Los fenómenos de oxidación-reducción o redox, pueden modificar la composición del agua ya sea poniendo en solución, ya sea precipitando ciertos iones que pueden presentarse en varios estados de valencia. En presencia de oxígeno, con o sin la

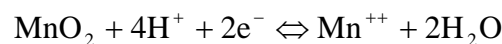
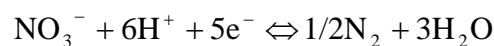
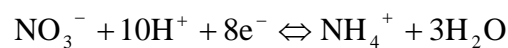
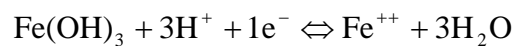
participación de bacterias, el ion  $S^{2-}$  y los sulfuros del terreno pueden oxidarse a ion  $SO_4^{2-}$ , aumentándose considerablemente la concentración del mismo.

Los fenómenos redox son especialmente importantes en relación con la solubilización del hierro, y también del manganeso el cual se comporta de forma similar aunque es mucho menos abundante; se puede disolver en medios reductores y se precipita con mucha facilidad cuando el medio pasa a ser oxidante.

El ion nitrato es también afectado por los procesos redox, ya que puede ser reducido a  $N_2$  o  $NH_4^+$  y éste último puede a su vez ser oxidado a  $N_2$  y a  $NO_3^-$

El ion uranilo  $UO_2^{2+}$  en medios reductores puede pasar a ion  $U^{4+}$ , que es menos soluble y queda retenido en el terreno.

Las reacciones redox son unas veces productoras y otras consumidoras de iones de Hidrógeno. Son frecuentes las siguientes reacciones de reducción, consumidoras de iones de hidrógeno:



El efecto tampón del equilibrio  $CO_2 \Leftrightarrow CO_3H^- \Leftrightarrow CO_3^{2-}$ , es muy importante. Las oxidaciones ceden iones de hidrógeno y aumenta la agresividad del agua, permitiendo nuevas disoluciones de caliza, mientras que las reducciones consumen iones de hidrógeno pudiendo por lo tanto producir precipitación de calcita; todo depende del balance de ambos tipos de reacciones.

## 4.5 METODOS GRAFICOS DE ESTUDIO

### 4.5.1 Representación gráfica de las características químicas y su utilidad

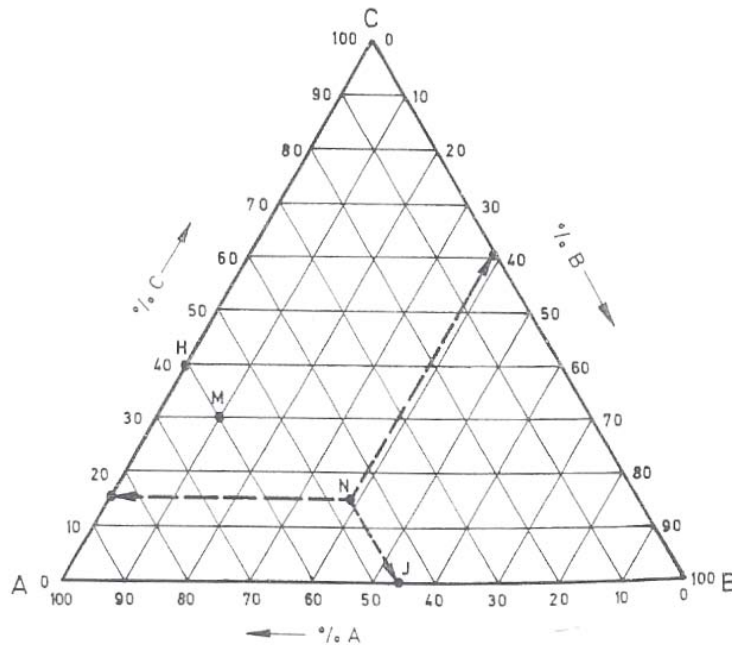
El manejo y estudio de análisis químicos puede simplificarse con el empleo de gráficos y diagramas, en especial cuando se trata de hacer comparaciones entre varios análisis de aguas de un mismo lugar en épocas diferentes o de diferentes lugares. Estas gráficas y diagramas pueden mostrar variaciones temporales, variaciones espaciales o bien resaltar relaciones entre los iones de una misma muestra. Las representaciones que tienen por objeto resaltar la composición iónica de un agua para permitir compararla con otras aguas son los diagramas en sus diferentes variantes. Además se deben de considerar los hidrogramas químicos y los planos y mapas hidroquímicos.



## 4.5.2 Diagramas hidroquímicos.

### 4.5.2.1 Diagramas triangulares. Diagramas de Piper

Los diagramas triangulares son los ideales para representar tres componentes. Cada uno de los vértices de un triángulo equilátero (figura 4.4) representa uno de los componentes A, B, C puros, tal como simboliza el 100% puesto en cada uno de ellos. Un punto tal como el J representa una mezcla binaria de 45% de A y por lo tanto 55 % de B (100%-45%). Un punto situado en el interior de del triángulo, como el punto M, representa una mezcla ternaria; como el vértice más cercano es el A y el más lejano es el B, esta mezcla tiene: *contenido A > contenido C > contenido B*



**Figura 4.3** Diagrama triangular para mezclas ternarias. Representación de una mezcla de 45% de A, 39% de B y 16% de C. Tomar el correspondiente % sobre el respectivo eje y trazar una paralela al lado opuesto al vértice que representa el 100% de esa característica.

Si se quiere saber cuantitativamente la composición de la muestra en uno de los componentes basta trazar por el punto representativo una paralela al lado opuesto al vértice que representa a ese componente y leer en el lado que representa fracciones del mismo el % que corresponde; así si se desea saber el contenido de M en el componente B basta trazar por M una paralela a AC hasta cortar BC y obteniéndose 10% de B; similarmente se obtiene 30% de C y 60% de A. El punto N representa una mezcla formada por 46% de A, 39% de B y 15% de C.

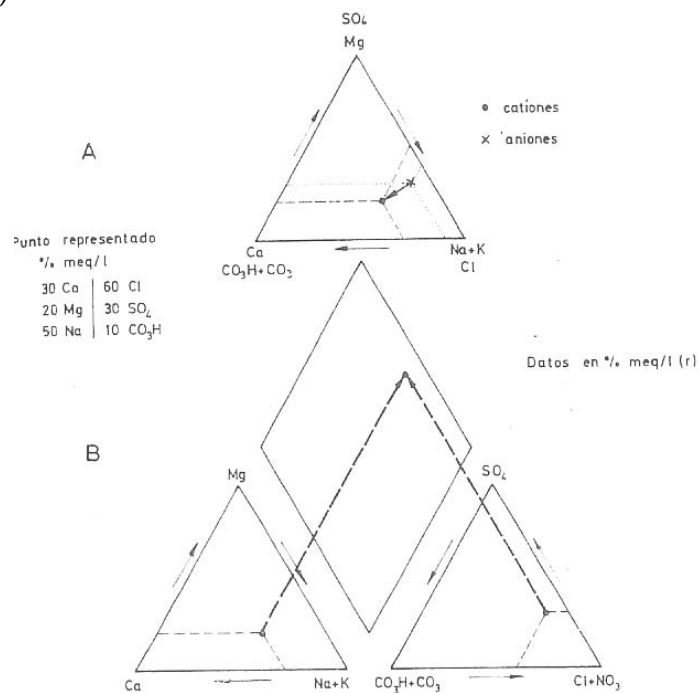
Se exige que los iones estén reducidos a % y sólo permiten reunir tres aniones y/o tres cationes. A cada vértice corresponde el 100% de un anión y/o catión. La forma más usual es de % de los valores en meq/l. A veces es útil emplear sólo una porción ampliada del diagrama.

### Iones Representados.

Lo más usual es representar como aniones  $\text{CO}_3 \text{H}^- + (\text{CO}_3^{2-})$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^- + (\text{NO}_3^-)$  y como cationes  $\text{Na}^+ + (\text{K}^+)$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ . En casos especiales se pueden tomar otros iones o cationes, como en el estudio de contaminación de aguas por industrias potásicas donde para hacer intervenir claramente el potasio conviene tomar para los cationes como vértices  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ .

### Tipos

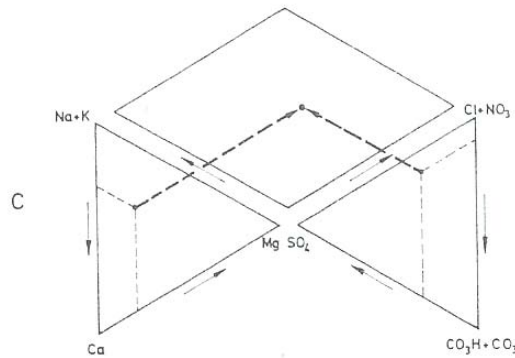
- a) Utilización del mismo diagrama triangular para representar aniones y cationes, uniendo los dos puntos representativos por un segmento orientado (figura 4.4 A)



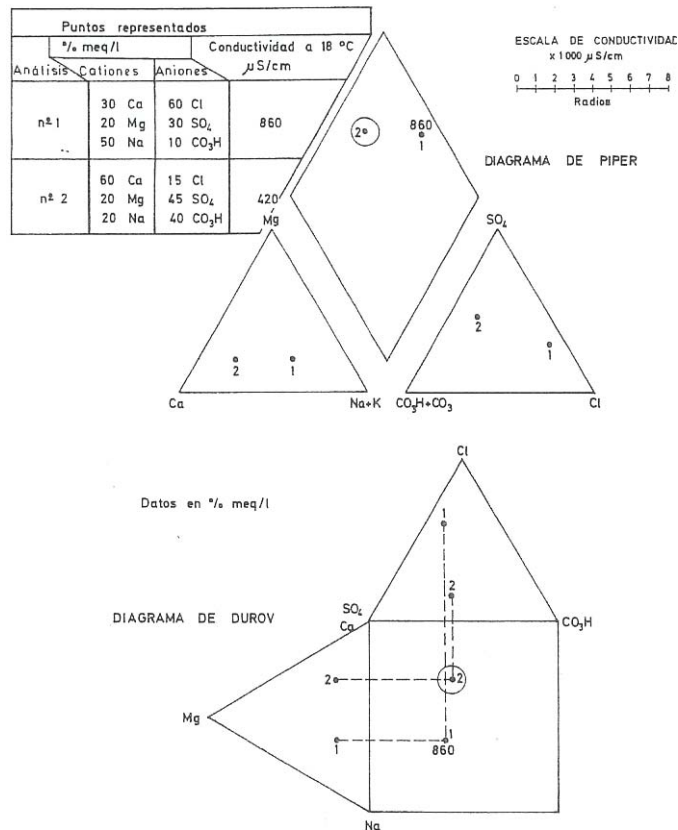
**Figura 4.4** Diferentes tipos de diagramas triangulares. **A)** Triangular simple indicando cada agua por una flecha que une el punto representativo de los aniones con el representativo de los cationes. **B)** Diagrama de Piper, indicando el modo de obtener el punto representativo en el diagrama romboidal.

- b) Utilización de dos diagramas separados para representar los aniones y los cationes colocados de diferentes formas (figura 4.4 B y C) y con un campo central romboidal o cuadrado donde se representa un tercer punto deducido de los que representan los aniones y los cationes. El más empleado es de

Piper (figura 4.4 B). Aunque también es común utilizar los diagramas de Durov (figura 4.5).



**Figura 4.4 C** Diagrama de Hill. Las líneas de representación sólo son indicativas; en la práctica no se dibujan, y los diferentes puntos correspondientes a una misma agua se identifican por un color, símbolo o numeración.



**Figura 4.5** Dos formas de tener en cuenta la salinidad total del agua en los diagramas triangulares de Piper y Durov. La escala de radios es lineal, pero sí conviene puede tomarse logarítmica para evitar tener círculos demasiado grandes o demasiado pequeños

### Propiedades.

En estos gráficos se pueden representar muchos análisis sin dar origen a confusiones y ésta es una de sus mayores ventajas. Las aguas geoquímicamente

similares quedan agrupadas en áreas bien definidas. Los diagramas con un solo triángulo son los que resultan más confusos a consecuencia de los vectores anión-cación.

El sentido de giro que se adopta para los triángulos no modifica la representación de los diferentes puntos si los vértices están bien definidos. En estos diagramas, en cambio, se pueden tener variaciones en la representación al variar la colocación de los iones en los vértices ya que varía el modo de asociación en el propio campo (tipo a) o en el campo central (tipo b). Las colocaciones indicadas en las figuras (4.4 y 4.5) son las más usuales.

En estos diagramas no se tiene una representación de las concentraciones absolutas dado que se utilizan valores reducidos a %. Si conviene tenerlos en cuenta, se puede asociar a cada uno de los puntos representativos de un análisis una cifra que indique el valor de la conductividad, residuo seco o total de meq/l o bien un círculo de radio proporcional a esas magnitudes (figura 4.5).

No es posible representar más que tres características por triángulo y en algunos casos puede ser insuficiente, por ejemplo cuando conviene resaltar el contenido en sílice o en algún otro ión o característica no representada.

Las mezclas de aguas, precipitaciones, disoluciones, modificaciones, etc. Quedan fácilmente reflejadas. Sea un diagrama de Piper (figura 4.6). Si el análisis C representa la simple mezcla de aguas representadas en A y B, el punto C se debe encontrar sobre el segmento AB. La consideración contraria, es decir si el análisis C se encuentra representado sobre el segmento AB, se trata a un agua mezcla de las A y B no es necesariamente cierta, ya que no se tienen en cuenta valores absolutos; el punto C puede estar entre A y B, siendo el total de meq/l de C mayor de A y B o menor que el menor de A y B, en cuyo caso no es posible la relación por mezcla (C sería una mezcla de más del 100% de uno de los extremos con una cantidad negativa del otro, lo cual no tiene sentido).

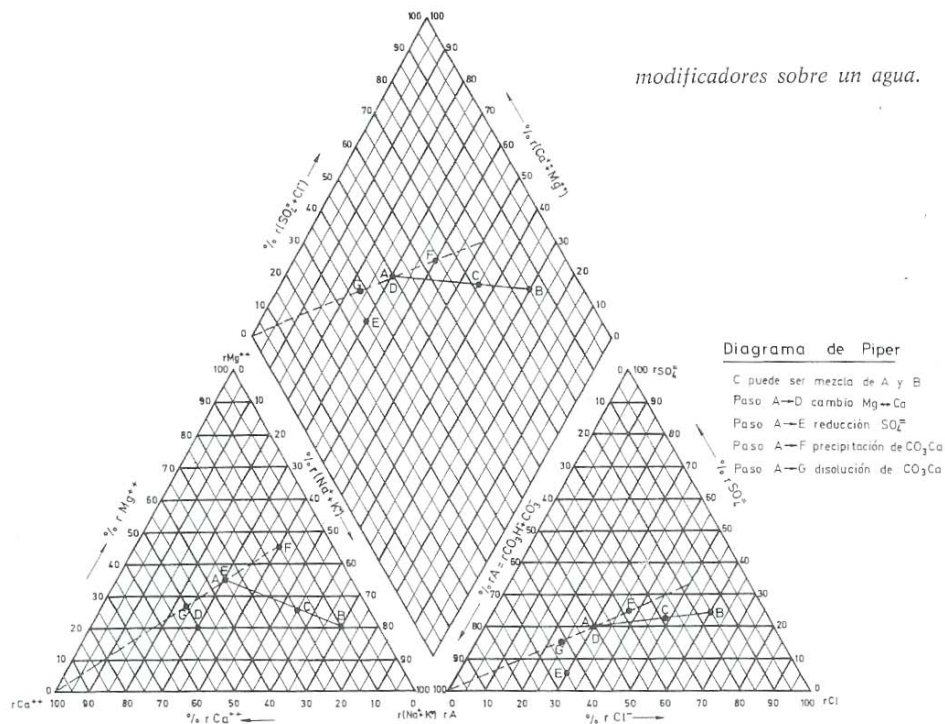
Si a es la concentración total del análisis A y b la del análisis B, y se sospecha que el análisis C es mezcla de A y B en la proporción volumétrica x de A y (1-x) de B, debe de cumplirse que:

$$C \cdot 1 = a \cdot x + b \cdot (1-x)$$

Y en el diagrama:

$$\frac{x}{1-x} = \frac{BC \cdot b}{AC \cdot a}$$

en la que BC y AC indican las longitudes de los elementos indicados medidos en el diagrama. Si se obtienen valores de x mayores que 1 o menores que 0 quiere decir que no se ha podido producir tal mezcla.



**Figura 4.6** Representación de los efectos simples de fenómenos modificadores sobre un agua

Si se produce disolución o precipitación de una sal, los diferentes puntos representativos se encuentran sobre rectas que pasan por el vértice que corresponde al anión y al catión afectado, como se indica en la figura 4.6. Como la suma de meq/l de aniones y cationes es igual, toda disolución o precipitación afecta de la misma forma a esas sumas de modo que fijando uno de los puntos representativos los otros vienen obligados.

Si se produce un cambio de bases, no debe producirse ninguna variación (si no hay reacciones secundarias) en el diagrama de aniones y los puntos representativos en el diagrama de cationes se mueven sobre una recta paralela al lado que une los vértices representativos de los dos cationes en juego (figura 4.6).

Si se produce una reducción de sulfatos, en ausencia de reacciones secundarias, no debe producirse variación en el diagrama de cationes, y en el de aniones los puntos representativos se desplazan en primera aproximación sobre una recta paralela al lado que une los vértices representativos del  $SO_4$  y  $CO_3H$  ya que en la primera aproximación 1 meq de  $SO_4^{2-}$  se cambia por 1 meq de  $CO_3H^-$ .

Las rectas que concurren en un vértice, representan aguas de igual relación entre los iones que representan los otros dos vértices.

En la realidad los fenómenos son más complejos pero un detenido estudio de estos diagramas permite descubrir las relaciones más importantes con facilidad.

#### 4.5.2.2 Diagramas poligonales o radiantes. Diagrama de Stiff.

##### Fundamento

Consisten en tomar sobre semirrectas convergentes o paralelas segmentos proporcionales a cada ion y unir extremos dando así un polígono. Sobre cada semirrecta se toma un solo ión o bien un catión y un anión simultáneamente. La forma de la figura resultante da idea del tipo de agua. Se prestan bien a comparaciones y a ser utilizados en mapas hidrogeoquímicos.

##### Tipos

- Radiantes: sobre 4, 6 o 12 semirrectas concurrentes uniformemente espaciadas se colocan valores proporcionales a los meq/l o a los % de los meq/l de cada ión y se unen los extremos formando un polígono estelar. Son de poco uso. ( Figura 4.7)

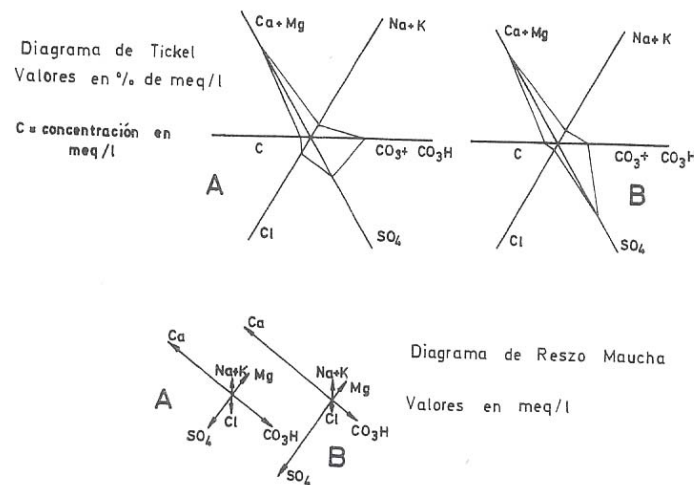


Figura 4.7 Dos tipos de diagramas, uno radiante (de Reszo Maucha) u otro poligonal (de Ticket)

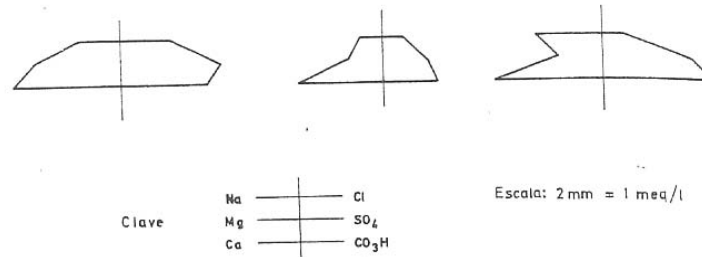
- Poligonales paralelos: El más conocido es el diagrama de Stiff (1951). En este diagrama se tienen cuatro rectas paralelas igualmente espaciadas cortadas por una normal dando así cuatro semirrectas izquierdas (campo de cationes) y cuatro semirrectas derechas (campo de aniones). Sobre cada recta se toma un segmento proporcional a los meq/l del ión correspondiente y se unen los extremos dando un polígono representativo. De arriba abajo se disponen Na+K, Ca, Mg, Fe; Cl, CO<sub>3</sub>H, SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>; esta es la disposición de Stiff para aguas de yacimientos de petróleo. Para aguas subterráneas es mejor utilizar la siguiente disposición utilizando tres o cuatro rectas base:

Na + K, Mg, Ca      Cl + NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>H + CO<sub>3</sub>

o bien:

K, Na, Mg, Ca      NO<sub>3</sub>, Cl, SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>H + CO<sub>3</sub>

Disposición que es similar a la empleada en los diagramas columnares de Collins. Estos diagramas se representan en la figura 4.8



*Figura 4.8 Diagramas de Stiff modificados*

Esta última disposición indicada parece más apta para aguas subterráneas normales y además permite apreciar rápidamente los valores de las relaciones iónicas con respecto a la unidad y la variación de las relaciones entre los cationes o entre aniones; además se adapta muy bien a ser utilizado en mapas geohidroquímicos y las comparaciones se pueden hacer con rapidez.

Para aguas muy concentradas o muy diluidas el diagrama es muy alargado, y entonces es conveniente reducir o ampliar la escala, indicándolo con un rayado especial del diagrama. El empleo de valores en % de meq/l evita diferencias de tamaño entre figuras, pero no permite apreciar concentraciones absolutas. La adopción de escalas logarítmicas permite representar aguas muy diferentes en contenido salino manteniendo tamaños aceptables pero su uso no es habitual y además se pierde parte de la semejanza.

#### 4.5.2.3 Diagramas de columnas verticales logarítmicas de Schoeller-Berkaloff

##### Fundamento

Se disponen varias semirrectas verticales paralelas igualmente espaciadas. A cada semirrecta se le asocia un anión o un catión y se representa a partir de un origen (en general a la misma altura para todas las semirrectas) segmentos proporcionales a la concentración en meq/l, ppm o en %. Los diferentes puntos obtenidos se unen dando una línea quebrada. Se pueden representar unos pocos análisis simultáneamente.

##### Tipos

- a) Aritméticos simples. Utilizados generalmente con expresiones en %. Son útiles para aguas de caracteres similares. Resultan algo confusos.
- b) Aritméticos acumulativos. Utilizados generalmente con expresiones en % y diferencian de los anteriores en que cada ión se representa en su correspondiente columna pero a partir de la altura del punto representativo de la columna anterior. El último punto es el 100%. Son poco usados y algo confusos.

Se pueden representar tanto aguas diluidas como concentradas en un mismo diagrama. A la escala logarítmica se le puede achacar la desventaja de que las diferencias de concentraciones se acentúan un poco.

La ordenación normal de las columnas de iones es de izquierda a derecha: Ca, Mg, Na + K, Cl, SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>H, dejando una o dos columnas al final por si conviene representar alguna característica más como dureza, SiO<sub>2</sub>, conductividad, NO<sub>3</sub>, etc. La inclinación de la recta que une los puntos representativos de dos iones mide su relación, que puede determinarse gráficamente con un papel transparente en que se tengan los valores de la relación para cada inclinación. Similarmente se pueden calcular índices de cambios de base.

Sobre estos diagramas se puede estudiar si un agua es no agresiva a la caliza. Basta colocar una columna en papel transparente entre las columnas de Ca y CO<sub>3</sub>H con una graduación de pH de equilibrio y el pH del agua se puede saber si es o no agresiva

Con una tabla adicional se puede obtener el pH de equilibrio para diferentes temperaturas y diferentes valores de la fuerza iónica  $\mu$ . También se puede obtener de forma similar el valor:

$$k_r = \sqrt[3]{(r\text{CO}_3\text{H})^2 \cdot (r\text{Ca})} \quad (r = \text{meq/l})$$

#### 4.6 EMPLEO DE LOS DIAGRAMAS Y GRÁFICOS.

En cualquier estudio hidrogeoquímico conviene en gran manera visualizar los datos químicos, ya que así se ponen rápidamente de manera visual posibles relaciones de interés y se aprecia mejor la técnica de estudio a seguir. Las herramientas a utilizar varían de un caso a otro.

En la comparación de análisis son de gran utilidad los diagramas triangulares y los de escalas verticales logarítmicas de Schoeller.

Los diagramas de Stiff caracterizan bien una serie histórica y se adaptan muy bien a planos, dando una rápida idea de las características químicas y de los diferentes tipos de agua.



## 4.7 CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS

### 4.7.1 Objeto

Las diferentes clases de aguas subterráneas se clasifican a fin de informar de forma breve sobre su composición química o sobre algunos aspectos de la misma. Las clasificaciones simples sólo dan una información global y en general se establecen con vistas a su uso doméstico, urbano, industrial o agrícola.

Las clasificaciones geoquímicas contienen más información de carácter geoquímico, y tienden a expresar de forma concisa lo que se obtiene con los diferentes tipos de diagramas. Las clasificaciones que aportan más información son las más complicadas y por ello en ocasiones su utilidad es muy limitada. La clasificación empleada en la presente tesis será la Clasificación Geoquímica por Iones Dominantes.

### 4.7.2 Clasificación geoquímica por iones dominantes

Se nombra el agua por el anión o el catión que sobrepasa el 50% de sus sumas respectivas; si ninguno supera el 50% se nombran los dos más abundantes. Si conviene se puede añadir al nombre de algún ión menor de interés y que esté en concentración raramente alta.

Para simplificar la expresión, a cada posible ordenación de aniones y cationes se les da un número y una letra que sirven para denominar el agua. Cuando además interese resaltar la mineralización total del agua se puede añadir una clasificación de acuerdo con la conductividad.

Los grupos que se hacen son:

Aniones	Cationes
<b>1</b> r Cl > r SO <sub>4</sub> > r CO <sub>3</sub> H	<b>a</b> r Na > r Mg > r Ca
<b>2</b> r Cl > r CO <sub>3</sub> H > r SO <sub>4</sub>	<b>b</b> r Na > r Ca > r Mg
<b>3</b> r SO <sub>4</sub> > r Cl > r CO <sub>3</sub> H	<b>c</b> r Mg > r NA > r Ca
<b>4</b> r SO <sub>4</sub> > r CO <sub>3</sub> H > r Cl	<b>d</b> r Mg > r Ca > r Na
<b>5</b> r CO <sub>3</sub> H > r Cl > r SO <sub>4</sub>	<b>e</b> r Ca > r Na > r Mg
<b>6</b> r CO <sub>3</sub> H > r SO <sub>4</sub> > r Cl	<b>f</b> r Ca > r Mg > r Na

C - 1 Conductividad a 25 °C entre 0 y 250 µS/cm (entre 0 y 215 a 18°C)

C - 2 Conductividad a 25 °C entre 250 y 750 µS/cm (entre 215 y 650 a 18°C)

C - 3 Conductividad a 25 °C entre 750 y 2250  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (entre 650 y 2000 a 18°C)

C - 4 Conductividad a 25 °C mayores que 2250  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (mayor que 2000 a 18°C)

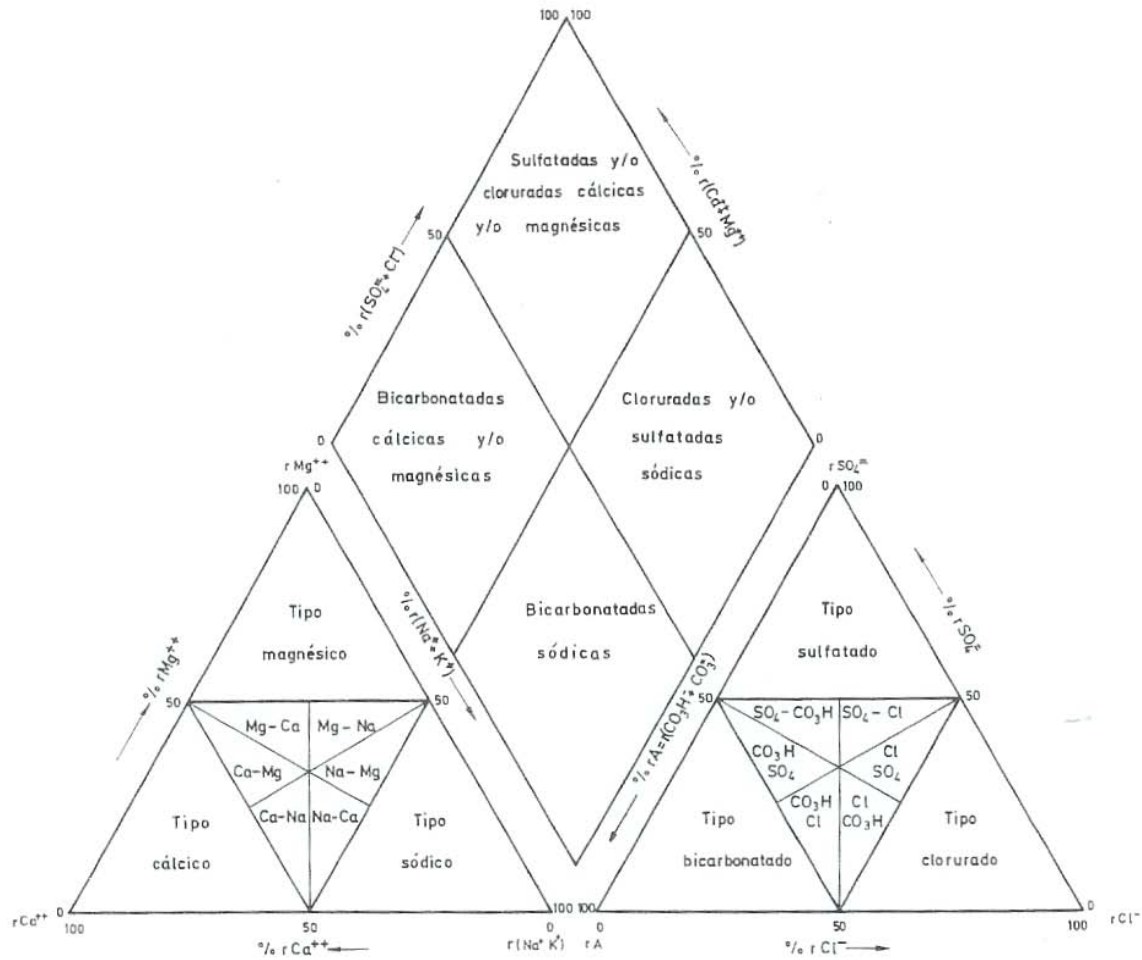


Figura 4.9 Tipos de aguas deducidas de un diagrama triangular de Piper.

La simplicidad de estas clasificaciones no permite, en general, buenas deducciones en cuanto a relaciones entre aguas, pero se adapta bien a determinar zonas en planos de composición química por emplear sólo dos signos (36 combinaciones) acompañados o no de la indicación de salinidad. Se adaptan bien a su representación en diagramas triangulares (ver Figura 4.9)

### ***4.7.3 Clasificación mediante diagramas y planos***

Las clasificaciones hidrogeoquímicas se prestan a delimitar campos en diagramas de tipo triangular, romboidal o cuadrado. En la figura 4.9 se indican los diferentes tipos de aguas que se identifican en un diagrama triangular de Piper.

## CAPITULO 5 MUESTREO Y ANALISIS

### 5.1. COMPORTAMIENTO HIDROGEOQUÍMICO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

#### 5.1.1 Base de datos

Para conocer el comportamiento de las aguas subterráneas del área de estudio, se recolectaron y se analizaron 206 muestras en iones mayores, menores y elementos traza. Estas muestras comprenden pozos, norias, manantiales y aguas superficiales, así como duplicados, según se muestra en la Tabla 5.1.

Elemento	No. de Muestras	No. de Duplicados
Pozos	183	15
Manantiales	10	3
Aguas Superficiales (presas, ríos, 1 noria)	13	1
TOTAL	206	

*Tabla 5.1. Número de muestras y duplicados colectado (COREMI 2004).*

En la Figura 5.1 se puede ver la distribución de las muestras analizadas en el área de estudio.

Estadísticamente, entre mayor sea el número de muestras, la interpretación será mejor. Debido a los problemas con algunos resultados, se optó por aplicar una selección rigurosa a los datos. En esta depuración de la base de datos el filtro principal se basó en la discriminación por medio del cálculo de electroneutralidad; de tal forma que sólo se tomaron en cuenta datos  $\leq 5\%$  de balance iónico; considerando las especies mayores, así como nitratos (Hem, 1992).

El comportamiento hidroquímico del total de los pozos y manantiales se muestra en el diagrama de Piper, basado en la composición de los iones mayores (Figura 5.1).

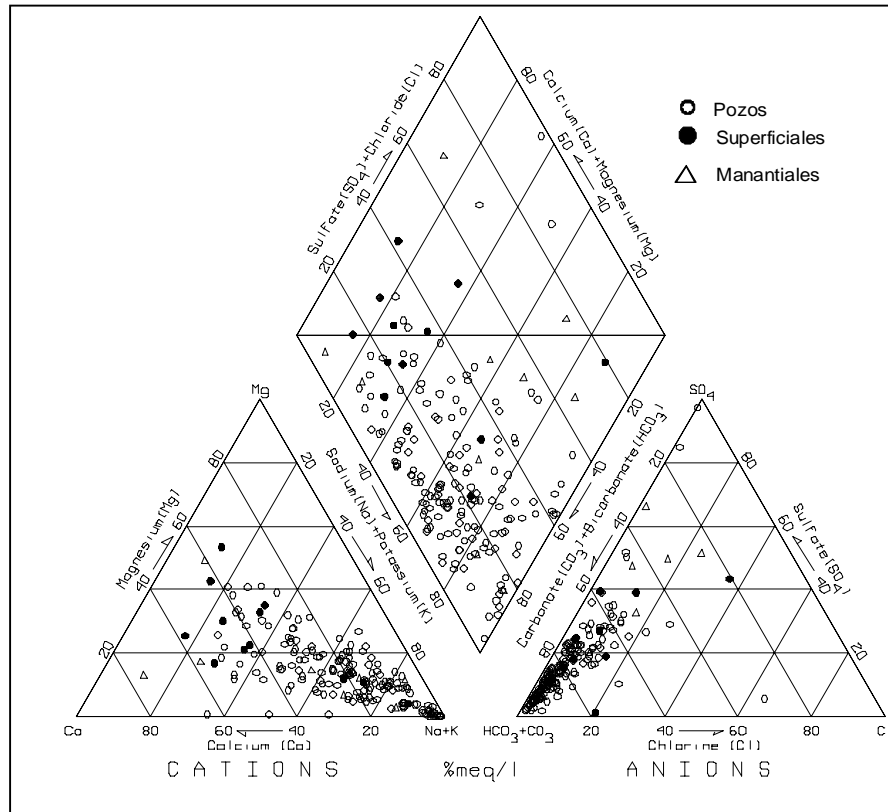


Figura 5.1. Composición de iones mayores en los 206 muestras

Al aplicar dicho filtro se obtuvieron 79 pozos y 6 manantiales con  $\leq 5\%$  de balance iónico; las muestras de los cuerpos superficiales y norias no se incluyen en esta parte del estudio (Tabla 5.2, Figura 5.2).

El comportamiento de la composición química del agua subterránea, los iones mayores, isótopos estables ( $^{18}\text{O}$  y D) y iones menores ( $\text{NO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ) se presenta en la Tabla 5.2.

Es importante mencionar que no hay determinaciones de isótopos para todas las muestras. Al comparar los diagramas de Piper (Figuras 5.1 y 5.2) se puede observar que al depurar los datos se mantiene el comportamiento del total de las muestras; es decir se aprecian las tendencias principales, solo desaparecen datos extremos, los cuales no proporcionan información sobre el comportamiento general del área de estudio (COREMI 2004).



Pozo	X	Y	pH	TDS	Cond	Temp	Eh	d18OVS/MOW	dDVSMOW	d-excess[‰]	Na	K	Ca	Mg	Cl	HCO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
M12	242,084	2,313,194	7.56	303	452	25.8	*	-10.6	-74	10.8	82	6.32	24.14	12.71	13.14	307.44		25.56	30.09	16.22
M15	232,561	2,311,397	7.58	317	654	28.1	*	-9.8	-74	4.4	122	5.17	21.33	4.5	3.2	370.88		17.78	23.26	13.29
M17	223,472	2,304,792	7.43	269	555	25.4	-30.2	-10.3	-74	8.8	75	5.59	22.4	8.59	3.09	297.68		28.73	11.32	14.11
M18	223,172	2,300,212	7.52	257	493	27.2	-36.7	-10.5	-73	11	85	4.71	20.76	4.89	3.35	285.48		41.68	7.7	12.92
M19	231,315	2,303,568	7.68	280	536	26.4	-45.8	-10.2	-73	8.2	106	8.08	14.58	7.59	3.26	331.84		25.6	10.29	16.86
M20	221,238	2,302,348	7.57	276	488	27.3	-45.1	-10.3	-70	12	100	4.52	19.45	3.53	3.71	322.08		33.2	11.4	11.55
M21	235,947	2,299,958	7.62	307	549	22.7	-44.8	-10.6	-75	9.2	94	6.88	22.85	12.56	3.49	348.92		37.61	14.76	17.82
M27	271,948	2,311,949	6.89	112	213	25.5	-10.7	-10.9	-73	14.4	42	3.59	5.94	0.7	2.9	119.56		15.84	5.94	10.75
M29	278,892	2,289,039	7.49	240	543	35.7	-46.9	-10.3	-72	10.2	85	5.17	15.73	5.66	2.38	324.52		6.4	6.17	12.75
M30	268,575	2,282,816	7.19	392	692	22.1	-28.8	-9.5	-70	6.1	140	6.96	29.88	8.65	11.57	385.52		63.41	43.78	16.88
M36	237,361	2,325,585	7.42	300	620	25.5	-33.4	-10.4	-77	5.8	88	14.86	26.48	9.63	2.26	390.4		16.78	8.17	22.45
M41	215,004	2,309,776	7.05	346	972	36.2	-26.2	-10.4	-75	8.7	123	3.27	26.81	4.11	8.11	246.44		131.92	7.41	12.89
M45	243,643	2,327,030	7.6	718	622	25.4	-49.6	-10.6	-74	11.1	92	5.89	15.06	8.08	4.84	305		5.56	6.21	13.78
M46	236,775	2,333,339	7.79	251	712	24.3	-67	-10.7	-75	10.2	96	4.25	13.94	6.28	3.98	297.68		21.32	9.11	18.66
M49	241,812	2,285,796	7.53	355	663	24.4	-51.4	-10.4	-74	9	96	7.17	23.93	22.09	12.81	326.96		80.23	20.59	17.35
M50	248,826	2,289,075	7.44	348	696	26.6	-38.8	-10.3	-73	9	107	6.15	23.47	18.76	14.99	324.52		81.12	11.19	17.28
M51	246,720	2,291,765	7.98	368	734	27.7	-63.9	-10	-71	8.9	136	5.52	20.94	13.69	23.18	305		106.93	7.18	16.74
M52	241,242	2,281,572	7.29	244	683	25.3	-49.1	-10.1	-73	7.7	104	12.92	25.15	19.18	10.58	331.84		74.22	11.32	19.84
M53	240,804	2,277,575	7.45	244	580	23.6	-55.7	-10.1	-66	14.6	94	34.5	14.3	10.58	11.68	292.8		55.79	14.34	16.78
M56	255,593	2,286,832	6.6	466	1008	23.2	-8.9	-10.2	-71	10.7	109	5.22	46.3	22.94	37.93	353.8		129.06	27.5	14.91
M57	252,569	2,274,979	7.87	302	709	28	-46.3	-10.2	-72	10.1	108	8.44	13.05	13.43	9.88	309.88		54.43	8.64	18.99
M58B	250,140	2,269,028	7.72	463	1109	27.1	-56.3	-10.2	-70	10.9	217	10.12	12.56	12.53	19.94	417.24		137.98	5.69	16.9
M60	247,482	2,273,539	7.78	303	716	23.9	-52.1	-10.2	-72	9.7	102	8.21	16.15	17.21	11.18	297.68		59.89	17.47	19.42
M61	248,290	2,280,486	7.79	278	656	25.2	-57.9	-10.3	-72	10.9	98	6.74	13.14	14.15	6.65	305		46.21	8.2	18.87
M63	249,033	2,265,297	8.02	557	1104	*	-69.2	-9.2	-65	8.4	159	13.11	22.18	28.93	19.67	429.44		89.38	25.03	17.92
M67	232,866	2,255,413	7.56	203	414	*	-42.2	-10.5	-71	12.5	86	8.79	5.02	7.41	4.57	239.12		11.44	10.15	12.66
M68	244,300	2,251,357	7.96	338	677	*	-66.2	-9.7	-66	11.2	137	10.95	14.44	10.69	30.43	309.88		92.35	17.2	17.38
M69	274,593	2,278,333	7.46	417	889	21.5	-40.9	-9.6	-66	10.7	210	9.19	12.62	4.78	22.1	378.2		112.91	32.91	18.78
M70	274,637	2,278,356	7.43	303	705	26.5		-10.2	-70	12	91	8.85	13.19	21.57	4.33	334.28		30.89	18.33	20.46
M75	244,487	2,330,395	7.55	276	632	27.9	-55.1	-11	-78	9.7	61	8.41	27.09	14.62	4.06	300.12		21.67	19.02	14.87
M84	215,274	2,313,765	7.19	202	512	27.3	-39.8	-10.7	-79	6.2	62	6.25	29.13	4.86	2.56	258.64		13.84	17.32	12.04
M86	226,200	2,314,819	7.51	161	359	33.4	-59.8	-10.9	-83	3.8	48	6.44	14.58	2.51	2.33	175.68		7.54	6.61	17.67
M86B	230,510	2,312,950	7.63	179	341	31.2	-57.3	-10.9	-80.1	6.9	48	6.72	15.34	2.43	2.34	175.68		7.54	6.59	18

Tabla 5.2 Resultados de análisis de iones mayores y parámetros físico-químicos de aguas subterráneas en el Estado de Guanajuato, las concentraciones se dan en mg/L. El asterisco indica parámetro no medido en campo, < LD; menor al límite de detección; el signo mas indica muestras tomadas en manantiales.

Pozo	X	Y	pH	TDS	Cond	Temp	Eh	d18OVS/MOW	dDVS/MOW	d-excess[‰]	Na	K	Ca	Mg	Cl	HCO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
M89	247,916	2,316,705	7.03	282	668	24.9	-33.7	-11.2	-79	10.4	67	6.92	27.66	12.58	5.11	312.32		25.12	11.84	13.02
M91	240,461	2,303,602	7.56	220	588	27.4	-50.7	-10.2	-75	6.4	76	5.2	15.13	6.74	2.84	236.68		16.37	7.3	13.65
M102	249,821	2,296,693	7.73	354	761	27.3	-57.1				92	5.97	33.69	17.44	29.91	295.24		75.24	8.69	11.92
M104	239,610	2,318,445	7.13	221	553	25.9	-37.2				55	15.56	38.42	6.29	2.9	270.84		17.44	8.52	29.35
M107	263,814	2,277,030	7.35	264	516	25.2	-37.7				75	12.56	18.98	8.64	14.26	278.16		16.31	19.73	9.58
M109	277,270	2,284,123	7.86	281	637	27.9	-65.6				117	7.21	10.16	6.98	6.47	309.88		31.22	12.88	10.77
M112	259,090	2,286,839	7.28	298	445	25.5	-54.2				78	8.61	19.32	9.16	6.17	283.04		33.12	9.37	11.85
M114	238,165	2,310,275	7.48	257	574	24.9	-127.8				77	7	20.38	8.77	6.1	290.36		16.32	19.74	12.42
M115	236,196	2,306,113	7.41	290	662	25.9	-61.4				95	6.07	18.73	7.88	3.17	312.32		43.24	9.36	10.95
M116	226,435	2,301,698	7.61	252	557	26	-37.1				85	6.58	20.81	3.38	3.75	275.72		25.43	10.2	7.33
M117	228,004	2,305,704	8.18	276	683	31.7	-20.7				127	3.79	12.48	2.12	5.13	258.64		63.47	9.17	6.81
M119	233,191	2,301,219	7.9	365	652	28.5	-57.3				94	9.61	19.23	18.82	3.83	387.96		24	13.23	11.44
M120	238,061	2,297,314	7.32	282	599	25.1	-57.2				88	8.57	20.55	14.14	4.14	341.6		13.16	13.92	12.07
M126	240,689	2,322,145	7.68	238	490	25.5	-75.4				70	12.78	25.01	9.51	3.24	319.64		14.45	8.89	14.51
M127	250,637	2,321,752	7.5	261	502	26.1	-40				56	8.77	31.45	16.29	4.06	334.28		12.1	12.64	15.66
M129	245,621	2,312,700	7.69	266	433	27.9	-69.9				65	6.95	36.73	15.97	4.9	317.2		26.94	13.88	11.4
M130	249,752	2,308,646	7.3	255	450	25.1	-54.3				55	4.34	30.15	18.78	4.87	309.88		36.26	11.96	10.25
M131	245,991	2,307,946	7.03	245	405	24.3	-54.1				51	3.78	30.86	15.69	3.96	292.8		21.45	12.7	6
M132	244,863	2,302,626	7.33	239	481	24	-69.3				80	6.56	22.96	12.54	3.95	278.16		30.64	7.77	13.11
M135	253,000	2,304,316	7.38	340	598	25	-43.2				59	13	56.72	17.8	40.33	285.48		80.91	12.53	15.18
M136	255,272	2,305,279	7.31	226	420	26.7	-56				45	19.74	37.24	9.36	12.97	263.52		19.96	11.49	17.11
M138B	277,418	2,314,432	6.87	112	229	29.8	-30.1				37	4.2	15.85	0.2	3.36	129.32		20.98	<LD	10.5
M140	269,432	2,313,945	6.94	150	290	24.5	-23.8				49	4.87	18.68	4.46	4.07	178.12		15.74	10.68	10.24
M142	248,080	2,293,841	7.64	322	728	27.5	-47.3				74	6.96	42.69	17.04	13.47	283.04		100.3	14.14	9.12
M143	252,806	2,293,213	7.53	322	882	24.1	-38.4				89	7.78	42.55	19.18	34.89	292.8		104.2	16.17	9.99
M144	251,211	2,284,033	7.09	332	779	23.7	-27.4				49	5.74	56.53	24.78	18.7	331.84		66.53	35.03	10.04
M146	246,393	2,277,186	7.44	229	495	25.3	-34.2				72	13.14	21.07	12.16	7.04	248.88		24.03	17.47	15.15
M152	241,735	2,250,393	7.98	213	447	26.1	-67.8				89	10.85	11.03	6.1	7.9	248.88		25.36	7.24	12.4
M153	244,996	2,255,651	7.9	213	447	25.8	-62.6				102	12.96	11.46	5.84	6.86	290.36		22.62	7.33	13.3
M154	246,175	2,259,306	7.66	287	620	27.7	-48.2				119	11.35	13.03	8.71	9.02	314.76		44.46	9.26	10.16
M155	250,542	2,260,653	7.69	400	907	30	-50.4				160	15.28	22.07	17.15	27.44	414.8		56.34	16.17	13.23
M159	211,018	2,303,231	8.86	235	605	41.1	-124.9				145	1.66	1.1	0.27	2.5	295.24	0.88	5.63	5.41	10.07

Tabla 5.2 Resultados de análisis de iones mayores y parámetros físico-químicos de aguas subterráneas en el Estado de Guanajuato, las concentraciones se dan en mg/L. El asterisco indica parámetro no medido en campo. < LD: menor al límite de detección; el signo mas indica muestras tomadas en manantiales. (Continuación)



Pozo	X	Y	pH	TDS	Cond	Temp	Eh	divISION	divISION	divISION	Na	K	Ca	Mg	Cl	HCO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
M160	217,607	2,317,497	7.64	282	682	37.2	-47.3				102	7.66	30.65	4.35	4.87	234.24		107.4	9.03	15
M162	221,243	2,336,149	7.95	232	502	28	-70.2				94	4.14	19.01	3.98	3.96	246.88		32.24	12.95	9
M163	222,484	2,310,791	7.8	233	490	27.7	-58				73	5.4	29.47	9.44	3.88	280.6		19.29	13.21	13.76
M164	218,838	2,312,637	7.43	321	653	27.4	-40.9				70	8.72	51.01	13.4	3.02	334.28		153.3	31.48	27.06
M167	231,940	2,319,245	7.58	242	502	26.6	-53.4				53	13.32	51.11	8.34	3.79	285.48		24.63	10.37	33.77
M176	246,650	2,323,000	7.16	221	612	24.4	-45.5				50	6.63	41.63	21.58	3.94	341.6		14.24	20.32	22.77
M178	235,151	2,331,578	6.67	358	716	25.4	-17.4				43	6.21	77.36	24.93	7.12	453.84		23.43	16.45	13.96
M179	234,154	2,336,474	7.48	357	794	30.9	-55.6				45	4.27	52.64	39.26	13.62	444.08		35.76	14.09	12.41
M181	239,770	2,334,485	7.86	336	691	25.1	-74.4				83	2.66	45.18	27.65	7.05	407.48		50.84	8.65	5.69
M193	263,491	2,311,634	7.63	329	689	24.3	-41.7				75	10.12	70.19	13.35	16	334.28		63.34	14.06	9.98
M194	254,328	2,291,065	7.54	334	692	27.7	-44.5				90	6.68	63.01	15.25	24.78	322.08		73.01	25.33	9.55
M198	249,771	2,275,943	7.59	319	637	28.2	-44.2				86	8.66	46.53	16.68	5.89	348.92		84.31	9.32	11.96
M197	245,666	2,289,968	7.79	526	1063	25.1	-59.2				296	13.76	37.78	18.11	17.83	378.2		344.98	7.48	9.9
M223	265,147	2,281,759	7.17	616	1790	23.2	-10.5				130	9.97	84.81	11.16	39.54	427		112.81	70.82	8.84
M6+	243,086	2,332,931	8.31	358	1514	78	*				151.5	7.9	4.7	0.4	14.26	336.72	144	40.27	<LD	
M6+	258,312	2,331,016	7.99	317	440	19.2	*				19.7	0.1	67.7	50	2.66	461.16		15.76	4.19	
M96+	261,279	2,338,653	7.36	88.9	167.1	15.3	-20				18	7.74	10.01	3.12	7.39	41.48		20.97	16.64	
M172+	272,190	2,322,833	7.53	203	393	18.2	-40.1				8	1.34	1.04	0.17	2.67	9.76		11.2	<LD	13.61
M173+	270,469	2,330,035	6.84	214	412	15.3	-20.4				11	2.21	60.85	7.27	3.04	90.28		147.93	4.09	12.45
M192+	256,113	2,319,339	7.34	410	794	20.1	-27.1				56	9.71	124.35	22.89	12.6	531.92		31.3	12.92	9.16

Tabla 5.2 Resultados de análisis de iones mayores y parámetros físico-químicos de aguas subterráneas en el Estado de Guanajuato, las concentraciones se dan en mg/L. El asterisco indica parámetro no medido en campo. < LD: menor al límite de detección; el signo mas indica muestras tomadas en manantiales. (Continuación)

El comportamiento de la composición química del agua subterránea, los iones mayores, isótopos estables ( $^{18}\text{O}$  y D) y iones menores ( $\text{NO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ) se presenta en la Tabla 5.2. Es importante mencionar que no hay determinaciones de isótopos para todas las muestras. Al comparar los diagramas de Piper (Figuras 5.1 y 5.2) se puede observar que al depurar los datos se mantiene el comportamiento del total de las muestras; es decir se aprecian las tendencias principales, solo desaparecen datos extremos, los cuales no proporcionan información sobre el comportamiento general del área de estudio.

### 5.1.2 Composición de iones mayores

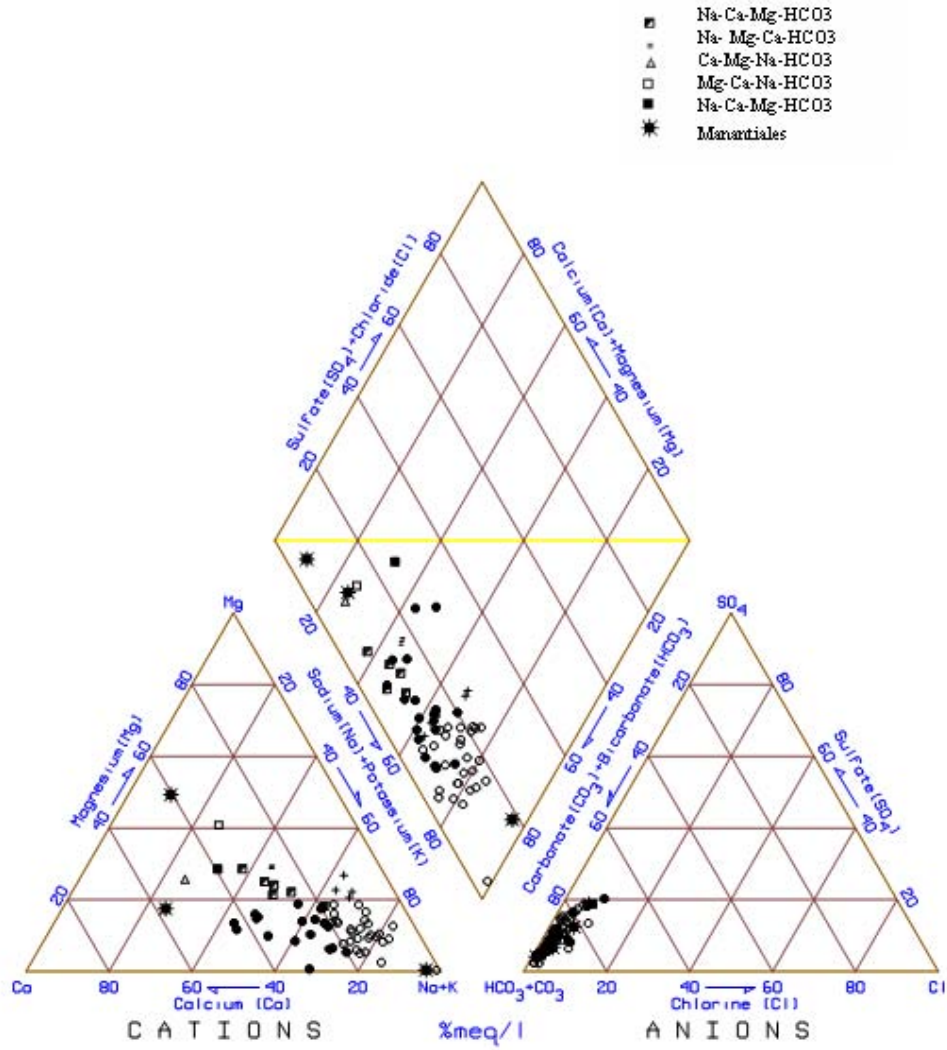
En el diagrama de Piper depurado (Figura 5.2) se observa que la mayoría del agua de los pozos tiene comportamiento del tipo sódico-bicarbonatado. Otra facie principal es del tipo Ca-Mg- $\text{HCO}_3$ , la cual cuenta con 6 muestras y variaciones dentro de la facie principal. En ella se encuentran los manantiales M5, con tipo de agua Mg-Ca- $\text{HCO}_3$ , y M192; con tipo Ca-Na- $\text{HCO}_3$ ; mientras que los pozos M130 y M181 son del tipo Na-Mg-Ca- $\text{HCO}_3$ , el M178 es Ca-Mg-Na- $\text{HCO}_3$  y el 179 Mg-Ca-Na- $\text{HCO}_3$  (Figura 5.2, Tablas 5.2 y 5.3).

Dentro de la facie sódico-bicarbonatado se tienen dos tendencias: La subfacie 1 que se ubica entre los 80-100 % meq/L de  $\text{HCO}_3$  y 60-100 % meq/L de Na+K. La subfacie 2 que contiene entre 60-80 % meq/L de  $\text{HCO}_3$  y 60-100 % meq/L de Na+K. Estas dos subfacies se distinguen por el contenido de los aniones, para la subfacie 1 ión que prevalece es el bicarbonato mientras que subfacie 2 presenta el binomio bicarbonato-sulfato (Figura 5.2).

#### 5.1.2.1 Subfacie 1

El comportamiento de la subfacie 1 comprende 61 pozos y 1 manantial en donde la principal subfacie es Na- $\text{HCO}_3$ , la cual cuenta con los pozos M15, M18, M19, M20, M21, M27, M29, M30, M45, M46, M53, M57, M61, M67, M91, M107, M109, M112, M114, M115, M120, M152, M153, M154, M155, M159, M162, que suman un total de 27 pozos (Figura 5.3, Tablas 5.2 y 5.3).

Dentro de esta misma facie esta la variación Na-Ca- $\text{HCO}_3$ , la cual cuenta con 17 pozos: M12, M17, M36, M84, M86, M86B, M89, M104, M116, M126, M132, M136, M138B, M140, M163, M164 y M194 (Figura 5.3 y Figura 5.4; Tabla 5.2 y 5.3).



**Figura 5.3** Diagrama de Piper. Comportamiento de la facie Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> y de la subfacie 1. Se muestra el Comportamiento de las muestras bicarbonatadas, con bajo contenido en SO<sub>4</sub> (COREMI 2004).

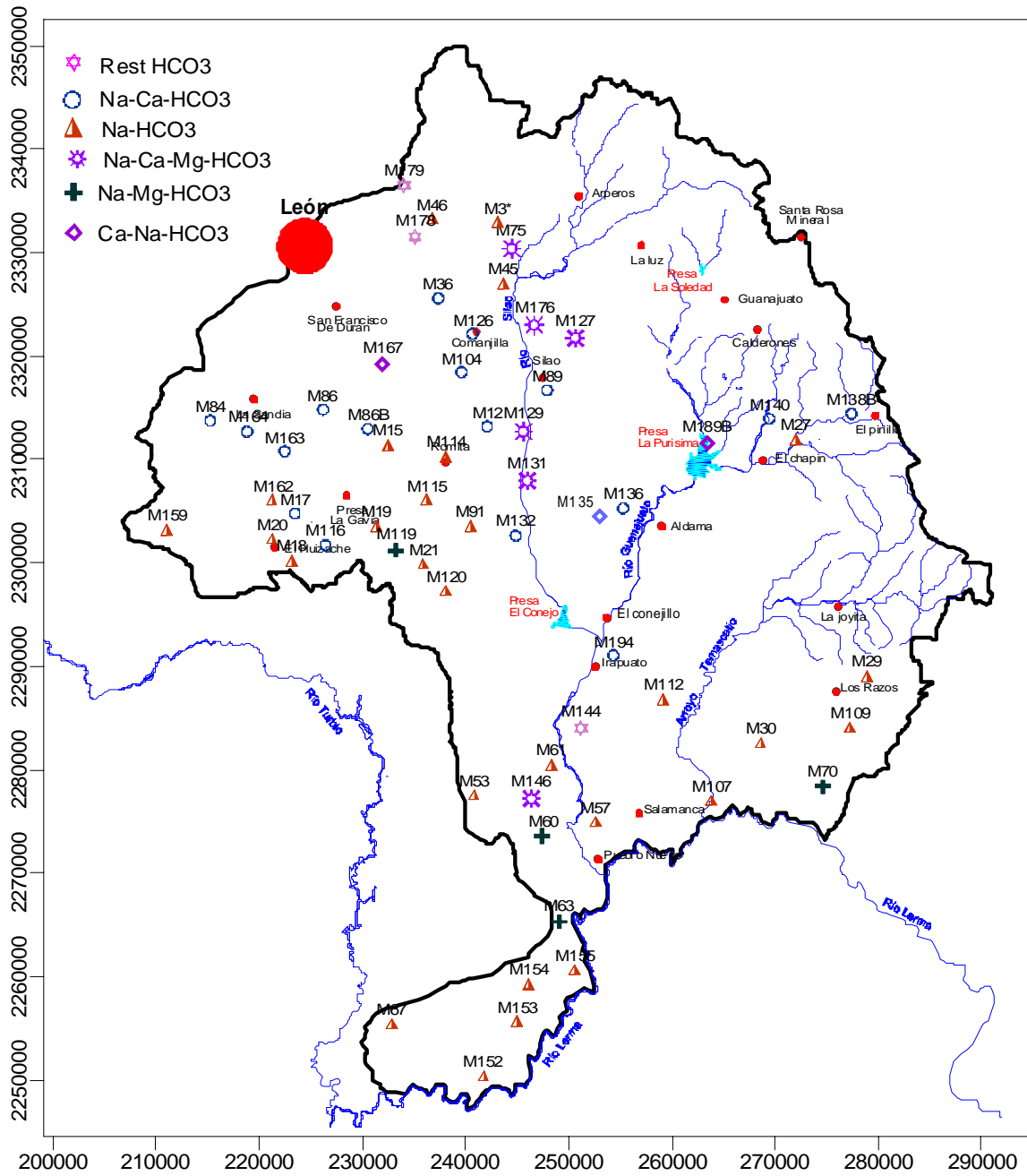


Figura 5.4 Ubicación de las muestras bicarbonatadas, donde la facie principal es Na CO<sub>3</sub> con 61 pozos y el manantial Comanjilla. (COREMI 2004).

Pozo	PH	TDS	Cond	Temp	Eh	Tipo de Agua
M15	7.6	317	654	28.1		Na-HCO3
M18	7.5	257	493	27.2	-36.7	Na-HCO3
M19	7.7	280	536	26.4	-45.8	Na-HCO3
M20	7.6	276	488	27.3	-45.1	Na-HCO3
M21	7.6	307	549	22.7	-44.8	Na-HCO3
M27	6.9	112	213	25.5	-10.7	Na-HCO3
M29	7.5	240	543	35.7	-46.9	Na-HCO3
M30	7.2	392	692	22.1	-28.8	Na-HCO3
M45	7.6	718	622	25.4	-49.6	Na-HCO3
M46	7.8	251	712	24.3	-67	Na-HCO3
M53	7.5	244	580	23.6	-55.7	Na-HCO3
M57	7.9	302	709	28	-46.3	Na-HCO3
M61	7.8	278	656	25.2	-57.9	Na-HCO3
M67	7.6	203	414		-42.2	Na-HCO3
M91	7.6	220	588	27.4	-50.7	Na-HCO3
M107	7.4	264	516	25.2	-37.7	Na-HCO3
M109	7.9	281	637	27.9	-65.6	Na-HCO3
M112	7.3	298	445	25.5	-54.2	Na-HCO3
M114	7.5	257	574	24.9	-128	Na-HCO3
M115	7.4	290	662	25.9	-61.4	Na-HCO3
M120	7.3	282	599	25.1	-57.2	Na-HCO3
M152	8	213	447	26.1	-67.8	Na-HCO3
M153	7.9	213	447	25.8	-62.6	Na-HCO3
M154	7.7	287	620	27.7	-48.2	Na-HCO3
M155	7.7	400	907	30	-50.4	Na-HCO3
M159	8.9	235	605	41.1	-125	Na-HCO3
M162	8	232	502	28	-70.2	Na-HCO3
M12	7.6	303	452	25.8	*	Na-Ca-HCO3
M17	7.4	269	555	25.4	-30.2	Na-Ca-HCO3
M36	7.4	300	620	25.5	-33.4	Na-Ca-HCO3
M84	7.2	202	512	27.3	-39.8	Na-Ca-HCO3
M86	7.5	161	359	33.4	-59.8	Na-Ca-HCO3
M86B	7.6	179	341	31.2	-57	Na-Ca-HCO3
M89	7	282	668	24.9	-34	Na-Ca-HCO3
M104	7.1	221	553	25.9	-37	Na-Ca-HCO3
M116	7.6	252	557	26	-37	Na-Ca-HCO3
M126	7.7	238	490	25.5	-75	Na-Ca-HCO3
M132	7.3	239	481	24	-69	Na-Ca-HCO3
M136	7.3	226	420	26.7	-56	Na-Ca-HCO3
M138B	6.9	112	229	29.8	-30	Na-Ca-HCO3
M140	6.9	150	290	24.5	-24	Na-Ca-HCO3
M163	7.8	233	490	27.7	-58	Na-Ca-HCO3
M164	7.4	321	653	27.4	-41	Na-Ca-HCO3
M194	7.5	334	692	27.7	-45	Na-Ca-HCO3
M167	7.6	242	502	26.6	-53	Ca-Na-HCO3
M189B	7.6	329	689	24.8	-42	Ca-Na-HCO3
M60	7.8	303	716	23.9	-52	Na-Mg-HCO3
M63	8	557	1104		-69	Na-Mg-HCO3
M70	7.4	303	705	26.5		Na-Mg-HCO3
M119	7.9	365	652	28.5	-57	Na-Mg-HCO3
M75	7.6	276	632	27.9	-55	Na-Ca-Mg-HCO3
M127	7.5	261	502	26.1	-40	Na-Ca-Mg-HCO3
M129	7.7	266	433	27.9	-70	Na-Ca-Mg-HCO3
M131	7	245	405	24.3	-54	Na-Ca-Mg-HCO3
M146	7.4	229	495	25.3	-34	Na-Ca-Mg-HCO3
M176	7.2	221	612	24.4	-46	Na-Ca-Mg-HCO3
M130	7.3	255	450	25.1	-54	Na-Mg-Ca-HCO3
M181	7.9	336	690	25.1	-74	Na-Mg-Ca-HCO3
M178	6.7	358	716	25.4	-17	Ca-Mg-Na-HCO3
M179	7.5	357	794	30.9	-56	Mg-Ca-Na-HCO3
M144	7.1	332	779	23.7	-27	Ca-Na-Mg-HCO3
M3+	8.3	358	1514	78	*	Na-HCO3
M5+	8	317	440	19.2	*	Mg-Ca-HCO3
M192+	7.3	410	794	20.1	-27	Ca-Na-HCO3

**Tabla 5.3** Características Físico-químicas y tipos de agua bicarbonatada. El asterisco indica parámetro no medido en campo; el signo más indica muestras tomadas en manantiales.

Otras variaciones de la misma subfacie son: Na-Ca-Mg-HCO3 en los pozos M75, M127, M129 y M131; del tipo Na-Mg-HCO3 en los pozos M60, M 63, M70, M 119;

del tipo Ca-Na-HCO<sub>3</sub> en los pozos M67 y M189B; y del tipo Ca-Na-Mg-HCO<sub>3</sub> en el pozo M144 (Tablas 5.2 y 5.3).

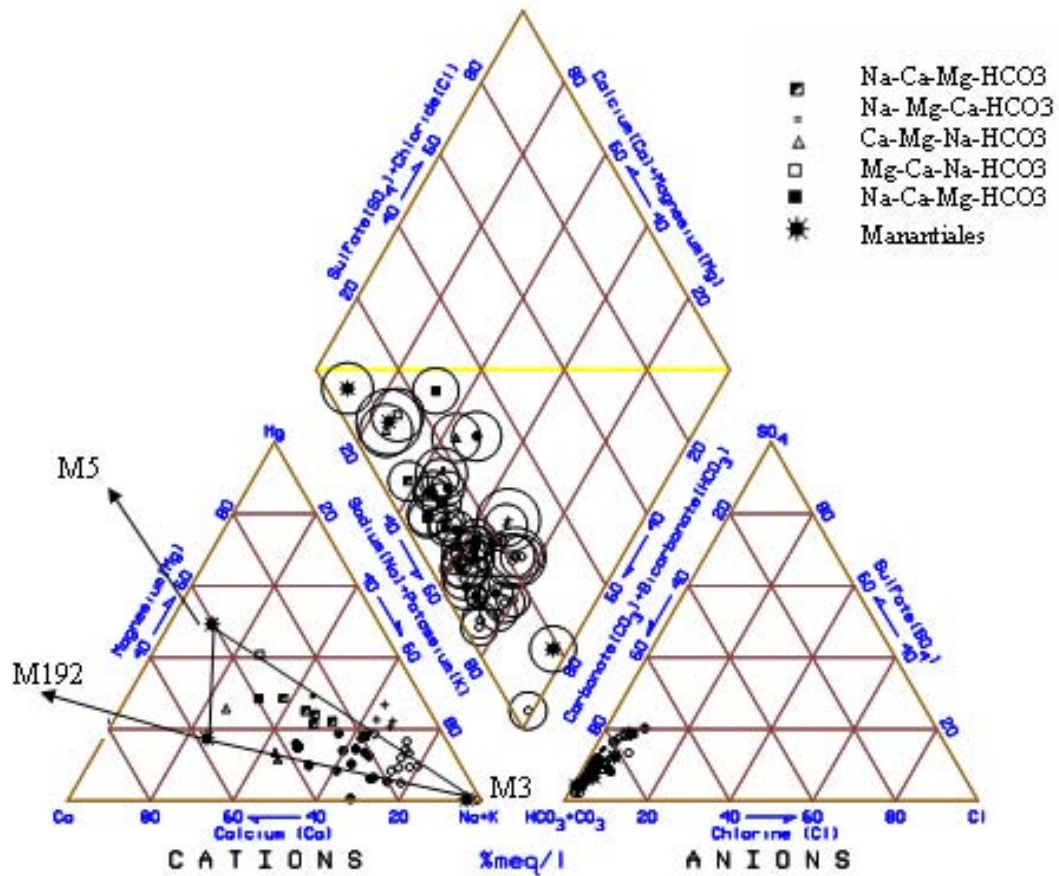
Para la subfacie 1, en dos casos se presenta un aumento en el contenido de sólidos totales disueltos, SDT (Figuras 5.5a, 5.5b, y 5.5c) de forma perpendicular al aumentar del Na+K; es decir, hacia aguas más sulfatadas. Este aumento de sólidos totales disueltos puede relacionarse con mezclas de agua del acuífero con aguas superficiales o aguas de flujos intermedios.

Dentro de la subfacie 1 las diferencias en los cationes presentan comportamiento que indica el intercambio, lo cual podría llevarse a cabo en espesores de arcillas; o bien a lo largo de flujos regionales que pueden ocurrir por la disolución de feldespatos de sodio provenientes de plagioclasas, dichos minerales son constituyentes comunes de rocas ignimbríticas que afloran en el área de estudio, por lo que la principal facie de agua es Na-HCO<sub>3</sub>.

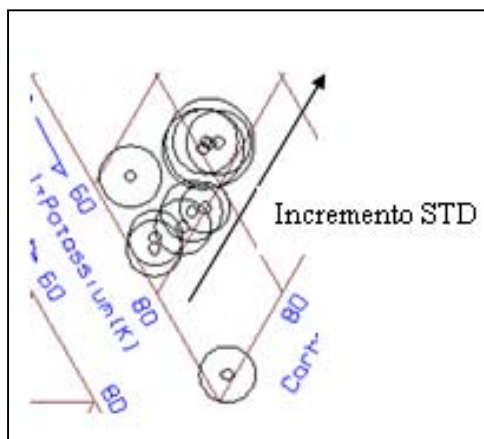
En la Figura 5.5a se puede ver que por sus cationes, se distinguen tres tipos de agua originales, en dicha figura se observa el comportamiento de los cationes, los cuales están delimitados por los manantiales presentes en el área de estudio (Figura 5.5a).

Estos miembros extremos pueden conformar un triángulo dentro del cual la mayoría del agua de los pozos se encuentra contenida. Un miembro extremo lo conforma el manantial M5 (La Luz) con altos contenidos de en Mg y Ca; un segundo tipo lo representa el manantial M192, el cual presenta altos valores en calcio y la tercera facie de agua original es el manantial Comanjilla M3 (Figura 5.5a), con valores bajos de calcio y magnesio y grandes cantidades de Na asociado con termalismo.

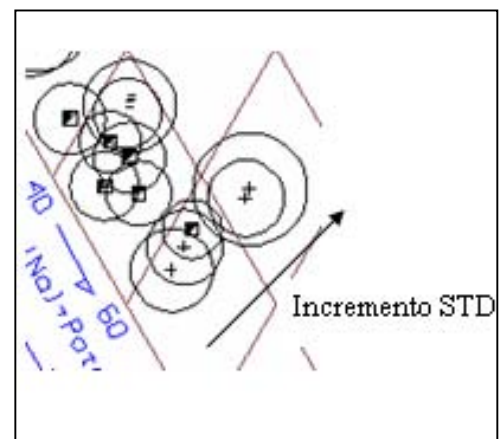
La posible relación entre pozos y manantiales puede explicarse por los miembros finales que conforman los manantiales la Luz M5, el manantial 192 y el manantial Comanjilla M3. Los pozos que caen dentro del triángulo de la Figura 5.5a representan la mezcla de ellos. Es de remarcar que estos tres manantiales se encuentran en la Sierra de Guanajuato (Figura 5.4), por las características físico químicas de los manantiales M5 y M192 pueden relacionarse con agua de lluvia, mientras que el manantial Comanjilla, M3, representa flujos regionales, evidenciado por su alta temperatura (78 °C); por lo que el agua original se infiltra e interrelacionan con las rocas circundantes, las que a su vez se mezclan con aguas de origen profundo dando lugar a mezclas de agua.



5.5 a



5.5 b



5.5 c

**Figura 5.5** Comportamiento de la subsficie 1, 5.5b y 5.5c Aumento en sólidos totales disueltos en aguas bicarbonatadas. El diámetro de los círculos indica es proporcional a los sólidos totales disueltos (STD).

La configuración del ion Magnesio, se muestra en la Figura 5.6, se consideran todos los tipos de agua asociados con este ion, en dicha figura se muestra una tendencia hacia el centro del área del estudio, mientras que en el poniente y oriente el contenido de las muestras es generalmente bajas en Mg. Esto evidencia la influencia de las aguas de tipo Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> que se mezclan para formar agua de tipo mixtas y que se encuentran distribuidas hacia los valles (Figura 5.6).

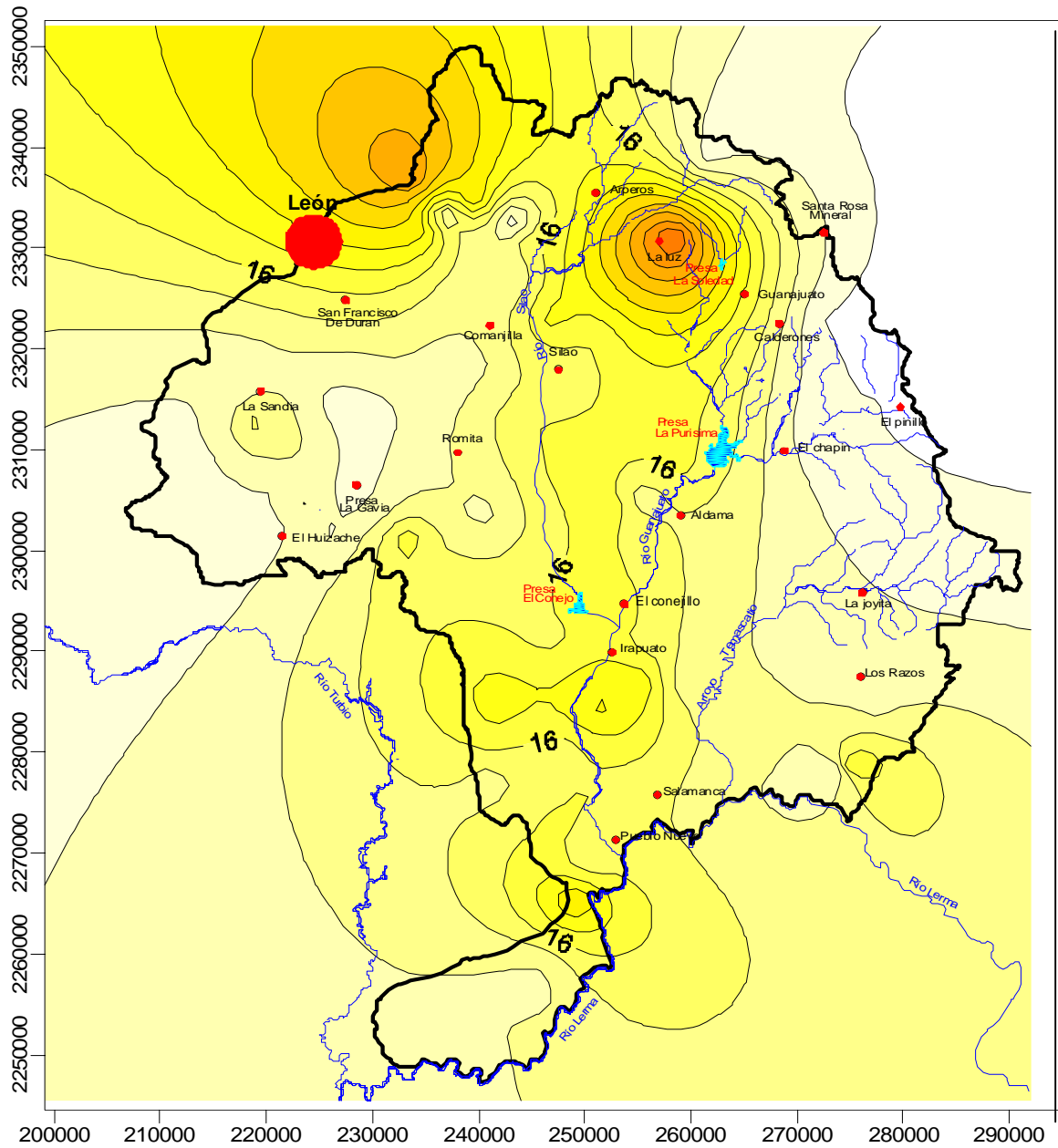
Dentro de la subfacie 1 se destaca la presencia del Manantial Comanjilla (M3), el cual presenta valores de pH de 8.31 y temperatura de 78 °C. Estos valores resaltan de los valores medios que se tienen para la Familia Na-HCO<sub>3</sub>, que son de 7.6 ± 0.3 en pH y temperaturas de 27.0 ± 3.8 °C, diferentes a los valores que presenta la muestra del manantial Comanjilla.

Otro valor que se desvía de la media de los valores medios, son las concentraciones de magnesio; en el manantial Comanjilla es de 0.40 mg/L, mientras el valor medio del total de los pozos de esta facie (Na-HCO<sub>3</sub>) es de 7.8 ± 3.8, asimismo, se resalta que en esta misma facie se presentan concentraciones de magnesio ≤ 1 mg/L y tienen relación con el termalismo; un ejemplo claro es el pozo M159, con una temperatura de 41.1 °C, el cual presenta una concentración de 0.27 mg/L de Magnesio (Tabla 5.1). Este pozo se localiza en la parte oeste de la subcuenca, en el sitio opuesto del manantial Comanjilla (Figura 5.4). Asimismo pozos que presentan características similares, se localizan en esta misma zona de la Muralla, en la cual la actividad termal es evidente y las mezclas de agua subterránea con agua original se encuentran ya documentadas en: CEAS/XXVI/OD/UNAM/99-088.

### 5.1.2.2 Subfacie 2

Existen dos tipos principales con presencia significativa de sulfatos. Aguas del tipo Na-Ca-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> se encuentran presentes en los pozos M102, M160, M196 y M223. Otro subtipo es reconocido en los pozos M41, M51, M58B, M68, M69 y M117, que tienen características Na-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>. Otras variaciones se presentan en la Tabla 5.4. Destaca el pozo M197 con características Na-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> y con 345 mg/L de sulfatos (Tabla 5.1). Este pozo y el M223 presentan valores en sólidos totales de 526 mg/L y 606 mg/L respectivamente, mucho mayor que el promedio de 369 mg/L de esta subfacie (Figura 5.7).





**Figura 5.6.** Distribución del ión magnesio en el área de estudio en mg/L. Se consideraron todas las familias para la configuración (COREMI 2004).

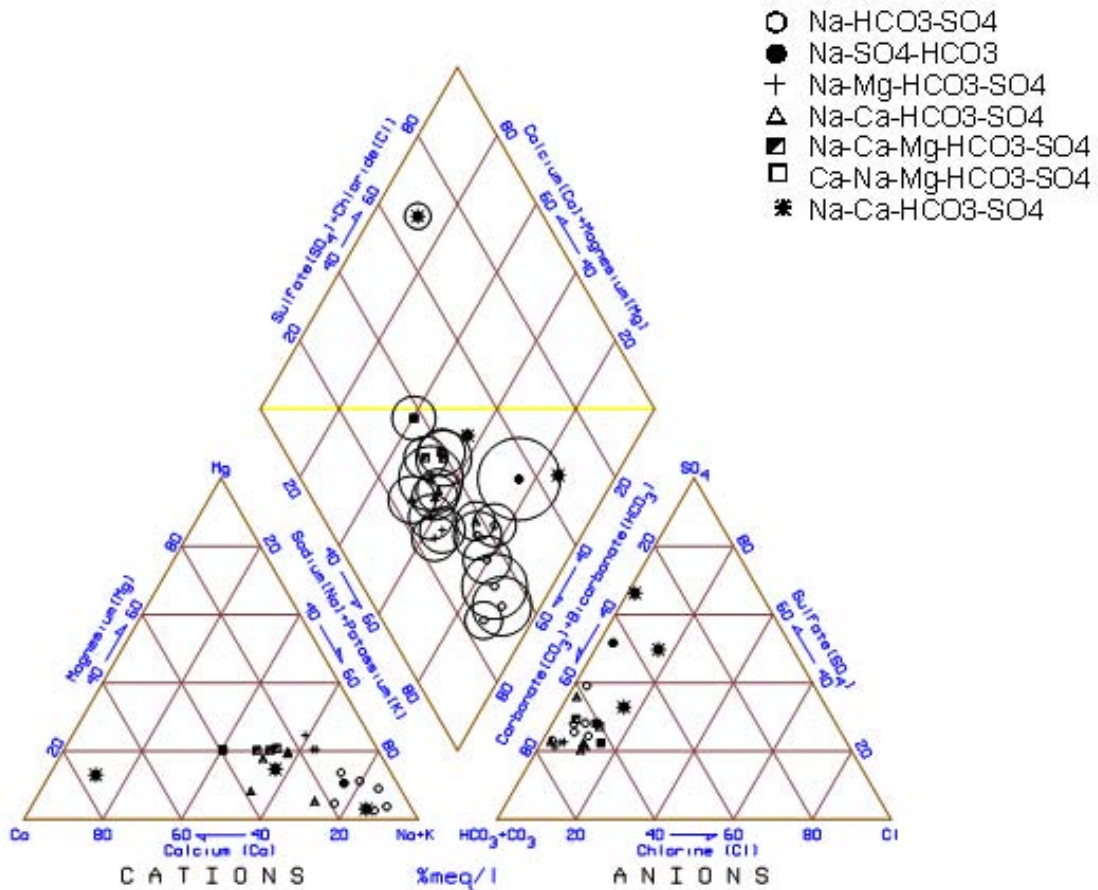


Figura 5.7 Subfacie 2

Este promedio es más grande que el del grupo de agua con características de bicarbonatada (277 mg/L).

Los valores de STD altos, así como valores de sulfatos elevados, apoyan a la suposición de que los sulfatos encontrados en los pozos tienen origen de una mezcla con agua superficial.

Dentro de esta subfacie existen 3 manantiales con agua del tipo bicarbonatada-sulfatada, representada por las muestras M96, M172 y M173, lo que hace suponer la afectación de los mismos por actividad antrópica (Figura 5.2).

La distribución geográfica de los pozos con componente sulfatada (Figura 5.8). Se localiza generalmente hacia el centro y al sur de la subcuenca, así como en los pozos M160, M41 y M117, que se encuentran en el poniente del área de estudio. Los pozos con alto contenido en sulfatos que se encuentran en las cercanías de la Ciudad de Irapuato y en las inmediaciones de las presas El Conejo y La Purísima, las cuales contienen altos valores del ión Cloruro (M135, M143, M102 y M56, Tabla 5.1).

Sí se considera el valor de fondo para cloruro con 15 mg/L (CEAS/XXVI/OD/UNAM/99-088), 11 de 19 muestras de la subfacie 2 sobrepasan dicho contenido de cloruros, por lo que se refuerza la hipótesis del origen de esta subfacie proviene de contaminación antropogénica; por lo tanto el valor del ión cloruro por encima de 15 mg/L puede relacionarse con la actividad humana.

Pozo	pH	TDS	Cond	Temp	Eh	Tipo de Agua
M41	7,05	346	972	36,2	-26,2	Na-HCO3-SO4
M51	7,98	368	734	27,7	-63,9	Na-HCO3-SO4
M58B	7,72	463	1109	27,1	-56,3	Na-HCO3-SO4
M68	7,96	338	677	*	-66,2	Na-HCO3-SO4
M69	7,46	417	889	21,5	-40,9	Na-HCO3-SO4
M117	8,18	276	683	31,7	-20,7	Na-HCO3-SO4
M197	7,79	526	1053	25,1	-59,2	Na-SO4-HCO3
M49	7,53	355	663	24,4	-51,4	Na-Mg-HCO3-SO4
M50	7,44	348	696	26,6	-38,8	Na-Mg-HCO3-SO4
M52	7,29	244	683	25,3	-49,1	Na-Mg-HCO3-SO4
M102	7,73	354	761	27,3	-57,1	Na-Ca-HCO3-SO4
M160	7,64	282	682	37,2	-47,3	Na-Ca-HCO3-SO4
M196	7,59	309	637	28,2	-44,2	Na-Ca-HCO3-SO4
M223	7,17	606	1790	23,2	-18,5	Na-Ca-HCO3-SO4
M56	6,60	466	1008	23,2	-8,9	Na-Ca-Mg-HCO3-SO4
M142	7,64	322	728	27,5	-47,3	Na-Ca-Mg-HCO3-SO4
M143	7,53	322	882	24,1	-38,4	Na-Ca-Mg-HCO3-SO4
M135	7,38	340	598	25	-43,2	Ca-Na-Mg-HCO3-SO4
M96*	7,36	88,9	167,1	15,3	-30	Na-Ca-HCO3-SO4
M172*	7,53	20,3	39,8	18,2	-40,1	Na-SO4-HCO3
M173*	6,84	214	412	15,3	-20,4	Ca-SO4-HCO3

**Tabla 5.4** Características físico-químicas y tipos de agua sulfatada-bicarbonatada

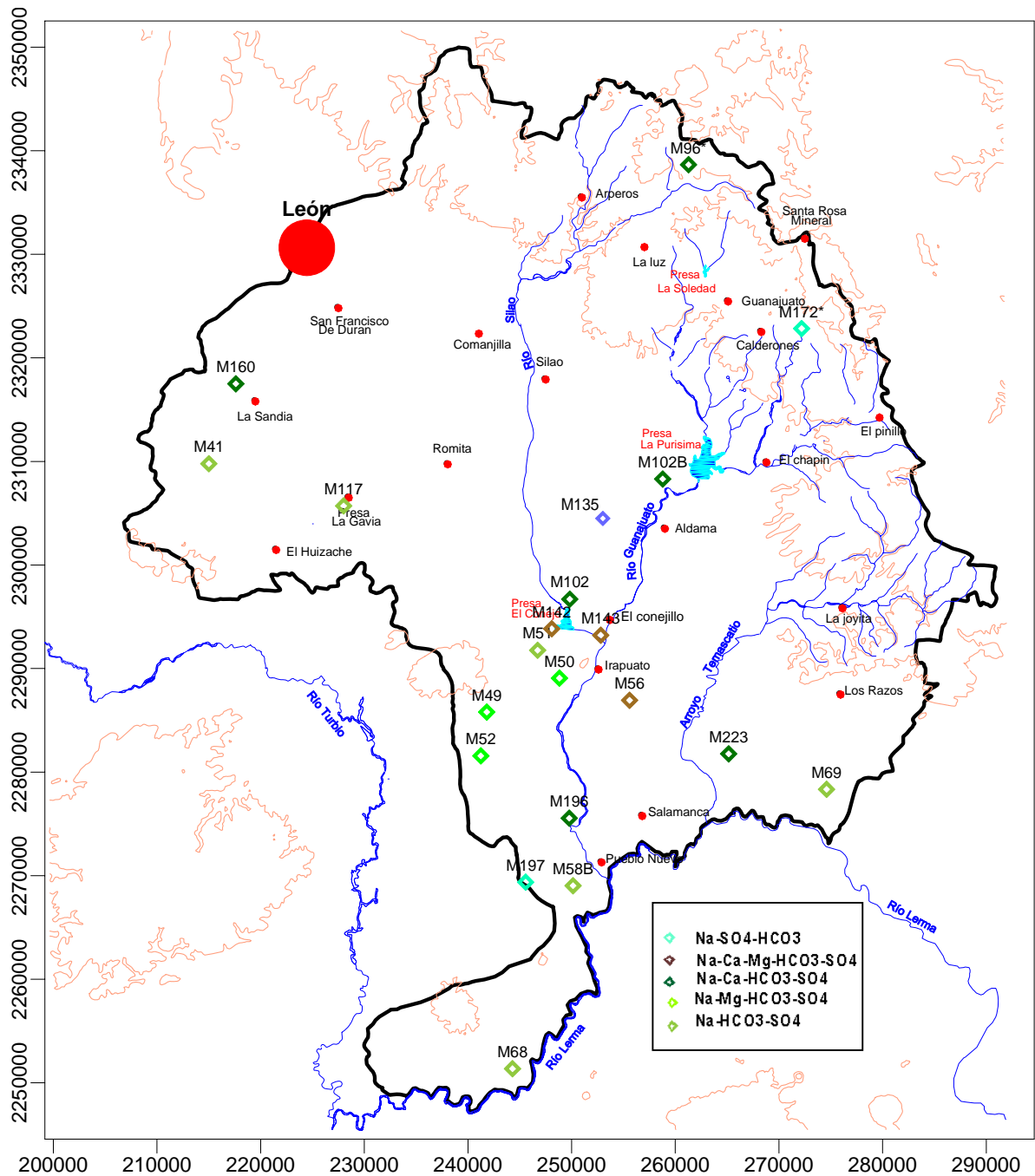


Figura 5.8 Distribución de los tipos de agua bicarbonatada-sulfatada (COREMI 2004)

## 5.2 IMPACTO DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Como vimos anteriormente, el análisis y la clasificación de familias según la composición de iones mayores permiten dar interpretaciones y conclusiones sobre el comportamiento y la evolución natural de los acuíferos. Además se apoyó este análisis del estado “instantáneo” del agua subterránea con la interpretación y comparación de los datos de isótopos estables.

Los resultados del estudio hidrogeoquímico, así como los de estudios anteriores, sugieren una gran influencia del impacto antropogénico a la cantidad y calidad del agua subterránea. La intensa e insostenible extracción en la zona cambió significativamente los niveles estáticos, formando fuertes conos de abatimiento, implicando no solo efectos económicos negativos, sobre todo al sector agrícola, al corto y largo plazo, sino también una mayor presión y competencia por el recurso entre los diferentes sectores como lo son: agrícola, industrial, municipal y hasta estatal. El manejo integral de los acuíferos es un asunto esencial en el desarrollo futuro de la región. La tarea incluye tomar en cuenta, impulsar y desarrollar las siguientes consideraciones:

- ✓ Mayor control de la extracción
- ✓ Monitoreo de cantidad y calidad del acuífero
- ✓ Concientización y los recursos técnicos para el uso responsable y eficiente del recurso
- ✓ Solución de los conflictos existentes entre los usuarios y procurar un manejo de cuenca participativo que integre intereses económicos, sociales y ecológicos
- ✓ Investigación de alternativas para el abastecimiento y la recuperación del recurso

El impacto antropogénico a los acuíferos debido al uso agrícola, industrial y urbano no se restringe a efectos cuantitativos, sino también implica un deterioro de la calidad del agua, lo que consecuentemente incrementa el costo y competencia por el recurso.

El análisis del riesgo sobre el deterioro en la calidad del agua subterránea incluye tres diferentes factores a analizar: 1) la vulnerabilidad intrínseca del acuífero, 2) el conocimiento de fuentes potenciales de contaminación y 3) análisis químicos periódicos para evaluar el estado real y actual de la calidad del acuífero.

Para la subcuenca del Río Guanajuato estos factores sugieren la necesidad de determinar el impacto antropogénico a la calidad del acuífero, por las siguientes consideraciones: El agua subterránea es más vulnerable en áreas en donde la zona vadosa está constituida por medios fracturados. Este efecto facilita la circulación de flujos superficiales igual que un transporte de posibles contaminantes, aunado al sistema de fallas presente en la zona.

Por otra parte, los estudios isotópicos, como se verá más adelante, sugieren que el sistema es mucho más dinámico de lo que se había considerado y con alto impacto por la recarga de la precipitación contemporánea. Este hecho puede resultar positivo, ya que se estaría permitiendo una rápida recuperación en algunas partes del acuífero sobre-explotado. Pero al mismo tiempo una infiltración rápida de la

recarga superficial implica una mayor susceptibilidad a la contaminación, quiere decir, el aporte de sustancias críticas antropogénicas que pueden causar un deterioro a la calidad del medio. Eso es porque la vulnerabilidad a menudo está asociada directamente al tiempo de residencia en la zona vadosa. Una infiltración más rápida implica menos interacción con el medio geológico y por lo tanto los contaminantes tendrán menos tiempo para ser retenidos, evitando los procesos naturales como la adsorción o degradación bioquímica.

En caso de las fuentes potenciales de contaminación, el lector es referido a un estudio realizado por la Universidad Iberoamericana en 1999, el cual incluye un catastro de dichas fuentes. Según este estudio los principales contaminadores potenciales detectados por sector fueron:

Industria: Las fuentes potenciales que provienen de este sector son los mismos terrenos industriales, ya sean activos o abandonados; la disposición de residuos y lodos o accidentes químicos. Un ejemplo en el área de estudio incluye varios accidentes en la planta "Tekchem" en Salamanca. Hay que recordar que en terrenos contaminados las sustancias peligrosas se pueden quedar muchos años en el suelo y subsuelo antes de llegar al acuífero. Ejemplos específicos y muy discutidos incluyen a las refinerías y ladrilleras.

Servicios Públicos: Deshechos municipales, pues se encontró que las descargas y canales de aguas negras, así como basureros activos y clausurados, están entre las fuentes principales de contaminación. Por otra parte, el tratamiento de agua es muy bajo o nulo; prueba de ello es que a menudo se encuentran problemas de funcionamiento en las plantas existentes. La práctica común es descargar directamente del alcantarillado a los cauces "naturales" de drenaje. Esto les convierte en fuentes potenciales de contaminación, como ocurre con los canales no revestidos y los revestidos que tienen fugas. Los contaminantes típicos son SDT, nitratos, cloruros y detergentes, entre otros.

En León se cuenta solamente con un relleno sanitario, los sitios de disposición de basura son, por lo general, tiraderos a cielo abierto, sin ninguna medida de protección para el acuífero. Asimismo, hace falta establecer un control estricto para el depósito de residuos hospitalarios e industriales. La infiltración (p.e. de metales pesados, nitratos, cloruros y sulfatos) se facilita por el hecho que en muchos casos se utilizan zonas en donde se ha extraído material para construcción, las que en muchos casos, están conformados por materiales altamente permeables como arena o grava (COREMI 2004).

Agricultura: Debido a que más del 80% del agua es utilizada para el riego, una parte de este sector utiliza aguas negras. Por esta razón, el retorno del riego es una importante fuente difusa para la contaminación de fertilizantes, pesticidas y sales.

Granjas: Es muy común la acumulación y disposición de excretas sin ninguna medida de protección, que hace de las granjas, a gran escala, importantes fuentes de contaminación de compuestos nitrogenados. En estos últimos sectores no han sido considerados los rastros, los cuales contribuyen de manera importante a la contaminación.

Minería: Sobre todo en el Distrito Minero de Guanajuato, los jales y otros depósitos, relacionados a este sector, presentan fuentes de contaminación con metales y sulfatos. Sin embargo, estudios previos concluyeron que la generación de acidez y el aporte de metales pesados al acuífero es muy limitado debido a la alta relación Ca/SO<sub>4</sub> y por procesos de precipitación, complejación y de reacciones redox (Armienta, 2000; Carillo et al., 2003).

Las minas también constituyen posibles fuentes de *polución*, debido al incremento de oxidación, que puede facilitar la movilización de diferentes metales y sulfatos. Además los túneles abandonados representan vías preferenciales de incorporación rápida de solutos.

Panteones: Por la descomposición de los cadáveres, de aquí se originan aminos, Ca, P y compuestos nitrogenados.

Gasolineras: por fugas de hidrocarburos en contenedores y tuberías.

Presas de regulación: Debido a la carga con aguas residuales estos cuerpos de agua pueden constituir fuentes de contaminación. Sin embargo necesitaría un cambio de las condiciones físico-químicas, así como del pH. Se ha comprobado que gran parte de los metales están inmovilizados en los sedimentos y una capa de materia orgánica inhibe la infiltración hacia el acuífero. La mayoría de las fuentes detectadas se concentran en las zonas urbanas. Un impacto mayor es de esperarse alrededor de las ciudades industriales de León, Irapuato y Salamanca.

### 5.2.1 Limitaciones por los datos de metales

Los puntos planteados anteriormente muestran que el riesgo de contaminación está presente en la zona de estudio. Por esta razón se realizó un muestreo muy amplio en la zona de estudio incluyendo una gran cantidad de elementos traza. Esto normalmente, nos podría dar una imagen amplia sobre la magnitud de algunos impactos antropogénicos al acuífero. Desgraciadamente a lo largo del análisis ocurrieron problemas con la confiabilidad de estos datos, reportándose valores muy altos para algunas sustancias. Se consideró que el método de análisis no fue apropiado. Se aplicó el método ICP-MS, que es muy preciso, pero no es aplicable para todas las concentraciones y elementos en el mismo análisis. Por esta razón, puede haber resultados dudosos, principalmente para elementos como son el Arsénico, Selenio y Mercurio. Por todo esto se optó por no incluir a los metales en la interpretación hidroquímica y dejar esta actividad para más adelante, como producto de un re-muestreo que se hará en 2004 y que se entregará como un adeudo. Sin embargo queremos mencionar algunas observaciones, para demostrar las diferencias que ocurrieron en comparación con estudios anteriores y por otro lado porque aún si la magnitud del efecto de los elementos no es confiable, las tendencias generales se muestran factibles (COREMI 2004).

Además el ejemplo subraya en buena manera las precauciones que se requieren para este tipo de análisis y cuando se trata de "contaminación", los resultados tienen un gran impacto, el cual puede llegar a ser grave y conllevar serios problemas en los sectores político, social y económico.

Con los datos enviados por el laboratorio Centro Experimental Chihuahua de COREMI, depurados y aplicando un balance iónico, se encontró que 8 parámetros sobrepasan las normas actuales. Sin embargo, de éstos los valores para sodio y nitratos se consideran suficientemente confiables para proceder con el análisis.

	Na mg/L	NO3-N mg/L	As mg/L*	B mg/L	Hg mg/L	Cr mg/L	Se mg/L	U mg/L**
NOM-127-SSA 1	200	10	0,025		0.001	0,05		
OMS				0,5		0,050	0,01	0.009
valores arriba de la norma	3	45	10	2	6	2	6	11

**Tabla 5.5** Este límite es valido desde 2005, el límite actual es 0.05 mg/L\*. \*\* Se base en la toxicidad química del Uranio, el valor fue establecido en una manera provisional

A pesar de todo, los metales mencionados, excluyendo el Uranio, tienen antecedentes en la región y su presencia es bastante probable, aún si hay incertidumbre sobre las concentraciones.

### Cromo

El Cromo es un elemento metálico que es utilizado por un gran número de industrias, tales como las curtidurías, pinturas, tintas, industria electrónica, de vidrio y de papel. También existe en yacimientos naturales, particularmente en las rocas ultramáficas, como cromita,  $FeCr_2O_4$ .

Para determinar y evaluar el riesgo debido a la presencia de cromo en el agua subterránea se requiere un conocimiento de su especiación. Esto es debido al hecho que la toxicidad y movilidad del cromo depende de su estado de oxidación. Mientras Cr(III) se considera como nutriente esencial para el metabolismo de glucosa, en la forma Cr(VI), éste metal es cancerígeno. Para Cr-total, medido en este estudio, la NOM-127-SSA propone un límite de 0.05 mg/L para agua de consumo humano.

Según los resultados el cromo presenta concentraciones generalmente altas, con varias irregularidades distribuidas en el área. Algunos puntos como el pozo M 178, al este de León se podría explicar, con el afloramiento de piroxenitas de San Juan de Otates, al norte de esta localidad. Estas rocas contienen cantidades elevadas de cromita, Ni, Fe y Mg. Su intemperismo o serpentización a altas temperaturas pueden liberar cromo, que en este proceso es oxidado fácilmente de Cr(III) a Cr(VI) [Mertz, 1974].

Pero mientras los valores asociados a esta fuente natural fueron reportados con 0.005-0.015 mg/L [Rodríguez y Armienta, 1995], en el presente estudio llegan hasta 0.039 mg/L. El contenido en cromo sobrepasa la NOM-127 en la muestra M 102 (0.054mg/L), situada al Norte de la presa El Conejo y en el manantial Mineral de la Luz M005, con 43.2 mg/L (!). El manantial se encuentra en el Distrito Minero de Guanajuato, cerca de un viejo confinamiento que contiene desechos mineros, que podría explicar su presencia, pero no los altos valores del Cr. En contradicción a



este resultado, está el hecho de que otros metales asociados con dichos deshechos, como el Fe, Cu, Cd, As, Se y Hg no fueron detectados en el manantial.

Altos valores en los sedimentos de las presas La Purísima (108 mg/L) y La Sandía (172.5 mg/L) reportados por Hernández Silva et. al. en 2000, no se manifiestan en las muestras tomadas cerca de estos cuerpos superficiales. Esto es debido a la inmovilización del Cr, como también de otros metales en los sedimentos, que confirman estudios anteriores.

### Arsénico y Selenio

Otras irregularidades son el arsénico y el selenio. Debido a que ambos elementos se pueden asociar a actividades en el Distrito Minero Guanajuato, valores altos se esperaban en esta área y cerca del Río Guanajuato. Pero en las dos muestras tomadas en el río (M6 y M8) el contenido en fue relativamente bajo, comparado con los altos valores que se obtuvieron alrededor de Irapuato, los cuales sobrepasan la norma para agua potable de la USEPA.

El Arsénico se encuentra en la naturaleza como compuesto, siendo el más común la arsenopirita (FeSAs). Se presenta en los jales de la minería y es utilizado por industrias del vidrio, cerámica, tintes y como insecticida en la agricultura. En varios estudios anteriores se reportó un gran potencial de adsorción para el arsénico, que resultó en gran parte del As liberado por fuentes superficiales (jales, industria, pesticidas, etc.), el cual es inmovilizado en los primeros 20cm del suelo o de sedimentos en cuerpos superficiales. Sin embargo esto puede cambiar si disminuye el pH o si la capacidad de adsorción es agotada.

Los valores del arsénico sobrepasan la NOM-SSA 127 actual (0.05 mg/L) en los pozos M058B (SW, cerca de Pueblo Nuevo) y M164 (el Panal, cerca de La Sandía). En total se presentan altos valores de As (arriba del límite permisible que es 0.025 mg/L) en 10 de los 78 pozos. Resultados similares se obtuvieron en un estudio en Silao-Romita en 1998, en el cual se encontró que existían valores mayores a 0.025 mg/L en 6 de 15 pozos. Los altos valores en el presente estudio se encuentran en pozos relativamente aislados, sugiriendo un origen muy local. Por otra parte, no se encuentra ninguna correlación general con el Fe, que podría indicar una disolución de FeSAs. Este hecho se puede deber a una precipitación de oxi-hidroxilos del Fierro o a otras fuentes de Arsénico. Se encontraron interesantes correlaciones en las familias específicas.

TIPO DE AGUA	As RELACIONADO CON:
Na-HCO <sub>3</sub>	Li, B
Na-Ca-HCO <sub>3</sub>	Cu, Fe, Li
Na-Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	Ni
Resto HCO <sub>3</sub>	Na, K
Tipos bicarbonatadas-sulfatadas	Na, B, Li, Mo

**Tabla 5.6** Correlaciones con el arsénico en los diferentes tipos de agua

Estos datos sugieren una relación entre la presencia de As y componentes profundos en el agua. En específico, los pozos M138B y M27, al este de la Sierra de Guanajuato, presentan valores levemente elevados en las concentraciones de Li, con pH relativamente bajo y bajos en sólidos totales; que corresponde a una zona de recarga en rocas riolíticas. Altos valores de Li, como también de Fe y nitratos, están presentes en el pozo M164. Otro grupo (M3, M75, M45) se asocia a agua termal del manantial Comanjilla, con valores de As de 24.3 mg/L. En el manantial se presentan además muy altos valores de níquel (52.4 mg/L) y zinc (38.2), como también concentraciones mayores de boro y litio. La asociación del Arsénico en aguas termales es factible, aún si el valor en si, es muy alto. En áreas hidrotermales los metales como As, Zn, Cu, Hg, etc., presentan una alta solubilidad y movilidad. Los contaminantes disueltos por manantiales termales pueden, posteriormente, depositarse en sedimentos y rocas con presencia de matrices polimetálicas, lo que puede constituir una fuente local de contaminación, aun si el sistema termal presenta variaciones en su temperatura (COREMI 2004).

En el sur y cerca del Río Guanajuato (M 58B, M155, M102, M102B, M64, M57, M61, M60) altos valores de As están acompañados por una mayor concentración en los iones boro y/o sodio.

### **Mercurio**

El mercurio muestra anomalías claras en los pozos 41, 45, 46, 117 y 197, lo cual indica que tienen una mayor distribución al oeste de la zona de estudio.

## **5.2.2 Nitratos y Cloruros como indicadores del impacto antropogénico**

### **Nitratos**

Los nitratos son la especie más oxidada del elemento nitrógeno y presentan un contaminante común en el agua subterránea. Sí están presentes en el agua potable no tienen un efecto directo a la salud humana. Los problemas de salud se presentan cuando estos se convierten en nitritos ( $\text{NO}_2$ ) después de su ingestión. Los nitritos pueden causar metahemoglobinemia, que es una condición de deficiencia de oxígeno en la sangre, que puede ser mortal para niños menores de 6 meses, debido a que la incidencia es más frecuente en este sector de la población se le ha llamado síndrome de los niños azules. Otras reacciones convierten los nitritos en N-nitrosaminos, que se ha comprobado que son carcinogénicos. Por estas razones la NOM-127 para agua potable en México estableció un límite permisible de 10mg/L de N- $\text{NO}_3$ .

Para analizar los nitratos conviene tomar en cuenta todo el ciclo del nitrógeno que pasa en el subsuelo y que está caracterizado por reacciones redox (nitrificación y denitrificación). Este ciclo básicamente incluye nitrógeno orgánico,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{NO}_3$ .

El nitrógeno orgánico contenido en la biomasa o fertilizantes es mineralizado en  $\text{NH}_4$  por microorganismos. Las fuentes posibles pueden ser aguas residuales, granjas, fosas sépticas, basureros y la agricultura. En el suelo, cuando existen

condiciones de oxidación, el amonio es convertido en nitratos, este es un proceso al que se le llama nitrificación. Los nitratos tienen una alta solubilidad en agua (~100g/L) y no son adsorbidos en el suelo. Por lo que el aporte de nitratos al agua subterránea es ilimitado.

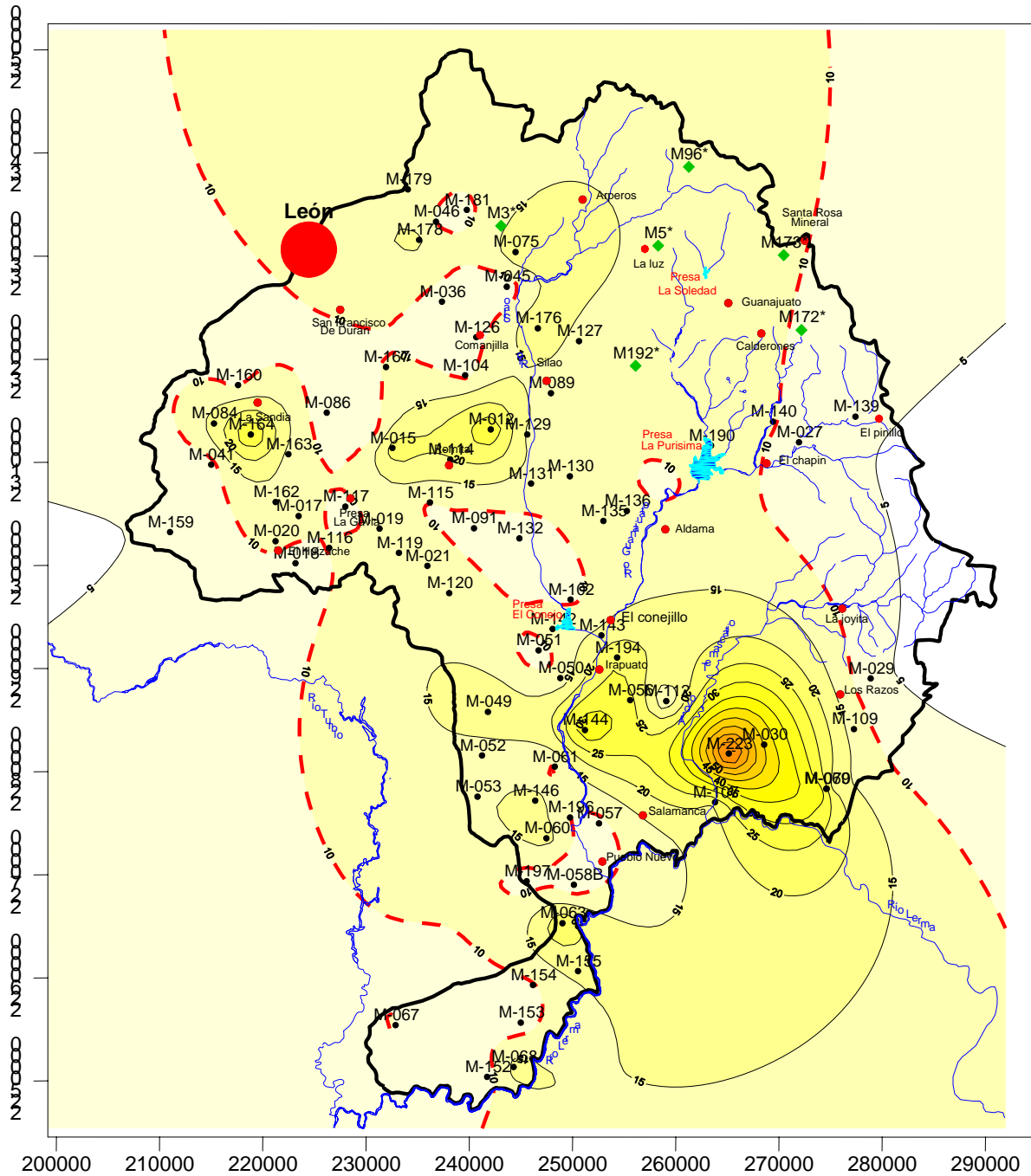
En el área de estudio el límite permisible sobrepasa en 45 de los 80 pozos analizados, lo que sugiere una fuente difusa de contaminación. Es muy probable que la intensa actividad agrícola juegue un papel importante en este aspecto. Además de que se utiliza como indicador del efecto de la agricultura sobre la calidad del agua subterránea. Se observa también un foco local en Salamanca, en el pozo M223 (Sist. Puenteillas No. 12), donde llega a un valor de 70.82 mg/L y en el pozo M69 (32.91 mg/L). Estos altos valores quizá se pueden relacionar con la presencia de la planta agroquímica de Tekchem.

La distribución de las concentraciones de nitratos, basado en los valores de 80 pozos y 6 manantiales e interpolados con el método Kriging se puede ver en la Figura 5.13. Las líneas rojas presentan el valor de 10 mg/L, siendo el límite permisible para agua potable. Se muestran altos valores en las zonas agrícolas del Valle Silao-Romita y alrededor de Irapuato (COREMI 2004).

Analizando las correlaciones estadísticas entre los diferentes parámetros físico-químicos y iones mayores, se observa que los nitratos no muestran una relación significativa con ninguna otra componente (Tabla 5.7). Sin embargo, existe una baja correlación con el pH (-0.35), que se puede relacionar con su ocurrencia en aguas más someras que presentan un pH más bajo debido a la influencia del CO<sub>2</sub> atmosférico. La aparente independencia del aporte de nitratos de otros componentes también se ve en el análisis separado de la facie bicarbonatada, ya que tampoco muestran ninguna correlación. En las facies bicarbonatadas-sulfatadas por el contrario los nitratos se asocian ligeramente con los siguientes parámetros: en forma negativa con el pH y en forma positiva con los sólidos totales, la conductividad y Ca, como se observa en la Tabla 5.7

	pH	TDS	Cond	Temp	Eh	Na	K	Ca	Mg	Cl	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
NO <sub>3</sub>	-0,43	0,64	0,75	-0,48	0,47	0,06	0,14	0,60	-0,05	0,47	0,53	-0,05	1,00	-0,13

**Tabla 5.7** Correlaciones estadísticas de nitratos con parámetros físico-químicos y iones mayores para la facie bicarbonatada-sulfatada.

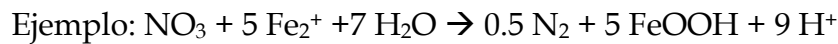


*Figura 5.9 Distribución de las concentraciones de Nitratos (COREMI 2004)*

Suponiendo a la agricultura como fuente principal de la contaminación por nitratos, su concentración es directamente dependiente de la carga de fertilizantes que se usan y la cantidad de infiltración del retorno de riego. Sin embargo son también importantes las características del suelo y subsuelo. Las reacciones redox en el ciclo de nitrificación y desnitrificación es dependiente de la presencia del oxígeno disuelto, la temperatura, el pH y de fuentes de energía para las bacterias.

Desgraciadamente no se cuenta con datos del  $\text{NH}_4$ . El amonio en el suelo es retenido por la adsorción de minerales arcillosos.

El proceso principal de la remoción de nitratos es la denitrificación. Para un contenido de OD < 5mg/L se pueden presentar localmente condiciones anaeróbicas en el suelo y subsuelo, en las cuales el nitrato sirve como fuente de oxígeno para los microorganismos y los nitratos son reducidos a nitrógeno, que se desprende del sistema en forma gaseosa.



Las fuentes de energía para las bacterias pueden ser sulfuros de metales (principalmente Fe), cal, minerales arcillosos y materia orgánica. Cabe mencionar que el potencial de denitrificación se agota y es irreversible. En sitios donde el nivel del agua subterránea es muy somero (donde las raíces llegan hasta el acuífero) presentan un alto potencial de denitrificación. Como los niveles estáticos en la zona de estudio son bajos, se supone que la mayor parte de los nitratos en el agua de infiltración se incorpora al acuífero, las diferencias están dadas, exclusivamente, en el tiempo de residencia en la zona vadosa.

### Cloruro

Las concentraciones promedio del ion cloruro en las muestras son bajas (10 mg/L), pero presentan una alta desviación estándar de 9.45, con valor máximos y mínimos de 40.33 mg/L y 2.26 mg/L. Los bajos valores de fondo se asocian a una alta influencia de recarga meteórica. Otras fuentes naturales son la disolución de minerales evaporitas, formaciones de salmueras y disolución de componentes fósiles; los cuales se consideran con menor importancia, resultando en valores de fondo que se consideran abajo de 15 mg/L ( Lesser, 1998).

Aunque ninguna muestra presentó valores arriba de la norma para agua potable (250 mg/L), los altos valores de Cl se interpretan como índice para un impacto antropogénico a la calidad del acuífero. La distribución de Cl se ve en la Figura 5.14, Valores arriba de 15 mg/L se encuentran principalmente en Irapuato, Salamanca y al sur de la zona de estudio. "Focos" locales incluyen los pozos M12, M56, M68, M102, M135, M143, M155 y M223. Aparte del pozo M155 (Na-HCO<sub>3</sub>) que presenta temperatura elevada (30°C), y altos concentraciones de Na, B y As, todos pertenecen a la facie de aguas bicarbonatadas-sulfatadas. El grupo es caracterizado por altos valores en sólidos totales, sulfatos, sodio y nitratos, así como irregularidades en algunos metales.

Esto apoya la suposición de que el impacto antropogénico es la principal fuente del Cl en la zona de estudio (excluyendo influencias hidrotermales como en el pozo M155). Lo cual se debe, probablemente, a la descarga de aguas residuales.

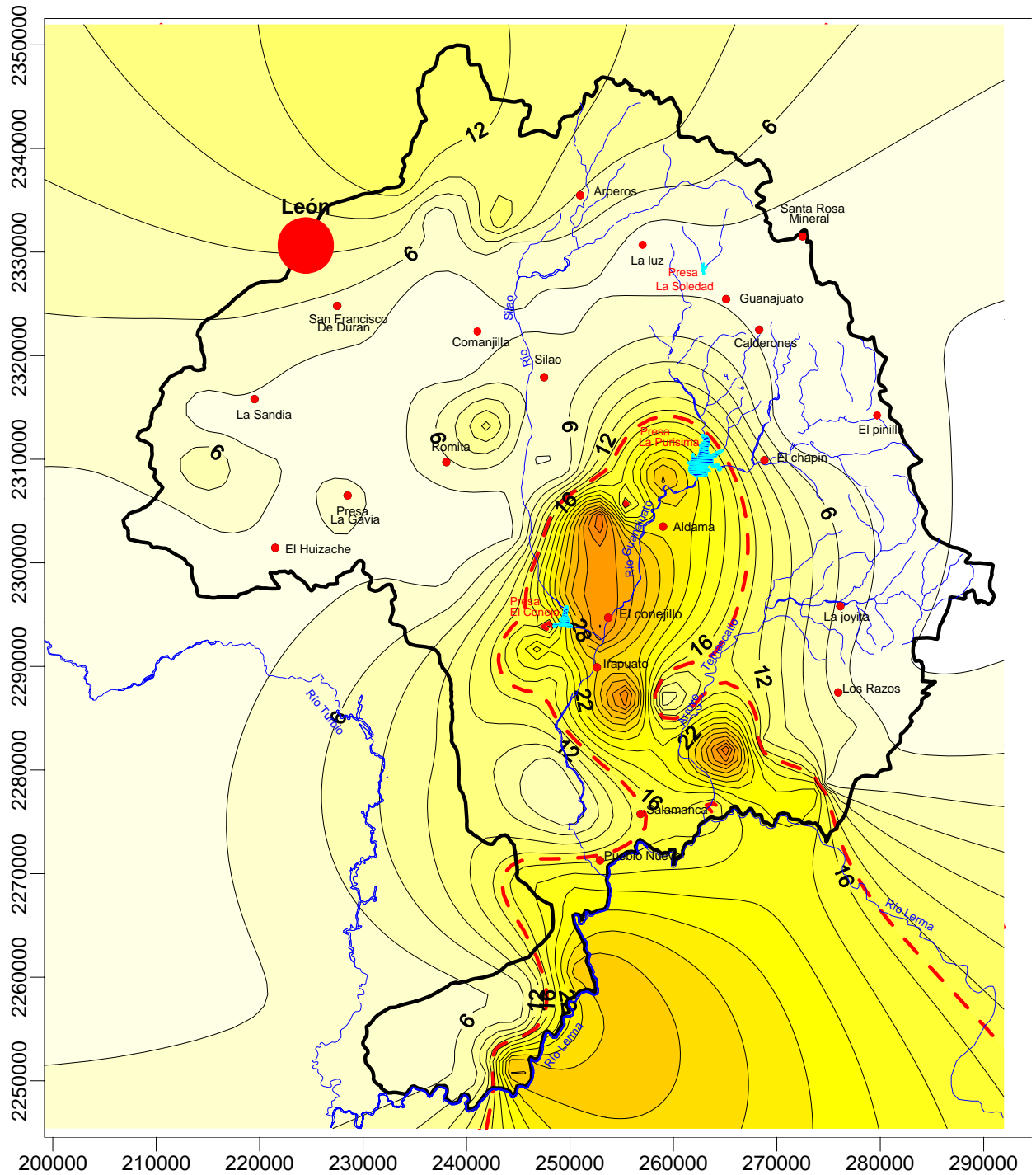
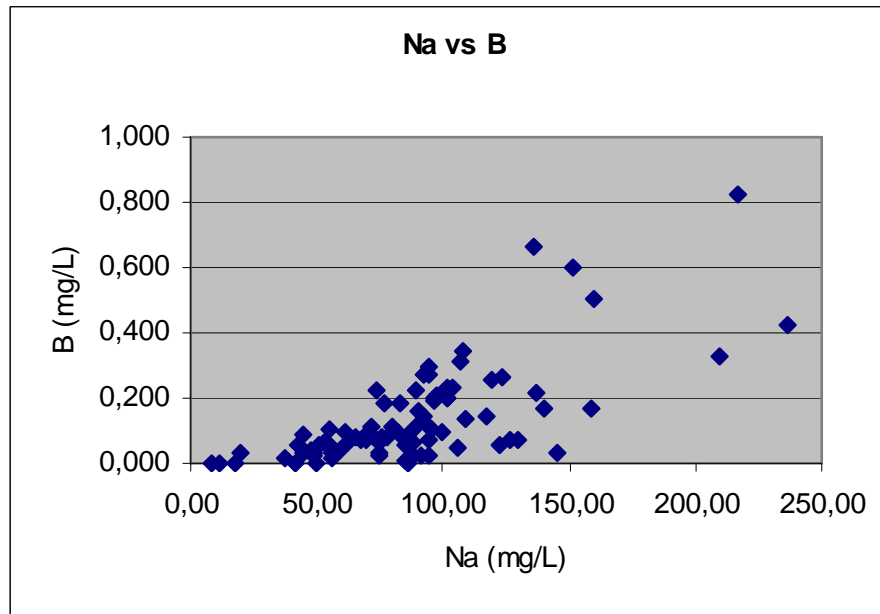


Figura 5.10 Distribución de las concentraciones de Cl

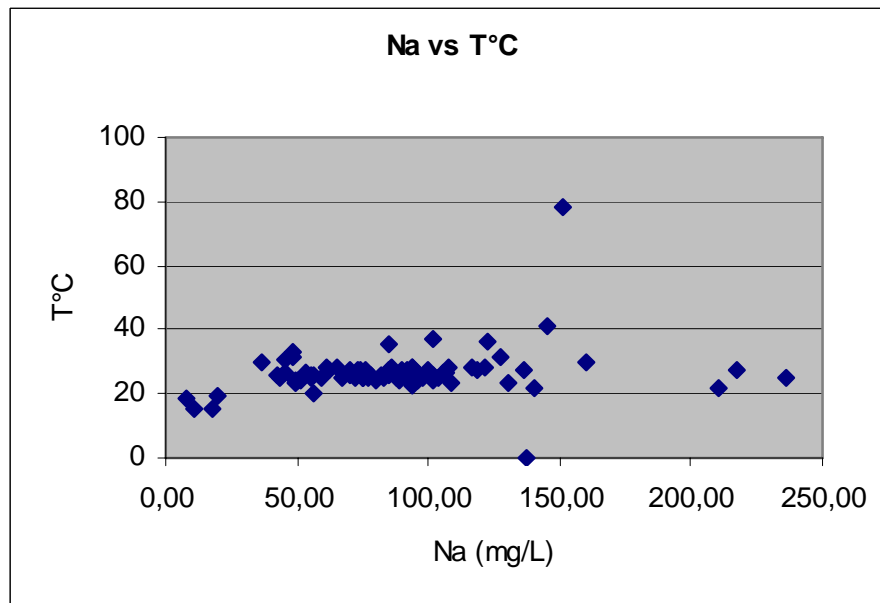
### 5.2.3 Altos valores de Sodio y su implicación en el uso de riego

Otro indicador para la calidad del agua se ha considerado el ión sodio, que sobrepasa la NOM-127-SSA-1 (200 mg/L) para agua potable en tres pozos, que son las muestras M197, M69 y M58B. Estos pozos también presentan elevadas concentraciones en  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ , B, Li y probablemente As, que sugiere una componente profunda como origen del sodio. Eso se puede observar en las figuras

5.11 a y b, que presentan la relación entre Na, B y la temperatura para las 86 muestras.



*Figura 5.11 a* Relación entre Na y B



*Figura 5.10 b* Relación entre Na y temperatura

A pesar de que el sodio no presenta un riesgo para el acuífero, los altos valores (promedio 91.49 mg/L, max 236 mg/L, min 37 mg/L) en algunos pozos podría ser problemático, siempre y cuando este agua se utilice, exclusivamente para el riego de cultivos, asimismo existen problemas relacionados con el deterioro del suelo, debido a la extracción y perforación de pozos, con el objetivo de extraer agua más profunda, estos problemas son conocidos y fueron reportados en varios estudios anteriores (Plan Estatal Hidráulico 2000-2025).

### 5.2.4 Calidad de agua para Riego

Hasta este punto se ha discutido la calidad del agua para el consumo humano, pero como un 87% del agua subterránea extraída en Guanajuato se utiliza para el riego de terrenos agrícolas, es importante analizar este factor también. Para poder comparar la calidad del agua para riego con estudios anteriores (Lesser, 1998: Estudio Hidrogeológico Silao-Romita) se usa la clasificación de WILCOX, que se base en la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio (SAR).

La relación de adsorción de sodio se expresa con la siguiente ecuación:

$$\text{SAR} = \text{Na} / ((\text{Ca} + \text{Mg}) / 2)^{1/2} \quad [\text{meq/L}]$$

Esta relación evalúa el peligro por altas concentraciones de sodio en el agua de riego, que por intercambio de cationes puede causar una degradación del suelo de cultivo, reduciendo la capacidad de infiltración y aeración.

Graficando el SAR y la conductividad en un nomograma de clasificación, se obtiene la clase de agua para el riego, que permite dar recomendaciones para el uso del agua subterránea en el sector agrícola.

Como se puede observar en las Figuras 5.16 y 5.17 la mayoría de pozos corresponden al tipo S1-C2, con baja cantidad de sodio intercambiable y apropiadas para la agricultura. El tipo S1-C1 puede causar problemas por la reducción en la capacidad de infiltración de agua en suelos arcillosos. Este tipo de problemas también es probable que se presente si se usa el agua del tipo S4-C2 (pozo M159) para el riego de cultivos.

Las clases se explican en continuación:

S1. Bajo SODIO - Puede usarse para riego en casi todos los suelos con poco peligro de que el sodio intercambiable llegue a niveles perjudiciales. Sin embargo las plantas sensibles al sodio como algunos frutales (con hueso) y aguacate pueden acumular concentraciones dañinas de sodio.

S2. Medio -Será peligrosa en suelos de textura fina y en aquellos que contengan una alta capacidad de intercambio de cationes, especialmente bajo condiciones de lavados leves. Esta agua puede usarse en suelos orgánicos o de textura gruesa con buena permeabilidad.

S4.MUY ALTO - Generalmente no es apropiada para el riego, excepto en casos de baja y quizás media salinidad, donde la solución del calcio del suelo o el empleo de yeso u otros compuestos que hagan factible el uso de esta agua.

C1... BAJA SALINIDAD - Puede usarse para riego en la mayoría de los suelos y para casi todas las plantas.

C2... MEDIA - Puede usarse con lavados moderados y plantas moderadamente tolerantes a las sales, sin necesidad de prácticas especiales.



C3... ALTAMENTE SALINA - No debe usarse en suelos de drenaje deficiente. Aún con drenaje adecuado se requiere manejo especial para el control de la salinidad, y plantas que sean bastante tolerantes a las sales.

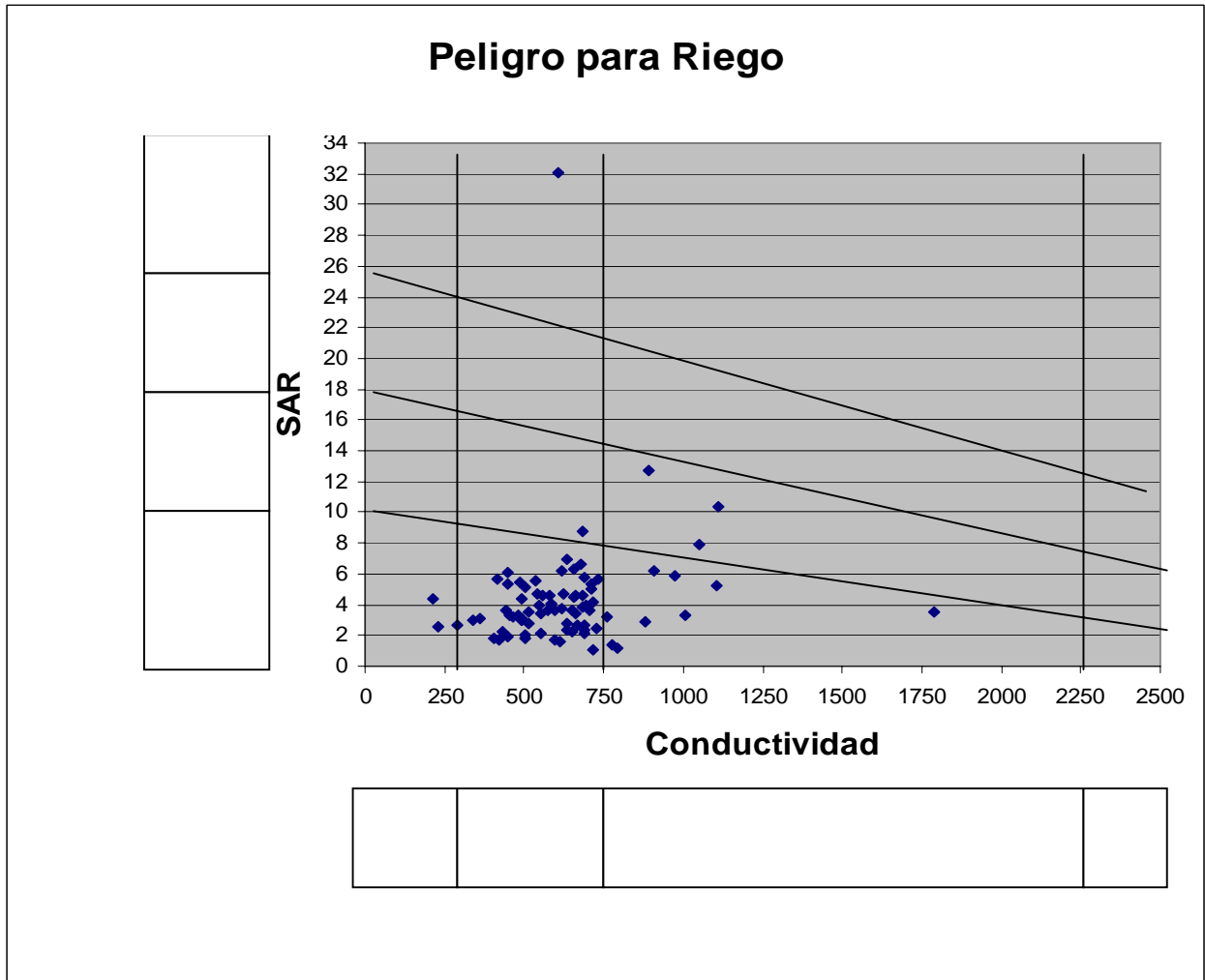


Figura 5.12 Rangos de Salinidad y relación de la adsorción de sodio, SAR

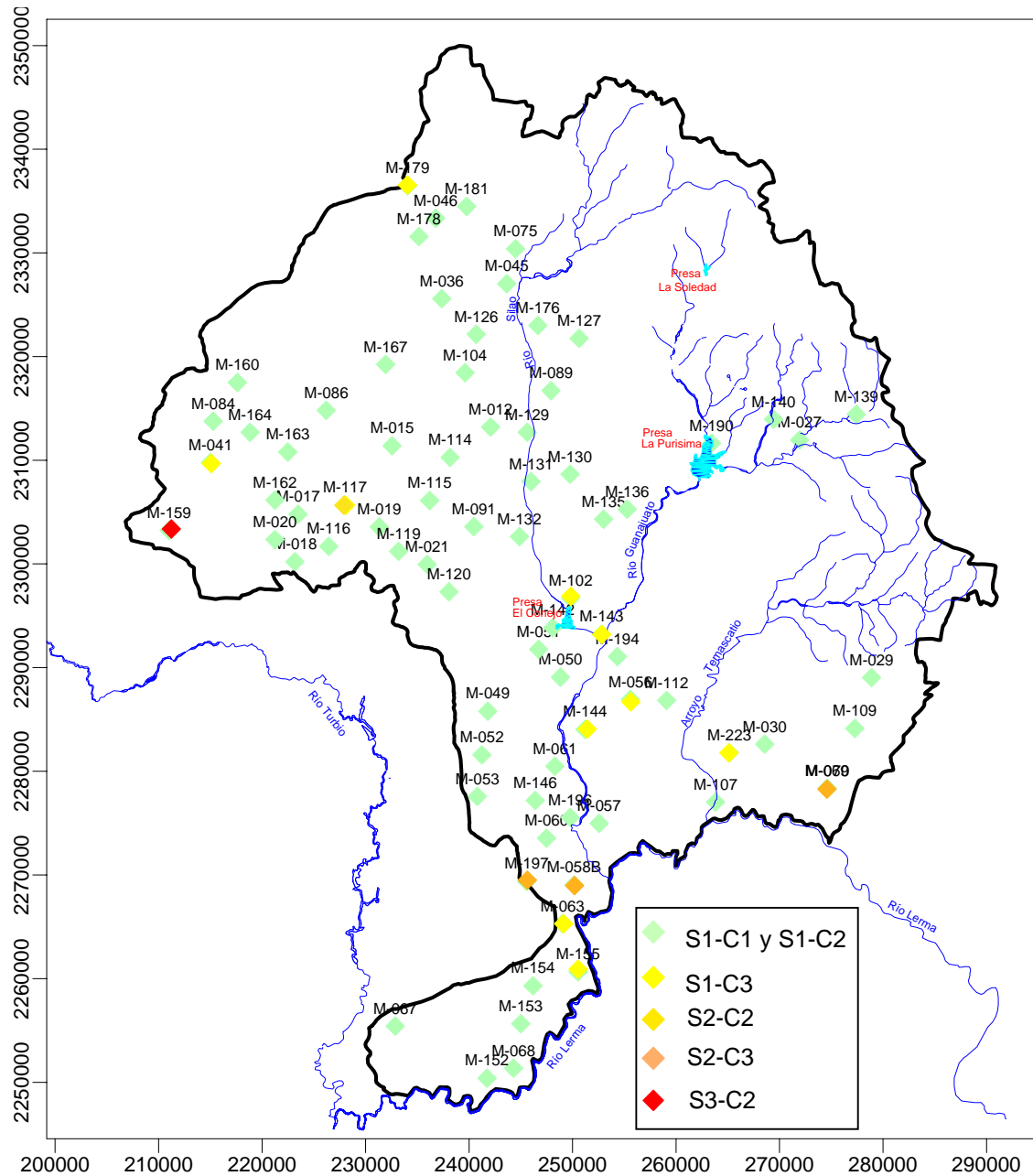


Figura 5.13 Distribución de las diferentes clases (COREMI 2004)

### 5.3. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA.

Un instrumento global para el análisis de la calidad del agua a fin de poder identificar los sitios que han sido impactados por la contaminación de origen natural o antropogénico son los índices de contaminación y de calidad.

El comportamiento de los indicadores de contaminación del agua subterránea es un reflejo de las condiciones en que se encuentra el acuífero al momento del muestreo, lo que permite elaborar un diagnóstico de las zonas potencialmente contaminadas y dar recomendaciones sobre las zonas en las que se deben llevar a cabo estudios más específicos, debido a que se considera un buen diagnóstico del estado del recurso.

Cabe mencionar que los resultados de los índices calculados se deben considerar con las mismas limitaciones en su confiabilidad referidos a los datos en que se basan. Lo que a continuación se presenta es una interpretación *cualitativa*, no *cuantitativa*. Debido al hecho de que el tipo de análisis utilizado para determinar los diferentes parámetros no corresponde a los de la Norma Oficial Mexicana, por lo que una vez más reiteramos que los resultados son meramente *cualitativos*; y el término “contaminación” no se usa para nada en su sentido legal. El objetivo de los resultados de este estudio entonces, se limitan a dar recomendaciones para investigaciones más específicas.

Para valorar el grado relativo de contaminación que se presenta en el área del estudio, se basó en lo expuesto en el capítulo anterior mediante la ecuación:

$$Cd = \sum_{i=1}^n Cfi$$

Se utilizaron únicamente los elementos y especies iónicas que exceden los valores permisibles para agua dedicada al consumo humano. Debido al hecho que la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización”, no contempla una gran cantidad de parámetros fisicoquímicos (valores guía) que pudieran ser empleados para calcular con más detalle el índice de contaminación  $C_d$ . Con el fin de utilizar la mayoría de los resultados analíticos de los pozos muestreados se consideró necesario enriquecer el trabajo con valores guía tomados de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para agua de consumo humano (Organización mundial de la Salud 1995), con lo que se pudo obtener un mapeo de la contaminación con mayor grado de sensibilidad. Los parámetros que sobrepasan estas dos normas son: sodio, arsénico, mercurio, boro, nitratos, selenio y cromo.

La determinación del índice de contaminación del agua subterránea ( $C_d$ ), se basa en la sumatoria de los factores individuales de los componentes mencionados.

En la Tabla 5.9 se presenta el número de pozos, los parámetros hidroquímicos que se emplearon para calcular los índices de contaminación  $C_d$  y el factor de contaminación calculado con el que se mapeo la subcuenca del Río Guanajuato (Figura 5.18).

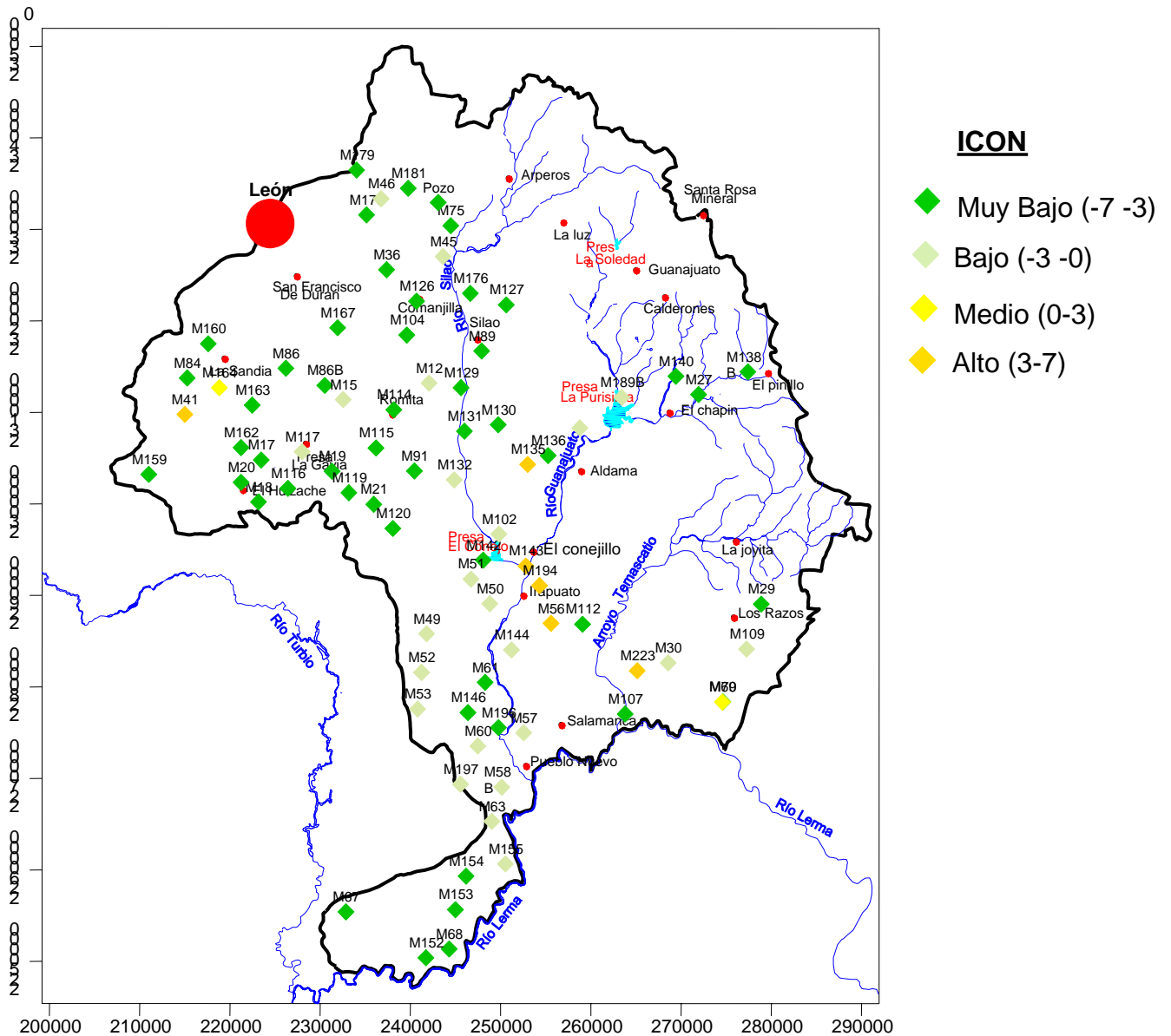


Figura 5.14 Distribución del Índice de Contaminación del Agua (COREMI 2004)

### 5.3.1 Interpretación del Índice de Contaminación ( $C_d$ )

A partir del mapeo del índice de contaminación  $C_d$  calculado, se desprenden los siguientes comentarios:

- Los índices de contaminación  $C_d$  calculados fluctúan en un rango que va de -7.8 a 4.8 unidades; a mayores valores de  $C_d$ , mayor es la contaminación del sitio o de la zona.
- Para la mayoría de los pozos se obtuvieron valores negativos, quiere decir con muy bajo grado de contaminación en uno o dos de los parámetros analizados.
- Con el mapa de índice de contaminación se denota que generalmente no existe contaminación regional en el agua subterránea.

➤ Los altos valores obtenidos en pocos pozos se consideran como contaminación local, se representan tres de estos focos:

Uno es el área alrededor de Irapuato, considerada como una de las zonas más importantes, desde un punto de vista agrícola en el país. Gran parte se cultiva con riego, destaca como ejemplo la producción de fresas. Un sector importante también son las granjas porcícolas, industrias textiles, alimentarias y químicas. Sin embargo esto no explica los altos valores en Selenio, que caracterizan este foco de contaminación del agua subterránea. Además presentan concentraciones mayores en Cl, que no se incluyó en el índice.

Otro foco se localiza en el pozo M 223, cerca de la carretera entre Silao y Salamanca. Aquí la contaminación (NO<sub>3</sub>, Boro, Uranio) se podría deber en parte a causas antropogénicos (la planta de Tekchem, produciendo químicos y agroquímicos, la refinería y otras industrias), o a componentes profundos, ricos en B. Por los altos valores es recomendable realizar estudios que contemplen otros parámetros como son pesticidas o hidrocarburos.

La tercera área local de contaminación media para el pozo M164 (debido a As, NO<sub>3</sub>, U) y alto índice para el pozo M41 se encuentra en el extremo oeste del área de estudio, suroeste de La Sandia. El alto índice para el pozo M41 se debe únicamente a su concentración en mercurio, que sobrepasa 8 veces la norma.

Cabe de mencionar que los valores obtenidos representan una clasificación exclusivamente de manera cualitativa y comparativa y por lo tanto deben ser considerados como tales.

#### 5.4 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (ICA).

Paralelamente a la determinación del índice de contaminación descrito anteriormente, se generó con el programa ICONICA (versión 1.0) un índice de calidad del agua (ICA), con el fin de evaluar la calidad del agua subterránea en la zona.

La manera más sencilla y práctica de estimar la calidad del agua consiste en la definición de los índices de ciertos parámetros físicos, químicos o biológicos, referenciados con un estándar que se considera admisible o deseable y que viene definido por ciertos criterios previamente estudiados (Conesa, 1993).

El índice de calidad del agua (ICA) puede ser considerado como un indicador general, que proporciona un valor global de la calidad del agua, incorporando los valores individuales de una serie de parámetros (Conesa, 1993), previamente determinados a través de las muestras de agua recolectadas de la zona, el cual es determinado por la ecuación:

$$ICA = k \frac{\sum C_i P_i}{\sum P_i}$$

Donde:

$C_i$  = Valor porcentual asignado a los parámetros

$P_i$  = Peso asignado a cada parámetro

$k$  = Constante que toma los valores siguientes:

- 1.00 para aguas claras sin aparente contaminación.
- 0.75 para aguas con ligero color, espumas, ligera turbidez aparente no natural.
- 0.50 para aguas con apariencia de estar contaminada y fuerte olor.
- 0.25 para aguas negras que presenten fermentaciones y olores

La base de datos con que se calculó el ICA contempla 80 muestras de la zona de estudio. Para calcular el ICA de la subcuenca del Río Guanajuato, se utilizó el programa ICONICA (versión 1.0) el cual calcula un peso y un valor porcentual de acuerdo a las concentraciones del parámetro en cuestión. Para cada muestra evaluada se realiza la sumatoria de los valores ponderados y los multiplica por una constante ( $K$ ), que está relacionada con las características sensitivas (propiedades organolépticas) de la muestra. El valor porcentual se extrae de tablas de Conesa, et., al), pero se trata de valores discretos que cubren rangos no muy finos. Lo que hace particular al programa ICONICA (versión 1.0) es que desarrolla una función continua (basada en un análisis de regresión) para asignar un valor porcentual a cada parámetro. El índice de calidad puede variar de 0 a 100 unidades, el valor nulo corresponde al peor escenario y los valores más altos representan la calidad óptima del agua.

Debido al enfoque del estudio, los parámetros considerados para el índice de calidad fueron limitados. Se utilizó: pH, temperatura, dureza, conductividad, oxígeno, el potencial redox, cloruro, sulfatos, nitratos, sodio, calcio y magnesio.

En la Tabla 5.8 se presentan los resultados de los índices de calidad del agua subterránea con los que se mapeo el acuífero, los cuales van de 49.95 a 88.42 unidades, indicando las curvas de isovalores bajos, las zonas en donde el agua subterránea es de menor calidad, Figura. 5.14, según el índice eso corresponde a una calidad buena - normal en los parámetros considerados.

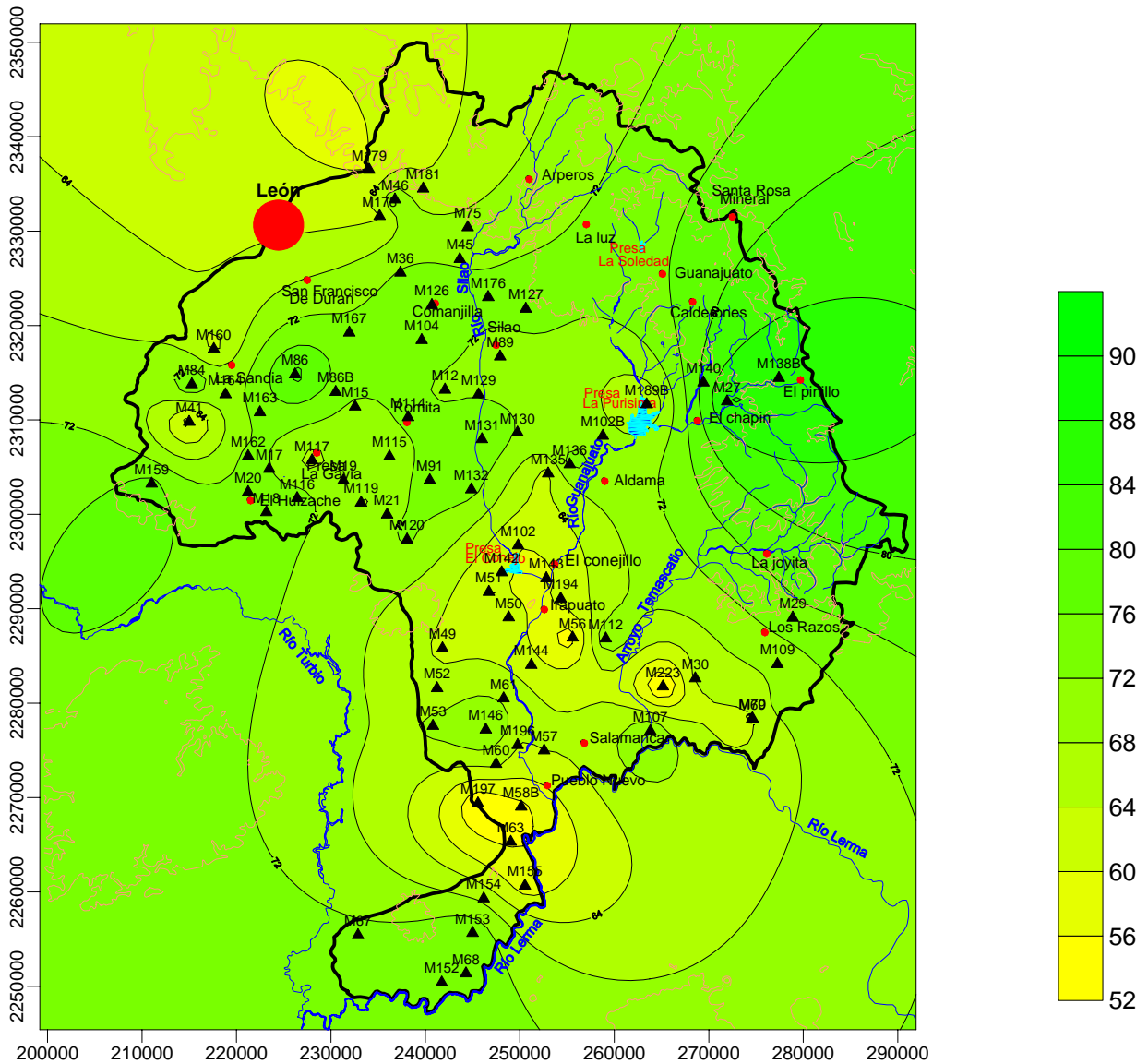


Figura 5.15 Índice de calidad del agua (COREMI 2004)

\*Nota: Es importante mencionar que los valores determinados para el ICA representan valores relativos de la calidad del agua subterránea y por lo tanto deben ser considerados como tales. El índice de calidad refleja una baja correlación con respecto al ICON ( $r^2=0.48$ ,  $r=-0.69$ ), debido a que se utilizaron diferentes parámetros. Sin embargo las principales tendencias son visibles en ambos mapas. Adicionalmente se observa una relativa baja calidad (normal) en el suroeste de la localidad Pueblo Nuevo, debido a las altas concentraciones en sulfatos, sólidos totales y sodio.

Pozo	LOCALIDAD	Na	NO <sub>3</sub>	As	B	Cr	Hg	Se	U	ICON	ICA
M12	SARDINAS	82,0	30,1	0,015	0,096	0,036	0,000	0,002	0,006	-2,2	71,1
M15	LA ALDEA	122,0	23,3	0,016	0,058	0,029	0,000	0,001	0,018	-1,6	71,1
M17	LOS MIRANDAS	75,0	11,3	0,011	0,032	0,024	0,000	0,002	0,005	-4,8	72,2
M18	SAN GONZALO	85,0	7,7	0,015	0,068	0,023	0,000	0,001	0,004	-5,1	72,3
M19	SAN JOSÉ DE SOLÍS	106,0	10,3	0,015	0,049	0,026	0,000	0,002	0,008	-4,1	72,4
M20	SAN ISIDRO OJO DE AGUA	100,0	11,4	0,013	0,096	0,023	0,000	0,001	0,006	-4,4	73,1
M21	PEDREGAL DE MARTÍNEZ	94,0	14,8	0,014	0,113	0,029	0,000	0,002	0,007	-3,7	71,1
M27	SANTA IFIGENIA	42,0	5,9	0,043	0,002	0,004	0,000	0,001	0,000	-5,3	88,4
M29	STA. ROSA DE RIVAS	85,0	6,2	0,004	0,005	0,023	0,000	0,001	0,004	-5,8	74,9
M30	LA SAUCEDA	140,0	43,8	0,019	0,168	0,030	0,000	0,003	0,008	0,0	65,3
M36	LA YERBABUENA	88,0	8,2	0,006	0,022	0,029	0,000	0,000	0,009	-4,9	72,4
M41	SAN JOSÉ DE LOS AYALA	123,0	7,4	0,013	0,263	0,017	0,008	0,001	0,003	3,2	57,6
M45	LA ORDEÑA	92,0	6,2	0,029	0,145	0,023	0,003	0,001	0,004	-1,5	71,3
M46	CÁRDENAS	96,0	9,1	0,019	0,201	0,021	0,002	0,001	0,002	-2,7	71,8
M49	EL PANAL	96,0	20,6	0,013	0,194	0,026	0,001	0,003	0,005	-2,2	63,2
M50	SANTA ANA DEL CONDE	107,0	11,2	0,018	0,315	0,026	0,001	0,004	0,005	-2,5	62,0
M51	BOQUILLAS	136,0	7,2	0,023	0,663	0,023	0,001	0,006	0,004	-1,9	59,8
M52	ALREDEDORES DE SAN AGUSTIN	104,0	11,3	0,020	0,235	0,031	0,001	0,002	0,008	-2,4	64,9
M53	LOS SAUCES	94,0	14,3	0,020	0,294	0,026	0,001	0,001	0,003	-2,8	68,8
M56	COL. JUÁREZ	109,0	27,5	0,009	0,138	0,027	0,001	0,060	0,012	4,8	53,2
M57	SAUZ DE ARMENTA	108,0	8,6	0,033	0,341	0,025	0,001	0,002	0,003	-2,6	64,2
M58B	PIEDRAS NEGRAS	217,0	5,7	0,056	0,825	0,029	0,000	0,002	0,003	-1,3	55,0
M60	SAN ANTONIO TEXAS	102,0	17,5	0,027	0,203	0,029	0,001	0,003	0,007	-1,6	65,0
M61	NÁPOLES	98,0	8,2	0,025	0,206	0,030	0,001	0,003	0,003	-3,0	67,5
M63	LOS PABILEROS	159,0	25,0	0,017	0,167	0,042	0,000	0,007	0,014	-0,6	-
M67	DUARTE	86,0	10,2	0,004	0,003	0,023	0,000	0,000	0,001	-5,8	-
M68	EL REPARO	137,0	17,2	0,014	0,215	0,026	0,000	0,002	0,004	-3,4	-
M69	SANTA RITA	210,0	32,9	0,039	0,327	0,034	0,000	0,005	0,010	0,8	61,4
M70	SAN JOSÉ DE GRACIA	91,0	18,3	0,010	0,024	0,035	0,000	0,001	0,005	-3,9	67,0
M75	SAN DIEGUITO	61,0	19,0	0,030	0,093	0,018	0,000	0,002	0,001	-3,7	69,3
M84	JESÚS DEL MONTE	62,0	17,3	0,015	0,061	0,012	0,000	0,003	0,006	-4,0	76,5
M86	EL JAGÜEY	48,0	6,6	0,012	0,036	0,021	0,000	0,001	0,004	-5,6	81,6
M86B		48,0	6,6	0,013	0,038	0,021	0,000	0,001	0,003	-5,7	-
M89	SILAO (POZO No. 2)	67,0	11,8	0,004	0,073	0,027	0,000	0,002	0,002	-5,2	69,5
M91	SAN CRISTOBAL	76,0	7,3	0,008	0,080	0,028	0,000	0,001	0,001	-5,6	73,9
M102	LOZA DE LOS PADRES	92,0	8,7	0,026	0,270	0,051	0,001	0,010	0,006	-1,4	60,0

**Tabla 5.8** Índices de contaminación y de calidad para los 80 pozos.



Pozo	LOCALIDAD	Na	NO <sub>3</sub>	As	B	Cr	Hg	Se	U	ICON	ICA
M102B		94,0	8,6	0,026	0,275	0,054	0,002	0,010	0,005	-0,7	-
M104	MEZQUITE GORDO	55,0	8,5	0,011	0,103	0,029	0,000	0,001	0,003	-5,2	74,7
M107	VILLAS DE IRAPUATO	75,0	19,7	0,008	0,064	0,037	0,001	0,001	0,003	-3,3	72,6
M109	LA CAJA	117,0	12,9	0,021	0,146	0,038	0,001	0,002	0,005	-2,7	68,8
M112	PURÍSIMA DE COVARRUBIAS	78,0	9,4	0,018	0,080	0,037	0,001	0,005	0,005	-3,1	72,3
M114	LA TRINIDAD	77,0	19,7	0,025	0,186	0,037	0,000	0,001	0,003	-3,0	73,0
M115	IRAPUATO	95,0	9,4	0,014	0,108	0,037	0,000	0,002	0,006	-4,2	68,9
M116	GUADALUPE DE PASO BLANCO	85,0	10,2	0,018	0,058	0,034	0,000	0,002	0,009	-3,9	73,7
M117	GRANJA	127,0	9,2	0,018	0,075	0,031	0,003	0,002	0,004	-0,9	66,0
M119	LA ASUNCIÓN (LAS FINCAS)	94,0	13,2	0,006	0,027	0,048	0,000	0,001	0,008	-4,0	67,1
M120	COL. 13 DE JULIO	88,0	13,9	0,012	0,063	0,043	0,000	0,002	0,008	-3,7	72,6
M126	BAJIO DE BONILLAS	70,0	8,9	0,015	0,086	0,041	0,000	0,001	0,004	-4,6	75,6
M127	SANTA ANITA	56,0	12,6	0,005	0,029	0,037	0,000	0,001	0,004	-4,9	74,0
M129	SAN ANTONIO EL RICO	65,0	13,9	0,008	0,078	0,026	0,001	0,003	0,002	-3,8	71,8
M130	EL CONEJO	55,0	12,0	0,004	0,053	0,021	0,001	0,002	0,001	-4,5	71,8
M131	VILLA DE CÁRDENAS	51,0	12,7	0,006	0,060	0,024	0,000	0,002	0,002	-5,2	75,4
M132	EL CAJÓN	80,0	7,8	0,040	0,116	0,023	0,001	0,002	0,006	-2,8	73,4
M135	SAN VICENTE DE FLORES	59,0	12,5	0,009	0,036	0,023	0,001	0,074	0,006	3,5	62,4
M136	EL COECILLO	45,0	11,5	0,006	0,032	0,024	0,001	0,012	0,005	-3,1	73,7
M138B	CD. DE LOS OLIVOS	37,0	0,0	0,037	0,015	0,009	0,000	0,000	0,001	-6,0	86,6
M140	ROMITA (POZO No.5)	49,0	10,7	0,009	0,023	0,015	0,001	0,002	0,003	-4,5	81,3
M142	YOSTIRO DE SAN ANTONIO	74,0	14,1	0,011	0,220	0,019	0,000	0,003	0,004	-4,3	60,9
M143	GRANJA ADELINA	89,0	16,2	0,012	0,109	0,020	0,001	0,066	0,004	3,2	59,0
M144	SAN CRISTOBAL	49,0	35,0	0,006	0,035	0,023	0,000	0,003	0,006	-2,6	61,7
M146	CAMPUZANO	72,0	17,5	0,014	0,114	0,019	0,000	0,001	0,002	-4,4	72,8
M152		89,0	7,2	0,018	0,225	0,017	0,000	0,001	0,001	-5,1	74,6
M153	TINAJA DE BERNALES	102,0	7,3	0,024	0,231	0,007	0,000	0,001	0,001	-5,0	75,3
M154	LA SOLEDAD	119,0	9,3	0,034	0,258	0,021	0,000	0,001	0,002	-3,9	67,2
M155	SAN JOSÉ DE PERALTA	160,0	16,2	0,048	0,505	0,032	0,000	0,002	0,005	-1,3	57,9
M159	COPALES	145,0	5,4	0,014	0,035	0,044	0,000	0,002	0,002	-4,8	77,4
M160	SAN JUAN DE OTATES	102,0	9,0	0,013	0,197	0,005	0,000	0,001	0,002	-5,3	62,8
M162	SAN RAMÓN	94,0	13,0	0,010	0,073	0,015	0,000	0,001	0,004	-4,9	73,1
M163	SAN MIGUEL DEL GUARICHO	73,0	13,2	0,010	0,081	0,008	0,000	0,002	0,004	-5,0	73,5
M164	LOS AMOLES (GPE. DE AMOLES)	70,0	31,5	0,067	0,071	0,001	0,000	0,003	0,017	0,5	69,9
M167	CARMEN DE SÁNCHEZ	53,0	10,4	0,013	0,067	0,028	0,000	0,001	0,005	-4,8	72,8
M176	SAN JOSÉ DEL RODEO	50,0	20,3	0,004	0,003	0,028	0,000	0,001	0,002	-4,7	72,6
M178	PURÍSIMA DEL JARDÍN	43,0	16,5	0,005	0,056	0,039	0,000	0,003	0,016	-3,1	63,5
M179	VENADO DE YOSTIRO	45,0	14,1	0,006	0,091	0,026	0,000	0,015	0,007	-3,3	59,9
M181	ARANDAS	83,0	8,7	0,002	0,184	0,034	0,000	0,001	0,000	-5,5	64,4
M189B	VISTA HERMOSA (MUN. ROMITA)	75,0	14,1	0,015	0,021	0,029	0,000	0,004	0,021	-2,3	63,6
M194	GAVIA DE RIONDA	90,0	25,3	0,015	0,159	0,025	0,000	0,093	0,010	6,7	61,1
M196	LAS COLORADAS	86,0	9,3	0,011	0,088	0,021	0,000	0,003	0,011	-4,1	63,6
M197	LA SARDINA	236,0	7,5	0,022	0,426	0,029	0,002	0,003	0,010	-0,3	52,4
M223	SIST. PUENTECILLAS N.12	130,0	70,8	0,010	0,069	0,026	0,000	0,003	0,050	6,6	50,0

**Tabla 5.8** Índices de contaminación y de calidad para los 80 pozos (Continuación)



## CAPITULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Conclusiones

- ✓ El agua subterránea en la Subcuenca del Río Guanajuato muestra en general buena calidad; sin embargo es evidente el impacto de la actividad humana en algunas zonas. Se reconocieron algunos aprovechamientos que registraron parámetros con anomalías importantes en algunos elementos que pueden resultar perjudiciales para la salud. Los nitratos sobrepasan el límite permisible en la mayor parte del área del estudio. Altos valores de varios metales pesados (As, B, Hg, Cr, Se, U) en algunos pozos y áreas específicas deberán ser verificados.
  
- ✓ Las familias de agua predominantes en la subcuenca son la bicarbonatada sódica (Na-HCO<sub>3</sub>), seguida de la bicarbonatada cálcico-magnésica (Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>), que tienen relación directa con las condiciones geológicas en el área, donde destaca la predominancia de rocas riolíticas, fallas y vestigios de actividad hidrotermal a profundidad. Esto indica una recarga constante y el aporte de aguas profundas con actividad geotermal, que se suman en algunos casos a la actividad humana. Gran número de las muestras analizadas muestran una interacción con agua de infiltración reciente.
  
- ✓ Se reconocen tres tipos de aguas originales, representados por tres manantiales; dos de ellos están relacionados con agua de lluvia: Manantial La Luz con altos contenidos de Ca y Mg (muestra M5: Mg-Ca-HCO<sub>3</sub>), el segundo con altos contenidos de calcio (muestra M192: Ca-Na-HCO<sub>3</sub>) y el tercero, el manantial Comanjilla (muestra M3: Na-HCO<sub>3</sub>), que representa flujos regionales. Estas aguas se mezclan en los valles, produciendo varias subfamilias: bicarbonatada-cálcico-sódica, bicarbonatada-cálcico-magnésica-sódica, bicarbonatada-sulfatada-sódica, bicarbonatada-sulfatada cálcico sódica, bicarbonatada-sulfatada-cálcico-sódica-magnésica y bicarbonatada-sulfatada-sódica magnésica.
  
- ✓ El estudio revela una gran influencia del impacto antropogénico a la cantidad y calidad del agua subterránea. Los valores altos de sulfato coinciden con contenidos de sólidos totales altos y se relacionan probablemente a infiltraciones locales de agua superficial contaminada por origen antropogénico.

- ✓ La componente sulfatada se observa hacia el centro y sur de la subcuenca, así como algunos puntos al poniente, donde se verifican también focos de actividad termal. En las cercanías de Irapuato y las presas El Conejo y La Purísima también se observaron altos valores de cloruros. El ión cloruro por encima de 15 mg/l puede relacionarse con actividad humana.
- ✓ Se encontró que 8 parámetros sobrepasan las normas actuales, estos son: NO<sub>3</sub>, As, B, Hg, Cr, Se, y U. Los metales mencionados, excluyendo el Uranio, tienen antecedentes en la región y su presencia es bastante probable, aún si hay incertidumbre sobre las concentraciones encontradas.
- ✓ En cuanto a Normatividad se refiere, en la mayoría de los casos los límites permisibles se sobrepasaron, por lo cual es necesario llevar a cabo una aplicación adecuada de las sanciones establecidas en las Normas Oficiales Mexicanas. Sin embargo, es bien sabido por todos, que existe en el país una falta de control por parte de las autoridades gubernamentales. Por lo cual es necesario hacer una reestructuración en el seno de las instituciones encargadas de aplicar la Ley como es debido.
- ✓ El índice de contaminación mostró que en general no existe contaminación regional en el agua subterránea. Para la mayoría de los pozos se obtuvieron valores con muy bajo grado de contaminación en uno o dos de los parámetros analizados. Los altos valores obtenidos en pocos pozos se consideran como contaminación local, aunque destacan tres de estos focos:
  - ✓ Uno es el área alrededor de Irapuato, considerada como una de las zonas más importantes, desde un punto de vista agrícola en el país. Gran parte se cultiva con riego, destaca como ejemplo la producción de fresas. Un sector importante también son las granjas porcícolas, industrias textiles, alimentarias y químicas. Sin embargo esto no explica los altos valores en Selenio, que caracterizan este foco de contaminación del agua subterránea. Además presentan concentraciones mayores en Cl, que no se incluyó en el índice.
  - ✓ Otro foco se localiza en el pozo de la muestra M 223, cerca de la carretera entre Silao y Salamanca. Aquí la contaminación (NO<sub>3</sub>, Boro, Uranio) se podría deber en parte a causas antropogénicas, por la presencia de diversas industrias y la refinería o a componentes profundos, ricos en B. Por los altos valores es recomendable realizar estudios que contemplen otros parámetros como son pesticidas o hidrocarburos.
  - ✓ La tercera área local de contaminación media para el pozo de la muestra M164 (debido a As, NO<sub>3</sub>, U) y alto índice para el pozo de la muestra M41 se encuentra en el extremo oeste del área de estudio, suroeste de La Sandía. El alto índice para el pozo de la muestra M41 se debe únicamente a su concentración en mercurio, que sobrepasa 8 veces la norma.

- ✓ Los índices de calidad más bajos se observaron en la zona de Irapuato, zona de confluencia de los ríos Silao y Guanajuato y al norte de la ciudad de Salamanca, así como al sur de Pueblo nuevo y Presa la Purísima.

## 6.2 Recomendaciones

Es necesario cambiar nuestra propia mentalidad como usuarios y como generadores de contaminación, haciéndonos conscientes de la importancia que tiene el agua en nuestro propio desarrollo como Nación y como seres humanos. Si esto se lleva a cabo, contaremos en un presente y futuro, de mejor calidad de nuestro gran recurso vital: el agua. En consecuencia, se aseguraría que las próximas generaciones también gozarán del recurso en calidad y cantidad necesarias.

Se recomienda realizar estudios periódicos en la zona debido a que los acuíferos son sistemas dinámicos, por lo que su cambio en el tiempo es constante.

Es importante realizar un monitoreo de los puntos en donde se observaron los parámetros más altos a fin de remediar y controlar la calidad del agua para consumo humano.

Actualmente existen plantas de tratamiento piloto y sistemas de purificación y descontaminación de algunos elementos tales como el flúor, arsénico, así como parámetros bacteriológicos. Presentados algunos de ellos en Foro Mundial del Agua llevado a cabo en la Ciudad de México del 16 al 22 de Marzo del 2006, y que actualmente se están aplicando en algunos estados de la República.

Uno de los aspectos más importantes de la conservación y calidad del agua es la educación de la población, por lo que es de vital importancia llevar a cabo campañas intensas y motivantes que ayuden a comprender la importancia que tiene el agua.

## ANEXO 1

### GLOSARIO DE TERMINOS

Con la finalidad de comprender mejor algunos conceptos mencionados en la presente tesis y como una ayuda al usuario, se presenta el siguiente glosario de términos.

**Ácido:** Sustancia que tiene tendencia a perder un protón. Sustancia que se disuelve en agua con la consiguiente formación de iones hidrógeno. Sustancia que contiene hidrógeno, que puede ser reemplazado por metales para formar sales

**Acuicludo:** Formación geológica que estando saturada de agua es incapaz de transmitirla en cantidades significativas cuando es sometida a gradientes hidráulicos normales.

**Acuífero:** Cualquier formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo.

**Acuífero artesiano:** Acuífero confinado cuyo nivel piezométrico se encuentra sobre el terreno de forma que las perforaciones son surgentes.

**Acuífero libre:** Es aquel en el que su límite superior está formado por la lámina de agua libre que se encuentra a presión atmosférica.

**Acuífero colgado:** Estructura saturada de agua rodeada de otras que no lo están.

**Acuífero confinado:** Aquel que se sitúa entre dos acuitardos.

**Acuitardo:** La menos permeable de una serie de formaciones en una secuencia estratigráfica. Estas formaciones son capaces de transmitir agua en cantidades significativas a nivel regional pero su permeabilidad no es suficiente para ser aprovechada en captaciones puntuales como son los sondeos de producción. Los acuitardos están normalmente formados por materiales como las arcillas, sales y rocas cristalinas no fracturadas.

**Aguas claras (Aguas de primer uso):** Aquellas provenientes de distintas fuentes naturales y de almacenamientos artificiales que no han sido objeto de uso previo alguno.

**Aguas del subsuelo:** Aquellas aguas existentes debajo de la superficie terrestre.

**Aguas Residuales:** Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general, de cualquier uso, así como la mezcla de ellas.

**Agua residual doméstica:** Son las aguas residuales procedentes de zonas de vivienda y de servicios, generadas principalmente por las excretas humanas y las actividades domésticas.

**Agua residual industrial:** Todas las aguas residuales generadas desde locales utilizados para efectuar cualquier actividad industrial o comercial, que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial.

**Agua residual urbana:** Son las aguas residuales domésticas o la mezcla de las mismas con aguas residuales industriales y/o aguas de escorrentía pluvial.

**Agua subterránea:** Agua situada bajo la superficie del terreno rellenando el espacio vacío entre las rocas, o el material poroso, y que se extiende por toda la zona considerada como saturada.

**Anión:** Ión de carga negativa, que en la electrólisis se dirige al ánodo o electrodo positivo.

**Aprovechamiento:** Aplicación del agua en actividades que pueden implicar el consumo o no de la misma.

**Balance iónico:** Relación entre el contenido en cationes y aniones determinados analíticamente en una muestra de agua (ver Error Analítico).

**Biodegradable:** Susceptible de descomponerse a través de procesos biológicos, generalmente mediados por microorganismos (bacterias, hongos, protozoos, etc). Esta propiedad, que caracteriza a la mayor parte de los compuestos biológicos, permite su transformación en sustancias más sencillas que no necesariamente son menos contaminantes o tóxicas que la sustancia original.

**Capacidad autodepuradora:** Capacidad de un sistema para diluir o transformar los contaminantes en el introducidos en sustancias más simples de forma que recupere

su calidad inicial. La autodepuración es un proceso complejo en el que intervienen tanto los componentes inorgánicos del medio, como los organismos vivos y procesos puramente físicos como la filtración o la decantación.

**Capacidad de cambio iónico:** En el suelo existen materiales, fundamentalmente las arcillas y la materia orgánica, que tienen la propiedad de acumular cationes de forma reversible en su superficie liberando a cambio otros cationes, por lo general calcio o magnesio. Esta propiedad recibe el nombre de Capacidad de Cambio y expresa químicamente el número de moles de iones adsorbidos que pueden ser intercambiados por unidad de masa seca, bajo unas condiciones dadas de temperatura, presión, composición de la fase líquida y una relación masa/solución dada (un mol de carga adsorbida equivale a  $6,02 \cdot 10^{23}$  cargas de iones adsorbidos). En el Sistema Internacional la capacidad de cambio se expresa como centimoles por kilogramo,  $c \text{ mol kg}$ . La capacidad de cambio es una propiedad fundamental del suelo, de ella depende muchas de sus propiedades como agente depurador.

**Capacidad de campo:** Agua retenida por un suelo, que previamente saturado, se ha dejado drenar libremente de forma que toda el agua que podría abandonar su seno por gravedad lo ha hecho. Su medida es difícil y se suele hacer de dos formas, o saturando el suelo y dejándolo drenar 48 horas protegido de la acción del viento y del sol, o a partir del contenido en humedad del material en equilibrio con una presión de 33 kPa en un equipo de placas de presión.

**Capacidad de Carga:** Estimación de la tolerancia de un ecosistema al uso de sus componentes, tal que no rebase su capacidad de recuperación en el corto plazo sin la aplicación de medidas de restauración o recuperación para restablecer el equilibrio ecológico.

**Capacidad de infiltración del suelo:**

Velocidad a la que el agua penetra en el interior del suelo desde su superficie. En condiciones de saturación, cubierto con una lámina de agua poco espesa. La capacidad de infiltración es equivalente a la conductividad hidráulica saturada.

**Catión:** Ión de carga positiva, que en la electrólisis se dirige al cátodo o electrodo negativo.

**Cauce de una corriente:** El canal natural o artificial que tiene la capacidad necesaria para que las aguas de la creciente máxima ordinaria escurran sin derramarse. Cuando las corrientes estén sujetas a desbordamiento, se considera como cauce el canal natural, mientras no se construyan obras de encauzamiento; en los orígenes de cualquier corriente, se considera como cauce propiamente definido, cuando el escurrimiento se concentre hacia una depresión topográfica y éste forme



una cárcava o canal, como resultado de la acción del agua fluyendo sobre el terreno. Para fines de aplicación de la presente Ley, la magnitud de dicha cárcava o cauce incipiente deberá ser de cuando menos de 2.0 metros de ancho por 0.75 metros de profundidad.

**Ciclo hidrológico:** Sucesión de fases por las que pasa el agua en su dinámica de distribución y circulación en la tierra. Este concepto incluye tanto las tres fases fundamentales: atmosférica, superficial y subterránea como los procesos de flujo (precipitación, escorrentía, infiltración, percolación, evaporación y condensación), que permiten el movimiento de la masa de agua entre y a través de las fases. Desde el punto de vista de la calidad de las aguas es preciso considerar que el ciclo hidrológico es un continuo, todas las fases están conectadas y se relacionan, de forma que una acción sobre cualquiera de ellas pueda afectar al resto de manera más o menos intensa. El suelo constituye la interfase activa más importante (entre las fases superficiales o atmosférica y la subterránea), en la composición de las aguas sufre profundos cambios, fruto de la interacción con los minerales y seres vivos que lo pueblan.

**Coefficiente de almacenamiento:** Se define como el volumen de agua que puede drenar, o almacenar un acuífero, por unidad de superficie y unidad de carga en el potencial hidráulico (igual al rendimiento específico en un acuífero no confinado)

**Condiciones Particulares de Descarga:** El conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos y de sus niveles máximos permitidos en las descargas de agua residual, determinados por la Comisión Nacional del Agua, conforme a sus respectivas competencias, para cada usuario, para un determinado uso o grupo de usuarios de un cuerpo receptor específico con el fin de conservar y controlar la calidad de las aguas.

**Cuenca Hidrológica:** Es la unidad del territorio, diferenciada de otras unidades, normalmente delimitada por un parte aguas o divisoria de las aguas -aquella línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación en dicha unidad-, en donde ocurre el agua en distintas formas, y ésta se almacena o fluye hasta un punto de salida que puede ser el mar u otro cuerpo receptor interior, a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal, o bien el territorio en donde las aguas forman una unidad autónoma o diferenciada de otras, aun sin que desemboquen en el mar. En dicho espacio delimitado por una diversidad topográfica, coexisten los recursos agua, suelo, flora, fauna, otros recursos naturales relacionados con éstos y el medio ambiente. La cuenca hidrológica conjuntamente con los acuíferos, constituye la unidad de gestión de los recursos hídricos. La cuenca hidrológica está a su vez integrada por subcuencas y estas últimas están integradas por microcuencas.

**Cuerpo receptor:** La corriente o depósito natural de agua, presas, cauces, zonas marinas o bienes nacionales donde se descargan aguas residuales, así como los terrenos en donde se infiltran o inyectan dichas aguas, cuando puedan contaminar los suelos, subsuelo o los acuíferos.

**Delimitación de cauce y zona federal:** Trabajos y estudios topográficos, batimétricos, fotogramétricos, hidrológicos e hidráulicos, necesarios para la determinación de los límites del cauce y la zona federal.

**Desarrollo sustentable:** En materia de recursos hídricos, es el proceso evaluable mediante criterios e indicadores de carácter hídrico, económico, social y ambiental, que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se fundamenta en las medidas necesarias para la preservación del equilibrio hidrológico, el aprovechamiento y protección de los recursos hídricos, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de agua de las generaciones futuras.

**Descarga:** La acción de verter, infiltrar, depositar o inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor.

**Distrito de Riego:** Es el establecido mediante Decreto Presidencial, el cual está conformado por una o varias superficies previamente delimitadas y dentro de cuyo perímetro se ubica la zona de riego, el cual cuenta con las obras de infraestructura hidráulica, aguas superficiales y del subsuelo, así como con sus vasos de almacenamiento, su zona federal, de protección y demás bienes y obras conexas, pudiendo establecerse también con una o varias unidades de riego.

**Elemento:** Sustancia compuesta por átomos, cada uno de los cuales tiene un número atómico. Un elemento no se puede descomponer químicamente.

**Escorrentía:** Agua que fluye sobre la tierra en vez de infiltrarse sobre el suelo.

**Estero:** Terreno bajo, pantanoso, que suele llenarse de agua por la lluvia o por desbordes de una corriente, o una laguna cercana o por el mar.

**Explotación:** Aplicación del agua en actividades encaminadas a extraer elementos químicos u orgánicos disueltos en la misma, después de las cuales es retornada a su fuente original sin consumo significativo.

**Facie:** Grupo distintivo de aguas que poseen una característica en particular, ya sea física, química o geológicamente.

**Humedales:** Las zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres que constituyen áreas de inundación temporal o permanente, sujetas o no a la influencia de mareas, como pantanos, ciénagas y marismas, cuyos límites los constituyen el tipo de vegetación hidrófila de presencia permanente o estacional; las áreas en donde el suelo es predominantemente hídrico; y las áreas lacustres o de suelos permanentemente húmedos por la descarga natural de acuíferos.

**Ión:** Átomo o molécula que posee una carga eléctrica.

**Manantial:** Flujo de agua subterránea que emerge de forma natural en la superficie del terreno.

**Molécula:** El agregado más pequeño de átomos capaces de actuar como unidad y exhibir las propiedades químicas de una sustancia. Combinación de dos o más átomos.

**Nivel Freático:** El nivel superior de la zona saturada de las aguas subterráneas

**Permeabilidad:** La medida de la capacidad de un medio para transmitir agua.

**pH:** El logaritmo común negativo de la concentración de los iones hidrógeno en una solución.

**Reacciones REDOX:** Reacción de oxidación-reducción con transferencia de electrones. La oxidación se refiere a cualquier reacción en la que la sustancia o especie pierde electrones. La reducción es lo opuesto a la oxidación.

**Reúso:** La explotación, uso o aprovechamiento de aguas residuales con o sin tratamiento previo.

**Ribera o Zona Federal:** Las fajas de diez metros de anchura contiguas al cauce de las corrientes o al vaso de los depósitos de propiedad nacional, medidas horizontalmente a partir del nivel de aguas máximas ordinarias. La amplitud de la ribera o zona federal será de cinco metros en los cauces con una anchura no mayor de cinco metros. El nivel de aguas máximas ordinarias se calculará a partir de la creciente máxima ordinaria que será determinada por "la Comisión" o por el Organismo de Cuenca que corresponda, conforme a sus respectivas competencias, de acuerdo con lo dispuesto en los reglamentos de esta Ley. En los ríos, estas fajas se delimitarán a partir de cien metros río arriba, contados desde la desembocadura de éstos en el mar. En los cauces con anchura no mayor de cinco metros, el nivel de aguas máximas ordinarias se calculará a partir de la media de los gastos máximos anuales producidos durante diez años consecutivos. Estas fajas se delimitarán en

los ríos a partir de cien metros río arriba, contados desde la desembocadura de éstos en el mar. En los orígenes de cualquier corriente, se considera como cauce propiamente definido, el escurrimiento que se concentre hacia una depresión topográfica y forme una cárcava o canal, como resultado de la acción del agua fluyendo sobre el terreno. La magnitud de la cárcava o cauce incipiente deberá ser de cuando menos de 2.0 metros de ancho por 0.75 metros de profundidad.

**Región hidrológica:** Área territorial conformada en función de sus características morfológicas, orográficas e hidrológicas, en la cual se considera a la cuenca hidrológica como la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos, cuya finalidad es el agrupamiento y sistematización de la información, análisis, diagnósticos, programas y acciones en relación con la ocurrencia del agua en cantidad y calidad, así como su explotación, uso o aprovechamiento. Normalmente una región hidrológica está integrada por una o varias cuencas hidrológicas. Por tanto, los límites de la región hidrológica son en general distintos en relación con la división política por estados, Distrito Federal y municipios.

**Región Hidrológico - Administrativa:** Área territorial definida de acuerdo con criterios hidrológicos, integrada por una o varias regiones hidrológicas, en la cual se considera a la cuenca hidrológica como la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos y el municipio representa, como en otros instrumentos jurídicos, la unidad mínima de gestión administrativa en el país.

**Río:** Corriente de agua natural, perenne o intermitente, que desemboca a otras corrientes, o a un embalse natural o artificial, o al mar.

**Sistema de Agua Potable y Alcantarillado:** Conjunto de obras y acciones que permiten la prestación de servicios públicos de agua potable y alcantarillado, incluyendo el saneamiento, entendiéndose como tal la conducción, tratamiento, alejamiento y descarga de las aguas residuales.

**Trazador ambiental del agua:** Cualquier sustancia que aparece en las aguas naturales derivada del ambiente, cuya distribución de concentración en el espacio y/o tiempo puede ser usado para diferenciar o etiquetar masas específicas de agua, o para identificar su origen. Los trazadores ambientales comúnmente, pasan a formar parte del ciclo hidrológico a través de los procesos atmosféricos, pero también lo hacen por disolución o intercambio con rocas o material orgánico que se encuentran en los estratos geológicos en los cuales se mueve el agua, o por decaimiento radiactivo de rocas a profundidad.

**Unidad de Riego:** Área agrícola que cuenta con infraestructura y sistemas de riego, distinta de un distrito de riego y comúnmente de menor superficie que aquél;

---

puede integrarse por asociaciones de usuarios u otras figuras de productores organizados que se asocian entre sí libremente para prestar el servicio de riego con sistemas de gestión autónoma y operar las obras de infraestructura hidráulica para la captación, derivación, conducción, regulación, distribución y desalojo de las aguas nacionales destinadas al riego agrícola.

**Uso Agrícola:** La aplicación de agua nacional para el riego destinado a la producción agrícola y la preparación de ésta para la primera enajenación, siempre que los productos no hayan sido objeto de transformación industrial.

**Uso Ambiental o Uso para conservación ecológica:** El caudal o volumen mínimo necesario en cuerpos receptores, incluyendo corrientes de diversa índole o embalses, o el caudal mínimo de descarga natural de un acuífero, que debe conservarse para proteger las condiciones ambientales y el equilibrio ecológico del sistema.

**Uso Consuntivo:** El volumen de agua de una calidad determinada que se consume al llevar a cabo una actividad específica, el cual se determina como la diferencia del volumen de una calidad determinada que se extrae, menos el volumen de una calidad también determinada que se descarga.

**Uso Doméstico:** La aplicación de agua nacional para el uso particular de las personas y del hogar, riego de sus jardines y de árboles de ornato, incluyendo el abrevadero de animales domésticos que no constituya una actividad lucrativa.

**Uso en acuicultura:** La aplicación de aguas nacionales para el cultivo, reproducción y desarrollo de cualquier especie de la fauna y flora acuáticas.

**Uso industrial:** La aplicación de aguas nacionales en fábricas o empresas que realicen la extracción, conservación o transformación de materias primas o minerales, el acabado de productos o la elaboración de satisfactores, así como el agua que se utiliza en parques industriales, calderas, dispositivos para enfriamiento, lavado, baños y otros servicios dentro de la empresa, las salmueras que se utilizan para la extracción de cualquier tipo de sustancias y el agua aun en estado de vapor, que sea usada para la generación de energía eléctrica o para cualquier otro uso o aprovechamiento de transformación.

**Uso Pecuario:** La aplicación de aguas nacionales para la cría y engorda de ganado, aves de corral y otros animales, y su preparación para la primera enajenación siempre que no comprendan la transformación industrial; no incluye el riego de pastizales.

**Uso Público Urbano:** La aplicación de agua nacional para centros de población y asentamientos humanos, a través de la red municipal.

**Vaso de lago, laguna o estero:** El depósito natural de aguas nacionales delimitado por la cota de la creciente máxima ordinaria.

**Zona de Protección:** La faja de terreno inmediata a las presas, estructuras hidráulicas y otra infraestructura hidráulica e instalaciones conexas, cuando dichas obras sean de propiedad nacional, en la extensión que en cada caso fije la CNA.

**Zona de reserva:** Aquellas áreas específicas de los acuíferos, cuencas hidrológicas, o regiones hidrológicas, en las cuales se establecen limitaciones en la explotación, uso o aprovechamiento de una porción o la totalidad de las aguas disponibles, con la finalidad de prestar un servicio público, implantar un programa de restauración, conservación o preservación o cuando el Estado resuelva explotar dichas aguas por causa de utilidad pública.

**Zona de veda:** Aquellas áreas específicas de las regiones hidrológicas, cuencas hidrológicas o acuíferos, en las cuales no se autorizan aprovechamientos de agua adicionales a los establecidos legalmente y éstos se controlan mediante reglamentos específicos, en virtud del deterioro del agua en cantidad o calidad, por la afectación a la sustentabilidad hidrológica, o por el daño a cuerpos de agua superficiales o subterráneos.

**\* Ver antecedentes de este Anexo en el capítulo de Referencias Bibliográficas.**

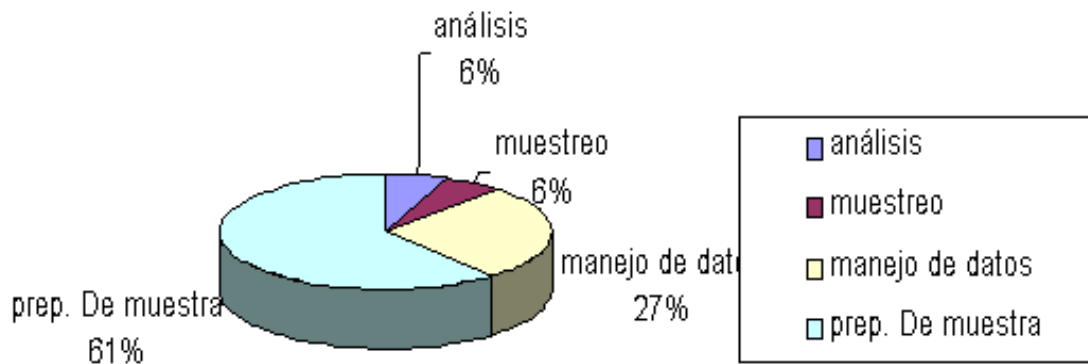
## ANEXO 2

### MUESTREO DE AGUA EN CAMPO Y ANALISIS

Se presenta el siguiente anexo con el propósito de que el usuario de esta tesis comprenda como se lleva a cabo un muestreo de los diferentes parámetros físico-químicos de las aguas subterráneas.

#### INTRODUCCIÓN.

En los estudios de agua, superficial y/o subterránea se ha encontrado que existe una distribución en el grado de aceptación, que va en función directa de los parámetros que influyen de manera determinante en la interpretación. En el siguiente esquema se muestra esta distribución.



**Adaptado de Sánchez Juárez Faustino, 2005.**

Como se indica en el esquema, del muestreo es un 6% el trabajo del estudio, por lo que un mal muestreo puede modificar e incluso dañar el resultado final. Por lo que se presente este trabajo, en el cual se presenta el manejo, uso e interpretación del equipo GPS que se ha empleado como herramienta para el posicionamiento en campo de puntos de muestreo.

De igual forma se muestra los procedimientos y técnicas para el muestreo y manejo de muestras de agua colectadas de acuerdo a la NOM.

## DEFINICIÓN

Muestreo.- Las actividades desarrolladas para obtener volúmenes de agua en un sitio determinado del sistema de abastecimiento, de tal manera que sean representativos, con el propósito de evaluar características físicas, químicas, y/o bacteriológicas (NOM-014-SSA1-1993).

El diseño de un programa de muestreo inicia con la definición de los objetivos del estudio a realizar; por ejemplo:

- Caracterización de fuente puntual.
- Estudio de reconocimiento / inspección.
- Estudio intensivo.
- Monitoreo (estación de monitoreo o red de monitoreo).
- Estudios especiales

En base a los objetivos del estudio, el programa continúa y finaliza la aplicación de los siguientes conceptos:

- Identificación del sitio: Mapa que identifique los puntos de muestreo.
- Matriz ambiental: Agua superficial, agua subterránea, agua potable, agua residual, suelo, sedimento, aire, etc.
- Tipo de muestra: Simple o compuesta.
- Número muestras.
- Duración del estudio.
- Frecuencia de muestreo: Diario, mensual, anual, etc.
- Tipo de toma de muestra: Manual o automática.



- Parámetros a determinar, que incluya referencias de los métodos de muestreo: recipiente, preservación, consideraciones especiales para toma de muestra o lavado del material de muestreo.
- Mediciones de campo.
- Control de calidad: Cadena de custodia, blanco de campo, duplicados, separación de muestra.
- Seguridad e higiene

Al definir el tipo y alcance de proyecto a realizar, es recomendable que los métodos y procedimientos de muestreo sean congruentes tanto con el tipo de estudio -investigación, control ambiental, docencia-, como los lineamientos normativos del organismo o dependencia a quien se presentará el estudio (local, regional, interno).

## **PROTOCOLO PARA LA TOMA DE MUESTRAS DE AGUA.**

### **Selección de los parámetros de calidad de las aguas.**

Los parámetros se seleccionarán en función de su relación con la calidad de agua producto del uso actual y potencial de la tierra en la cuenca. Es lógico pensar que el número de parámetros al inicio será grande, ya que hay necesidad de desarrollar un conocimiento significativo de las condiciones de línea base. Sin embargo, para racionalizar la determinación, se hará un inventario de los parámetros de calidad de agua más relacionados con las actividades que actualmente se realizan en la cuenca, y con las actividades del proyecto.

### **Selección de los sitios potenciales de muestreo de la calidad del agua.**

Los sitios de muestreo serán seleccionados considerando: (a) los objetivos de muestreo, (b) los análisis de laboratorio, y (c) los requisitos para el manejo de los datos. La selección de los sitios se realizará en dos fases:

Macro-localización, es decir, la identificación de las áreas de la cuenca que deberán ser seleccionadas para satisfacer los objetivos del Plan de Monitoreo; y

Micro-localización, es decir, identificando en cada una de las áreas seleccionadas, los sitios que aseguren la representatividad de las muestras y garanticen la seguridad y facilidad en la toma de muestras.

Mediante la realización de inspecciones de campo, uso del material cartográfico recopilado, y revisión de la información disponible se deberá tratar de darle respuesta a las siguientes interrogantes:

- ¿Se podrán obtener las muestras?
- ¿Se han identificado todos los sitios de muestreo existentes?
- ¿Cuáles sitios, de los seleccionados, deberán ser incorporados, de ser posible, en el Programa de Monitoreo?
- ¿Cuál será el número mínimo indispensable de muestras a tomar, a fin de evitar un número excesivo o insuficiente de las mismas?
- ¿Cuál será el tamaño adecuado de la muestra para obtener resultados estadísticamente válidos?

### **Revisión de información existente.**

Para determinar las condiciones físicas, químicas y biológicas del cuerpo de agua, se deberá revisar la información disponible referente a la ubicación de los sitios de muestreo existentes en la cuenca.

### **Establecimiento de los sitios de muestreo.**

Los sitios potenciales de muestreo serán seleccionados y examinados a través de reconocimientos que aseguren su localización óptima para proveer datos representativos sobre la calidad del agua.

Se elegirán secciones del río donde su canal esté lo mas plano, derecho, accesible, y uniforme en profundidad, por lo menos 100 metros aguas arriba de una confluencia, y cerca de un punto de referencia. Un canal bien mezclado requiere menos muestras que un canal que muestre cambios desde un punto a otro. Otra consideración importante es la ubicación de fuentes de contaminación, aguas arriba y aguas abajo del sitio de muestreo, y su impacto en la calidad del agua.

Los sitios de muestreo para las descargas de afluentes líquidos deberán estar al inicio de la zona de dilución o a una distancia aguas abajo que permitan la mezcla completa y la medición de los caudales descargados.

**Localización física del sitio de muestreo.**

La ubicación y el número de identificación de los sitios de muestreo (punto de monitoreo) de calidad del agua serán señalados exactamente en un mapa a escala 1:25,000, con un círculo o punto, con la finalidad de permitir su fácil ubicación en el campo y eventualmente la digitalización de los datos en una base de datos computarizada. Además, en la libreta de campo, se dibujará un croquis de cada sitio, donde se señalarán: caminos, infraestructuras, árboles y otros puntos de referencia, no mostrados en las cartas topográficas, que ayudarán su localización.

La localización física se llevará a cabo midiendo la distancia horizontal entre el sitio y los rasgos físicos relevantes que lo caracterizan: caminos, construcciones, líneas eléctricas, aguas superficiales, o cambios repentinos de pendientes, medir la distancia en un mapa, y marcando la ubicación con una X, círculo, punto u otro símbolo. El sitio y sus alrededores se dibujarán en la libreta de campo.

**Determinación de las coordenadas de los sitios de muestreo.**

Las coordenadas geográficas, como UTM, serán determinadas mediante un instrumento portátil del sistema de posicionamiento global (GPS).

**Fotografía de los sitios de muestreo.**

Se sacarán fotografías de los sitios de muestreo y sus alrededores, con el propósito de documentar los mismos y establecer un archivo completo de fotos. Las fotos se tomarán en cada visita, desde puntos preestablecidos y constantes que se determinarán referenciándolos con respecto a rasgos naturales, como un árbol o roca grande e incluyendo a una persona en la foto para mostrar la escala. Los puntos de toma de fotografía serán descritos en detalle en la libreta de campo, como una parte permanente del archivo del sitio de muestreo.

Se sacarán dos (2) fotos: una, desde aguas arriba, enfocando al punto de muestreo; y, otra, desde aguas abajo, enfocando el punto de muestreo. Se sacarán fotos adicionales cuando haya cambios significativos en los alrededores del sitio: erosión excesiva del canal, azolve intenso, construcción reciente u otros cambios biológicos o ecológicos que requieran documentación.

Cada foto será identificada con la información siguiente:

- Identificación del sitio,
- Nombre del sitio,
- Nombre de la persona que tomó la muestra
- Fecha y la hora de la toma, y

- Orientación de la foto.

En la última visita al sitio, se tomarán las mismas fotos de la primera visita (desde los mismos puntos-de-foto) para documentar los cambios que puedan haber ocurrido en la vida del sitio.

### **Frecuencia de muestreo**

La frecuencia de muestreo estará en función de los períodos críticos de las actividades del proyecto. Se debería establecer un régimen quincenal, durante tres (3) meses de la estación lluviosa (mayo a noviembre), y semanal, durante tres (3) meses de la estación seca (diciembre a marzo).

### **PROGRAMA DE ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD (QA/QC) DEL PLAN DE MONITOREO.**

El Programa de Aseguramiento y Control de Calidad (QA/QC) tendrá como objetivo maximizar la precisión y exactitud durante la ejecución del Plan de Monitoreo. La imprecisión de los datos, en la mayoría de los casos, es producto de inconsistentes técnicas de muestreo en el campo, de análisis de las muestras en el laboratorio, y de la introducción de contaminantes durante ambos procedimientos.

#### **Aseguramiento de calidad.**

Como Aseguramiento de Calidad (QA) se entenderá al procedimiento para garantizar que el muestreo está acorde con las normas de calidad establecidas en la Serie ISO 9000 y/o en la Guía 25 ISO/IEC (Taylor, 1987). El aseguramiento de calidad se adoptará no sólo para los procedimientos de muestreo en el campo (muestreo, preservación, y transporte) sino también para los procedimientos de análisis en el laboratorio seleccionado.

#### **Control de calidad.**

Como Control de Calidad (QC), se entenderá el procedimiento para garantizar la calidad de la información desde la toma de muestra hasta su análisis en el laboratorio. Éste incluye los protocolos escritos, la participación de personal entrenado, el uso de equipos bien mantenidos y correctamente calibrados, el uso de muestras de control de calidad.

#### **Descripción de las muestras de aseguramiento y control de calidad (QA/QC).**

Las mayores fuentes de error que se pueden encontrar durante la ejecución de un Plan de Monitoreo de la Calidad de las Aguas son:

- El equipo de campo,
- Los equipos de muestreo,
- Los preservativos utilizados,
- Los envases, y
- La calidad del aire durante la toma, envase, y preservación de las muestras.

El uso de muestras para el control de la calidad (QC) es el principal medio para determinar el momento en el cual se produjo la contaminación. El número, tipo y manejo de las muestras de control y aseguramiento de calidad (QA/QC) deberán estar claramente especificado en el Plan de Monitoreo.

### **Muestras de laboratorio para control de calidad (QC).**

Se tomará una muestra por cada 10 muestras, o una por semana, cualquiera que sea más grande. Esta muestra no será una muestra adicional, sino una designación especial para una que ya existe. Se tomará un volumen doble de muestra (un envase más que la muestra normal), y su envase será claramente identificado como Muestras de Laboratorio de QC.

### **Los blancos de equipo.**

Consistirán de envases llenos con el agua final del enjuague de la descontaminación de los equipos. Una vez analizada, mostrará la efectividad de la limpieza de los equipos de campo. Los blancos de equipo se tomarán después del muestreo de las aguas, en el sitio de más alta contaminación. Uno por día de muestreo es suficiente.

### **Los blancos de campo.**

Serán envases de agua desionizada que se llenarán en el sitio de muestreo. Una vez etiquetados, empaquetados y sellados, se mandarán al laboratorio seleccionado con las otras muestras. Se usarán los blancos de campo para investigar la contaminación en el laboratorio, y durante la toma y envío de las muestras. El laboratorio requerirá un blanco de campo por cada día del muestreo.

### **Los blancos de viaje.**

Serán envases de agua desionizada preparados por el laboratorio. Se mantendrán en la misma hielera, con las otras muestras, en cada fase del proceso de toma de

muestra, manejo y envío de las mismas al laboratorio. En el laboratorio se analizarán las muestras para determinar así la posibilidad de contaminación durante el transporte de la muestra o en el almacenaje en el laboratorio. Se requiere por lo menos un blanco de viaje por cada envío de muestra.

### **Las muestras duplicadas.**

Se usarán para verificar la precisión del muestreo o del análisis de laboratorio. Se tomarán las muestras duplicadas junto con la muestra de la calidad del agua en una cantidad equivalente al 10% de las mismas al día. También se deberá tomar una muestra duplicada en los sitios dónde se crea que hay niveles altos de un compuesto particular.

### **Las muestras divididas.**

Serán muestras adicionales de la calidad del agua que se tomarán y manejarán igual que las otras en el campo, excepto que se enviarán a un laboratorio diferente o al mismo laboratorio enclave para los análisis, para probar los procedimientos y manejo de la muestra en el laboratorio.

## **SELECCIÓN DE ENVASES Y CONSERVADORES QUÍMICOS**

Para la selección de los envases se tomarán en cuenta tres factores:

- Su reactividad con la muestra;
- Su volumen; y
- Su integridad.

El lugar de análisis, el tipo de envases y de preservación, y el tiempo límite para realizar los análisis de las muestras serán de acuerdo a las condiciones para la extracción de las muestras establecidas en la **NOM-014-SSA1-1993**

A continuación se presenta el tipo de envase y el método de preservación recomendado, dependiendo del parámetro seleccionado. Tabla 3:

Tabla 3.- Reactivos y envases para muestreo de aguas

Los envases limpios de muestreo, preservadores y hieleras serán suministrados por el laboratorio seleccionado; laboratorio con el cual se debe hacer contacto para programar los análisis y transportar los envases. En los arreglos con el laboratorio

seleccionado, se discutirá a profundidad el programa de Aseguramiento y Control de Calidad aquí propuesto.

Recibidos los envases y preservativos del laboratorio seleccionado, y concertado y asimilado por cada uno de los participantes los procedimientos para el aseguramiento y control de calidad, se tomarán las provisiones para asegurar que ninguno se derrame y, como muchos de los preservativos pueden quemar los ojos y la piel, para que sean manejados con cuidado. Los envases para las muestras serán etiquetados, señalando en cada uno el tipo de preservativo usado y el parámetro al cual pertenece, y acompañados con una Hoja de Información de Material y Seguridad.

Las hieleras usadas para el transporte de las muestras serán lo suficientemente grandes para que puedan almacenar los envases, los materiales de empaque y el hielo; nunca se colocarán cerca de solventes, combustible u otras fuentes de contaminación o combustión; y, en el campo, siempre se mantendrán en la sombra.

#### **Envase para muestras de análisis fisicoquímicos.**

Utilizar un envase de aproximadamente 1 litro, de vidrio o plástico, bien limpio, que no tenga olor ni residuos ajenos al agua. Se prefieren envases plásticos por su menor peso, resistencia a la rotura y menor reacción con los iones del agua. En caso de aguas para RIEGO, se requiere envase PLASTICO (debido al análisis de BORO).

#### **Limpieza de envases**

La preparación de los envases en los que se va a colocar la muestra de agua, es de suma importancia para evitar contaminación por oclusiones que pudiera haber en los mismos, ya que afectan los análisis fisicoquímicos.

La forma en que se preparen los envases es función del tipo de análisis que se desee realizar, pues como se sabe existen análisis fisicoquímicos y biológicos.

Para análisis fisicoquímicos, se recomienda el siguiente tratamiento:

- Los envases se lavan perfectamente con detergente y se enjuagan varias veces con agua potable.
- Se enjuagan con agua destilada.
- Se enjuaga con HCl al 10% en volumen, mínimo 10 veces recomendando usar un volumen de 20 mL cada vez.

- Se enjuaga varias veces con agua destilada (15 veces) y 5 veces con agua desionizada.
- Se recomienda que el recipiente sea de plástico con tapa de plástico sin empaque ahulado.

Para análisis biológicos:

- Los recipientes deben de ser de vidrio con tapa de plástico duro y si empaque.
- La limpieza de los envases se hace en la forma que se indica en los pasos a, b, c y d del análisis fisicoquímico.
- Después de la limpieza, se procede a esterilizar los envases en estufas de laboratorio a  $T = 150^{\circ}\text{C}$  por 30 min. o en autoclaves.
- Se apaga la estufa o el autoclave al transcurrir el tiempo de residencia, se dejan enfriar, se cubren con bolsas de hule teniendo cuidado de realizar esta operación con guantes para evitar contaminación.
- Se colocan los recipientes en cajas limpias y adecuadas para su transporte.

### **Revisión del equipo de muestreo**

La obtención de las muestras representativas de agua comúnmente requiere muchas provisiones y equipo; en consecuencia, 24 horas antes del muestreo se deberá revisar y calibrar el equipo, asegurándose que las baterías (pilas) operen apropiadamente. Igualmente se tomarán las provisiones para garantizar que en la toma de muestras, en presencia de metales, no se usen muestreadores con componentes de metal y que, en presencia de componentes orgánicos, se evite el uso de muestreadores con componentes plásticos, para evitar la contaminación de las muestras.

Los equipos, una vez descontaminados, se envolverán en celofán o papel aluminio, dependiendo su uso, para su transporte al sitio.

### **Limpieza de los Equipos de Muestreo.**

Todos los equipos que tengan contacto con una muestra de calidad del agua serán limpiados cuidadosamente antes de rehusarlos. Con excepción de los filtros, que se



desecharán después de usarlos, los equipos de muestreo utilizados serán descontaminados siguiendo el siguiente procedimiento (EPA, 1993):

- Limpieza con detergente sin fosfatos.
- Enjuague con agua.
- Enjuague con una solución al 10% de ácido nítrico (si existe la posibilidad de contaminación con metales).
- Enjuague con agua desionizada/destilada.
- Enjuague con solvente grado plaguicida (si existe la posibilidad de contaminación con componentes orgánicos semi-volátiles o volátiles).
- Enjuague con agua desionizada/destilada, dos veces.
- Enjuague con agua libre de compuestos orgánicos de grado "HPLC".
- Secado al aire o ventilación con nitrógeno en un ambiente sin polvo.
- Envoltura del equipo limpio para componentes inorgánicos en celofán y el equipo limpio para componentes orgánicos en papel aluminio.

Cuando se disponga de varios juegos de equipos y utensilios de muestreo, la descontaminación será realizada en tandas al principio o al final del día de muestreo. Esto ahorrará tiempo y reducirá el número de blancos de campo necesarios.

### **Calibración del Equipo de Campo**

El equipo de campo usado para medir los parámetros físicos será calibrado antes de que se proceda a tomar las muestras de calidad del agua, siguiendo las indicaciones del fabricante que describen su operación y calibración. Los resultados de la calibración de los equipos serán documentados y sus resultados anotados en la libreta de campo.

### **TOMA DE MUESTRAS**

La toma de las muestras tendrá cuatro componentes importantes que siempre se deberán tener en cuenta. El primero y más importante es la salud y la seguridad del personal profesional y técnico que participe en el programa; el segundo componente es la toma de muestras representativas; el tercer componente es el aseguramiento y control de la calidad del proceso y el cuarto, el mantenimiento de archivos.

#### **Toma de Muestras de Agua.**

La toma de muestras de la calidad del agua no sólo involucrará el proceso de adquirir físicamente la mejor muestra posible para el futuro análisis, sino también el de caracterizar el ambiente en el cuál fue tomada la muestra, y el de manejo de la

muestra para que cumpla con el objetivo propuesto. Esto significará ejecutar a cabalidad los procedimientos preestablecidos para preservar y mantener la calidad del agua y de las muestras de aseguramiento y control de calidad (QA/QC), y observar los requisitos de la cadena de custodia.

El manejo apropiado de las muestras de la calidad de agua incluye la elección de los equipos y el uso de guantes. En consecuencia, se tendrá especial cuidado en la selección del equipo de campo: cuando se esté haciendo un muestreo. El equipo siempre será descontaminado antes de usarlo, y siempre se usarán guantes desechables, sin polvo; cuando se haga un muestreo para los inorgánicos, se usarán guantes de látex.

La toma de muestras se realizará siguiendo las siguientes reglas:

- Se tomará cuidado con inundaciones repentinas. Si un evento de inundación es probable y aún así se tienen que tomar las muestras, se deberán tomar las normas de seguridad más recomendable, incluyendo la identificación de una ruta fácil de escape;
- Se tratará de que la localización de los sitios de muestreo estén cerca de una estación de aforo para que se pueda relacionar el caudal del río con la muestra de la calidad del agua. En caso de no existir una estación de aforo, se medirá la velocidad de flujo en la hora del muestreo;
- Se realizará el muestreo en una sección derecha y uniforme del río;
- Se evitará que la localización de los puntos de muestreo se ubique cercano de la confluencia de descargas o “punto” de contaminación;

La toma de muestras implicará el transporte de todos los equipos e implementos necesarios para el sitio de muestreo. El primer paso será medir los parámetros de campo y, luego, el caudal del río. Después de la toma y preservación de las muestras, el equipo se descontaminará y almacenará. Cuando los sitios de muestreo sean muy lejanos o apartados, se usarán equipos adicionales para eliminar la necesidad de descontaminarlos en el campo.

### **Cadena de Custodia**

Debido a que una muestra es una evidencia física, se usarán los procedimientos de Cadena de Custodia para mantener y documentar la posesión de la muestra desde

la hora en que se toma hasta que se introduzca como evidencia. Cuando la muestra esta en "custodia", se entenderá que se tiene posesión física de ella, o que se tiene en vista, o que se ha sellado para prevenir su falsificación. Por lo tanto, el Registro de la Cadena de Custodia comenzará cuando se reciban los envases para las muestra del laboratorio.

Las muestras se manejarán lo menos posible en el campo, y cada una de ella requerirá un Registro de Cadena de Custodia. Cuando las muestras cambien de posesión, las personas involucradas en el cambio, deberán firmar y poner la fecha y la hora del traspaso en el Registro de Cadena de Custodia. La hoja de la Cadena de Custodia contendrá como mínimo la siguiente información:

- Nombre y dirección de la persona natural o jurídica que realizó el muestreo.
- Número de la muestra.
- Número del envase de cada una de las muestras.
- Número total de envases.
- Descripción de la muestra.
- Nombre de la persona que asume la responsabilidad de la muestra.
- Fecha y hora en que se asume la responsabilidad de la muestra.

La hoja permanecerá con la muestra todo el tiempo y la persona responsable de la misma se asegurará que la muestra, en efecto, está bajo su custodia o en un lugar seguro.

### **Empacado y Envío de las Muestras**

Las muestras serán empacadas de manera de evitar que los envases contentivos de las muestras no se rompan durante su traslado al laboratorio. Los blancos deberán empacarse en la misma forma de las demás muestras, para que no puedan ser identificados en el laboratorio. Todos los números de identificación serán anotados en la libreta de campo. Similarmente, se notificará al laboratorio, la hora de la entrega y la manera del envío de las muestras (camión de carga, mensajero u otro).

### **Métodos de Análisis Oficiales**

Los métodos de análisis oficiales son los establecidos en la última edición del "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", publicada por la A.P.H.A., A.W.W.A., W.P.C.F. y NOM. En casos excepcionales, debido a condiciones especiales, la autoridad competente podrá aceptar modificaciones a los métodos oficiales. El método de análisis utilizado para cada parámetro, deberá ser él que corresponda para las características específicas de la muestra, debiéndose observar en cada caso, las interferencias y límites de detección de dicho método.

## Lugar de muestreo

Según la procedencia del agua, considerar lo siguiente:

- a) **Pozos en servicio:** Dejar correr como mínimo 10 MINUTOS antes de llenar el envase para eliminar el agua estancada . Si ha estado fuera de uso durante algún tiempo, extraer luego de 1 HORA de BOMBEO.
- b) Tomar directamente de la cañería ascendente o grifo inmediato al pozo, evitando depósitos intermedios, a menos que se requiera alguna investigación sobre los mismos. Considerar que en los tanques, el agua puede sufrir cambios con respecto a su origen por evaporación (especialmente en verano) o por actividad microbológica.
- c) **Pozos nuevos:** Extraer luego de VARIAS HORAS de BOMBEO, o mejor aún, varios días de bombeo, en forma similar al caso anterior.
- d) **Aguas superficiales en movimiento (ríos, arroyos, canales):** Tomar en lugares donde la CORRIENTE sea NORMAL, evitando la costa, remolinos o remansos. Omitir materias extrañas flotantes (algas, plantas, etc.). Sumergir el recipiente mediante pinzas unos 20 cm POR DEBAJO DE LA SUPERFICIE dirigiendo la boca en contra de la corriente.
- e) **Aguas superficiales en reposo (lagos, represas, embalses):** En estudios básicos, tomar en el centro del cuerpo de agua, a media profundidad, moviendo el recipiente en semicírculos. No muestrear en las orillas y evitar poner en suspensión depósitos sedimentados.

En estudios de mayor detalle, deberían establecerse varios puntos de muestreo, y en cada uno de ellos, tomar muestras a varias profundidades. Luego mezclar para obtener una muestra promedio. En las aguas superficiales también puede extraerse en los lugares donde eventualmente se piense instalar una cañería de bombeo u otra forma de extracción.

## Frecuencia de análisis

El análisis proporciona una idea de la composición media de una fuente de agua. En algunos casos puede haber factores que originen cambios significativos

(condiciones meteorológicas, cantidad de agua extraída, desechos industriales, etc.). Entonces debe recurrirse a análisis frecuentes, cuyo número depende de los factores en cuestión.

En las Aguas Superficiales o de Manantiales, es difícil obtener una muestra representativa promedio, ya que su composición varía considerablemente a lo largo del año. En estos casos, en un estudio preliminar, deben realizarse varias tomas abarcando las condiciones extremas, p. Ej., en épocas de estiaje y crecida, o según los períodos de lluvias. En base a estos resultados, se establece el sistema de monitoreo apropiado para cada cuerpo de agua en particular.

### Identificación y datos complementarios

- Rotular la muestra con etiqueta o marcador resistente al agua.
- Adjuntar una HOJA reseñando el mayor número de circunstancias sobre el origen del agua y detalles que puedan influir en su diagnóstico de aptitud. Por Ej.:
  - Propietario- Establecimiento
  - Localidad
  - Fecha y hora extracción de muestra
  - Origen (subterráneo o superficial)
  - Cercanía a pozos negros o industrias
  - Profundidad
  - Destino (bebida humana; ganado -especie-; riego).
  - Inconvenientes en personas o animales que la consumen.
  - Para Riego: -Características del suelo a regar (permeabilidad/ salinidad /Sodio)
  - Sistema y duración del riego
  - Cultivos a regar

### Transporte

Cuanto más corto sea el tiempo transcurrido entre la recolección y el análisis, más fidedignos serán los datos analíticos.

Como NORMA GENERAL, **se recomienda que NO pasen MÁS DE 48 hrs. entre la EXTRACCION y el ANALISIS, y durante ese período mantener la muestra en HIELERA (4 a 10°C) o LUGAR FRESCO y OSCURO.**

### Análisis bacteriológico

La toma de muestras es una operación que requiere especial atención a fin de que la fracción a analizar represente realmente al material en estudio. De lo contrario,

pueden producirse cambios químicos y biológicos o contaminaciones antes de la llegada al Laboratorio, que afecten los resultados e induzcan a conclusiones erróneas. Considerar que este análisis es un estudio de “seres vivos” (Microorganismos), los que son sumamente sensibles a la alteración de sus condiciones normales de vida.

### **Frecuencia y época**

Se recomienda realizar este análisis por lo menos una vez por año. El momento ideal es a fin de primavera- principio de verano, por mayor desarrollo de microorganismos y mayor consumo de agua por las personas. En las aguas rurales, también es indicado luego de períodos lluviosos e inundaciones, por mayor probabilidad de filtraciones y contaminación de las capas subterráneas.

### **Envase**

Utilizar un FRASCO PLASTICO O VIDRIO ESTERILIZADO para análisis biológicos, de capacidad mínima 125 cm<sup>3</sup>.

### **Identificación y datos complementarios**

- Rotular la muestra con etiqueta o marcador resistente al agua.
- Completar la HOJA adjunta , reseñando el mayor número de datos posibles sobre el origen del agua y detalles que puedan influir en su diagnóstico y recomendaciones.

### **Transporte**

- NO DEBEN PASAR MAS DE **24 HS.** entre la toma de muestra y la llegada al Laboratorio. Cuanto MENOR TIEMPO hay entre la EXTRACCION y el ANALISIS, más fidedignos son los resultados analíticos.
- En todo momento, la TEMPERATURA del agua debe mantenerse **EN FRIO**, entre 4 y 10°C .
- Mientras no se viaja..... en HIELERA COMUN.
- Durante los traslados..... en CONSERVADORA con refrigerante (tipo vacunas) o cubitos de hielo, cuidando que los mismos no apoyen sobre el frasco.

### **Formas de extracción**

Según la procedencia del agua, considerar las reglas siguientes.

#### a) - GRIFO SITUADO EN LA RED DE DISTRIBUCION

- Elegir un grifo que esté conectado directamente con la cañería principal de distribución, evitando aquellos que estén en puntos muertos (salvo que se quiera examinar alguna situación especial).
- Quitar los tubos de goma u otros destinados a evitar salpicaduras.
- Con una tela limpia, frotar la boca del grifo para quitar cualquier suciedad que pueda haber en la parte interna del orificio.

#### LIMPIAR EL GRIFO

- Elegir un grifo que esté conectado directamente con la cañería principal de distribución, evitando aquellos que estén en puntos muertos (salvo que se quiera examinar alguna situación especial).
- Quitar los tubos de goma u otros destinados a evitar salpicaduras.
- Con una tela limpia, **frotar la boca del grifo** para quitar cualquier suciedad que pueda haber en la parte interna del orificio.

#### ABRIR EL GRIFO

- Dejar salir agua a **flujo máximo** durante 2 ó 3 minutos.
- Cerrar para esterilizarlo.

#### ESTERILIZAR EL GRIFO

- **Esterilizar** el grifo durante 1 a 3 minutos calentándolo con la llama de un hisopo de algodón embebido en alcohol, una lámpara de soldar o encendedor.

#### ABRIR EL GRIFO ANTES QUE EL ENVASE

- **Abrir el grifo** cuidadosamente para enfriarlo, permitiendo que el agua fluya durante 1 ó 2 minutos a flujo medio.

#### ABRIR EL ENVASE ESTERILIZADO

- Mientras fluye el agua según el paso anterior, **quitar la envoltura plástica** del frasco. Conservarla.
- **Sosteniendo el frasco por la parte inferior**, destapar con cuidado.
- Mantener la **tapa siempre en la mano y hacia abajo** (para no contaminar con polvo portador de microorganismos), y evitar el contacto de los dedos con la boca del frasco.

## LLENAR EL ENVASE

- Colocar el envase debajo del chorro y llenarlo, dejando un pequeño espacio de aire. Tapar y colocar la envoltura plástica.

### b) - GRIFO SITUADO EN LA CAÑERÍA DE UN POZO SEMISUMERGIDO

- Puede tratarse del grifo de una bomba accionada a mano, molino o motor. Conviene elegir un **GRIFO que esté comunicado con la cañería ascendente del pozo**, salvo que por circunstancias especiales se desee considerar algún depósito intermedio, (tanque elevado del molino, depósito de reserva, etc.)
- Cuando se examinen aguas de pozos semisumergidos, extraer muestras cuyas características bacteriológicas correspondan exactamente a las aguas de pozo. Así, por ejemplo, si el ante-pozo se encuentra en malas condiciones de higiene, esto influirá en los resultados del examen y ellos no indicarán fielmente la calidad del agua. Debe tratarse que exista el menor número de intermediarios entre la toma y el caño de subida del pozo.
- Si el **POZO** es de **USO CONTINUO**, basta dejar correr el agua durante **MEDIA HORA**.
- Si el **POZO** es de **POCO USO** o está **FUERA DE SERVICIO** dejar salir agua durante **MINIMO 5 HORAS** , o mejor aún, hacer funcionar **VARIOS DIAS**.
- Procedimiento: Para la toma de muestras, proceder como en el ítem anterior (a).

### c) RIOS, ARROYOS, LAGOS, RESERVAS o ESTANQUES

En **CURSOS DE AGUA**, evitar extraer muestras en lugares afectados por aportes accidentales de otros cursos o descargas de líquidos cloacales o industriales, salvo que se trate de estudiar específicamente a los mismos.

En **RESERVAS O ESTANQUES**, extraer lejos de la costa y cerca del conducto de salida, para máxima representatividad.

Procedimiento:

- 1 - Quitar la envoltura plástica del frasco y destaparlo, manteniendo la tapa en la mano y hacia abajo, cuidando que no toque ningún objeto durante la extracción.
- 2 - Tomar el frasco por el medio, mediante una pinza de brazos largos y preferiblemente esterilizada con la llama de un hisopo de alcohol o lámpara de soldar. Sumergirlo rápidamente hasta unos 20 cm de profundidad, llenándolo.



Dirigir la boca en sentido contrario a la corriente; si no hay movimiento, imprimir movimientos circulares.

#### d) -ALJIBE O POZO ABIERTO

Es conveniente utilizar aparatos especiales. En su defecto, puede usarse un balde metálico.

Procedimiento:

- 1 - Lavar perfectamente el interior y el exterior de un balde.
- 2 - Volcar en el interior del balde el contenido de un vaso de alcohol, quemar y encender. Mientras arde, tratar de hacer correr el alcohol encendido por las paredes del balde, a fin de esterilizar totalmente la superficie interna. Esterilizar la superficie externa del balde mediante la llama de un hisopo de alcohol.
- 3 - Atar una soga limpia al balde y sumergirlo en el aljibe rápidamente.
- 4 - Una vez llenado el balde y llevado a la superficie, quitar la envoltura plástica del frasco y destaparlo. Verter en él parte del agua hasta llenarlo, y tapar cuidadosamente, colocando nuevamente la envoltura plástica.

## ANÁLISIS DE CAMPO

### Determinación de pH

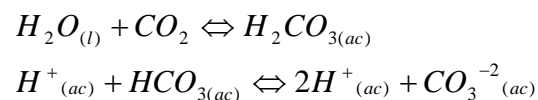
El pH es una medida que determina el carácter ácido / básico en una muestra de agua, el cual se define como la concentración de iones hidrógeno presentes y se representa con la siguiente ecuación:

$$\text{pH} = -\log_{10} [\text{H}^+]$$

donde  $[\text{H}^+]$

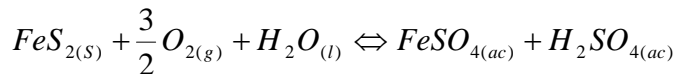
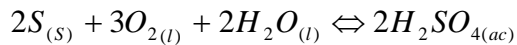
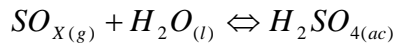
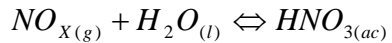
es la concentración de iones hidrógeno en solución.

La mayoría de las aguas naturales, domésticas e industriales residuales poseen un pH neutro, debido a la acción amortiguadora del equilibrio dióxido de carbono-ión bicarbonato ( $\text{CO}_2 - \text{HCO}_3^-$ ) en el que entra el gas  $\text{CO}_2$  presente en el aire:



y, en menor proporción,  $\text{CO}_2$  producido por oxidación biológica de material orgánico presente en el agua .

Un exceso de dióxido de carbono disuelto es la principal causa de acidez de aguas naturales. También se han detectado cuerpos de agua natural contaminados con valores altos de acidez como resultado de caída de lluvia ácida,



lixiviaciones de residuos de minas y la oxidación bacteriana de azufre con sus sales, o bien la hidrólisis de sales de ácidos fuertes:



El grado de acidez en el agua es importante ya que esto incrementa el carácter corrosivo del agua, así como la capacidad de disolución de metales presentes o en contacto con la misma. La acidez causada por la presencia de dióxido de carbono puede ser solucionada por aireación y/o neutralización con carbonato de sodio o hidróxido de sodio.

### Limpieza de los electrodos

Con objeto de obtener una mejor lectura en el potenciómetro es conveniente efectuar una correcta limpieza de los electrodos antes de realizar las mediciones de pH en las muestras. La limpieza de los electrodos se debe hacer de la siguiente manera:

- Es conveniente usar guantes de hule para realizar este trabajo a fin de evitar se ensucien los electrodos con grasa que se pudiera tener en las manos.
- Para desengrasar de manera perfecta los electrodos se utiliza una solución alcohólica de hidróxido de potasio 0.1 N preparada de la siguiente forma: se pesan 5.61 g de KOH se disuelven en agua destilada y se afora a un l se toman 100 mL de esta solución y se mezclan con 200 mL de etanol.
- Una vez desengrasados los electrodos se lavan con solución jabonosa, se enjuagan con agua limpia, después con una solución de HCl 1:10, por

último se enjuagan con agua desionizada varias veces y se secan con un papel suave.

### **Interferencias**

El electrodo de vidrio en general no presenta interferencias la presencia de color, turbiedad, materia coloidal, oxidantes, reductores o salinidad moderada (<0.1 molar), a pH mayor de 10 puede presentarse el llamado error de sodio, el cual puede eliminarse empleando electrodo de bajo error de sodio.

Cuando el electrodo es sumergido en aguas con alto contenido de sustancias oleicas, se presenta una interferencia debida a la formación de una capa de grasa que se forma, esta interferencia puede eliminarse con una agitación fuerte.

Debido a la dependencia del pH con la temperatura, debe especificarse el valor de la misma al efectuar la medición. Se recomienda también la calibración del equipo a la temperatura de las muestras, para evitar errores en la determinación.

### **Calibración del potenciómetro**

La calibración del potenciómetro se lleva a cabo como sigue:

- Sumergir el(los) electrodo en agua desionizada junto con la sonda de temperatura
- Sacar el electrodo y sonda del agua, secándolos con papel suave
- Sumergir el(los) electrodo en buffer de pH= 7 junto con la sonda de temperatura y ajustar el equipo a una lectura de  $7 \pm 0.05$
- Quitar del buffer el electrodo y sonda, lavarlos con agua desionizada y secarlos con papel suave
- Sumergir el(los) electrodo junto con la sonda de temperatura en buffer de pH= 4 si se espera un rango ácido ó pH=9 si es alcalino, ajustar la pendiente del equipo a una lectura de  $4 \pm 0.05$  ó de  $9 \pm 0.05$  según sea el caso.
- Quitar del buffer el electrodo y sonda, lavarlos con agua desionizada y secarlos con papel suave
- Repetir el proceso por lo menos tres veces hasta tener una variación máxima de lectura de  $\pm 0.10$

### **Medición del pH en la muestra**

Una vez calibrado el aparato se procede a hacer las mediciones de las muestras, se colectan en vasos de precipitados limpios, se introducen los electrodos, se espera 30 segundos y se anota la lectura registrada por el potenciómetro, se sacan los

electrodos, se enjuagan con agua desionizada o bi-destilada se secan con un papel suave y se sumerge en un vaso con agua bi-destilada. Se repite el proceso 3 veces. **Las lecturas obtenidas se anotan.**

## **Conductividad**

La conductividad de una muestra de agua representa una medida de su capacidad para transmitir una corriente eléctrica. Cualquier sistema acuoso conteniendo iones, tendrá la capacidad de conducir la corriente eléctrica. En un campo magnético de corriente directa, los iones positivos (cationes) se mueven hacia el electrodo negativo, mientras que los iones negativos (aniones) lo hacen hacia el electrodo positivo.

### **Importancia de la conductividad**

- La estimación de la conductividad nos permite determinar los Sólidos Disueltos Totales (TDS)
- La determinación de los TDS es una medida primaria de la calidad del agua que permite evaluar y dictaminar riesgos para diferentes tipos y usos de agua.
- Una pobre conductividad nos indica que el agua es pura y que por lo tanto tiene alta resistencia al flujo eléctrico.

### **Conceptos fundamentales en conductividad**

- La conductividad se define como la capacidad de una solución para conducir corriente eléctrica y por tanto es inversa a la resistencia
- Esta capacidad está determinada por la presencia de iones o sales minerales disociados en la sustancia
- La presencia de estos iones, disminuye la resistencia que ofrece la sustancia para conducir corriente eléctrica
- Los iones en la solución son considerados como electrolitos
- Los Electrolitos se clasifican en Cationes y Aniones.

### **Métodos para determinación de conductividad**

#### **Método tradicional:**

- El método tradicional consiste en someter la muestra a un análisis gravimétrico que por lo regular requiere de mucho tiempo además de una serie de instrumentos como: balanza analítica, horno, material de vidrio volumétrico, etc.

#### **Método electroquímico:**

- El método electroquímico consiste en medir la resistencia de la sustancia en un área conocida entre dos electrodos inmersos en la solución. El valor de la

caída de voltaje causada por la resistencia (diferencial) se utiliza para desarrollar la ecuación y calcular la conductividad.

- El procedimiento anterior se logra por medio de un conductímetro en el cual se lleva a cabo la reacción electroquímica y la conversión del valor del diferencial de voltaje a unidades de conductividad.
- El conductímetro consiste de una sonda ó sensor que no es selectiva por lo que debe tenerse presente que sólo mide la suma total de las conductividades de los componentes inorgánicos en la solución.
- La unidad básica para reportar el valor encontrado de conductividad es el Siemens (mho). Para pequeños valores de conductividad son utilizadas las unidades de mili Siemens y Micro Siemens

### **Condensación de la temperatura**

- La temperatura de la sustancia a evaluar afecta el resultado del valor de la conductividad
- Las medidas de la conductividad deben ser referidas a una temperatura de referencia de 25 °C
- Por cada grado de desviación de la temperatura de referencia un circuito de compensación, en instrumentos con ATC (compensación automática de temperatura) la temperatura de la solución es medida por un termistor en la sonda del conductímetro lo que ajusta el valor medido en un cierto porcentaje para proveer una lectura equivalente a la que habría sido leída a la temperatura de 25 °C.

### **Calibración del conductímetro:**

- La calibración del conductímetro se necesita realizar periódicamente ya que puede darse envejecimiento de la sonda lo cual llevaría a respuestas tardías y hasta erróneas.
- Luego de llevar a cabo el reemplazo de la sonda es necesario recalibrar su medidor de conductividad.

### **Almacenamiento:**

- Es muy importante que la sonda sea almacenada seca y nunca dentro de una solución acuosa.
- Cuando la sonda es almacenada por largo tiempo y se vuelve a utilizar, se debe dejar el tiempo suficiente en la solución para que se humecte nuevamente.

### **Enjuague:**

- Después de cada medición, la sonda debe ser enjuagada con agua desmineralizada para evitar posibles incrustaciones de sustancias en los electrodos que afectaría en las siguientes mediciones.
- Si las muestras evaluadas contienen aceites o grasas es probable y casi seguro que la sonda resulte cubierta por una fina película de estos provocando resultados erróneos en las mediciones. En este caso, la sonda

deberá ser limpiada con una solución detergente o sumergirla en una solución de ácido clorhídrico de muy baja concentración y luego enjuagarla con agua desmineralizada.

### Sólidos totales disueltos (TDS)

- Normalmente en la determinación de los TDS se utiliza un factor de correlación de 0.5 respecto del valor de la conductividad, aunque no es exacto, se acepta que el valor para TDS sea la mitad del valor de la conductividad. Con el factor 0.5 la concentración de TDS es casi equivalente a la concentración del cloruro de sodio en aguas naturales.
- La mayoría de las aguas naturales tiene un factor promedio de 0.64 ya que el NaCl no es la única sal disuelta en la solución. Usualmente las aguas naturales tienen cantidades sustanciales de iones de Ca, Mg, Na, Si, Cl, HCO<sub>3</sub> y CO<sub>3</sub> cuya combinación da un factor más cercano a 0.64 que a 0.5.

### Factores de la conversión

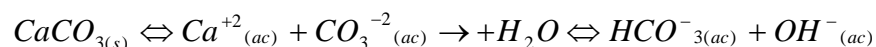
Las lecturas de la conductividad pueden ser convertidas a otras unidades de medida multiplicando o dividiendo por un factor de conversión.

La mayoría de los ácidos, bases, y sales inorgánicas son buenos conductores debido a que al disolverse en agua se disocian en iones; las moléculas orgánicas – como los azúcares y el etanol- no se disocian en iones al encontrarse en solución acuosa, y por tanto sus soluciones tienen una baja o nula conductividad.

### Alcalinidad.

La alcalinidad de un agua natural es mayormente causada por la presencia de bases débiles -por ejemplo carbonatos, bicarbonatos, boratos, y fosfatos-; y en menor proporción por bases fuertes -hidróxidos de sodio y potasio-. Así, la alcalinidad de una muestra de agua representa el total de todas estas especies presentes en ella y se expresa como miligramos de carbonato de calcio presentes en cada litro, mg CaCO<sub>3</sub>/L.

En ocasiones, las aguas subterráneas y las aguas dulces presentan una ligera alcalinidad debido a la presencia de minerales conteniendo iones carbonato:



Bajo ciertas condiciones especiales donde existe crecimiento de algas, el agua natural presenta altos valores de alcalinidad debido a la presencia, por orden jerárquico, de: hidróxidos, carbonatos, y bicarbonatos.

Debido a que la alcalinidad se genera por la presencia de sales de ácidos débiles y bases de ácidos fuertes, éstos actúan como neutralizadores de la adición de ácidos. Así, la alcalinidad proporciona al agua una capacidad de resistencia a la lluvia ácida, (debido a su capacidad de neutralización). A diferencia de la acidez, la alcalinidad en aguas potables le adiciona un sabor desagradable.

La alcalinidad se expresa como miligramos de carbonato de calcio presentes en cada litro, mg CaCO<sub>3</sub>/L.

Al determinar alcalinidad en campo se puede evitar el problema que ocasiona la disolución de gases en las muestras de agua logrando un mejor resultado que el determinado en el laboratorio.

### **Reactivos:**

#### Preparación de Reactivos

- Agua destilada libre de CO<sub>2</sub> si no se dispone de equipo para desgasificar el agua destilada, cuya conductancia debe ser menor de 2 micro siemens/cm y con pH menor de 6, es necesario hervirla durante 15', enfriarla y protegerla del contacto con el aire. Todos los reactivos deberán prepararse con agua tratada de esta manera.

- Solución Stock Ácida. Diluir 8.3 mL de HCl<sub>conc</sub> o 2.8 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4conc</sub> a 1000 mL, así se obtiene una solución cuya normalidad es aproximadamente 1N.

- Solución estándar ácida. Tomar 200 mL de la solución stock ácida y llevarla a 1000 mL con agua. La concentración obtenida es aproximadamente 0.020 N. Estandarizar con solución de carbonato de sodio 0.02 N.

- Solución normalizadora de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 0.02 N. Secar durante la noche a 140°C el carbono de sodio anhidro. Pesar 1.060 g diluir y aforar con agua a 1000 mL.

- Indicador Fenolftaleína

- Si se dispone de la sal disódica de fenolftaleína pesar 500 mg y diluir a 100 mL con agua destilada.
- Si se dispone de fenolftaleína pesar 500 mg y disolverlos en 50 mL de etanol llevándolos a un volumen final de 100 mL con agua.

- Indicador mixto de Rojo de Metilo-Verde de Bromocresol.

- Si se dispone de la sal disódica de ambos pesar 20 mg de rojo de metilo y 100 mg de verde de bromocresol y disolver con 100 mL de agua.
- Si se dispone de los indicadores como tal, pesar 20 mg de rojo de metilo, 100 mg de verde bromocresol y disolver en 100 mL de etanol.

### **Procedimiento**

Normalización del ácido ~ 0.02N.

Verter 25 mL de la solución normalizadora de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  0.02N en un matraz Erlenmeyer, adicionar 0.15 mL (3 gotas) de la mezcla de indicadores rojo de metilo - verde bromocresol, adicionar con bureta el ácido, mientras el indicador vira de azul verdoso a azul intenso y a gris claro, en este momento la solución se somete a ebullición durante 2 minutos, se continúa con la valoración agregando el ácido gota a gota sobre la muestra caliente hasta obtener un color gris rosado y finalmente, un rosa intenso.

La normalidad del ácido se calcula con la fórmula:

$$N_{\text{HCl}} = \frac{mL_{\text{Na}_2\text{CO}_3} \times N_{\text{Na}_2\text{CO}_3}}{mL_{\text{HCl}}}$$

### **Alcalinidad a la fenolftaleína:**

Verte una alícuota de la muestra en un matraz Erlenmeyer Adicionar 0.15 mL (3 gotas) de fenolftaleína, si se presenta color rosa fuerte adicionar lentamente ácido con la bureta hasta desaparición del color.

### **Alcalinidad total**

Sobre la muestra en la que se determinó la alcalinidad a la fenolftaleína se adiciona 0.15 mL (3 gotas) de la mezcla de indicadores rojo de metilo - verde de bromocresol y agregar ácido hasta aparición de color gris claro, continuar añadiendo el ácido gota a gota hasta que la solución presente un color gris rosado que finalmente será rosa intenso.



Cálculos

Alcalinidad a la fenolftaleína mg/L de  $\text{CaCO}_3$  = (mL ácido x N ácido x 50,000)/  
mL muestra

Alcalinidad total mg/l de  $\text{CaCO}_3$  = (mL totales de ácido x ácido x 50,000)/ mL  
muestra

## REFERENCIAS BIBILOGRAFICAS

Alba Beatriz Vázquez González, Enrique César Valdez, 1994. "Impacto Ambiental". Facultad de Ingeniería UNAM, México.

Consejo de Recursos Minerales, 1992. "Monografía Geológico-Minera del Estado de Guanajuato". Pachuca, Hidalgo, México

Custodio, E, M. R. 1976. "Hidrología Subterránea". Ediciones Omega, Barcelona, España.

Huizar Álvarez Rafael, "Definición de Control de Calidad del Agua Subterránea Extraída de la Subcuenca de México" (Delegación Iztapalapa), Instituto de Geología UNAM

Henry Glynn J., Heinke Gary W. "Ingeniería Ambiental", 2a Edición, Prentice Hall, México, 1999

Drever, James, I. "The Geochemistry of Natural Waters, Surface and Groundwater Environments", 3rd Edition, Prentice Hall, USA 1997

Instituto de Geofísica, UNAM, 1999. Estudio isotópico para la caracterización del agua subterránea en la zona de La Muralla, Gto. Informe técnico, inédito.

Juárez Sánchez Faustino 2005, Muestreo y Análisis en Campo de Aguas Superficiales. Laboratorio de Radiactividad Natural, Instituto de Geofísica UNAM

Metcalf Leonard, Eddy Harrison 1981, Tratamiento y Depuración de Aguas Residuales, Editorial. Labor

"Ley de Aguas Nacionales".

Diario Oficial de la Federación del 1° de Diciembre de 1992

López Ruiz, Rafael, "Aguas Residuales, Municipales y Biosólidos, Elementos Básicos, Caracterización, Tratamientos y Re-usos", Facultad de Ingeniería, División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica, UNAM

Murguía Vaca Ernesto, 1999. "Evaluación, Efectos y Solución de la Contaminación del Agua" Editado por el autor.

"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.

Tebbut, T. H. Y. "Fundamentos de Control de Calidad del Agua", 2ª Edición, editorial Limusa, México, 1999